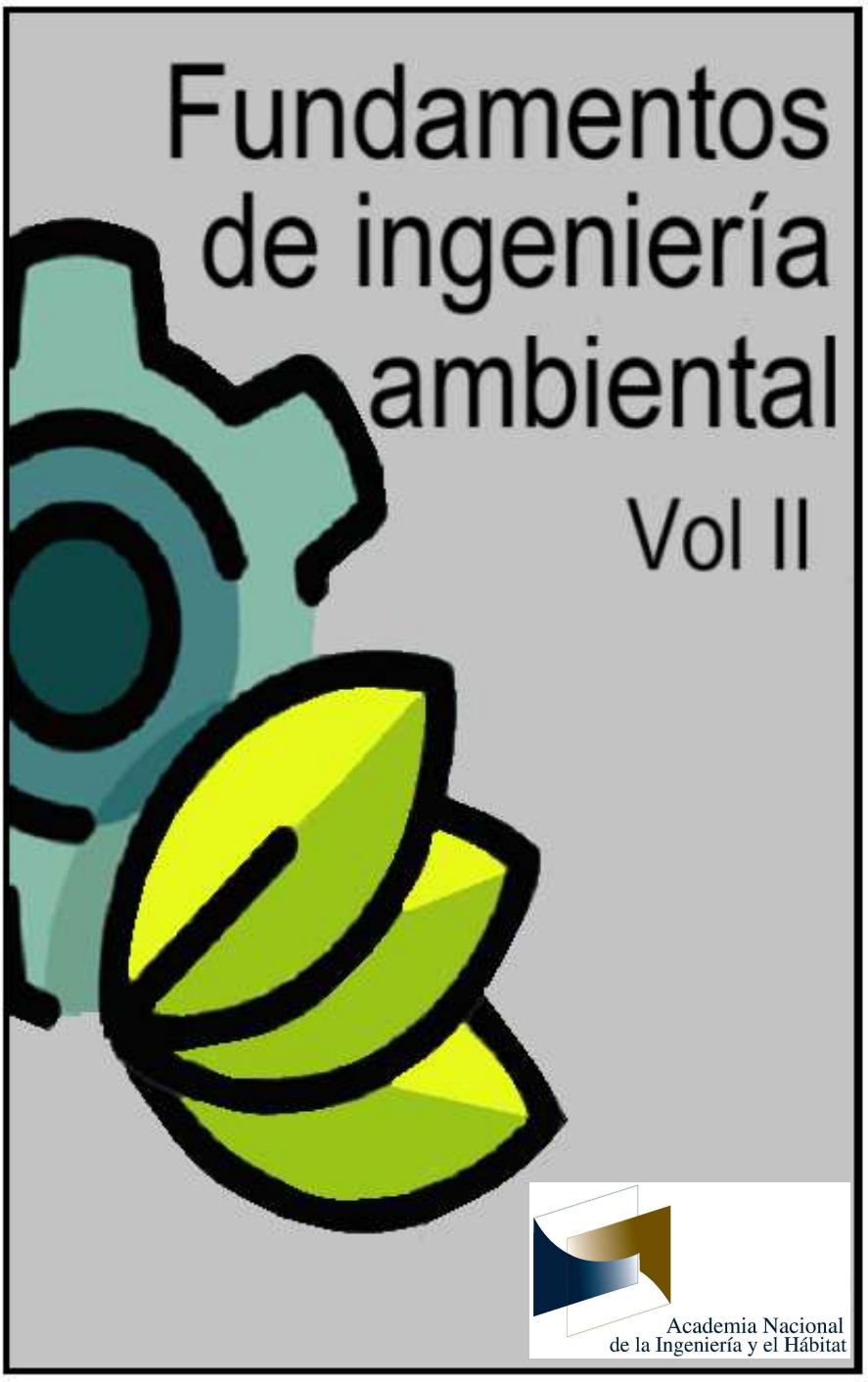
Fundamentos de ingeniería ambiental

Vol II



Academia Nacional
de la Ingeniería y el Hábitat

FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL

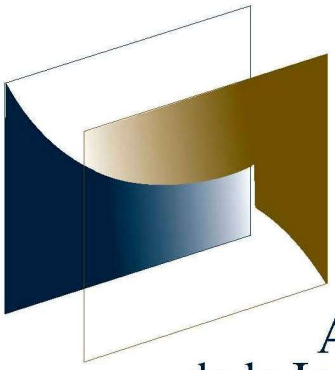
VOL. II

Griselda Ferrara de Giner
Antonio Machado-Allison
Manuel Torres Parra
Eduardo Buroz
Rafael Lairet
Editores

2025

FUNDAMENTOS
DE
INGENIERIA AMBIENTAL

Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, ANIH
Griselda Ferrara de Giner, Antonio Machado-Allison, Manuel Torres Parra, Eduardo Buroz y Rafael Lairet (eds)



Academia Nacional
de la Ingeniería y el Hábitat

ISBN: 978-980-7106-18-4
Depósito legal:DC2025001736

Diagramación y Edición: Antonio Machado-Allison

Diagramación Portada: Maria Isabel Almiñana

Imagen Fuente: https://www.cleanpng.com/png-environmental-engineering-natural-environment-clea-5836385/download-png.html

Impresión electrónica

DESCARGO DE RESPONSABILIDADES

El contenido de este informe no refleja necesariamente los puntos de vista o políticas de la ANIH. Si bien se han realizado esfuerzos razonables para garantizar que los contenidos de esta publicación sean objetivamente correctos y se mencionen adecuadamente la ANIH no acepta responsabilidad por la exactitud o integridad de los mismos, ni por ninguna pérdida o daño que pueda ocasionarse directa o indirectamente mediante el uso de los contenidos de esta publicación. Asimismo, los autores son responsables de los derechos de autor de las figuras incluidas en esta publicación. Sin embargo, la ANIH manifiesta su compromiso con las obligaciones y derechos establecidos en el marco legal vigente y las normativas internacionales sobre propiedad intelectual, por lo que, para cualquier requerimiento, reclamo o sugerencia, pone a disposición su dirección de email y página WEB indicada en esta página.

Palacio de las Academias, Av. Universidad, con esquina La Bolsa a San Francisco, Zona Postal 1012, Caracas, Venezuela.
Teléfono: +58 0414 378 44 41
Correo-e: acadingven@gmail.com
url: www.acading.org.ve

Caracas - Venezuela

PRESENTACION

La Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, ANIH, de Venezuela, se complace en presentar esta primera edición del libro *FUNDAMENTOS DE LA INGENIERIA AMBIENTAL VOL II* el cual constituye el segundo avance sobre el tema en referencia, con el propósito de contribuir al conocimiento y divulgación de los aspectos relacionados con el ejercicio de la Ingeniería y Gestión Ambiental. Podrá servir también de texto auxiliar para apoyar el aprendizaje a la introducción en las ciencias ambientales, a los estudiantes de aquellas asignaturas relacionadas y de aplicación transversal en las diversas carreras de la ingeniería, la arquitectura, el urbanismo, ciencias y otras con temas ambientales en sus diseños curriculares. Del mismo modo, se aspira que pueda ser útil como material de consulta en los programas de nivelación de quienes han decidido tomar cursos de diplomados, especialización o maestría en la temática ambiental.

Esta nueva entrega, es el producto de un trabajo en equipo que forma parte del programa de actividades de la Comisión de Ambiente de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, en donde cada capítulo ha sido desarrollado por un experto en la temática, con un consejo editorial encargado de recopilar y supervisar la publicación. Aun cuando esta nueva versión no es exhaustiva, pues la temática que abordan los distintos programas curriculares de las universidades nacionales es muy amplia y las áreas profesionales se expanden con la horizontalidad del ambiente, se espera que la misma pueda contribuir en algunos aspectos a la formación de los estudiantes, y la adaptación de nuevas carreras y actividades profesionales relativas a los procesos y desarrollo ingenieriles.

Los miembros de la referida Comisión de Ambiente de la ANIH y sus asesores académicos, continuarán elaborando nuevos capítulos para ir agregando contenidos en temas complementarios en futuras nuevas ediciones, corregidas y aumentadas, a fin de ofrecer una publicación cada vez más actualizada e integral.

Esta publicación, al igual que la presentada en el Volúmen I, intenta plantear contenidos conceptuales que permitan la comprensión del tema ambiental. Además, crear conciencia en nuestro entorno sobre la cuestión fundamental que significa conocer el ambiente, formar una cultura sobre el valor estratégico que el mismo representa y estimular la curiosidad profesional sobre el tema. También persigue desarrollar instrumentos que faculten a los

profesionales para adoptar capacidades que les permitan resolver problemas sencillos y adquirir conocimientos básicos para investigar y resolver problemas de complejidad media. La información presentada se ha estructurado en concordancia con los contenidos de las asignaturas que se imparten en las carreras académicas mencionadas.

En este volumen trata en su introducción una discusión actual del concepto de “Límites Planetarios”; continúa con el Recurso Hídrico, “el agua” como elemento fundamental para la vida silvestre y humana, su conservación y su uso adecuado como recurso natural en peligro; le siguen el “Suelo” y sus características “Geomorfológicas”; las “Radiaciones Ionizantes” su uso, contribución y peligros; la “Transición Energética” como una alternativa a los efectos antrópicos sobre nuestro planeta y finaliza con un aspecto particular de nuestras ciudades como lo es la “Movilidad Urbana.”

Aunque el libro está dirigido principalmente a estudiantes y profesores de las carreras referidas, puede abarcar una población-objetivo mucho más amplia, por cuanto aspira ser utilizado para complementar estrategias de enseñanza-aprendizaje en otros programas de carreras que tengan temas relacionados con el contenido general del texto. Igualmente apunta a aquellos lectores interesados en conceptos como los que aquí se exponen, tan vigentes en la actualidad. Sobre todo cuando la humanidad se enfrenta a un especial esfuerzo por crear conciencia sobre el desarrollo sostenible, la nueva visión del crecimiento de las naciones, que nos permitirá enfrentar los retos que plantean el acelerado crecimiento poblacional, el desarrollo agroindustrial, comercial y urbano, y el cambio climático. Todo en pro de lograr un equilibrio armónico entre el bienestar del hombre y el ambiente.

Los editores agradecen a los lectores y a los especialistas en estos temas, hacer llegar las sugerencias y contenidos asociados que a bien tengan, para mejorar y ampliar su alcance en próximas ediciones.

Caracas, 2025

PRÓLOGO

Hace poco más de seis años, iniciamos un recorrido académico por la vastedad de una disciplina muy relevante, como es la ingeniería ambiental, la cual encara el complejo universo de la interacción entre los sistemas naturales y las actividades del *Homo sapiens.*

En aquel momento empezamos con la exploración de ese amplio mundo. El primer volumen de *Fundamentos de Ingeniería Ambiental* fue concebido como un recurso para los estudiantes de ingeniería, arquitectura y urbanismo y también para ampliar los conocimientos de profesionales de estas disciplinas, ante los novedosos desafíos ambientales que día a día tienen que enfrentar.

Pero, la industrialización, la tecnología, la ciencia no cesan de producir innovaciones para que las sociedades modernas mejoren su calidad de vida, y al mismo tiempo pueden convertirse en factores degradantes de nuestro entorno. Todo este bagaje de nuevos saberes conlleva una carga nueva de conocimientos sobre la temática ambiental. Ese primer tomo fue pensado para tratar de cubrir algunos de esos espacios, pero ya en aquel momento estabamos conscientes de la inmensidad de este universo y que se debería seguir transitando ese camino, para ofrecer a los potenciales lectores más novedades en ese mundo de la ingeniería ambiental.

Ahora, con este II Volumen, damos un paso más en la exploración de saberes que de alguna manera hagan una conexión entre el ser humano, la tecnología y el ambiente y se convierta en una herramienta para la reflexión, tanto para estudiantes como especialistas que están buscando soluciones sostenibles que les permitan intuir el equilibrio ambiental.

En esta páginas nos adentramos primero en una visión integral del ambiente y sus desafíos como son los límites planetarios, siguiendo con diversas visiones de dos compartimientos ambientales críticos como el agua y el suelo, al explorar los recursos hídricos de nuestro país, la esencial calidad del agua y los misterios de la vida de los peces en aguas ácidas, el análisis del suelo como componente esencial de los ecosistemas y la relevancia de la geomorfología para la gestión ambiental. Se completa así, una red de conocimientos interrelacionados que nos ayudan a comprender las conexiones vitales de nuestro planeta. Respondiendo a los desafíos ambientales se abordan temas desde una perspectiva ingenieril como los sistemas urbanos

de drenaje sostenible y el reúso seguro del agua, ambos pilares de la resiliencia de nuestras ciudades y se amplían las miradas hacia las nuevas fronteras energéticas al analizar las radiaciones ionizantes y la transición energética, culminando con el enfoque sostenible de un problema propio del crecimiento de las urbes como es la movilidad urbana.

Este texto, es el producto de un esfuerzo colectivo, donde participaron diversos especialistas que comparten la búsqueda de una gestión integral del ambiente en pro de un desarrollo que sea sostenible para el planeta. Por ello en cada capítulo de este II Volumen de Fundamentos de Ingeniería Ambiental se encuentra un llamado a la reflexión sobre como enfrentar proactivamente las acciones humanas degradantes del ambiente que ejercen presión sobre los sistemas que dan soporte a la vida en el planeta.

El Consejo Editorial del libro espera que este II Volumen amplíe el acervo con el que cuentan nuestros potenciales lectores para resolver los desafíos ambientales a los que en los actuales momentos nos enfrentamos los seres humanos y enriquezcan su visión para un cambio en la dirección de construir un mundo mejor para todos.

Griselda Ferrara de Giner
Caracas, 2025

CONTENIDO

CAPÍTULO I. Los límites Planetarios.
Griselda Ferrara de Giner

CAPÍTULO II. Recursos hidricos.
Belkis Rosario Echenique Archiles, Elena Vega Ribas y *Ángela González Landazabal*

CAPÍTULO III. Calidad del Agua.
Ernesto González Rivas y *Antonio Machado-Allison*

CAPÍTULO IV. La vida de los peces en aguas ácidas.
Antonio Machado-Allison

CAPÍTULO V. Sistemas urbanos de drenaje sostenible.
José Ochoa

CAPÍTULO VI. El reúso seguro de las aguas.
Rafael Daudant

CAPÍTULO VII. El suelo componente esencial de los ecosistemas
Jesus Viloria Rondón

CAPÍTULO VIII. La geomorfología y la gestión ambiental
Pedro García Montero

CAPÍTULO IX. Radiaciones ionizantes.
Laszlo Sajo Bohus

CAPÍTULO X. La Transición energética.
Jesus Augusto Gómez

CAPÍTULO XI. Movilidad urbana.
Celia Marilyn Herrera de Morales

CAPÍTULO I

LOS LÍMITES PLANETARIOS

1. Introducción

Si bien es verdad que durante el siglo XX muchos indicadores del desarrollo humano alcanzaron cuotas prometedoras, entre otros, el promedio de esperanza de vida, la alfabetización y educación de alcance global, acceso a la atención sanitaria como agua potable y vacunas, así como los derechos humanos, también debe afirmarse que se han introducido cambios ambientales negativos de origen antrópico con repercusiones de índole planetaria.

Las presiones antropogénicas sobre la Tierra son un factor determinante en la degradación ambiental que se manifiesta en todas las esferas, y será parte relevante de este capítulo, no obstante, debemos reconocer que existen fuentes naturales que también degradan el entorno y provocan molestias. En este orden de ideas, a manera de ejemplo nombraremos algunos impactos de origen natural y sus consecuencias.

(i) Tenemos así el caso de las erupciones volcánicas que expulsan ingentes cantidades de gases, como dióxido de azufre (SO_2) y material en suspensión (aerosoles entre otros) y que llegan a la atmósfera y que introducen variaciones en el régimen de temperaturas y destruyen el ozono estratosférico. Una de las erupciones relativamente recientes, más importantes, fue la del volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991 que eyectó más de 10 km^3 de materiales y la columna de cenizas y gases llegó a 35 km de altura (estratosfera) enviando grandes cantidades de óxidos de azufre (SO_x) y una nube de aerosoles de sulfato, todo lo cual incidió en un enfriamiento de alrededor de 0,5 ºC en grandes zonas del planeta entre 1992-93 (Newhall et al., 1997).

(ii) Así mismo tenemos contaminantes biogénicos como los terpenos, que son hidrocarburos producidos por árboles como el pino, eucaliptus y cítricos, entre otros, y el polen de las plantas (partículas

suspendidas) y que causan alergias y molestias a personas con problemas respiratorios.

(iii) También las tormentas de arena o polvaredas son fenómenos meteorológicos comunes en zonas áridas y semiáridas, como el desierto de Sahara y el de Gobi, en las grandes llanuras de Norteamérica, en la zona de la Pampa seca en Argentina y en Australia. Pueden reducir la visibilidad a cero y llevarse la capa superior del suelo. Las arenas viajan con el viento miles de kilómetros y dañan estructuras y afectan la salud. La sequía y el viento contribuyen al fenómeno.

No obstante, es mucho más preocupante, la degradación ambiental ocasionada por las actividades humanas, que está asociada a la creciente población que ya sobrepasó los 8.000 millones de personas y al desarrollo de las sociedades que agotan los recursos naturales y son generadoras de grandes cantidades de residuos líquidos, gaseosos y sólidos, capaces de ocasionar el deterioro del agua, el suelo, la atmósfera, la salud del hombre y la biota. No cabe duda que todas estas manifestaciones negativas son mucho más inquietantes para el globo terráqueo por la escala a la que se está produciendo. La carga negativa de tales problemas ambientales sobre el planeta está ocasionándole perturbaciones alarmantes que inciden sobre el equilibrio del propio sistema Tierra (Sthepens et al., 2019; Attemborough, 2021; Quintana Solórzano, 2019).

Los humanos dependemos para nuestra sobrevivencia de ese complejo sistema, que es nuestro único hogar, y parece que requerimos de un llamado de alerta para buscar vías que reviertan estos impactos degradantes que estamos ocasionando. En este capítulo haremos una revisión a los llamados *límites planetarios* como tema principal del mismo, pero no podemos olvidar que en décadas anteriores hubo otras llamadas de atención de la comunidad científica para con la humanidad, y que realmente muchas de ellas no han sido atendidas con la consideración que merecían.

A continuación, vamos a hacer un recorrido por llamados de atención históricos, de especialistas de diferente índole, sobre la salud del planeta y las consecuencias negativas a las que se enfrenta la especie *Homo sapiens,* sino toma en consideración estas advertencias. Esta revisión no es exhaustiva, pero señalamos a las más resaltantes y que

han tenido mayor impacto en la comunidad científica en la historia reciente, digamos desde la segunda mitad del siglo XX.

2. Algunos hitos en las múltiples llamadas de atención sobre la salud del planeta previos a los límites planetarios

2.1. La primavera silenciosa. Rachel Carson.

En el ya lejano año 1962 salió a la luz pública el libro de la bióloga Rachel Carson titulado "*La Primavera Silenciosa*". En el mismo alertaba del peligro del uso indiscriminado de los pesticidas y especialmente el DDT y sus efectos sobre la vida silvestre. Carson puso en duda la lógica de la liberación de grandes cantidades de productos químicos en el medioambiente sin comprender plenamente sus efectos en los ecosistemas y la salud humana, al tiempo que presentó pruebas sobre el efecto en las poblaciones de aves, muchas en vías de desaparición, sobre la alteración de los ciclos naturales de la vida vegetal y la contaminación de las aguas subterráneas (Mallén Rivera, 2012).

El libro fue un éxito editorial, permaneció siete meses en la lista de "*best sellers*" del New York Times, pero levantó una amplia polémica por parte de las compañías químicas fabricantes de los pesticidas que reaccionaron con furibundos ataques a la bióloga y escritora.

Al mismo tiempo el libro impulsó una investigación federal en los Estados Unidos sobre el uso indebido de los pesticidas, con audiencias en el Congreso, que le dieron mayor publicidad a la problemática de uso de los pesticidas. El presidente Kennedy, presionado por la polémica planteada, ordenó una investigación a cargo del Comité Asesor Científico Presidencial que publicó un detallado informe. En el mismo se señalaba qué si bien los plaguicidas habían sido examinados minuciosamente para su efectividad agrícola, por el contrario, no se le dio el mismo nivel de revisión para la seguridad ambiental y pública, y que sobre muchos de ellos que se encontraban en uso se carecía del suficiente conocimiento respecto a los efectos crónicos a lo largo de la vida. Realmente fue una reivindicación a la tesis de Carson (CLAES, 2018).

Durante sus testificaciones, en 1963, ante dos comités senatoriales que celebraron audiencias sobre el tema después de la publicación de

La Primavera Silenciosa, Carson pidió el establecimiento de alguna agencia reguladora independiente para proteger a las personas y al medioambiente de los peligros químicos.

Unos pocos años después, en 1970, se crea en EEUU la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) y existe bastante consenso en la influencia del libro de Carson sobre la creación de esta institución gubernamental. En 1972, la EPA prohibió el DDT y otros pesticidas debido a su persistencia en el ambiente y su acumulación en la cadena alimentaria (Carandell Baruzzi, 2021). Muy pronto otros países siguieron esta vía, quedado restringido el uso del DDT solo para fines de la erradicación de la malaria.

Sin duda, Rachel Carson fue pionera en el despertar de la conciencia ambiental en el público, y "*La Primavera Silenciosa*", con el enorme impacto alcanzado después de su publicación, es uno de sus principales legados y la han transformado en un símbolo del ecologismo en el mundo. Sus advertencias sobre el impacto de los pesticidas en la salud humana y de los ecosistemas, ha sido comprobado exhaustivamente en los años posteriores, dándole la razón (Mallen Rivera, 2012; Carandell Baruzzi, 2021).

2.2. Informes del Club de Roma

En el año 1972 se publicó la primera edición del informe titulado "*Los límites del crecimiento*". Este informe fue encargado por la asociación privada denominada "Club de Roma", fundada en Roma en 1968 por un pequeño grupo de científicos, empresarios y políticos provenientes de distintos países, como laboratorio de ideas, para hablar de las consecuencias de las acciones humanas que se estaban produciendo sobre el planeta. Se lo encargaron a un grupo de investigadores del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), bajo la dirección de Donella Meadows, biofísica y científica ambiental, especializada en dinámica de sistemas y con el acompañamiento de un equipo de 17 expertos profesionales.

El informe usó el programa World3 de simulación de dinámica de sistemas, creado por el propio equipo de investigación, y el cual era capaz de estudiar y analizar cinco factores básicos que determinan y limitan el crecimiento en nuestro planeta Tierra: producción agrícola,

población y su crecimiento, recursos naturales, producción industrial y contaminación, según los datos disponibles hasta la fecha (Bonifetti, 2017). La conclusión principal del informe se refería a que:

> "*En un planeta limitado, las dinámicas de crecimiento exponencial (población y producto per cápita) no son sostenibles*." (Bonifetti, 2017: p.....)

En otras palabras, no puede haber un crecimiento poblacional, económico e industrial ilimitado en un planeta de recursos limitados. Los redactores del informe estaban convencidos de qué, si la industrialización, la contaminación ambiental, la producción de alimentos y el agotamiento de los recursos mantuvieran las tendencias obtenidas de crecimiento de la población mundial, el planeta alcanzaría los límites de su crecimiento en el curso de los próximos 100 años. Pero también concluyeron que es posible alterar estas tendencias de crecimiento y establecer unas condiciones de estabilidad económica y ecológica capaces de ser sostenidas en el futuro diseñando un estado de equilibrio global de tal forma que las necesidades materiales básicas de cada persona sobre la tierra sean satisfechas (Meadows et al., 1992).

Este informe tuvo mucha controversia y lo discutieron sociedades científicas y parlamentos. Despertó opiniones muy favorables y al mismo tiempo ataques desde sectores diversos de la sociedad, tanto la izquierda, la derecha y el sector medio de las grandes corrientes económicas.

Aunque muchos pudieran haber interpretado el informe como una predicción del juicio final, realmente versaba sobre una elección y un reto, y aunque contenía una advertencia también contenía un mensaje promisorio que exponía que si la humanidad decidiera alterar tales tendencias de crecimiento expuestas en el trabajo, podría establecer unas condiciones de estabilidad económica y ecológica capaces de ser sostenidas en el futuro, alcanzando un equilibrio global de forma tal que las necesidades básicas de cada habitante del planeta pudieran ser satisfechas, en una sociedad diferente a la actual obsesionada por el crecimiento (Meadows et al., 1992).

El Club de Roma siguió propiciando otros programas de indagación sobre análisis de problemas mundiales y elaboración de escenarios a

futuro. Los resultados han sido publicados en diversos informes bajo la autoría de expertos mundiales. Pero en este capítulo nos referiremos particularmente a la actualización de *Los Límites del crecimiento.*

En 1991, con motivo del vigésimo aniversario del primer informe, se actualizaron los datos de la primera publicación en una nueva versión denominada: "*Más allá de los límites del crecimiento*". Se elaboró con base a los datos recolectados desde el primer informe y usando el modelo de simulación World3/91, basado en el anterior modelo World3, pero reajustado y revisado. En 1971 habían llegado a la conclusión de que los límites físicos al uso humano de materiales y energías distaban aún varias décadas, pero en 1991, al revisar los datos, el modelo de ordenador y su propia experiencia del mundo, se dieron cuenta de que, a pesar de las mejoras tecnológicas mundiales, una mayor consciencia y políticas medioambientales más firmes, muchos flujos de recursos esenciales y la generación de muchos tipos de contaminantes habían traspasado las tasas que son físicamente sostenibles.

Para tener algún viso de fiabilidad en el futuro se requería una transición hacia una sociedad sostenible que hiciera una revisión global de las políticas y prácticas que perpetúan el crecimiento del consumo material y de la población con un énfasis mayor en la suficiencia, equidad y calidad de vida, que en la cantidad de la producción. Los autores expresaron que estas conclusiones constituyen una advertencia condicional, no una mera predicción, no son una sentencia de muerte y que al contrario ofrecen una elección de vida y esperan que la elección del mundo sea en favor de la sostenibilidad, pero reconocen la dificultad de esta elección ante tanta moderna cultura industrial construida sobre la premisa del perpetuo crecimiento material. Ven la desaceleración de la insostenibilidad no como un sacrificio, sino como una oportunidad de dejar golpear los límites de la tierra y comenzar a trascender límites autoimpuestos e innecesarios en instituciones humanas, estados mentales, creencias y éticas (Meadows et al., 1992)

En 2004 se actualizan e integran las dos versiones anteriores en la denominada "*Los límites del crecimiento: 30 años después*". El modelo usado para la simulación es el World3/2000. En este tercer reporte se hace una clara distinción entre crecimiento y progreso y se corroboran las conclusiones de la primera versión con la advertencia de que el peligro aumenta y asimismo la urgencia de adoptar medidas.

A lo largo de los 14 capítulos del libro los autores explican porque no solo es deseable sino incluso imperativo, que se incrementen los niveles de consumo de los pobres, reducir la huella ecológica total de la humanidad y pensar en términos de planificación a largo plazo.

Esta versión nos brinda un abanico de hasta 10 posibles escenarios de cómo podría evolucionar el siglo XXI y además ofrece 7 líneas generales para acelerar la transición hacia la sostenibilidad:

(i) Extender la planificación a largo plazo.

(ii) Mejorar y aumentar el sistema de señalización para obte ner una mejor calidad de la retroalimentación de la información de los fenómenos y procesos del medio ambiente.

(iii) Acelerar la respuesta temporal a las crisis ecológicas.

(iv) Minimizar el uso de los recursos no renovables.

(v) Prevenir la erosión de los recursos renovables.

(vi) Utilizar todos los recursos con la máxima eficiencia.

(vii) Frenar e incluso detener el crecimiento exponencial de la población y del capital físico.

2.3 Informe Brundtland sobre Desarrollo Sostenible (ONU, 1987)

En 1984 se reunió por primera vez la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo atendiendo un llamado de la Asamblea General de las Naciones Unidas en el sentido de establecer una agenda global para el cambio. En ese momento ya era unánime la convicción de la imposibilidad de separar los temas del desarrollo y el medio ambiente. A la Comisión se le impusieron tres objetivos:

(i) Examinar los temas críticos de desarrollo y medio ambien te y formular propuestas realistas al respecto.

(ii) Proponer nuevas formas de cooperación internacional capaces de influir en la formulación de las políticas sobre temas de desarrollo y medio ambiente con el fin de obtener los cambios requeridos.

(iii) Promover los niveles de comprensión y compromiso de individuos, organizaciones, empresas, institutos y gobiernos.

La Comisión partió de la convicción de que es posible construir un futuro más próspero, más justo y seguro para la humanidad. En 1987, esta comisión presenta su primer informe titulado "*Nuestro futuro común*", también conocido como "*Informe Brundtland*" (ONU, 1987).

Este informe supuso un toque de atención para la comunidad internacional. Incluía ideas de avanzada sobre el camino que la sociedad global había tomado y que estaba destruyendo el ambiente y dejando cada vez más gente en la pobreza y la vulnerabilidad. La Comisión observó que muchos ejemplos de "desarrollo" conducían a aumentos en términos de pobreza, vulnerabilidad e incluso degradación del ambiente. Por eso surgió como necesidad apremiante un nuevo concepto de desarrollo, un desarrollo protector del progreso humano hacia el futuro, el "desarrollo sostenible". Muchas acciones actuales supuestamente orientadas hacia el progreso resultan sencillamente insostenibles, implican una carga demasiado pesada sobre los ya escasos recursos naturales. Puede que esas acciones reflejen utilidades en las hojas de balance de nuestra generación, pero implican que nuestros hijos heredarán pérdidas. Se trata de pedirle prestados recursos a las siguientes generaciones a sabiendas de que no se les podrá pagar la deuda. Por eso la Comisión planteó que la humanidad tiene la capacidad para lograr un "desarrollo sostenible", al que definió como **aquel que garantiza las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.** Por primera vez se incorpora la dimensión ambiental a las dimensiones económica y social cuando se habla de desarrollo, lo que supuso un hito para la teoría del desarrollo (Pérez, 2017).

Ahora bien, el concepto de desarrollo sostenible implica limitaciones. Considera la Comisión que los niveles actuales de pobreza son evitables. Y que el desarrollo sostenible exige precisamente comenzar por distribuir los recursos de manera más equitativa en favor de quienes más los necesitan. Esa equidad requiere del apoyo de los sistemas políticos que garanticen una más efectiva participación ciudadana en los procesos de decisión, es decir, más democracia a niveles nacional e internacional. En última instancia el desarrollo sostenible depende de la voluntad política de cambiar, de adoptar las decisiones que permitan asegurar los recursos para sostener a esta generación y las siguientes.

Es importante exponer que la Comisión, además de introducir la definición de desarrollo sostenible, prestó su atención a temas que

siguen siendo de palpitante actualidad y que plasmó en su informe (ONU, 1987):

(i) Población y recursos humanos: La población mundial sigue creciendo a un ritmo muy acelerado, especialmente si ese incremento se compara con los recursos disponibles en materia de vivienda, alimentación, energía y salud. Dos propuestas se formulan al respecto: reducir los niveles de pobreza y mejorar el nivel de la educación.

(ii) Alimentación: El mundo ha logrado volúmenes increíbles de producción de alimentos. Sin embargo, esos alimentos no siempre se encuentran en los lugares en los que más se necesitan.

(iii) Especies y ecosistemas**:** recursos para el desarrollo. Muchas especies del planeta se encuentran en peligro, están desapareciendo. Este problema debe pasar a convertirse en preocupación política prioritaria.

(iv) Energía: se sabe que la demanda de energía se encuentra en rápido aumento, si la satisfacción de esta demanda se basara en el consumo de recursos no renovables el ecosistema no sería capaz de resistirlo. Los problemas de calentamiento y acidificación serían intolerables. Por eso son urgentes las medidas que permitan hacer un mejor uso de la energía. La estructura energética del siglo veintiuno debe basarse en fuentes renovables.

Industria: El mundo producía ya en 1987 siete veces más productos de los que fabricaba en 1950. Los países industrializados han podido comprobar que su tecnología anti polución ha sido efectiva desde el punto de vista de costos en términos de salud, propiedad y prevención de daño ambiental y que sus mismas industrias se han vuelto más rentables al realizar un mejor manejo de sus recursos.

(v) El reto urbano**:** Al comienzo del nuevo siglo prácticamente la mitad de la humanidad habitará en centros urbanos. Sin embargo, pocos gobiernos de ciudades del llamado tercer mundo, cuentan con los recursos, el poder y el personal para suministrar a sus poblaciones en crecimiento, la tierra, los servicios y la infraestructura necesarios para una adecuada forma de vida: agua limpia, sanidad, colegios y transporte. El adecuado manejo administrativo de las ciudades exige la descentralización, de fondos, de poder político y de personal, hacia las autoridades locales.

Como conclusión, el Informe Brundtland exhorta a los Gobiernos a asegurar que sus agencias y divisiones actúen con responsabilidad apoyando un desarrollo que sea sostenible económica y ecológicamente y fortalecer así mismo las entidades encargadas del control ambiental. Se realiza un llamado de acción, recordando que al comenzar el siglo veinte ni la población ni la tecnología humana tenían la capacidad de alterar los sistemas planetarios. No obstante, al terminar el siglo si tienen ese poder y más aún, muchos cambios no deseados se han producido ya en la atmósfera, el suelo, el agua, las plantas, los animales y en las relaciones entre éstos. El Informe Brundtland alertó sobre el impacto ambiental diferenciado entre los países industrializados y en desarrollo, abogando por mejoras sanitarias y educativas en estos últimos y lideró un cambio de paradigma hacia un enfoque más consciente de las interacciones entre el desarrollo humano y la salud del planeta

Se puede puntualizar que el informe Brundtland impulsó oficialmente la necesidad de abrazar el desarrollo sostenible como política de Estado entre las naciones que integran la ONU. Así desde 1987, las Naciones Unidas se han abocado a la defensa y puesta en marcha del concepto de desarrollo sostenible a nivel global.

Sucesivas conferencias cumbres en este sentido se llevaron a cabo a lo largo de los años. Se puede destacar en primer lugar la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo, llevada a cabo en Río de Janeiro en 1992 donde se firmó la "Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo" aclarando el concepto de desarrollo sostenible. Diez años más tarde, en el año 2002 en Johannesburgo se realizó la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible y se adoptó una Declaración Política y un Plan de Implementación que incluía un conjunto de actividades y medidas relacionadas con el agua, la energía, salud, agricultura, diversidad biológica, uso de recursos genéticos, entre otros, a tomarse en cuenta para el logro de un desarrollo con respeto por el medio ambiente.

Mucho más reciente, en 2015 se realizó en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York otra cumbre sobre el Desarrollo Sostenible, con el resultado de la firma de un ambicioso plan denominado "*Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*" (Naciones Unidas, 2015) que incluía una declaración, 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas y que básicamente tenía

como objetivo encontrar nuevas formas de mejorar la vida de las personas en el mundo, erradicar la pobreza, promover la prosperidad y bienestar para todos, proteger el medio ambiente y luchar contra el cambio climático. En la actualidad estos objetivos constituyen una sólida base para los lineamientos relacionados con el ambiente y los factores económicos y sociales en la mayoría de los países en el mundo.

3. Los límites planetarios

Las advertencias de la comunidad científica sobre la salud del planeta que se han sucedido en la segunda mitad del siglo XX, y señaladas anteriormente, no han tenido los resultados que pudieran esperarse ante la gravedad de efectos que pronosticaban. Así que siguen apareciendo nuevas advertencias, muy bien fundamentadas, sobre el continuo aumento de la presión que ejercemos los seres humanos sobre los recursos y los ecosistemas de la Tierra y que producen una intensa degradación de los sistemas que dan soporte a la vida en el planeta.

Destacaremos los estudios que proporcionan el título de este capítulo, que se conocen como "Los límites planetarios".

Motivados por la creciente preocupación por la explotación de los recursos naturales y los impactos de las actividades antropogénicas en el planeta, un grupo internacional de 29 científicos ambientales y del sistema terrestre, liderados por Johan Rockström del Stockholm Resilience Center y Will Steffen de la Australian National University publicaron en el año 2009 un artículo en la prestigiosa revista *Nature* bajo el título: "*A safe operating space for humanity*". Este artículo, de apenas 11 páginas, era el compendio del primer resultado de sus investigaciones para identificar los procesos ambientales que regulan la estabilidad y la resiliencia del sistema Tierra y sus límites. Había nacido el concepto de "**límite planetario**" (LP).

Adicionalmente al artículo publicado en *Nature*, el equipo de investigadores publicó en forma paralela (en 2009) en la revista *Ecology and Society* un artículo mucho más amplio titulado: "*Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity*" que era una explicación de su investigación con mucha mayor amplitud y detalle de los límites, sus basamentos y el análisis subyacente detrás

de ello que permitieron establecer en forma preliminar los límites planetarios y además estaba acompañado de un anexo con cinco discusiones suplementarias que ampliaban lo presentado en el artículo.

El equipo de trabajo estaba interesado en definir un espacio operativo seguro para la humanidad, como lo expresaba el título de los artículos, e incluyendo en ella la sociedad civil, los gobiernos, la comunidad científica, las organizaciones internacionales y el sector privado. En ambos artículos se presentaron nueve procesos clave para la estabilidad y resiliencia del planeta y los umbrales que, en caso de ser superados, pueden comprometer la habitabilidad de la Tierra para regenerarse y mantener las condiciones que todos los seres vivos disfrutamos actualmente. Se puede decir que los límites planetarios son niveles, con base científica, de perturbaciones humanas del Sistema Tierra, más allá de los cuales el funcionamiento del sistema puede ser alterado sustancialmente.

Las transgresiones de los límites planetarios crean riesgos sustanciales de desestabilización del estado estable del Sistema Tierra en el Holoceno, época geológica en el cual las sociedades modernas han evolucionado. El marco de los límites planetarios no dicta como deben desarrollarse las sociedades. Son decisiones políticas que deben incluir consideración de las dimensiones humanas, incluyendo equidad, que no está incorporada en la trama de los límites planetarios. Sin embargo, identificando un espacio de operación seguro para la humanidad sobre la Tierra, el marco de los límites planetarios puede convertirse en una contribución valiosa para los tomadores de decisiones al trazar el mapa del curso deseable para el desarrollo de la sociedad.

Los coautores de ambos artículos eran exactamente los mismos que conformaron el equipo liderado por Rockström y Steffen, y que presentaron una versión resumida (Rockström et al, 2009a) y una versión larga, mucho más detallada de las bases para la escogencia de los límites planetarios y sus umbrales (Rockström et al. 2009b). Ambas versiones expresan que, aunque la tierra ha pasado por muchos períodos de cambios ambientales significantes a lo largo de su historia de más de 4.500 millones de años, en cambio en los últimos 11.780 años (realmente un marco de tiempo muy reciente) correspondientes a la época geológicamente conocida como Holoceno (última y actual época del período Cuaternario en la escala temporal geológica)[1], (Tabla 1) la situación ha sido inusualmente estable y esto ha permitido al

ser humano desarrollarse y prosperar a través de diversas civilizaciones, tal como las conocemos. Mas, ahora, tal estabilidad puede estar amenazada. Desde la revolución industrial las acciones humanas se han convertido en impulsores importantes de cambios ambientales globales que pueden empujar al sistema Tierra (ST) fuera de ese estado estable en que ha permanecido durante estos últimos 11.780 años, con consecuencias que pueden ser catastróficas para gran parte del mundo.

Durante el Holoceno, los cambios ambientales ocurrían naturalmente y la capacidad regulatoria de la Tierra mantenía condiciones que permitían el desarrollo humano: temperaturas regulares, disponibilidad de agua dulce, y flujos biogeoquímicos que permanecían en un rango relativamente estrecho. Esta situación se esperaba que continuara por varios cientos de miles de años, pero las presiones de los seres humanos la están cambiando. El rápido incremento de la dependencia de los combustibles fósiles y las formas industrializadas de la agricultura, han hecho que las actividades humanas alcancen niveles que puedan dañar el sistema que mantenía a la Tierra en el deseable estado del Holoceno, conduciéndola a cambios ambientales abruptos y que en algunos casos pudieran ser irreversibles.

Es importante señalar, que Rokström y sus 29 colaboradores usaron el novel concepto de Antropoceno, para señalar una nueva época que ha surgido como consecuencia de las acciones humanas que se han convertido en un impulsor principal de cambios ambientales globales y que sigue al período geológico del Holoceno. Este concepto aún no ha

Tabla 1. Ubicación de la época Holoceno en el Eón Fanerozoico.

Eón	Era	Período	Época	Millones de años atrás
Fanerozoico	**Cenozoica**	**Cuaternario**	**Holoceno**	0, 011780
			Pleistoceno	2,6 – 0,011780
		Neógeno		23 - 2,6
		Paleógeno		66 - 23
	Mesozoica			251 - 65,5
	Paleozoica			541 - 251

sido aceptado como un nuevo período geológico por la Comisión Internacional de Estratigrafía dependiente de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, para lo cual debe llenar variados criterios, uno muy importante: que existan señales medibles en los estratos geológicos de qué efectivamente hay un cambio (Trischler, 2017). Entre tanto, el nuevo concepto de Antropoceno ha tenido bastante aceptación culturalmente hablando por investigadores de otras disciplinas como historiadores, sociólogos, filósofos, teólogos y representantes de otras comunidades académicas, desde que Paul Crutzen (premio Nobel) y Eugene Stoermer lo propusieron en el año 2.000, en el boletín del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (GBP, por sus siglas en inglés). El término tuvo una trayectoria meteórica después de esta mención en un modesto boletín y Crutzen le dio su espaldarazo al publicar en la prestigiosa revista *Nature* (2002) su hipótesis de que el Antropoceno comenzó con la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII por cuanto los seres humanos se han convertido en una fuerza geológica (Trischler, 2017).

3.1. Introduciendo el concepto de límites planetarios

Rockström y sus colaboradores sostienen que, aunque el complejo ST, a veces tiene una respuesta suave a presiones cambiantes, en algunos subsistemas del planeta la reacción es no lineal y frecuentemente abrupta con sensibilidad alrededor de niveles límites de ciertas variables clave. Si ese umbral se cruza, el subsistema puede moverse hacia un nuevo estado, frecuentemente con consecuencias deletéreas o potencialmente desastrosas para los humanos.

La mayoría de esos niveles umbrales pueden definirse por un valor crítico o varias variables de control. Para alcanzar el desafío de mantener el estado del Holoceno, Rockström et al. (2009a, 2009b) proponen un marco de trabajo de referencia, basado en lo que denominan "*los límites planetarios*" que definirían un espacio seguro para la humanidad con respecto al ST y están asociados con los procesos de los subsistemas biofísicos del planeta. Ellos hicieron un primer esfuerzo preliminar de identificación de los procesos clave del ST llegando a nueve procesos globales: Cambio climático; Pérdida de la tasa de biodiversidad (terrestre y marina); Interferencia con ciclos del nitrógeno y fósforo; Agotamiento del ozono estratosférico; Acidificación del océano; Uso global del agua dulce; Cambio en usos de la tierra; Polución química; Carga de aerosoles atmosféricos.

Al mismo tiempo intentaron cuantificar para cada proceso el nivel límite que pudiera no ser sobrepasado si la humanidad evitara cambios globales ambientales inaceptables. Aquí un cambio inaceptable está definido en relación a enfrentar el riesgo de la humanidad en la transición del planeta del Holoceno al Antropoceno. Esos niveles límites son los propuestos y denominados: "Límites Planetarios" (LP), que podemos considerar indicadores de la situación de cada proceso. En su trabajo, Rockström y su equipo (2009b) insisten en que:

> "*los límites propuestos son crudos, solo primeros estimados, rodeados de grandes incertidumbres y brechas del conocimiento. Llenar esas brechas requerirá mayores avances en la ciencia del sistema Tierra y resiliencia. El concepto propuesto de «límites planetarios» yace sobre el trabajo base para mover nuestra aproximación a la gobernanza y gestión, lejos de los análisis esencialmente sectoriales de los límites del crecimiento dirigida a minimizar externalidades negativas, hacia la estimación del espacio seguro para el desarrollo humano*" (Traducción propia).

3.2 ¿Qué son los límites planetarios?

Para identificar los criterios y procesos usados para la identificación y definición de los LP, el equipo de investigadores, ya citado, argumenta que la selección de los mismos proviene de la definición de lo que constituyen cambios ambientales globales inducidos por los humanos. Así mismo, la posición de un límite planetario es una función del grado de riesgo que la comunidad global está dispuesta a aceptar. En otras palabras, cuan cerca, a una zona de incertidumbre alrededor de un nivel peligroso o umbral de un proceso humano del ST se está dispuesto a colocarse y/o cuán lejos, un límite puede ser sobrepasado temporalmente antes de que se cruce el umbral.

La propuesta del grupo de investigadores liderados por Rockström y Steffen es una medida cuantitativa de los LP dentro de los cuales la humanidad podría seguir desarrollándose y prosperando como lo había hecho durante el período relativamente estable del Holoceno. Estos límites respondían a la pregunta de ¿Hasta dónde podrá el ST absorber las presiones antropogénicas sin comprometer las condiciones de vida de la especie humana? Son valores para variables de control que están a una distancia "segura" de los niveles umbrales (para procesos

con evidencia de conducta umbral) o a niveles peligrosos (para procesos sin evidencia de umbrales). El equipo de investigadores del equipo de Rockström y Steffen decidieron tomar una aproximación conservadora, usando el principio de precaución, sin tomar en cuenta el riesgo para cuantificar los límites planetarios, tomando en cuenta las grandes incertidumbres que rodean la posición verdadera de muchos de los umbrales.

Para llegar a la obtención de los LP propuestos, el grupo de científicos hizo una búsqueda comprehensiva para los procesos críticos encontrados para el ST y sus variables de control asociadas, lo que permitió identificar, en primer lugar, los nueve procesos señalados anteriormente y para los cuales se necesita establecer los límites que minimicen el riesgo de cruzar los umbrales críticos que puedan llevar a salidas indeseables. Los límites identificados cubren:

(i) los ciclos biogeoquímicos globales del nitrógeno, fósforo, carbón y agua;

(ii) los principales sistemas de circulación física del planeta (el clima, la estratosfera, los sistemas oceánicos);

(iii) los rasgos biofísicos de la Tierra que contribuyen a la resiliencia subyacente de su capacidad autorregulatoria (biodiversidad marina y terrestre, sistemas del suelo); y

(iv) dos rasgos críticos asociados con el cambio antropogénico global (carga de aerosoles y polución química).

La aproximación que se hace al formular estos límites planetarios descansa en tres ramas de la investigación científica. En primer lugar, la que indica la escala de la acción humana en relación a la capacidad de la Tierra para sostenerla. Esto tiene que ver con la economía ecológica, con el conocimiento del rol esencial de las propiedades del ambiente que dan soporte a la vida y a las restricciones biofísicas para el bienestar humano y el crecimiento de la economía. En segundo lugar, es la comprensión de los procesos esenciales de la Tierra, incluyendo acciones humanas, acercándonos a la evolución de cambios globales en la ciencia del ST y en el desarrollo de la ciencia de la sostenibilidad. El tercer campo se refiere al marco de la investigación en lo tocante a resiliencia y sus lazos con la dinámica compleja y de autorregulación de sistemas vivientes.

El marco propuesto lo construyeron sobre una aproximación en extenso con base, entre otros, a los límites del crecimiento de Meadows et al. (1972). En conjunto, los límites representan el "espacio" biofísico dinámico del ST dentro del cual la humanidad ha evolucionado y prosperado. Es como si fuera definir el "campo de juego del planeta" para la empresa humana. Los investigadores expresan que no ofrecen un mapa de ruta para el desarrollo sostenible, sino que meramente proveen el primer paso en identificar los límites biofísicos a la escala planetaria, dentro del cual la humanidad tiene la flexibilidad para escoger miles de trayectorias para el bienestar humano y el desarrollo. Enfatizan que trabajos posteriores necesitan enfocar la dinámica social que ha llevado a la situación actual, y proponer caminos para que la sociedad pueda establecerse dentro de esos límites.

A continuación, se presenta la Figura 1, tal como apareció en el artículo condensado que se publicó en la revista *Nature*, donde se muestran los nueve LP encontrados. Se observa además tres zonas coloreadas. El sombreado interior verde representa el espacio de operación seguro propuesto para los nueve sistemas planetarios. La cuña roja representa un estimado de la posición, en 2009, para cada variable.

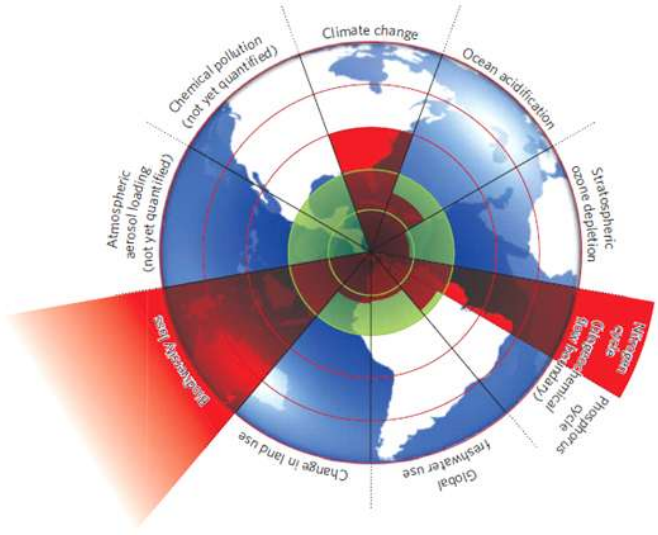


Figura 1. Más allá de los límites Fuente: Rockström et al, 2009a

Es de gran significancia que en la Figura 1 se puede observar que ya los límites en tres de los sistemas señalados: tasa de pérdida de biodiversidad, cambio climático e interferencia humana en el ciclo del nitrógeno y fósforo, han sido excedidos. Este hecho, de por sí, en ese momento (2009) ya era una llamada de alerta para el planeta.

La Tabla 2 que se muestra a continuación y que fue presentada en la versión condensada de *Nature*, muestra el detalle de las concentraciones actuales y propuestas para cada uno de los nueve límites establecidos. Es muy importante señalar las bases utilizadas por los autores para llegar a establecer estos valores. Los límites para los procesos que aparecen sombreados en rojo en la Figura 1 y que han sido cruzados, fueron establecidos usando como fuente los datos de Steffen, Crutzen y McNeill pertenecientes al equipo de Rockström, y publicados en *Ambio* en el 2007. También se discutió ampliamente y se abundó en detalles sobre los límites allí establecidos en información suplementaria que presentaron (Rokström et al., 2009 Supplementary Information). En esta información suplementaria se amplían las bases de la investigación incluyendo una discusión sobre la dinámica de los cambios de sistemas, ajuste de los límites comparando con otras aproximaciones, descripción extendida de límites del cambio climático y de los límites del uso de agua dulce y la descripción adicional de interacción entre límites; además se describen métodos suplementarios para identificar y definir los LP y los datos, así como el tratamiento de estos datos para los cálculos de la figura que muestra el estimado de la evolución cuantitativa de las variables de control de los siete LP desde los niveles pre-industriales hasta el presente. Para finalizar esta información suplementaria se presenta un listado de 49 referencias adicionales para sustentarlas.

Se pudo evaluar que hay suficiente evidencia científica para hacer una primera tentativa, preliminar, de cuantificar las variables de control para siete de esos límites (Tabla 2). Los dos límites remanentes (carga de aerosoles y polución química), deben ser incluidos entre los límites planetarios, pero por ahora el equipo de investigadores es incapaz de sugerir niveles cuantitativos de sus límites

Al detallar la Figura 1 puede observarse que además de los tres procesos ya señalados: cambio climático, tasa de pérdida de la biodiversidad e interferencia con el ciclo del nitrógeno que ya han sobrepasado sus límites, también es posible destacar que el planeta puede

Tabla 2: Los límites planetarios. Fuente: Rockström et al. 2009a.

Procesos del Sistema Tierra	Parámetros	Límite propuesto	Estado actual	Valor pre-industrial
Cambio climático	(1) Concentración atmosférica de dióxido de carbón (partes por millón en volumen). (2) Cambio en forzamiento radiativo (vatios por m^2)	350 1	387 1,5	280 0
Tasa de pérdida de la biodiversidad	Tasa de extinción (número de especies por millón de especies por año)	10	›100	0,1-1
Ciclo del nitrógeno (es parte de un límite con el ciclo del fósforo)	Cantidad de N_2 removido de la atmósfera por uso humano (millones de toneladas por año)	35	121	0
Ciclo del fósforo (es parte de un límite con el ciclo del nitrógeno)	Cantidad de P fluyendo en el océano (millones de toneladas por año)	11	8,5-9,5	-1
Agotamiento de la capa de ozono	Concentración de ozono (unidades Dobson)	276	283	290
Acidificación del océano	Estado de saturación promedio global de la aragonita en aguas marinas superficiales	2,75	2,90	3,44
Uso global del agua dulce	Consumo de agua dulce por humanos (km^3 por año)	4.000	2.600	415
Cambios en uso de la tierra	Porcentaje de cobertura global de tierra convertida a tierra de cultivo	15	11,7	Bajo
Carga de aerosol atmosférico	Concentración de partículas globales en la atmósfera, sobre una base regional	A ser determinado		
Polución química	Por ejemplo, cantidad emitida a, o concentración de contaminantes orgánicos persistentes, plásticos, disruptores endocrinos, metales pesados y desechos nucleares en, el ambiente global, o los efectos sobre los ecosistemas y funcionamiento del Sistema Tierra mismo	A ser determinado		

aproximarse pronto a los límites de otros cuatro procesos: uso del agua dulce global, los cambios en el uso de la tierra, la acidificación de los océanos y la interferencia con el ciclo global del fósforo.

Por otra parte, el análisis del grupo de investigación sugiere que la tasa de pérdida de especies y la tasa de remoción del N_2 de la atmósfera al convertirse en nitrógeno reactivo para uso humano (variables de control de estos dos procesos), son tasas que de continuar podrían erosionar significativamente la resiliencia de componentes principales del ST.

También distinguen entre límites directamente relacionados con el reforzamiento de umbrales continentales o planetarios, como el riesgo de fusión de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, cuando

permanentemente cruzan un umbral de forzamiento radiativo y los límites basados en procesos planetarios "lentos", con ninguna evidencia actual de conducta umbral, a escala planetaria, lo cual provee resiliencia subyacente del ST funcionando como sumidero y fuente de carbón y regulando flujos de agua, nutrientes y minerales. Esto produce una clasificación según las categorías de los límites planetarios, que pueden verse en la Tabla 3 (Rockström et al, 2009b).

Tabla 3. Categorías de límites planetarios. Fuente: Rockström et al. 2009b.

Carácter del límite	**Procesos con umbrales a escala global**	**Procesos lentos sin umbrales conocidos a escala global**
Procesos sistémicos a escala planetaria	Cambio climático Acidificación de los océanos Ozono	Estratosférico
Procesos agregados de escala local/regional	Ciclos globales Carga de aero Uso Cambio	de N y P soles atmosféricos de agua dulce en el uso del suelo Pérdida de biodiversidad Polución química

Por otra parte, en el artículo en extenso publicado en *Ecology and Society* (2009) aparece una tabla que además de las concentraciones propuestas para los límites y que ya se presentan en la Tabla 2, detalla los niveles evitados o influenciados por las variables lentas y el estado del conocimiento en relación a los factores: Comprensión básica de los procesos del ST; Existencia de una conducta umbral; y la posición del límite. Estos detalles se muestran a continuación en la Tabla 4.

En líneas generales, los comentarios que suscita la Tabla 4 pueden resumirse en los siguientes: Existe amplia evidencia de que cambios graduales en ciertas variables de control claves como son: biodiversidad, cosecha, calidad del suelo, flujos de agua dulce y ciclos de nutrientes, pueden disparar abruptamente cambios en el estado de ecosistemas desde locales a regionales (lagos, bosque y arrecifes coralinos, entre otros) cuando los niveles críticos han sido sobrepasados. Por ello se necesita más investigación sobre la dinámica de los valores umbral y la retroalimentación que opera a escalas continentales y globales, especialmente para variables de control lentas tales como uso del suelo y su cubierta, uso del recurso agua, pérdida de biodiversidad y flujo de nutrientes.

Tabla 4. Detalles de los límites planetarios propuestos * Estado del conocimiento respecto a tres factores: 1. Comprensión básica de los procesos del Sistema Tierra. 2. Existencia de conducta umbral. 3. Posición del límite. Fuente: Rokström et al. (2009b).

Procesos del Sistema Tierra	Umbral evitado o influenciado por variables lentas	Estado del conocimiento*
Cambio climático	Pérdida de cubierta de hielo polar Disrupción regional del clima Pérdida de suministro de agua dulce glaciar Debilitamiento de sumideros de carbono	1. Amplia evidencia científica 2. Múltiples umbrales de subsistema. 3. Debate sobre posición del límite
Acidificación de los océanos	Conversión de arrecifes de corales a sistemas dominados por algas. Eliminación regional de alguna biota marina formadora de aragonita y calcita alta en magnesio. Variable lenta afectando el sumidero de carbono marino.	1. Procesos geofísicos bien conocidos. 2. Probabilidad de umbrales. 3. Incertidumbre con posición de los límites debido a respuestas poco claras del ecosistema.
Agotamiento de la capa de ozono	Efectos de la radiación UV-B severos e irreversibles sobre la salud humana y los ecosistemas.	1. Amplia evidencia científica. 2. Umbrales bien establecidos. 3. Posición de los límites implícitamente acordada y respetada.
Carga atmosférica de aerosoles	Disrupción de los sistemas monzónicos. Efectos sobre la salud humana. Interacción con los límites del cambio climático y el agua dulce.	1. Amplia evidencia científica. 2. Conducta de umbral global desconocida. 3. Incapacidad de sugerir límites por ahora.
Flujos biogeoquímicos: Interferencia con ciclos de P y N	P: Evitar un evento oceánico grande (incluyendo regionales), con impactos sobre ecosistemas marinos. N: Variable lenta afectando resiliencia global de ecosistemas vía acidificación de ecosistemas terrestres y eutrofización de sistemas costeros y de agua dulce.	P: (1) Conocimiento limitado sobre respuestas de ecosistemas; (2) Alta probabilidad de umbral, pero el tiempo es muy incierto.; (3) Posición del límite con alta incertidumbre. N: (1) Algunos ecosistemas con respuestas desconocidas; (2) Actúa como una variable lenta, existencia de umbrales globales desconocidos; (3) Posición del límite con alta incertidumbre.
Uso global de agua dulce	Puede afectar patrones regionales climáticos (por ej. Conducta de monzones). Primariamente variable lenta afectando retro-alimentación de humedad, producción de biomasa, consumo de carbón por sistemas terrestres y reducción de la biodiversidad.	1. Evidencia científica de respuesta de un ecosistema, pero incomple-ta y fragmentada. 2. Variable lenta, existe umbral regional o de subsistema. 3. El valor límite propuesto es un agregado global, la distribución espacial determina el umbral regional.
Cambio en sistema suelo	Disparador de conversión irreversible y amplia de la biomasa a un estado indeseable. Primariamente actúa como una variable lenta afectando el almacenamiento de carbono y resiliencia vía cambios en biodiversidad y heterogeneidad del paisaje.	1. Amplia evidencia científica de los impactos del cambio en la cubier-ta de suelo sobre los ecosistemas, en gran parte locales y regionales. 2. Variable lenta, no es probable un umbral global, pero son probables umbrales regionales. 3. El límite es un agregado global con alta incertidumbre, la distri-bución regional del cambio del sistema suelo es crítica.
Pérdida de biodiversidad	Variable lenta afectando el funcionamiento del ecosistema a escalas de cuencas continentales y oceánicas. Impacto de muchos otros límites-almacenamiento de C, agua dulce, ciclos de N y P, sistemas del suelo. Perdida masiva de biodiversidad inaceptables por razones éticas.	1. Conocimiento incompleto del rol de la biodiversidad para el fun-cionamiento de los ecosistemas transversalmente en las escalas. 2. Probabilidad de un umbral a escalas local y regional. 3. Posición del límite con alta incertidumbre.

Tabla 4. Detalles de los límites planetarios propuestos * Estado del conocimiento respecto a tres factores: 1. Comprensión básica de los procesos del Sistema Tierra. 2. Existencia de conducta umbral. 3. Posición del límite. Fuente: Rokström et al. (2009b). (cont.)

Procesos del Sistema Tierra	Umbral evitado o influenciado por variables lentas	Estado del conocimiento*
Polución química	Los umbrales llevan a impactos inaceptables sobre la salud humana y el funcionamiento posible de los ecosistemas, pero mayormente desconocido. Puede actuar como una variable lenta socavando la resiliencia e incrementando el riesgo de cruzar otro umbral.	1. Amplia evidencia científica sobre productos químicos individuales, pero ausencia de análisis a nivel de agregados y globales. 2. Variable lenta, escala de los umbrales mayormente desconocida. 3. Incapaz de sugerir límites por ahora.

* Estado del conocimiento respecto a tres factores: 1. Comprensión básica de los procesos del Sistema Tierra. 2. Existencia de conducta umbral. 3. Posición del límite.

3.3. Cuantificando los límites planetarios. Justificación de los límites propuestos.

La justificación que hizo el equipo de investigadores del Stockholm Resislience Center, para cada uno de los nueves límites planetarios propuestos y su cuantificación cuando fuera posible, se presenta a continuación. Las presentaron en el artículo en extenso publicado en la revista *Ecology and Society* (Rockström et al., 2009b). Estos límites estaban basados en las últimas investigaciones realizadas por científicos eminentes en el mundo. Debe destacarse que ellos especificaron que los límites propuestos aún podían considerarse crudos, que solo eran unos primeros estimados, rodeados de grandes incertidumbres y brechas del conocimiento que requerirían mayores avances en la ciencia del ST y su resiliencia.

En el artículo citado en el párrafo anterior, los investigadores del equipo de Rockström justificaron los límites correspondientes a los procesos del ST propuestos por ellos, a saber: a) cambio climático; b) acidificación de los océanos; c) agotamiento del ozono estratosférico; d) interferencia con los ciclos globales de fósforo y nitrógeno; e) tasa de pérdida de la biodiversidad; f) uso global de agua dulce; g) cambio en el sistema del suelo; h) carga de aerosoles; i) polución química. En las siguientes secciones se presenta en forma resumida la justificación de cada uno de estos límites planetarios investigados por Rockström y su equipo de colaboradores.

3.3.1. Cambio climático: Es un problema de alcances planetarios que ya es una realidad y nos muestra día a día sus efectos negativos en campos tan variados como el incremento de las olas de calor o la elevación del nivel del mar. Lo podemos considerar como una interferencia humana en el sistema climático global. Las pruebas que se acumulan soportando esta realidad son cada vez más contundentes. Según el 6º informe del IPCC (Grupo I), publicado en agosto de 2021, cada una de las últimas cuatro décadas han sido sucesivamente más calientes que alguna década precedente desde los niveles preindustriales (1850). En este 6º informe se afirma, con mucho más énfasis que en informes anteriores, que es inequívoco que por la influencia humana se han producido cambios generalizados y rápidos en la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera (Ferrara-Giner, 2022).

Ya en 2009, en la fecha de aparición de los artículos sobre los LP que hemos expuesto, se podría considerar que las evidencias del origen antropogénico del cambio climático eran bastante concluyentes.

Rockström et al (2009a) basan su planteamiento en dos umbrales críticos que separan cuantitativamente diferentes estados del sistema clima. Son los parámetros concentración atmosférica del dióxido de carbono y forzamiento radiativo (la tasa de cambio de energía por unidad de área del globo medido en el tope de la atmósfera). Su propuesta es que los cambios humanos de la concentración de CO_2 no deben exceder 350 ppm por volumen y el forzamiento radiativo no debe exceder 1 watt/m^2 (vatio/m^2) sobre los niveles preindustriales. Sobrepasar tales límites incrementarán el riesgo de cambios climáticos irreversibles, como la pérdida de glaciares, aceleración de la elevación del nivel del mar y cambios abruptos en sistemas forestales y agrícolas. A la fecha del trabajo del equipo de investigadores del Stockholm Resilience Center ya la concentración de CO_2 estaba en 387 ppm y el cambio en forzamiento radiativo era de 1,5 W/m^2 según datos del IPCC.

La fundamentación de esta propuesta de los límites climáticos para dióxido de carbono y forzamiento radiativo tiene tres vertientes. La primera se refiere a la consideración de que los modelos de clima podían subestimar la severidad de los cambios climáticos de largo plazo para una dada concentración de gases de efecto invernadero, ya que sugieren que doblar la concentración de CO_2 puede elevar 3ºC la

temperatura global (con un rango probable de incertidumbre de 2-4,5ºC) una vez que el clima haya recuperado el equilibrio. No obstante, no están incluyendo procesos de retroalimentación del forzamiento, de largo plazo, como la disminución del área superficial de la cobertura del hielo o cambios en la distribución de la vegetación. Si esa retroalimentación lenta se toma en cuenta, cuando se doblan los niveles de CO_2 se produce un incremento de temperatura de 6ºC (con un rango probable de incertidumbre de 4-8ºC). Tal situación amenazaría los ecosistemas desarrollados en el último ambiente del Cuaternario con posibilidad de desafiar severamente la viabilidad de las sociedades humanas contemporáneas (Rockström et al., 2009b).

Una segunda vertiente es considerar la estabilidad de las grandes capas de hielo polar, conociendo que data paleo-climática de 100 millones de años atrás muestran que las concentraciones de CO_2 fueron un factor mayor en el enfriamiento a largo plazo de los pasados 50 millones de años. Sin embargo, el planeta estuvo largamente libre de hielo hasta que las concentraciones de CO_2 cayeron por debajo de 450 ppm.v (±100 ppm.v) y esto sugiere que hay un umbral crítico entre 350 y 550 ppm. Al escoger como límite 350 ppm, se tiene el propósito de asegurar la existencia continua de las grandes capas de hielo polar (Rockström et al., 2009b).

Como tercera consideración, expresan que están empezando a ver evidencia de que algunos subsistemas de la Tierra están saliendo fuera del estado estable del Holoceno. Tal es el caso de la criosfera, que incluye el rápido retroceso del hielo marino en verano en el Ártico, el retroceso de los glaciares de montaña alrededor del mundo y la pérdida de masa de Groenlandia y de las capas de hielo de la Antártida occidental, adicionalmente se tiene que la tasa de elevación del nivel del mar se está acelerando en los pasados 10-15 años (Rockström et al., 2009b).

3.3.2. Acidificación de los océanos: El hecho de que la concentración de CO_2 en la atmósfera se está incrementando desde la época industrial significa que su concentración en los océanos también se está incrementado, ya que estos absorben una fracción importante de ese CO_2. Los océanos se comportan como un sumidero de carbono en el ciclo biogeoquímico del carbono. Por ello, el equilibrio químico del CO_2 en los océanos, se está desviando. El CO_2 se transforma en

ácido carbónico (H_2CO_3) al disolverse en el agua de mar y su equilibrio es desviado hacia la formación de más hidrogeniones (H+) lo que significa que está disminuyendo el pH de los océanos. Desde la era preindustrial el pH ha disminuido 0,1 unidades de pH, esto es que la concentración de hidrogeniones se ha elevado 30% y la concentración de carbonato ha declinado 16%. Esta tasa de acidificación es al menos 100 veces más rápida que en cualquier otro tiempo en los últimos 20 millones de años (Rockström et al., 2009b).

Muchos organismos marinos secretan carbonato de calcio con lo que forman sus conchas, primariamente en la forma de aragonita (producida por corales, muchos moluscos y otra vida marina) y calcita (producida por plancton y otros grupos). Con la disminución del pH del océano, en forma paralela disminuye la concentración de ión carbonato y resulta en una disminución del estado de saturación con respecto a aragonita o calcita, lo que interfiere en el crecimiento de la concha de los organismos formadores de concha. Esta circunstancia puede tener serios impactos sobre los corales y ecosistemas asociados.

El equipo de investigadores propuso como primer estimado del LP del estado de saturación de la aragonita que se mantenga a 80% o superior del promedio global pre-industrial del agua superficial.

3.3.3. Agotamiento del ozono estratosférico: el adelgazamiento de la capa de ozono, encargada de filtrar la peligrosa radiación ultravioleta del sol, tiene efectos negativos sobre organismos marinos y la salud humana. Este fenómeno se reconoce como un ejemplo de libro de texto de como en forma completamente inesperada, un umbral en el ST está siendo cruzado. Se combinaron la elevación de las concentraciones de sustancias antropogénicas agotadoras del ozono (como clorofluorocarbonos) y nubes polares estratosféricas que se mueven en la estratosfera Antártica en un nuevo régimen.

En este caso, Rockström y sus colaboradores, escogieron enmarcar el límite planetario alrededor del ozono estratosférico extra-polar. Usaron dos razones para ello: la primera, que el hueco de ozono "punto de información privilegiada" depende de las sustancias agotadoras de ozono antropogénicas, pero también de temperaturas suficientemente frías y una cantidad suficiente de vapor de agua y en algunos casos de ácido nítrico. Los humanos contribuyen directamente al primero (y

en alguna extensión al último) de estos factores e indirectamente de otros. La segunda, que mientras el hueco de ozono polar tiene impactos locales, un adelgazamiento de la capa de ozono extra-polar pudiera tener un mayor impacto sobre humanos y ecosistemas.

En el caso de ozono extra-polar estratosférico, global, no hay un umbral claro alrededor del cual construir un límite. Así, la colocación de tal límite, en este caso, es de más incertidumbre que por ejemplo, en el caso de acidificación del océano. Consideraron que el límite planetario para niveles de ozono sea menor que la disminución de 5% en la columna de niveles de ozono para una latitud particular con respecto a valores de 1964-1980 (Rockström et al., 2009b).

Afortunadamente, este caso es un ejemplo positivo donde el esfuerzo humano concertado y decisiones sabias han permitido quedarnos dentro del límite planetario. En efecto, a causa de las acciones tomadas como resultado del Protocolo de Montreal (y sus subsecuentes enmiendas) se tomó una trayectoria que evitó sobrepasar ese límite.

3.3.4 Interferencia con los ciclos globales de fósforo y nitrógeno (Rockström et al., 2009b): A escala planetaria, las cantidades adicionales de nitrógeno y fósforo activadas por los seres humanos son tan grandes, por su uso en la agricultura moderna, que perturban significativamente los ciclos globales naturales de estos elementos.

Alrededor de 120 millones de toneladas por año de N_2 de la atmósfera se convierten en formas reactivas, primariamente fertilizantes para producción de alimentos. Esta cantidad es mayor a los efectos combinados de todos los procesos terrestres del planeta. Una parte importante de este nitrógeno reactivo nuevo finalmente termina contaminando cursos de agua y zonas costeras, acumulándose en sistemas terrestres y añadiendo gases a la atmósfera, como por ejemplo óxido nitroso (N_2O), que es uno de los más importantes gases de efecto invernadero no CO_2 y así se incrementa directamente el forzamiento radiativo.

Los impactos generados por los nutrientes justifican la formulación de límites planetarios para el flujo del nitrógeno y el fósforo que hizo el equipo de investigadores del Stockholm Resilience Center quienes propusieran mantenerlos juntos como un solo límite dado su cercana interacción como nutrientes biológicos clave en encaminar cambios abruptos en varios sub-sistemas del planeta Tierra.

En el caso del ciclo del nitrógeno expusieron que la configuración de un LP para el mismo, causado por modificaciones humanas, no es directa y por ello definieron el límite considerando que la fijación antrópica del N_2 atmosférico era una "válvula" gigantesca que controla un flujo masivo de nitrógeno reactivo nuevo en la Tierra y como una primera conjetura sugirieron que esta válvula debería contener el flujo del N_2 reactivo nuevo a un 25% de su valor en ese momento lo que equivalía a 35 millones de toneladas de nitrógeno por año. Recomendaron, para esta cifra, más investigación y síntesis de información que la sustentara y así poder tener un límite con más información base.

A diferencia del nitrógeno, el fósforo es un mineral fósil que se acumula por procesos geológicos. Para su uso en múltiples áreas, cada año se extrae por minería alrededor de 20 millones de toneladas, de las cuales alrededor de 9 millones de toneladas de P van a los océanos y se estima que este valor es aproximadamente ocho veces la tasa de retorno natural de la afluencia del fósforo. A partir de datos históricos de la Tierra se conoce que cuando el nivel crítico de afluencia del fósforo hacia el océano cruza el valor límite ocurren eventos de anoxia a gran escala en océanos, como ocurrió en el mar Báltico. Esta situación pasada explica extinciones masivas de vida marina. El modelaje sugiere que un incremento sostenido de fósforo fluyendo a los océanos que excediera la línea base natural de meteorización en un 20% fue suficiente para inducir eventos de océanos anóxicos, corroborando los datos históricos (Rockström et al., 2009a). Específicamente, si hubiera un incremento mayor de fósforo fluyendo a los océanos en comparación a niveles preindustriales, estos eventos se hacen más probables en 1.000 años. No obstante, a pesar de las grandes incertidumbres envueltas, las observaciones científicas en ese momento indicaban que no deberían permitirse una afluencia de fósforo a los océanos mayor a 11 millones de toneladas (10 veces la tasa básica natural). Se estimaba que ese nivel límite permitiría a la humanidad dirigirse con seguridad lejos del riesgo de eventos anóxicos por más de 1.000 años, aún, cuando se reconocía que los niveles actuales ya excedían los límites críticos para casos puntuales de estuarios y sistemas de agua dulce.

3.3.5 Tasa de pérdida de la biodiversidad (Rockström et al., 2009b): Aunque la extinción de especies es un proceso natural, en el Holoceno nos enfrentamos a una aceleración de la pérdida de la biodiversidad.

Tal tasa de extinción de las especies no se había visto desde la última extinción global masiva[2], y puede considerarse que es la primera extinción empujada específicamente por los impactos de las actividades humanas en el planeta. Se estimaba para el 2009 que la tasa de extinción de especies era de 100 a 1.000 veces mayor que lo que podría considerarse natural. La tasa de extinción global promedio está proyectada que se incrementará otras 10 veces, llegando a 1.000-10.000 especies/millón de especies-año durante el siglo actual. Al igual que con el cambio climático, las actividades humanas son la principal causa de esta aceleración. El efecto más significante lo ejercen los cambios en el uso de la tierra, incluyendo conversión de ecosistemas naturales en agrícolas o en áreas urbanas; cambios en frecuencia, duración o magnitud de incendios forestales y eventos semejantes; introducción de nuevas especies en ambientes terrestres y de agua dulce.

Hasta recientemente, la mayoría de las extinciones han ocurrido en islas oceánicas, sin embargo, en los últimos 20 años, aproximadamente la mitad de las extinciones registradas han ocurrido en continentes, indicando que la biodiversidad está, ahora, ampliamente en riesgo en todo el planeta.

La pérdida de la biodiversidad, que ocurre desde nivel local hasta regional, puede tener efectos profundos sobre el funcionamiento de los sistemas de la Tierra y además interactúa con varios otros límites planetarios: incrementa la vulnerabilidad de ecosistemas terrestres y acuáticos a cambios en el clima y la acidez de los océanos y reduce los niveles seguros de estos procesos. Hay una comprensión creciente de la importancia de la biodiversidad funcional para mantener la resiliencia de un ecosistema. Las evidencias que las tasas de extinción actuales y proyectadas son insostenibles es cada vez más amplia. Pero es difícil conseguir unos límites para la biodiversidad, aunque se acepta que una mezcla rica en especies fortalece la resiliencia de los ecosistemas, no se tiene mayor conocimiento sobre cuánto y que clase de biodiversidad puede perderse antes de que esa resiliencia se pierda.

Dado que la ciencia no podía proveer tal información a un nivel de agregación, Rockström y su equipo propusieron la tasa de extinción como un indicador alternativo, aunque más débil, asumiendo que la humanidad ya ha entrado profundamente en una zona de peligro donde el cambio indeseado del sistema no puede excluirse si la elevada tasa

actual de extinción (comparada con la extinción de base natural) se mantiene por largos períodos de tiempo. Sugirieron un rango de incertidumbre de 10-100 especies/millón de especies-año y que un límite planetario seguro sería 10 especies/millón de especies-año y admitieron que ese límite relativamente seguro de pérdida de la biodiversidad estaba claramente excedido por al menos uno o dos órdenes de magnitud, lo cual indica la urgente necesidad de reducir radicalmente la tasa de pérdida de la biodiversidad y reconocen que se requiere más investigación para precisar el límite con mayor certidumbre. No obstante, expresan con alguna confidencia que el planeta no puede sostener la tasa actual de pérdida sin una significante degradación de la resiliencia de los ecosistemas.

3.3.6 Uso global de agua dulce: Los humanos son ahora la fuerza de empuje predominante en el ciclo global del agua dulce, alterando el flujo a escala global de los ríos y de los patrones espaciales y estacionales del flujo de vapor.

Las alteraciones globales del ciclo del agua dulce afectan la biodiversidad, seguridad alimentaria y de salud, provisión de hábitats para incorporar peces, secuestro de carbono y regulación del clima, todo ello contribuye a socavar la resiliencia de los ecosistemas terrestres y acuáticos. El deterioro de los recursos globales de agua, amenazan a los medios de vida humana y pueden considerarse de tres tipos:

(i) Pérdida de los recursos húmedos del suelo (agua verde) debido a la degradación de la tierra y deforestación, amenaza de la producción de biomasa terrestre y secuestro de carbono.

(ii) Uso y desvío de volúmenes y patrones de escorrentías (agua azul) que amenazan el suministro de agua y necesidades de la vida acuática.

(iii) Impactos sobre la regulación del clima debido a la declinación de la retroalimentación de la humedad de los flujos de vapor (flujo de agua verde) afectando los patrones de precipitación locales y regionales.

Puede citarse, en el caso de Venezuela, que el río Orinoco en su zona baja, a pesar de usos como la minería, las industrias, actividades agrícolas y la construcción de centrales hidroeléctricas de envergadura (Guri, Macagua, Caruachi y Tocoma), entre otras obras ingenieriles

que han afectado sectores de esta zona, muestra un buen estado de conservación, posiblemente debido al gran caudal (promedio = 37. 600 m^3/s) del río y a la gran amplitud de su planicie de inundación (Mora et al., 2017).

Según los estudios de Rokström y colaboradores (2009b), los estimados de investigaciones recientes indican que se requiere un 90% del flujo global de agua verde para sostener los servicios críticos de los ecosistemas, mientras 20-50% de la media anual del flujo de agua azul en cuencas de ríos son requeridos para sostener los servicios de los ecosistemas acuáticos. Los umbrales del agua a escala continental o planetaria pueden cruzarse como resultado de la agregación de impactos de subsistemas a escalas locales (caso de la cuenca de un río) o regional (caso del sistema de monzones) causados ambos por cambios en el uso de los recursos hídricos y cambios inducidos por cambio climático en el ciclo hidrológico.

El flujo de agua verde influencia a escala regional los niveles de lluvia por la retroalimentación de la humedad y de este modo también la disponibilidad de recursos de agua azul. Los umbrales inducidos de agua verde incluyen el colapso de subsistemas biológicos como un resultado de procesos regionales de secado. Tales son los casos del cambio abrupto de estado estable húmedo a seco en la región del Sahel aproximadamente 5.000-6.000 años antes del presente, o el riesgo futuro de una sabanización rápida de la selva lluviosa del Amazonas por la declinación abrupta de la retroalimentación de la humedad (Rockström et al., 20009b).

Por lo tanto, debe establecerse un límite planetario para los recursos de agua dulce, tal que sostenga el flujo de agua verde para retroalimentar la humedad (para regenerar precipitación), permitir el funcionamiento del aprovisionamiento de ecosistemas terrestres y los servicios ecosistémicos y asegurar la disponibilidad de recursos de agua azul para ecosistemas acuáticos. La cercana interacción entre suelo y agua, y entre flujos de vapor y escorrentía, hace difícil definir un límite apropiado de agua dulce. No obstante, como un primer intento el equipo del *Resilience Center* propone el agotamiento de la escorrentía en la forma de escorrentía consuntiva o uso del agua azul, como un sustituto para capturar la complejidad completa de los umbrales de agua dulce global. Ellos consideraron las evaluaciones de im-

pactos de uso del agua verde y azul, que entre otros considera que hay escasez física de agua cuando las extracciones de agua azul exceden 5.000-6.000 km^3/año y estimaron que transgrediendo un límite aproximado de 4.000 km^3/año de uso consuntivo de agua azul (con una zona de incertidumbre de 4.000-6.000 km^3/año) se incrementará significativamente el riesgo de aproximarse a umbrales inducidos de agua verde y azul. Se estima que el espacio de operación segura para el agua puede estar comprometida para cubrir demandas humanas futuras (Rokström et al., 2009b).

3.3.7 Cambio en el sistema del suelo: siguiendo con la justificación de Rockström y colaboradores para los límites planetarios presentados se presentan los cambios en el sistema suelo, empujados primariamente por la expansión e intensificación agrícola, y que contribuyen a cambios ambientales globales, con el riesgo de socavar el bienestar humano y la sostenibilidad a largo plazo.

En los últimos 40-50 años la conversión de bosques y otros ecosistemas a tierras agrícolas ha ocurrido a una tasa promedio de 0,8%/año. La humanidad puede alcanzar un punto donde la expansión adicional de las tierras agrícolas a escala global puede amenazar seriamente la biodiversidad y socavar las capacidades regulatorias del ST afectando el sistema climático y el ciclo hidrológico.

La propuesta de LP del equipo de Rockström es que no más del 15% de la superficie global de tierra libre de hielo debe ser convertida a tierra de cultivo. Colocando un límite terrestre al suelo en términos de cambios en área cultivada, reconocen las limitaciones que implica esta métrica dado el ajustado acoplamiento con los otros límites de uso de fósforo y nitrógeno, pérdida de la biodiversidad y uso global del agua dulce.

El equipo de Rockström indica que para que la humanidad permanezca dentro de los límites citados, las tierras de cultivo deben localizarse en las áreas más productivas. Por otra parte, aquellos procesos que lleven a la pérdida de tierra productiva, como degradación de la tierra, pérdida de agua de irrigación, competencia con otros usos del suelo como desarrollo urbano o producción de biocombustible, deben ser controlados. También, puede necesitarse que procesos del lado de la demanda sean manejados. Incluye dieta, consumo de alimento per

cápita, tamaño de la población y los desechos en la cadena alimentaria.

Los efectos del cambio del sistema suelo actúan como una variable lenta que influencia otros límites; biodiversidad, agua y clima y ellos pueden servir de detonantes de cambios rápidos a escala continental cuando los umbrales de cobertura del suelo son sobrepasados. Como, por ejemplo, la conversión de la selva nublada del Amazonas en sistemas de cultivo o de pasto para ganado puede llevar a la cuenca a transformarse en una sabana semiárida.

En 2009, en torno al 12% de la superficie global del suelo está bajo cultivo. Se propone que la expansión permitida del suelo cultivado sea un 3% (aproximadamente 400 Mha), un límite del sistema suelo que con probabilidad se alcanzará en las siguientes décadas y que incluye suelo adecuado que actualmente no está cultivado o bajo cubierta boscosa como son tierras de cultivo abandonadas en Europa, Norte América y la antigua Unión Soviética y también algunas áreas de las sabanas de África y el Cerrado brasileño (ecorregión de sabana tropical de Brasil).

3.3.8 Carga de aerosoles: la carga de este complejo componente de la atmósfera que incluye particulados, ozono troposférico, óxidos de azufre y nitrógeno, entre otros, constituye un proceso antropogénico de cambio global con un potencial límite planetario por dos razones:

(i) la influencia de los aerosoles sobre el sistema climático y

(ii) su efecto adverso sobre la salud humana a escala regional y global.

Desde la era pre-industrial, las actividades humanas han duplicado la concentración de la mayoría de los aerosoles, los cuales influyen directamente en el balance de radiación de la Tierra por su efecto de dispersión de la radiación entrante, de vuelta al espacio o indirectamente por su persistencia y la influente reflectividad de las nubes. Además, los aerosoles pueden influir en el ciclo hidrológico al alterar el mecanismo que forma la precipitación en las nubes.

Desde la perspectiva de los efectos sobre la salud humana, un componente de los aerosoles como son las partículas finas ($PM_{2.5}$) es

responsable de aproximadamente un 3% de la mortalidad adulta por enfermedades cardiopulmonares, alrededor de un 5% de la mortalidad por cancer traqueal, branquial y pulmonar y por cerca del 1% de mortalidad por infección respiratoria aguda en niños en las áreas urbanas del mundo. Esto significa alrededor de 800.000 muertes prematuras y una pérdida anual de 6,4 millones de vidas por año. La mortalidad debida a exposición al humo interior por combustibles sólidos es alrededor del doble que por polución urbana del aire (en torno a 1,6 millones de muertes) y la exposición a particulados ocupacionales aerotransportados produce unas 300.000 muertes por año.

Dado que entre los componentes del aerosol se encuentran ozono troposférico, óxidos de azufre y nitrógeno, se tienen otros efectos deletéreos. Daño a los cultivos por la exposición al ozono, degradación de bosques y pérdida de peces de agua dulce debido a las lluvias ácidas, cambios en los patrones de precipitación y en el balance de energía son ejemplos adicionales de efectos indirectos de la polución del aire sobre el bienestar humano.

Es difícil definir un LP de los aerosoles por encima del cual los efectos pueden causar cambios inaceptables. Esto, por su gran complejidad, tanto en términos de la gran variedad de partículas envueltas como por las diferentes fuentes, impactos y dinámicas espaciales y temporales. Adicionalmente, en tanto que los aerosoles han sido claramente ligados con cambios en la circulación de los monzones y con efectos adversos sobre salud humana, los procesos y mecanismos detrás de esas correlaciones aún están por ser completamente explicados. Por todas estas razones, el equipo de investigadores concluyó que aún no es posible identificar un valor límite que sea seguro para la carga de aerosoles (Rockström et al., 2009b).

3.3.9 Polución química: Afecta la salud de humanos y ecosistemas y ya es evidente que lo hace a escala global. Entre los compuestos primarios incluidos en la polución química se tiene a los radiactivos, los metales pesados y un amplio rango de compuestos orgánicos de origen antrópico.

Para el equipo de investigadores liderados por Rockström, la evaluación sobre el por qué la polución química califica como un límite planetario descansa sobre dos aspectos que pueden influenciar el funcionamiento del ST:

(i) a través del impacto global sobre el desarrollo fisiológico y de mográfico de seres humanos y otros organismos con impactos definitivos sobre el funcionamiento y estructura de los ecosistemas; y

(ii) actuando como una variable lenta que afecta otros límites planetarios. Por ejemplo, la polución química puede influenciar el limite de biodiversidad al reducir la abundancia de especies y potencialmente incrementando organismos y vulnerabilidad a otras tensiones como el cambio climático. Aún puede haber conexiones más complejas entre los límites químicos, biodiversidad y cambio climático. Es el caso del cambio climático que puede cambiar la distribución de plagas y esto puede llevar a mayor uso de pesticidas y estarán más ampliamente distribuidos.

El ajuste de un LP para polución química requiere conocimiento de los impactos críticos sobre organismos expuestos a miríadas de químicos y la concentración umbral a la cual esos efectos ocurren. La exposición directa a los químicos en ambiente abiótico -aire, agua o suelo- o a través de bioacumulación o biomagnificación en la cadena alimentaria, puede tener consecuencias deletéreas que pueden llegar a efectos en los predadores ubicados en el tope.

Según estimados actuales de la USEPA (1998) hay 80.000 a 100.000 químicos en el mercado global. Es imposible medir todos los posibles químicos en el ambiente, lo cual hace muy difícil definir un único LP derivado de los efectos agregados de decenas de miles de químicos. Existe alguna data de la toxicidad para unos pocos miles de esos químicos, pero virtualmente no hay conocimiento de sus efectos combinados. Se pueden identificar dos aproximaciones complementarias para definir un LP para la polución química. Una enfocada sobre los contaminantes persistentes y su distribución global y la otra identificando efectos inaceptables de largo plazo y a gran escala de la polución química sobre los organismos vivientes.

La primera aproximación apunta a químicos como el mercurio que son capaces de sufrir transporte de gran alcance vía océanos o dinámica atmosférica e identificar contaminantes que tengan efectos significantes sobre un rango de organismos a escala global y niveles umbrales asociados con esos efectos. La exposición crónica, con bajas dosis de exposición pueden llevar a efectos subletales que impiden el

desarrollo, interrumpen el sistema endocrino, impiden la reproducción o causan mutagénesis. Con frecuencia los organismos más jóvenes son más vulnerables a las exposiciones a un contaminante particular (por ejemplo, la neurotoxicidad del plomo en niños). Los umbrales solo pueden ser identificados para unos pocos químicos o grupos de químicos y para solo unas pocas especies biológicas, tal como un predador del tope de la cadena. Un ejemplo bien conocido es la concentración umbral del DDT que causan un adelgazamiento crítico en la concha de los huevos de pájaros de presa y por ende fallas en la reproducción.

Aunque los mayores esfuerzos para reducir la polución química se han enfocado a escalas locales y regionales, el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes firmado en 2001 y que entró en vigencia en 2004, (PNUMA, 2009) reconoció implícitamente que las concentraciones globales de unos pocos contaminantes orgánicos persistentes (caso de PCB, dioxinas, DDT y otros pesticidas) ya habían cruzado un LP aún no cuantificado. Las prohibiciones impuestas estaban basadas en efectos conocidos y observados de altas concentraciones de esos POPs en algunos predadores en el tope y en poblaciones humanas. Ampliar la aproximación desde unos pocos contaminantes bien estudiados requiere la determinación de los efectos críticos para cada químico o grupo de químicos, lo cual es una tarea gigantesca y puede requerir la identificación de umbrales asociados con mezclas de químicos e igualmente un desafío de enormes proporciones.

El límite enfocado sobre los efectos de la polución química, por otra parte, puede estar basado en la reproducción reducida o en su fallo, déficits neuroconductuales o sistemas inmunes comprometidos, los cuales están unidos a la exposición combinada a muchos químicos. Tal LP pudiera necesitar cubrir efectos subletales sobre las etapas más sensibles de la vida en la mayoría de las especies sensibles y/o humanas, con efectos observables a escala global. Un ejemplo de esta aproximación ha sido revisado basado en el incremento sugerido en desórdenes del neurodesarrollo tales como autismo y déficit de atención y desordenes de hiperactividad/ADHD en niños. La amplia exposición a concentraciones bajas de múltiples químicos con efectos neuro-tóxicos conocidos o sospechados pueden haber creado una pandemia silente de desórdenes subletales del desarrollo neurológico en niños, posiblemente a escala global. De los 80.000 químicos en el comercio, se sabe por experimentos, que 1.000 son neurotóxicos, en

particular 200 a los seres humanos, y cinco (metilmercurio, arsénico, plomo, PCBs, tolueno) se sabe que son tóxicos a los humanos durante su neurodesarrollo.

Finalmente, un límite de polución química puede requerir el ajuste de un rango de sub-límites basado en el efecto de muchos químicos individuales combinados con la identificación de efectos específicos sobre organismos sensibles. Resumiendo, se concluye que aún no es posible definir un límite planetario comprehensivo ni está claro como agregarlos.

3.4 Interacciones entre los límites

También las interacciones entre límites se explicaron con más detalle en el artículo en extenso publicado en *Ecology and Society*, Los LP se han descrito en términos de cantidades individuales y procesos separados, pero no se puede dejar de reconocer que están estrechamente acoplados. No están aislados los unos de los otros. En otras palabras, si un límite es transgredido, entonces los otros límites están en serio riesgo. Es de destacar que las interacciones entre LP pueden empujar el nivel seguro de uno o varios límites, que, provisionalmente se habían colocado bajo una suposición (fuerte) de que ningún otro límite era sobrepasado. Lo que puede parecer como un límite físico, con un umbral claramente definido, puede cambiar de posición cuando una variable de cambio lento tal como la tasa de biodiversidad (de la que no se conoce su umbral global) excede su nivel límite. A nivel agregado, la desecación del suelo debido a la escasez de agua inducida por sobrepasar los límites climáticos puede causar, por ejemplo, una gran pérdida de suelo disponible para propósitos agrícolas tal que los límites del suelo también disminuyen. A escala regional, la deforestación en el Amazonas en un régimen de clima cambiante puede reducir la disponibilidad de los recursos de agua en un sitio tan alejado como el continente asiático, lo que señala la sensibilidad del límite del agua a cambios en los límites del uso del suelo y del cambio climático.

Es conocido que las selvas tropicales son un componente clave de los balances de energía y ciclos hidrológicos tanto regionales como globales. En la cuenca del Amazonas, una cantidad significante del agua de la atmósfera se recicla a través de la vegetación. En adición, la selva produce partículas de aerosol que pueden formar gotas de nubes. La cambiante concentración de partículas influencia el cómo las

nubes producirán lluvia y la fuerza de la circulación convectiva. La deforestación y la quema de biomasa asociada con las prácticas del uso de la tierra han cambiado la convección y precipitación en la cuenca amazónica. Esos cambios en precipitación completan un bucle de retroalimentación, donde la disponibilidad de agua influencia la cantidad y clase de partículas de aerosol que emite la vegetación. Tales procesos, interactuando y empujados por cambios en el uso de la tierra y en el clima, pueden alcanzar un punto de inflexión tal que la selva amazónica podría ser reemplazada por vegetación del tipo de sabana al final del siglo 21.

Otro ejemplo de interacciones entre límites se refiere a que cambios en las condiciones climáticas en la región de Tibet afectan mucho y directamente a los recursos de agua de Asia. Los 15.000 glaciares en la región del Himalaya-Hindu Kush almacenan un estimado de 12.000 km^3 de agua dulce que sirven a un aproximado de 500 millones de personas en la región y adicionalmente 250 millones en China. (Cruz et al., 2007). El deshielo de los glaciares causa inicialmente a corto plazo un incremento en la escorrentía, produciendo un riesgo en inundaciones, desviaciones estacionales en suministro de agua y un incremento en la variabilidad de las precipitaciones. A pesar de que en estos ejemplos no se ha analizado la interacción entre los límites planetarios propuestos, sugieren que muchas de esas interacciones reducirán, en vez de expandir los límites propuestos disminuyendo el espacio de operación seguro para la humanidad.

Es de destacar que los límites planetarios propuestos por Rockström y colaboradores representan una nueva aproximación a definir las precondiciones biofísicas para el desarrollo humano, es decir una cuantificación de los límites seguros fuera de los cuales el ST no podría continuar funcionando de una forma estable como lo hace en el período vigente del Holoceno. Se sugiere la evidencia, hasta el momento, de que mientras los umbrales no sean cruzados la humanidad tiene la libertad de continuar con su desarrollo social y económico de largo plazo.

4. La humanidad ha sobrepasado al menos tres límites planetarios

La figura 2 muestra el intento de Rockström et al. (2009b) de cuantificar la trayectoria temporal de siete de los límites planetarios

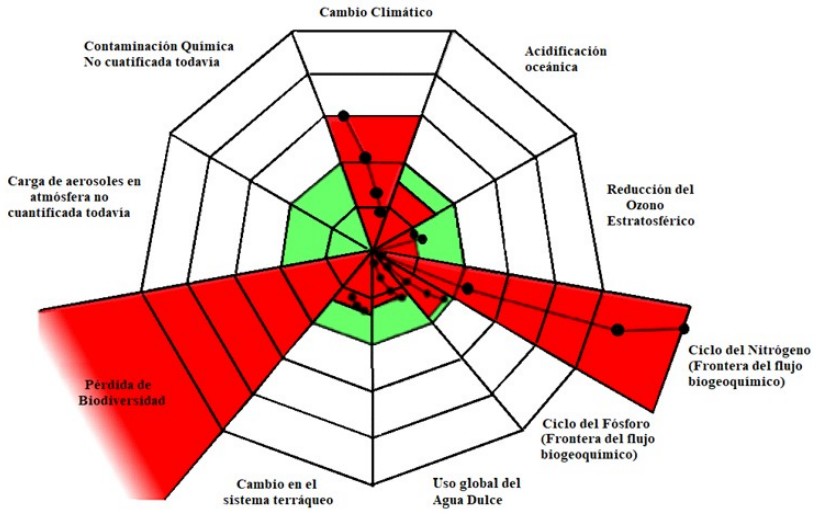


Figura 2. Estimado de la evolución cuantitativa de variables de control para siete límites planetarios desde la era pre-industrial hasta el presente. Fuente: Rockström et al, 2009b.

propuestos desde niveles pre-industriales al presente. La fuente de los datos y su tratamiento se pueden consultar en la referencia *Supplementary Methods* que acompaña a la publicación en *Ecology and Society*. La cuña interna sombreada en verde, en el polígono, representa el espacio seguro de operación con los niveles del límite propuestos para cada uno de los límites planetarios. La extensión de la cuña para cada límite muestra la posición actual estimada de la variable de control (ver tabla 2). Los puntos muestran la trayectoria de tiempo estimada reciente (1950-presente) de cada variable de control. Para pérdida de la biodiversidad, el nivel actual estimado de › 100 extinciones por millón de especies-año, excede el espacio disponible en la figura.

El cambio climático, la acidificación de los océanos, el agotamiento del ozono estratosférico, los cambios en el uso del suelo, el uso del agua dulce y, la interferencia con el ciclo del fósforo tienen límites definidos por el estado de la variable escogida como indicador (concentración de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, estado de saturación de la aragonita, concentración de ozono estratosférico, % de suelo bajo cultivo, cantidad máxima de uso de agua dulce global anual, carga acumulativa de P en océanos, respectivamente). Por otra parte, en el caso de los límites remanentes: Pérdida de la biodiversidad y el

componente del límite del ciclo biogeoquímico relacionado con la interferencia humana con el ciclo del N son definidos por tasas de cambio para cada variable de control respectiva (extinción por millón de especies por año y tasa de N_2 removido de la atmósfera para uso humano).

El crecimiento del uso de fertilizantes en la agricultura moderna desde la década de los 50, ha tenido como resultado que se sobrepase la tasa de interferencia humana del ciclo global del nitrógeno. No hay disponibilidad de datos agregados en largos períodos de tiempo para el límite de biodiversidad, pero, para la definición de límite propuesta, ya se ha excedido bastante. El equipo de investigadores no está sugiriendo que el estado actual de la biodiversidad ha pasado un límite, sino que el mundo no puede sostener la tasa actual de pérdida de especies sin que resulte en un colapso funcional.

Ya en torno a la década de los 80s la humanidad se aproximó al límite climático propuesto de la concentración de CO_2, y desde entonces la tendencia de las concentraciones históricas no muestran signos de bajar. En contraste, la humanidad ha tenido éxito en revertir la tendencia con respecto al límite del ozono estratosférico en los 1990s, como resultado de la firma del Protocolo de Montreal. Como se observa en la Figura 2, el estimado indica que la humanidad se está acercando a un ritmo más acelerado a los límites para uso del agua dulce y cambios en usos del sistema suelo. El límite de acidificación del océano está en riesgo, aunque hay lagunas de los datos de la serie de tiempo para variables seleccionadas del límite, así como información sobre la respuesta de organismos marinos y ecosistemas a la perturbación proyectada del CO_2.

5. Algunas conclusiones del reporte sobre Límites Planetarios de 2009

Como culminación de la presentación de los nueve límites planetarios y sus umbrales, en 2009, puede decirse lo siguiente:

(i) El grupo de investigadores del Stockholm Resilience Center propuso un marco de referencia de nueve LP que definen un espacio seguro para la humanidad con relación al ST y sus procesos biofísicos.

(ii) Bajo la condición de que esos límites no sean sobrepasados por demasiado tiempo, pareciera que la humanidad tiene libertad

para maniobrar en la búsqueda de desarrollo social y económico a largo plazo, dentro de la estabilidad que proporciona la resiliencia observada del ST en el Holoceno.

(iii) Están conscientes de que existen muchas lagunas en el conocimiento científico para implementar un marco a los umbrales de los límites planetarios. No obstante, partiendo de la base del conocimiento actual se sugieren algunos límites planetarios.

(iv) Del análisis preliminar realizado se observa que actualmente se han sobrepasado tres límites, los correspondientes a: cambio climático, tasa de pérdida de la biodiversidad y tasa de interferencia con el ciclo del nitrógeno. Sobrepasar un límite puede, además, amenazar seriamente la habilidad de permanecer dentro de niveles seguros a otros límites, por las interacciones existen tes entre ellos.

(v) Existe una significativa incertidumbre alrededor del lapso en el cual los límites pueden ser sobrepasados antes de causar cambios ambientales inaceptables y antes de que se disparen las retroalimentaciones que pueden resultar en sobrepasar los umbrales que reduzcan drásticamente la habilidad del ST para retornar a niveles seguros. La ciencia debe seguir profundizando en estos hechos para poder operar con seguridad dentro de estos límites.

6. Reacciones de la comunidad científica y tecnológica ante la aparición de los límites planetarios en el escenario mundial en 2009.

La presentación de estos límites ha originado múltiples reacciones en la comunidad científica. Ha estado sujeta a escrutinio científico y diversos sectores bien de la política, gobernanza o el comercio también han sido atraídos por el tema y su análisis y en muchas políticas de sostenibilidad a nivel mundial ha tenido gran influencia. Aunque un importante sector ha aceptado el concepto expresado, otros discuten los umbrales que se propusieron, e incluso, si estamos en condiciones de establecerlos con rigor.

Algunos dudan de la conveniencia de fijar límites porque en aquellos que no fueron sobrepasados, no se verá razón suficiente para cambiar nuestros malos hábitos de conducta en relación con el planeta

(Terradas, 2009). Este autor también opina que estos indicadores, a pesar de que a veces se pretende sacralizar tales números, no son débiles, por cuanto tienen la ventaja de que no son valores agregados y cada uno se refiere a una variable específica e indica el vigor de la propuesta al señalar umbrales en el sistema planetario pasados los cuales pueden producirse cambios abruptos, una afirmación que no es difícil suscribir.

La destacada economista Kate Raworth en su publicación pionera "Economía Rosquilla" (2018) donde rompe con los moldes de la economía convencional que persigue el PIB como como un indicador principal de progreso de las naciones, usa el estudio del *Resilience Stockholm Center* sobre los límites planetarios como la mejor imagen para mantener las condiciones de la Tierra en la época geológica del Holoceno y definir el techo ecológico de su concepto visual, tan novedoso, que denominó "la rosquilla" y que en su espacio interior incluye los elementos básicos de la vida que no deben faltarle a nadie. Ella consideró a los LP estrechamente interconectados con su teoría de la rosquilla que apunta a que la humanidad pueda desarrollarse dentro de un espacio justo y seguro donde todos puedan satisfacer sus necesidades básicas, dentro de los límites biofísicos del planeta.

Attemborough en su última publicación "Una vida en nuestro planeta" (2021) expresa que el ambicioso proyecto de Rockström y sus colaboradores ha transformado la comprensión del funcionamiento del planeta que teníamos hasta ahora, poniendo de manifiesto la existencia de esos nueve umbrales críticos inseparablemente vinculados con el medioambiente, que:

> "*si extremamos nuestras demandas hasta rebasar cualquiera de ellos corremos el riesgo de desestabilizar el sistema de soporte vital, debilitando de manera permanente el entorno natural y aniquilando su capacidad para preservar el entorno benigno y seguro del Holoceno.*" (Attemborough, 2021)

Carpenter y Bennet en 2011, cuestionan que el límite para el fosforo (P) no toma en cuenta la eutrofización del agua dulce. Ellos analizaron el ciclo global del P y sugieren que en regiones de exceso y transferencia de P a regiones deficientes pudieran mitigar la eutrofización, incrementar la producción agrícola y ralentizar o evitar la disminución de P.

Running (2012) expresa que muchas de las métricas usadas para cuantificar los tres sistemas identificados por Rockström et al (2009), como los que excedían sus límites planetarios: cambio climático, tasa de pérdida de la biodiversidad e interferencia humana con el ciclo del nitrógeno, sin embargo, no son fáciles de medir globalmente.

De Vries et al. (2013) son críticos del LP del ciclo del N, argumentando que el límite de N reactivo debe incluir tanto efectos adversos como beneficiosos y la variabilidad espacial de sus impactos. Los ejemplos de aplicaciones muestran que los límites previos sugeridos de límite planetario de 35 Tg/año son demasiado bajos tomando en cuenta la fijación necesaria de N y también la mayoría de impactos ambientales.

7. Revisión y actualización de los límites planetarios en 2015.

Seis años después de la aparición del novel concepto de límites planetarios, el equipo de científicos trabajando en el *Stockholm Resilience Center* publica una actualización de los mismos en la prestigiosa revista Science bajo el título "*Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet.*" (Steffen et al, 2015). En esta publicación se presenta un análisis actualizado y ampliado del marco de los LP producto de la investigación continuada a lo largo de 6 años. Se introduce la idea de una "zona de incertidumbre", para dar cuenta que, dadas las lagunas en la comprensión científica y la variabilidad intrínseca en la dinámica del ST, existen grandes incertidumbres sobre donde debe colocarse el límite. Por ello, los límites se situaron en el extremo inferior de la zona de incertidumbre, sobre la base de la evaluación del equipo de que se estaría seguro si la variable de control se situara por debajo de ese nivel. No entrar en la zona de incertidumbre es lo que se requiere para permanecer dentro del "espacio operativo seguro" del ST.

Es necesario aclarar, para efectos de comprender las nuevas figuras, que ahora los nombres de tres de los procesos clave del ST identificados y utilizados en 2009, han sido cambiados y las nuevas designaciones se presentan a continuación en la Tabla 5.

En este análisis renovado, de los límites planetarios publicados anteriormente en 2009, ahora se ha adelantado el desarrollo de la trama básica de estos límites por:

Tabla 5. Nuevas designaciones para cuatro de los procesos clave del Sistema Tierra

Nombre 2009	Nombre 2015
Pérdida de tasa de la biodiversidad	Cambio en integridad de la biosfera
Flujos biogeoquímicos: (ciclos de P y N)	Flujos biogeoquímicos (Interferencia con ciclos P y N)
Polución química	Introducción de entidades noveles

(i) un enfoque de dos niveles para varios de los límites a tomar en cuenta para heterogeneidad a nivel regional;

(ii) actualizando la mayoría de los límites planetarios;

(iii) identificando dos límites centrales; y

(iv) proponiendo un límite cuantitativo a nivel regional para uno de los dos que no fueron cuantificados anteriormente (Carga de aerosoles atmosféricos). En esta nueva publicación se presenta la actualización de los nueve LP planteados seis años atrás por el mismo equipo de investigadores (Steffen et al., 2015).

Ellos se enfocaron en cinco de los LP que tenían fuertes escalas de operación regionales, a saber: integridad de la biosfera, flujos biogeoquímicos, cambios en el sistema suelo, uso de agua dulce y carga de aerosoles atmosféricos. Es de destacar que sobrepasar alguno de los límites propuestos en el nivel subglobal afecta al ST en el nivel global. Para aquellos procesos donde la dinámica subglobal potencialmente juega un rol crítico en la dinámica global existe el reto operacional de interiorizar la importancia del cambio subglobal para el funcionamiento del ST.

Vale la pena recalcar que las unidades a nivel subglobal para esos cinco límites no son idénticas. Ellas varían de acuerdo al rol que el proceso juegue en el ST, es decir:

(i) los cambios en la integridad de la biosfera ocurren a nivel de biomas basados en el suelo, ecosistemas de agua dulce grandes, o ecosistemas marinos mayores, que son la unidad subglobal más grande;

(ii) el rol de cambio directo impulsado por humanos en sistemas de suelo;

(iii) flujos y usos de agua dulce que ocurren en el nivel subglobal más grande en las cuencas de los principales ríos en el mundo y;

(iv) cambios en flujos biogeoquímicos, ejemplificados por el ciclaje de fósforo y nitrógeno, que son agregados de perturbaciones relativamente localizadas pero muy severas, en zonas de agricultura intensiva que afectan el flujo global de nutrientes. Se reconoce que son regiones críticas para que funcione el ST.

Cuando sea apropiado, las actualizaciones de los límites individuales (Tabla 6) contienen tanto el valor límite del agregado global de la variable de control como su función de distribución regional. En la Figura 3 se muestran las distribuciones y estatus actual de las variables de control para tres de los límites donde la dinámica subglobal anteriormente descrita es crítica: ciclos biogeoquímicos, cambios en el uso del suelo y el uso de agua dulce. Se enfatiza que el foco a nivel subglobal se basa en la necesidad de considerar este nivel para comprender el funcionamiento del ST como un todo. La estructura de los LP es por lo tanto para complemento y no reemplaza los esfuerzos para abordar las cuestiones ambientales locales y regionales.

En cada panel de la Figura 3, a continuación, las áreas verdes están dentro del límite (seguro), áreas amarillas estan dentro de la zona de incertidumbre (riesgo aumentado), y áreas rojas están más allá de la zona de incertidumbre (riesgo alto). Las áreas grises en (A) y (B) son áreas donde los fertilizantes P y N no se aplican; en (C), están aquellas áreas no cubiertas por grandes biomas forestales; y en (D), hay áreas donde el flujo del río es muy bajo y así los flujos ambientales no están asignados.

La actualización de los valores de los LP y sus zonas de incertidumbre se presentan en la Tabla 6, a continuación, que incluye las variables de control y sus valores en 2015, junto con los límites propuestos y las zonas de incertidumbre.

En la Figura 4 se muestra el estado actual de los siete LP que ya han podido cuantificarse a nivel global. La zona verde es el espacio seguro de operación, la amarilla representa la zona de incertidumbre

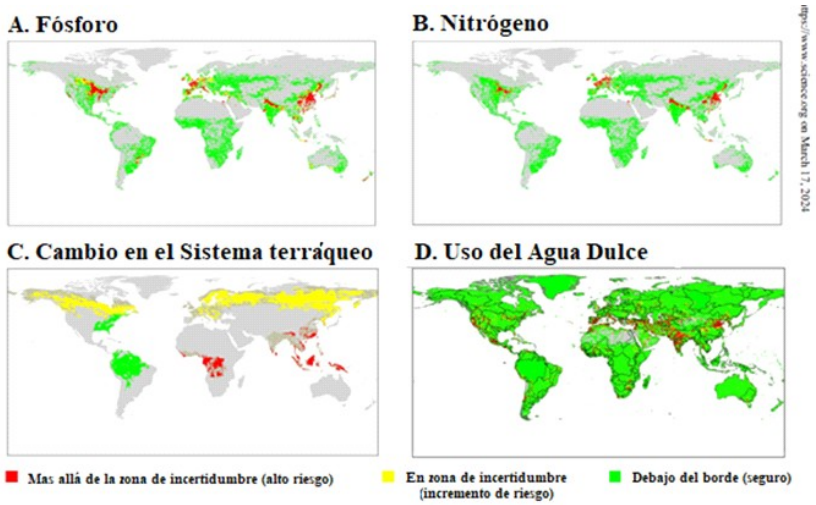


Figura 3. Las distribuciones subglobales y estado corriente de las variables de control para (A) flujos biogeoquímicos de P; (B) flujos biogeoquímicos de N; (C) cambio en sistema suelo; y (D) uso de agua dulce. Fuente: Steffen et al., 2015

(incrementándose riesgo), y la roja es la zona de alto riesgo. El límite planetario mismo yace en la intersección de las zonas verde y amarilla. La variable de control ha sido normalizada para la zona de incertidumbre; el centro de la figura, por lo tanto, no representa valores de cero para las variables de control. Para el cambio climático la variable de control mostrada es la concentración de CO_2 atmosférico. Procesos para los cuales los límites a nivel global no pueden ser cuantificados se presentan por cuñas grises; y son la carga de aerosoles atmosférica, entidades noveles y el rol funcional de la integridad de la biosfera.

8. Justificación de la actualización y la revisión de los Límites Planetarios en 2015

En principio puede decirse que, para cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico y acidificación de los océanos los valores permanecen esencialmente sin cambios con respecto a lo presentado en 2009. Por otra parte, en los casos de los LP para integridad de la biosfera, flujos de ciclos biogeoquímicos, cambios en el uso del suelo y uso del agua dulce, se han desarrollado LP a niveles regionales y agregados globales.

Tabla 6. Actualización de los límites planetarios (2015). Fuente: Steffen et al. 2015

Procesos del Sistema Tierra (ST) identificados y actualizados (2015)	Variable de control propuesta	Límites del planeta (zona de incertidumbre)	Valores actuales de la variable de control
Cambio climático	Concentración de CO_2 atmosférico Desequilibrio energético sup. atm	350 ppm CO_2 (350-450 ppm) + 1.0 $W \cdot m^{-2}$ (+ 1.0 – 1.5 $W \cdot m^{-2}$)	398.5 ppm CO_2 2.3 $W \cdot m^{-2}$ (+ 1.1 – 3.3 $W \cdot m^{-2}$)
Cambios en la integridad de la biosfera	Diversidad genética: tasa de extinción*	< 10 E/MSY E/MSY=nº de especies/ millón de especies al año	100-100 E/MSY
Pérdida de ozono estratosférico	Concentración de O_3 estratosférico, DU	< 5% reducción desde niveles pre-industriales (290 DU; 5 – 10%)	Únicamente transgredido en la Antártida durante la primavera austral (~200 DU)
Flujos biogeoquímicos (interferencias con los ciclos de nitrógeno, N y fósforo, P)	**P global**: flujo de P desde aguas dulces al océano **P regional**: flujo de P desde fertilizantes hasta suelos erosionables **N global**: industrial y fijación biológica del N (intencional)	11 Tg P/ año (11-100 Tg P/ año); 6.2 Tg P/año (6.2 -11.2 Tg P/ año; el límite es global pero la distribución regional es crítica para los impactos) 62 Tg N/ año (62-68 Tg N/ año; la distribución regional es crítica para los impactos)	~ 22 Tg P/ año ~ 14 Tg P/ año ~ 150 Tg N/ año
Acidificación oceánica	Concentración del ion carbonato, estado global de saturación media de aragonito de la superficie marina	≥ 80% del estado de saturación de aragonito pre-industrial media de la sup. marina	~ 84% del estado de saturación de aragonita pre-industrial
Uso del agua dulce	**Global**: cantidad máx. de agua dulce para consumo **Cuenca**: agua dulce retirada como % del caudal mensual medio	**Global:** 4000 km^3/año (4000–6000 km^3/año) **Cuenca:** Meses de bajo caudal: 25% (25–55%); Meses de caudal medio: 30% (30–60%) Meses de caudal alto: 55% (55–85%)	~ 2600 km^3/año
Cambios en los usos del suelo	**Global**: área de tierra forestal como % de cobertura forestal original **Bioma**: área de tierra forestal como % de bosque potencial	**Global:** 75% (75-54%). Valores = media ponderada de los 3 límites de biomas individuales y sus zonas de incertidumbre **Bioma:** Tropical: 85% (85–60%) Temperate: 50% (50–30%) Boreal: 85% (85–60%)	62% ~2.600 km^3/año
Carga de aerosoles atmosféricos	**Global**: Profundidad óptica del aerosol (AOD), gran variación regional **Regional**: AOD como media estacional en una región. (Monzón asiático como caso de estudio)	**Regional**: AOD total antropogénico (absorbido y disperso) en el subcontinente indio: 0,25 (0,25-0,50). Absorbido (calentamiento) AOD menos del 10% del AOD total	0,30 AOD en la región del Sur asiático.
Introducción de entidades noveles/organismos vivos	No establecida	No establecida. Observar el límite del ozono estratosferico como ejemplo de nueva entidad (CFCs)	

El grupo de investigadores del *Stockolm Resiliance Center* justificaron los valores de los LP propuestos en esta revisión de 2015. A continuación, se presentan con más detalle, lo más resaltante de tales explicaciones para cada uno de los 9 procesos.

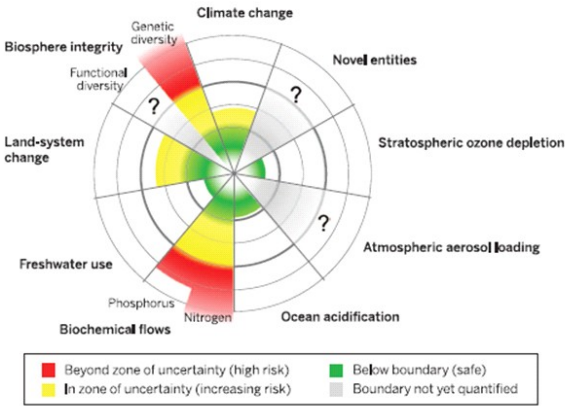


Figura 4. Estatus actual de las variables de control para siete de los límites planetarios Fuente: Steffen et al. 2015.

8.1 Cambio climático: Se mantiene una concentración de 350 ppm para el CO_2 y un incremento de forzamiento radiativo de +1,0 Wm^{-2} relativo a niveles preindustriales. Aunque el CO_2 es importante por su larga vida media en la atmósfera y por las grandes emisiones humanas, el forzamiento radiativo es más inclusivo y fundamental y generalmente es el más riguroso de los dos límites, aunque la relación entre él y el CO_2 puede variar en el tiempo con cambios en la importancia relativa del mismo. Debe considerarse para esta variable de control que los cambios impulsados por acciones humanas incluyen todos los factores antropogénicos: CO_2, otros gases de efecto invernadero y aerosoles.

Se ha acumulado evidencia que sugiere que la zona de incertidumbre de la variable de control CO_2 debe estrecharse desde 350-550 ppm hasta 350-450 ppm CO_2, mientras se mantiene la zona actual de incertidumbre para forzamiento radiativo de +1,0 a 1,5 Wm^{-2} relativas a los niveles preindustriales. Cambios observados en el clima a los niveles actuales de las variables de control confirman la escogencia original de los valores límite y el estrechamiento de la zona de incertidumbre para el CO_2. Es el caso de incremento en intensidad, frecuencia y duración de las ondas de calor globalmente; el número de eventos de lluvia grandes se están incrementado en muchas regiones del mundo; cambios en patrones de la circulación atmosférica han incrementado las sequías en algunas regiones del mundo y se ha

incrementado la tasa de la pérdida de masa combinada de Groenlandia y de las capas de hielo de la Antártida.

8.2 Agotamiento de la capa de ozono estratosférico: Cuando se trata del agotamiento de la capa de ozono estratosférica, se retiene la variable de control original (Concentración de O_3 en unidades Dobson) y un límite de 275 unidades Dobson (UD). Este límite solo es traspasado en la Antártida durante la primavera austral, cuando las concentraciones de ozono caen en torno a 200 UD. Sin embargo, la concentración mínima de O_3 ha permanecido estacionaria por aproximadamente 15 años y se espera que se eleve en las próximas décadas cuando hayan desaparecido por completo las sustancias agotadoras de ozono. Este es un ejemplo significante en el cual, después de sobrepasar un límite regionalmente, la humanidad tomó acciones efectivas para hacer retroceder el proceso.

8.3 Acidificación de los océanos: En este caso, el límite está íntimamente ligado con una de las variables de control del límite planetario cambio climático, el CO_2. La concentración de iones H^+ libres en la superficie del océano se ha incrementado alrededor del 30% en los pasados 200 años debido al incremento del CO_2 atmosférico y esto tiene una influencia inmediata en la química del carbonato en las aguas oceánicas superficiales. En específico, disminuye el estado de saturación de la aragonita (Ω_{arag}), la forma más habitual de carbonato de calcio formado por las especies marinas. Cuando $\Omega_{arag} < 1$, la aragonita se disuelve. No han surgido evidencias nuevas que sugieran que el límite originalmente propuesto ($\geq$ 80% de Ω_{arag} promedio anual global preindustrial) deba ajustarse. Actualmente, Ω_{arag} es aproximadamente igual al 84% del valor preindustrial. Este límite no debería haberse sobrepasado si se hubiera respetado el límite de 350 ppm CO_2 para cambio climático.

8.4 Integridad de la biosfera: En este caso, se propuso una aproximación de dos componentes, para los cambios en el valor de los límites, definiendo dos roles claves de la biosfera en el ST. El primer componente capta el rol del material genéticamente único como un "banco de información" que finalmente determina el potencial para que la vida continúe coevolucionando con el componente abiótico del ST en la forma más resiliente posible. La diversidad genética provee a la biosfera de capacidad para persistir y adaptarse ante cambios abióticos graduales y abruptos. El segundo componente capta el rol de la

biosfera en el ST funcionando a través del valor, rango, distribución y abundancia relativa de las peculiaridades de los organismos presentes en un ecosistema o biota.

Para el primer rol, el concepto de variabilidad filogenética de especies (PSV por sus siglas en inglés) puede ser una variable de control apropiada. No obstante, a causa de que datos globales para PSV no están disponibles, se prefirió retener la tasa de extinción global como una variable transitoria, aunque se mide con imprecisión y con retraso en el tiempo y además puede haber un considerable riesgo en usarla como variable de control, porque la diversidad filogenética puede ser más sensible a presiones humanas que el nivel de diversidad de especies. Como no se conoce la PSV, se vuelve a usar como LP la imperfecta tasa de extinción de organismos, los cuales han sido bien estudiados en los últimos millones de años y alcanza un valor en torno a 1 millón de especies por año, y se decidió añadir un límite, con gran incertidumbre, de 10 millones de especies por año.

La segunda variable de control se refiere a cambios en la integridad de la biosfera que sirve para comprender el rol de esta variable en el funcionamiento del ST y medir las pérdidas de componentes de la biodiversidad a niveles globales, de biomas y ecosistemas grandes. Se propuso una variable de control transitoria: el Índice de Integridad de la Biodiversidad (BII, por sus siglas en inglés) que evalúa, usando como referencia la abundancia en la era preindustrial, los cambios en abundancia de la población como resultado de uso del suelo e impactos humanos sobre el mismo, a través de amplia variabilidad de taxa y grupos funcionales en el bioma o ecosistema. Los rangos típicos del índice van desde 100% (abundancia de todos los grupos funcionales a niveles preindustriales) a niveles más bajos que reflejen la extensión y grado de modificación humana de poblaciones de plantas y animales.

Debido a la ausencia de evidencia sobre las relaciones entre BII y las respuestas del ST, se propone un límite preliminar de 90% del BII pero con un gran rango de incertidumbre (90 a 30%) que refleja las grandes lagunas en nuestro conocimiento sobre relaciones de funcionamiento de BII-Sistema Tierra. BII ha sido aplicado solo a biomas terrestres del sur de África donde el índice (aún no disgregado en grupos funcionales) fue estimado en 84%. En siete países donde se ha aplicado, el BII está en un intervalo de 69 a 91%.

8.5 Flujos de ciclos biogeoquímicos: en este caso, el límite originalmente se formuló para fósforo (P) y nitrógeno (N) solamente. Ahora se propone un LP más genérico que incluya la influencia humana sobre los ciclos biogeoquímicos en general. Aunque el ciclo del carbono está cubierto en los límites del cambio climático, otros elementos tales como silicio, son importantes para el funcionamiento del ST. Además, hay un incremento de evidencias sobre que las proporciones entre elementos en el ambiente puede tener impactos en la biodiversidad en suelo y mar. Por lo tanto, al final se hará necesario desarrollar otros límites planetarios para otros elementos y sus proporciones. No obstante, por el momento solo se enfocaron en P y N.

Ahora se propone una aproximación de dos niveles para el componente P. El límite planetario en el nivel global original (el presentado en 2009) basado en la prevención de un evento anóxico a gran escala en el océano, se mantiene y es un flujo sostenido de 11 Tg P. $año^{-1}$ desde el sistema de agua dulce que va a los océanos. Así mismo, se propone un nivel adicional de P regional proveniente de fertilizantes, que alcanza 6,2 Tg P/año y está diseñado para evitar una eutrofización generalizada de sistemas de agua dulce. La tasa global actual de aplicación de P a cuencas regionales proviene casi toda de fertilizantes, por lo que el límite a nivel regional se aplica primariamente a tierras de cultivo del mundo. Las tasas de aplicación actual de P en fertilizantes a zonas de cultivo es de 14, 2 Tg/año. Hay observaciones que apuntan a unas pocas regiones agrícolas con tasas de aplicación de P muy altas como principales contribuyentes a la transgresión de este límite, como puede observarse en la Figura 3-C que sugiere además que hay una redistribución de P desde áreas con exceso a suelos pobres que aumenta la producción global de cosecha y reduce la transgresión del límite de P, a nivel regional.

El LP para N se ha tomado de un análisis propuesto por de Vries y colaboradores, de 62 Tg N/año para la eutrofización de ecosistemas acuáticos por fijación de N industrial y biológico usando los criterios de calidad del agua más exigentes. Igual que sucede con el límite del P, unas pocas regiones agrícolas con una tasa muy alta de aplicación del N son las principales contribuyentes a la transgresión de este límite (ver Figura 3-B) y sugiere que una redistribución del N puede simultáneamente incrementar la producción global de las cosechas y reducir la trangresión del límite a nivel regional.

8.6 Cambios del sistema suelo: los límites actualizados de integridad de la biosfera proveen una restricción considerable sobre la cantidad y patrones de cambios del sistema suelo en todos los biomas terrestres: selvas, bosques, sabanas, praderas, matorrales, tundra, entre otros. El cambio del LP del sistema suelo ahora está más fuertemente enfocado en una restricción específica: los procesos biogeofísicos en el sistema suelo que regulan directamente clima-intercambio de energía, agua, y el *momentum* entre la superficie del suelo y la atmósfera. La variable de control ha sido cambiada de *la cantidad de tierras de cultivo* a la *cantidad de cobertura de bosque remanente*, puesto que los tres principales biomas forestales: tropical, templado y boreal, juegan un rol más fuerte en el acoplamiento del sistema superficie suelo-clima que otros biomas.

Entre los biomas forestales, los bosques tropicales tienen sustanciales retroalimentaciones al clima a través de cambios en evapotranspiración, cuando ellos se convierten en sistemas desforestados, y cambios en la distribución de bosques boreales afectan el albedo de la superficie del suelo y por tanto el intercambio regional de energía. Ambos tienen fuertes teleconexiones regionales y globales. El límite a nivel de bioma para esos dos tipos de biomas forestales ha sido puesto en 85% (ver Tabla 4) y el límite para los bosques templados ha sido propuesto como 50% de la cubierta potencial forestal, porque los cambios de los bosques templados se estima que tengan influencias más débiles sobre el sistema climático a nivel global que los cambios en los otros dos biomas forestales principales (tropicales y boreales). Debe destacarse que esos límites casi pudieran cumplirse si el límite propuesto de integridad de la biosfera de 90% BII hubiera sido respetado. Estimados del estatus, en 2015, de los cambios del límite del sistema suelo se presentan en las figuras 3 y 4.

8.7 Uso de agua dulce: El límite revisado de uso del agua dulce ha mantenido el uso consuntivo del agua azul (de ríos, lagos, reservorios y las aguas subterráneas renovables) así como la variable de control a nivel global y el valor límite de 4.000 km^3/año. Este LP puede ser mayor o menor dependiendo de los requerimientos de flujo ecológico de los ríos. Por lo tanto, se reporta una nueva evaluación que complementa el LP con uno a escala de cuenca para la tasa máxima de extracción del agua azul a lo largo de los ríos, basado en la cantidad de agua requerida en el sistema río para evitar fluctuaciones en el

régimen de funcionamiento de ecosistemas dependientes del flujo. Los investigadores basaron su variable de control en el concepto de flujo de agua ambiental (EWF por sus siglas en inglés), el cual define el nivel de flujo del río para características hidrológicas diferentes de la cuenca, como adecuadas para mantener un estado del ecosistema de agradable a bueno.

Para calcular el límite a escala de cuenca se usó el método de flujo mensual variable. Que toma en cuenta variabilidad intra-anual clasificando los regímenes mensuales de flujo en alto, intermedio y bajo y localizando el EWF como un porcentaje del flujo mensual medio (MMF por sus siglas en inglés). Con base en este análisis, las zonas de incertidumbre para el límite a escala de cuenca fue de 25 a 55% de MMF para el régimen de flujo bajo, 40 a 70% para el flujo intermedio y 55 a 85% para el régimen de flujo alto. Los límites se colocaron en el extremo más bajo del rango de incertidumbre que abarca el promedio mensual EWF.

En las figuras 3 y 4 se muestran los nuevos estimados del estatus actual del límite de uso de agua dulce con estimados de extracción de aguas agrícolas, industriales y domésticos,

8.8 Carga de aerosoles atmosféricos: Se sabe que los aerosoles tienen efectos serios sobre salud humana, produciendo en torno a 7,2 millones de muertes por año. Ellos también afectan el funcionamiento del ST en muchas formas. Aquí, el enfoque se hace en el efecto del aerosol sobre la circulación regional océano-atmósfera. Se adoptó la profundidad óptica del aerosol (AOD por sus siglas en inglés) como la variable de control y se usó el monzón del sur de Asia como un caso de estudio, basado en el potencial de una amplia carga de aerosol sobre el subcontinente Indio que cambia el sistema monzónico a un estado seco. Solo pudo establecerse un límite regional, para los monzones del sur de Asia.

El valor basal AOD del sur de Asia es alrededor de 0,15 y puede ser tan alto como 0,40 durante eventos volcánicos. Emisiones de negro humo y carbón orgánico por cocinar y calentar con biocombustibles y por usar diesel para transporte y emisiones de sulfatos y nitratos de la combustión de combustibles fósiles, pueden incrementar la media de AOD estacional a un valor tan alto como 0,4 (mayor durante períodos volcánicos), llevando a disminuciones de 10 a 15% de la radiación

solar incidente en la superficie. Una sustancial disminución en actividad monzónica está alrededor de un AOD de 0,50 y un incremento de 0,35 sobre los niveles basales. Tomando con precaución una aproximación hacia las incertidumbres que rodean la posición del punto de inflexión, los investigadores propusieron un límite de AOD de 0,25 (un incremento por actividades humanas de 0,1), con una zona de incertidumbre de 0,25 a 0,50. La media anual de AOD actualmente es aproximadamente 0,3, dentro de la zona de incertidumbre.

8.9 Introducción de entidades noveles: No se pudo identificar un solo límite planetario para entidades noveles (referidas como nuevas sustancias, nuevas formas de sustancias existentes y formas de vida modificadas que tengan el potencial para efectos geofísicos y/o biológicos no deseados). No obstante están incluidos en el marco de los límites planetarios dado su potencial para cambiar el estado del ST.

La introducción antropogénica de entidades noveles al ambiente es preocupante a nivel global cuando esas entidades exhiben:

(i) presistencia,

(ii) movilidad con una consecuente amplia distribución e

(iii) impactos potenciales sobre procesos vitales del ST o subsistemas.

Esto incluye potencialmente a sustancias químicas y otros nuevos tipos de materiales ingenieriles u organismos no conocidos previamente (provenientes de otras latitudes o producidos genéticamente), así como elementos que ocurren naturalmente (por ejemplo, metales pesados) movilizados por actividades antrópicas. Los riesgos asociados con la introducción de entidades noveles en el ST están ejemplificados con la liberación de CFCs (clorofluorocarbonos), los cuales son químicos sintéticos muy útiles, que inicialmente se pensaron no eran dañinos, pero tuvieron un dramático e inesperado impacto sobre la capa de ozono estratosférico, y la introducción de especies exóticas en ambientes naturales (caso del conejo en Australia).

Hoy en día existen más de 100.000 sustancias en el comercio global. Si se agregan los nano- materiales y los polímeros plásticos que se degradan a microplásticos la lista sería aún más larga. Hay una "intensificación química" debido al rápido incremento de la producción

y distribución global de sustancias químicas, y el extensivo comercio global en desechos químicos.

En años recientes, ha habido un gran debate sobre los efectos a escala global de la polución química. Hay investigadores que propusieron que se requiere llenar tres condiciones para que un químico sea una amenaza al ST:

(i) la sustancia tenga un efecto disruptivo desconocido sobre proce sos vitales del ST;

(ii) el efecto disruptivo no sea descubierto hasta que es un proble ma a escala global; y

(iii) el efecto no es reversible.

El reto a la comunidad de investigadores es desarrollar el conocimiento básico que permita cribar los químicos antes que sean dispersados en el ambiente, con propiedades que los inclinen a ser un problema global.

No existe actualmente, un análisis de polución química a nivel agregado global sobre el cual basar una variable de control o un valor límite. Hay poca oportunidad para definir valores límites y variables de control para un límite planetario de esta complejidad. No obstante, hay una amenaza potencial de las entidades noveles de disrumpir el funcionamiento del ST y la sociedad necesita aprender como mitigar esos riesgos desconocidos y manejar los químicos bajo incertidumbre.

9. Jerarquía de los límites

Al analizar las muchas interacciones entre los límites, se observa que dos de ellos -cambio climático e integridad de la biosfera- están fuertemente integrados y conectados a los otros LP. Han operado a nivel del ST completo y han coevolucionado por aproximadamente 4. 000 millones de años, regulados por los otros límites. Adicionalmente, grandes cambios en el clima o integridad de la biosfera, pudieran, empujar al ST fuera del estable estado del Holoceno. De hecho, transiciones entre períodos de tiempo en la historia geológica de la Tierra frecuentemente han sido delineados por cambios sustanciales en el clima, la biosfera, o ambos.

Tales observaciones sugieren que cambio climático e integridad de la biosfera, se reconocen como el “corazón” de los límites planetarios, a través de lo cual operan los otros sistemas. El sistema climático es

una manifestación de la cantidad, la distribución y el balance neto de energía en la superficie del planeta. En tanto que la biosfera regula los flujos de materiales y energía en el ST e incrementa su resiliencia frente a cambios abruptos y también graduales. En el clima actual de la Tierra, el rango de temperaturas superficiales globales y la presión atmosférica permite la presencia simultánea de las tres fases del agua, con el hielo y el vapor de agua jugando un rol crítico en las retroalimentaciones físicas del sistema clima.

La distribución de energía por latitud, sobre la superficie terrestre y oceánica, juega un papel relevante en la circulación de los dos grandes fluidos, el océano y la atmósfera., determinando la clave de la distribución espacial de la biota y la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, controlando además los flujos biogeoquímicos. La integridad de la biosfera también es crucial para el funcionamiento del ST, definiendo la biosfera como la totalidad de todos los ecosistemas sobre la Tierra y su biota, los cuales tienen un rol crítico en la determinación del estado del ST y en regular sus flujos de materiales y energía y sus respuestas a cambios graduales y abruptos. La diversidad en la biosfera, por otra parte, provee resiliencia a los ecosistemas terrestres y marinos y no solo interactúa con los otros LP sino que también incrementa la capacidad del ST para persistir en condiciones de cambios en esos otros límites. La base última de los muchos roles que juega la biosfera en la dinámica del ST es el código genético de la biota, el banco de información básica que define el rol funcional de la biosfera y su capacidad para innovar y persistir en el futuro.

10. Nueva revisión de los límites planetarios (2023)

En septiembre 2023 se publicó un nuevo artículo (Richardson et al. 2023) que nos da a conocer la revisión actualizada de los LP, que el grupo de investigadores del *Stockholm Resiliance Center* ha seguido estudiando desde su revisión de 2015. Rockström y Steffen, quienes lideraron la primera publicación sobre el concepto de los LP, forman parte también del grupo de científicos que presenta este estudio.

Se presentan avances de diferentes campos de la ciencia para actualizar el marco y el estatus de los límites. Por primera vez se han propuesto límites para todos los nueve procesos propuestos originalmente. La actualización de los límites de la integridad funcional de la biosfera y la carga de aerosoles se basan en análisis presentados aquí,

así como análisis recientes forman la base de la actualización de los límites de cambios en agua dulce y entidades noveles. La importancia de considerarlos impactos humanos sobre los componentes del ambiente global en el contexto de sistema se ilustra usando un ejercicio de modelización explorando varios escenarios de transgresión del sistema (representando la biosfera) y los límites del cambio climático se combinan para afectar las características del ST.

En esta oportunidad, la actualización de los LP nos muestra que seis de los nueve límites evaluados son transgredidos y sugieren que la Tierra ahora está muy afuera del espacio seguro para la humanidad. La acidificación de los océanos está muy cerca de ser violada, mientras que la carga de aerosoles regionales excede los límites. Los niveles de ozono estratosférico se han recuperado levemente. Para el caso de los niveles de procesos que en años anteriores se habían identificado como sobrepasados: cambio climático, cambios en el sistema suelo, flujo de ciclos biogeoquímicos e integridad de la biosfera los niveles de transgresión se han incrementado. Se propone como variable de control para la integridad funcional de la biosfera a la apropiación humana de la producción primaria neta (PPN), por cuanto esta impulsa las funciones del ST y cabe decir que también este límite ha sido transgredido. Por otra parte el modelaje del ST de los diferentes niveles de la transgresión de los límites del clima y cambios en el sistema suelo ilustra que los impactos antropogénicos de dicho ST deben considerarse en un contexto sistémico.

En efecto, las perturbaciones del ambiente global de origen antrópico que anteriormente se abordaban como problemas separados, caso del cambio climático, pérdida de la biodiversidad o polución, ignorando las interacciones no lineales entre ellas, ahora deben considerar el estado del ST como un todo.

En la Figura 5 presentada en la revisión de 2023 (Richardson et al., 2023) pueden observarse que seis de los nueve límites propuestos han sido sobrepasados y la acidificación de los océanos se está acercando peligrosamente. La zona verde es el espacio de operación segura (debajo de los límites). La zona amarilla a roja representa la zona de incremento del riesgo. La zona púrpura indica la zona de alto riesgo donde las condiciones del sistema Tierra interglacial son transgredidas con alta confidencia. Los valores para las variables de

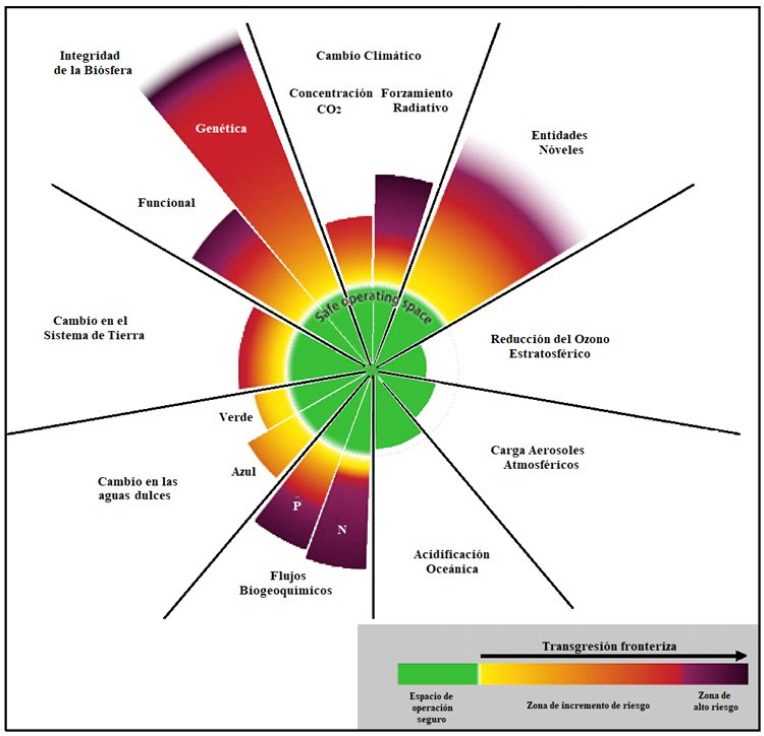


Figura 5. Estado de las variables de control para todos los nueve límites planetarios en 2023**.** Fuente: Richardson et al., 2023.

control están normalizadas así que el origen representa las condiciones promedio del Holoceno y los límites planetarios (extremo más bajo de la zona de incremento de riesgo, circulo punteado) yacen en el mismo radio para todos los límites (excepto para las cuñas representando agua verde y azul, ver texto principal). La longitud de las cuñas están escaladas logarítmicamente. Las esquinas superiores de las cuñas para las entidades noveles y el componente de diversidad genética de los límites de integridad de la biosfera están borrosas porque el extremo superior de la zona de incremento de riesgo no ha sido aún cuantitativamente definida (entidades noveles) o porque el valor actual es conocido solo con gran incertidumbre (pérdida de diversidad genética). Ambos, sin embargo, están bien fuera del espacio de operación seguro. La transgresión de esos límites refleja una disrupción humana sobre el ST sin precedentes pero está asociada con grandes incertidumbres científicas.

Los nueve límites planetarios representan las variables relevantes para el estado global de la Tierra y que son afectados criticamente por las actividades antropogénicas. Las variables de control escogidas para cada uno de los LP son las que con mayor fuerza atrapan la influencia humana a nivel planetario. Por ejemplo, para los cambios en el sistema suelo se adoptó como variable de control la reducción global del área forestal.

El equipo de investigadores del Stockholm Resilience Center, liderados ahora por K. Richardson, usa actualmente en lugar de la "zona de incertidumbre" a la zona de incremento de riesgo del ST para evaluar el estado de los límites sobrepasados. Se refuerza la racionalidad de usar el principio de precaución para colocar los LP en el extremo más bajo de la zona de incremento de riesgo.

Así, por ejemplo, para el LP del cambio climático, ellos retienen 350 ppm de CO_2 en la zona de incremento de riesgo entre 350 y 400 ppm antes de alcanzar alto riesgo. Estos números corresponden al rango de elevación de la temperatura superficial global promedio de 1ºC a 2ºC (asumiendo escenarios principales de no forzamiento del CO_2). La precaución coloca el LP en el comienzo del incremento de riesgo (350 ppm *circa* 1ºC), o sea ligeramente debajo de la meta de 1,5ºC identificado en el Acuerdo de París, que la ciencia ha demostrado que está asociado con riesgo sustancial de disparar grandes cambios irreversibles.

Reconociendo la capacidad de resiliencia del ST, el equipo de investigación nunca le ha colocado a la mayoría de los límites valores superiores a los observados durante el Holoceno hasta la Revolución Industrial (para CO_2 *circa* 280 ppm). La estabilidad y el rango de variabilidad de las características del estado interglacial del ST en el Pleistoceno y la modelización del sistema sugiere que este podría permanecer estable, si todos los límites fueran respetados.

La distinción entre zonas de "incremento" y de "alto" riesgo no pueden definirse sostenidamente. Hay evidencia acumulada de que el nivel actual de transgresión de los límites ha llevado al ST más allá de una zona segura. Por ello se ha adoptado representar la transición gradual de riesgo moderado (amarillo) a alto (rojo) a muy alto (púrpura) usando la aproximación "brasas ardientes" introducida por el IPCC.

Desde la anterior actualización del marco de los LP (Steffens et al., 2015), se han hecho algunos progresos a pesar de que cuantificar las interacciones entre límites siguen siendo un gran reto. Estudios recientes han mostrado que transgresiones adicionales o más extensivas de un LP puede cambiar los gradientes de riesgo de otros límites. Por ejemplo, hay cada vez mayor evidencia que sugiere que transgredir los límites del cambio climático o bien de la integridad de la biosfera puede llevar potencialmente a un incremento brusco de riesgo en el otro.

Ante la actual ausencia de un modelo comprehensivo del ST que incorpore completamente las interacciones entre todos los componentes de las esferas, el grupo de investigadores exploró como se combinan varios escenarios de transgresiones de los límites del sistema suelo (representando a la biosfera) y el cambio climático para controlar biológicamente el almacenamiento de carbono a nivel planetario.

11. Detalle de los resultados obtenidos para los nueve procesos del sistema Tierra. Revisión 2023

A continuación, en esta sección se presentan ciertos detalles de interés para los nueve procesos del ST que el grupo de investigadores del *Stockholm Resiliance Center* consideró de relevancia para la actualización de 2023.

11.1 Integridad de la biosfera

Se toma en cuenta las interacciones entre la biosfera y la geosfera. El funcionamiento planetario de la biosfera descansa definitivamente en su diversidad genética proveniente de la selección natural tanto en su dinámica histórica de coevolución con la geosfera, pero también en su rol funcional regulatorio del estado del ST.

Se mantiene el nivel límite de <10 E/MSY (extinciones por millón de especies-año) definido por Rockström et al. (2009b). Aunque la línea base de la tasa de extinción (y de evolución de nuevas especies) es muy variable y difícil de cuantificar con confidencia a través del tiempo geológico, la tasa actual de extinción de especies está estimada en al menos de 10 a 100 veces superior que la tasa promedio sobre los pasados 100 millones de años y se está acelerando. Conservadoramente se ha adoptado un valor actual para la tasa de extinción >100 E/MSY. De un estimado de 8 millones de especies de plantas y

animales, alrededor de 1 millón están amenazadas con extinción y sobre 10% de la diversidad genética se ha perdido en los últimos 150 años. Así, el componente genético de la integridad de la biosfera esta marcadamente excedido (Figura 5 y Tabla 7).

En el trabajo previo de Steffens et al. (2015) se propuso usar el Índice de Integridad de la Biodiversidad (BII por sus siglas en inglés), una métrica empirica basada en los impactos humanos sobre la abundancia de la población, como un sustituto provisional para la integridad de la biosfera funcional. Se ha notado que el vínculo de BII con las funciones del ST están pobremente comprendidas y BII no puede ser directamente unido a los flujos planetarios biogeoquímicos y de energía relevantes para establecer el estado del ST. En la actualidad se reemplazó esta métrica con un sustituto computable para energía fotosintética y flujo de materiales en la biosfera, esto es, producción primaria neta (NPP, por sus siglas en inglés), y así se define el componente funcional del límite de la integridad de la biosfera como un límite a la apropiación humana del NPP de la biosfera (HANPP, por sus siglas en inglés) como una fracción de su NPP en el Holoceno.

El índice NPP es fundamental para ecosistemas y sociedades humanas como soporte de su mantenimiento, reproducción, diferenciación, trabajo en redes y crecimiento. Los biomas dependen del flujo de energía asociado con NPP para mantener sus funciones ecológicas planetarias como parte integral del ST. El grupo de investigación determinó el NPP de la biosfera terrestre en el Holoceno en 55,9 Gt de C $año^{-1}$. En 2020, el NPP potencial natural pudo elevarse a 71,4 Gt de C $año^{-1}$ por la fertilización con carbono, una respuesta de la fisiología de plantas terrestres al incremento antropogénico de la concentración de CO_2 en la atmósfera, donde el NPP actual fue 65,8 Gt de C $año^{-1}$ debido al efecto reductor de NPP del uso global del suelo.

Richardson et al. plantean que para desarrollar fundamentos más profundos para los LP de la integridad de la biosfera basados en HANPP, se necesita mejorar la comprensión de como la dinámica ecológica genera las funciones de la biosfera en el ST.

11.2. Cambio climático

Las variables de control de cambio climático y los niveles de los límites se mantienen con respecto a las actualizaciones anteriores. Los

Tabla 7. Resumen del estado actual de los límites planetarios (2023)

Procesos del Sistema Tierra	Variable(s) de control	Límite planetario	Valor base del Holoceno preindustrial	Extremo superior en la zona de incremento de riesgo	Valor actual de la variable de control
Cambio climático	Concentración atmosférica de CO_2 (ppm de CO_2) Forzamiento radiativo total antropogénico en el tope de la atmósfera	350 ppm CO_2 +1,0 W m^{-2}	280 ppm 0 W m^{-2}	450 ppm CO_2 +1,5 W m^{-2}	417ppm CO_2 2,91 W m^{-2}
Cambio en la integridad de la biosfera	Diversidad genética: E/MSY Integridad funcional: medida como energía disponible para ecosistemas (NPP) (% HANPP)	<10 E/MSY HANPP (en billón t de C $año^{-1}$ <10% de NPP Holoceno, preindustrial de función biosfera	<1 E/MSY	<100 E/MSY 1,9% (2σ de la variabilidad media de NPP en siglo preindustrial del Holoceno)	>100 /MSY 30% HANPP
Agotamiento de ozono estratosférico	Concentración de O_3 Estratosférico (promedio global) (UD)	<5% reducción de nivel preindustrial evaluado por latitud (~276 UD)	290 UD	261 UD	284,6 UD
Acidificación de océanos	Concentración de ión carbonato, estado de saturación con respecto a aragonita: Ωarag de la media global superficial del océano	≥80% Ωarag Con respecto a promedio preindustrial	3,44 Ωarag	2,75 Ωarag	2,8 Ωarag
Flujos biogeoquímicos: ciclos P y N	Fosfato *global*: flujo de P del sistema agua dulce hacia el océano; *Regional:* flujo de P de fertilizantes a suelos erosionables (Tg de P $año^{-1}$) Nitrogeno *global:* fijación industrial e intencional de N (Tg de N $año^{-1}$)	Fosfato *global*: 11 Tg de P $año^{-1}$; *regional*: 6,2 Tg de P $año^{-1}$ minado y aplicado a suelos (agrícolas) erosionables: 6.2 Tg de P. Nitrogeno *global:* 62 Tg $año^{-1}$.	0 Tg de P $año^{-1}$ 0 Tg N $año^{-1}$	*Global:* 100 Tg de P $año^{-1}$; *Regional*: 11,2 Tg de P $año^{-1}$ 80 Tg N $año^{-1}$	*Global*: 22.6 Tg de P $año^{-1}$; R*egional*: 17,5 Tg de P $año^{-1}$ 190 Tg N $año^{-1}$
Cambio en el sistema suelo	*Global*: área de suelo forestado como porcentaje de la cubierta forestal original; *biome*: área de suelo forestado como porcentaje del potencial forestal (% área remanente)	*Global: 75%* de los valores son promedio ponderado de los tres límites individuales de *biomas:* tropical, 85%; templado, 50%; boreal, 85%	100 %	*Global:* 54%; *biomas*: tropical, 60%; templado, 30%; boreal, 60%	*Global*: 60%
Cambio de agua dulce	Agua azul: disturbios inducidos por humanos de flujos de agua azul. Agua verde: disturbios inducidos por humanos de agua disponible para las plantas	Límite superior (percentil 95%) del área global suelo con desviaciones mayores que durante preindustrial, agua azul: 10,2% Agua verde: 11,1 %	9.4% (mediana de las condiciones preindustriales). 9,8% (mediana de condiciones preindustriales)	50% (provisional) 50% (provisional)	18,2 % 15,8%

Tabla 7. Resumen del estado actual de los límites planetarios (2023) (cont.)

Procesos del Sistema Tierra	Variable(s) de control	Límite planetario	Valor base del Holoceno preindustrial	Extremo superior en la zona de incremento de riesgo	Valor actual de la variable de control
Carga de aerosoles atmosféricos	Diferencia Interhemisférica en AOD	0,1 (media anual de la diferencia interhemisférica)	0,03	0,25	0,076
Entidades noveles	Porcentaje de químicos sintéticos descargados al ambiente sin prueba de seguridad adecuada	**0**	0	No aplica	Transgredido

Fuente: Richardson et al, 2023

disparadores más importantes de impactos antropogénicos sobre el balance de energía de la Tierra son las emisiones de gases de efecto invernadero y los aerosoles, y los cambios en la superficie del albedo. Las variables de control en el marco son las concentraciones de CO_2 atmosférico promedio anuales y el cambio en el forzamiento radiativo. Así el LP para la concentración de CO_2 se coloca a 350 ppm y para el forzamiento radiativo es 2,91 $W.m^{-2}$ (estimados de 2022 respecto a 1750), y actualmente la concentración de CO_2 atmosférico es 417 ppm. Esto significa que en 2023 los LP, para ambas variables, están más alejado del espacio seguro de operación que en la última actualización en 2015. El límite de 350 ppm pudiera llevar a un nivel más bajo de calentamiento global antropogénico que lo fijado en el Acuerdo de París con una meta de 1,5ºC de aumento y esto es consistente con estudios recientes que sugieren la posibilidad de impactos extremos en el ST aún con un calentamiento de 1,5ºC, con marcado incremento de los riesgos sobre 1ºC de calentamiento.

11.3. Entidades noveles

La definición de este límite ahora está restringido a la introducción de verdaderas entidades noveles antropogénicas en el ST total. Esto incluye químicos sintéticos y sustancias (por ejemplo, microplásticos, disruptores endocrinos y contaminantes orgánicos); materiales radiactivos movilizados antropogenicamente, incluyendo desechos y armas nucleares; y modificaciones humanas por la evolución, organismos geneticamente modificados y otras intervenciones humanas directas en procesos evolutivos.

El grupo investigador afirma que las entidades noveles sirven como un marcador geológico del Antropoceno, período geológico aún no reconocido por la Comisión Internacional de Estratigrafía dependiente de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, pero que el grupo ha asumido. Sin embargo, sus impactos sobre el ST como un todo permanecen sin estudiar. El marco de los LP solo concierne con la estabilidad y resiliencia del ST, esto es, no sobre salud humana o la de los ecosistemas. Por lo tanto, permanece el reto científico de evaluar cuanta carga de entidades noveles tolera el ST antes de un desvío irreversible hacia un estado potencialmente menos habitable.

Cientos de miles de sustancias químicas sintéticas se producen actualmente y se descargan en el ambiente. En muchos casos, los efectos potenciales persistentes de su introducción sobre el ST no se conocen, en particular sobre la integridad funcional de la biosfera y su uso no está regulado. La humanidad ha sido sorprendida en repetidas oportunidades por consecuencias no esperadas de tales descargas, por ejemplo, el conocido caso de pesticidas como el DDT y el efecto de los clorofluorocarbonos (CFCs) sobre la capa de ozono. Para estos tipos de entidades noveles, el único espacio seguro de operación que puede mantener condiciones como las del Holoceno es aquel donde esas entidades estén ausentes a menos que su impacto potencial con respecto al ST haya sido minuciosamente evaluado. Esto implica que el LP cuantificado de un compuesto químico sintético debería tener descarga cero al ambiente abierto a menos que haya sido certificado como no dañino y sea monitoreado. Esta es la meta que el Protocolo de Montreal puso con respecto a las sustancias que habían mostrado ser dañinas por su contribución al agotamiento de la capa de ozono.

El equipo investigador adoptó la métrica para las entidades noveles que salió del análisis de varias estrategias para establecer un LP, partiendo de las investigaciones de Persson y sus colaboradores (2022) que identificaron como una variable de control, el compartir las descargas de los compuestos químicos con evaluaciones adecuadas de seguridad y monitoreo. El LP adoptado es descarga cero al ST de los sintéticos no comprobados. Cuando los sintéticos descargados al ambiente son comprobados minuciosamente el consiguiente riesgo de efectos dañinos disminuye. Pero esta aproximación tiene una debilidad, la data disponible es incompleta; los estudios de seguridad frecuentemente se enfocan sobre una estrecha banda de toxicidad y no captu-

ran los "efectos cocktail" de mezclas químicas en el ambiente ni sus efectos a condiciones específicas.

El porcentaje de sintéticos descargados globalmente sin pruebas se desconoce. Existen estimados de que 80% de los químicos actualmente registrados oficialmente se han usado por al menos 10 años sin sufrir alguna evaluación de seguridad. Así mismos, pocos estudios de seguridad consideran los efectos potenciales sobre el ST.

Con tal enorme porcentaje de químicos no testados descargados al ambiente, un límite definido de esta manera para entidades noveles está claramente violado. Persson y sus colaboradores no identificaron o cuantificaron un LP singular para entidades noveles, pero, sin embargo, también concluyeron que el espacio seguro de operación actualmente está sobrepasado.

11.4. Agotamiento de la capa de ozono estratosférico

El límite para el espacio seguro de operación se colocó en 276 Unidades Dobson (UD), o sea permitiendo una reducción menor al 5% del nivel preindustrial de 290 UD, según latitud. Al seguir con la ratificación del Protocolo de Montreal en 1987, la tendencia y extensión global del agotamiento de ozono se ha recuperado ligeramente. El estimado global actual (2020) es 284 UD. La perturbación humana sobre el ozono estratosférico ha disminuido y ahora está en el espacio seguro de operación. Actualmente solo en el Antártico y altas latitudes al sur y en los tres meses de la primavera austral los límites para agotamiento de ozono son transgredidos.

11.5. Cambios del agua dulce

Este límite se revisó en forma comprehensiva para considerar los cambios a través del ciclo entero del agua sobre el suelo. Se usó una corriente como sustituto del agua azul (superficial y subterránea) y la humedad en la zona de raíces del suelo para representar agua verde (disponible para la planta). Las variables de control se definen como el porcentaje anual global de área de tierra libre de hielo de corriente/ zona de raíces del suelo, con desviaciones de la variabilidad preindustrial. El nuevo componente del agua verde directamente toma

en cuenta regulaciones hidrológicas de ecosistemas terrestres, clima y procesos biogeoquímicos, mientras el componente de agua azul se toma en cuenta para regulación de ríos y la integridad del ecosistema acuático.

No obstante, ahora este límite captura los impactos del ST de ambas aguas incluyendo sus patrones espaciales.

Los límites, para las variables de control de agua azul y verde se colocan en el percentil 95 de la variabilidad preindustrial, esto es variabilidad del porcentaje global del área del suelo con desviaciones de ~10% para agua azul y ~11% para agua verde. Los investigadores asumen que las condiciones preindustriales son representativas de condiciones a largo plazo del Holoceno y que la notable desviación de este estado coloca el sistema Tierra de agua dulce en riesgo. Los límites propuestos son preliminares y de alta precaución, porque están pendientes evaluaciones comprehensivas de impactos como capacidad de secuestro de carbono, regulación del clima y pérdida de biodiversidad. En la actualidad se proponen desviaciones de ~ 18% (agua azul) y ~16 % (agua verde) del área de suelo global experimentando humedad o sequedad.

Así, en contraste a los LP anteriores donde solo se consideró remoción de agua azul, esta nueva aproximación indica transgresiones sustanciales del límite de cambio de agua dulce. Un siglo atrás, en 1905 y 1929, ocurrían transgresiones de los límites de agua azul y verde, respectivamente (Richardson et al., 2023). Con la definición revisada de las variables de control, el agua dulce ha sido sobrepasada al tiempo de las evaluaciones de los LP previos. La variable de control a escala global previa aún indicaría agua dulce usada para permanecer en la zona segura, incluso con fuentes de datos más nuevos que aquellos usados previamente.

Los estimados recientes de consumo global de agua azul total ~1.700 km^3 $año^{-1}$, es un valor muy lejos, debajo del límite previo colocado en 4.000 km^3 $año^{-1}$.

11.6. Carga de aerosoles atmosféricos

Como expresan Richardson y su equipo al actualizar los límites planetarios en 2023, ~~L~~ los aerosoles tienen múltiples efectos físicos, biogeoquímicos y biológicos en el ST, motivando su inclusión como un límite planetario. La carga de aerosoles antropogénica se ha incre-

mentado. Cambios desde los preindustriales para aerosoles naturales (por ejemplo, polvo del desierto, hollín de fuegos silvestres) son difíciles de evaluar a causa de diferencias en el signo de las tendencias, pero evidencia observacional sugiere un doblaje global de la deposición de polvo desde 1750. Actualmente, el Sahara es la fuente de polvo más grande de la región. Pero antes, en el Holoceno (en torno a 14.500-5.000 A.C) ese paisaje era vegetal con muchos lagos y tierras húmedas. Cambios en las lluvias monzónicas, envolviendo retroalimentaciones vegetación-clima polvoriento, se piensa que han terminado con el "Sahara verde", llevando a un gran desplazamiento de asentamientos humanos a través de África y Asia.

La cuantificación del LP para la carga de aerosoles está obstaculizada por las múltiples diferencias en composición química de sus fuentes naturales y humanas, estacionales y tiempo de vida atmosférico, y en consecuencia gran heterogenereidad espacial y temporal en la distribución e impactos climáticos y ecológicos de los aerosoles. Sin embargo, la profundidad óptica del aerosol (AOD, por sus siglas en inglés) provee una variable de control genérica para la carga de aerosoles. AOD es una medida integrada de la reducción global en alcanzar la luz del sol a la superficie de la Tierra causada por la absorción y dispersión en la columna vertical de aire. Sobre la base de la evidencia de los impactos de grandes valores de AOD en la precipitación regional sobre el sur de Asia, Steffens et al (2015) colocó un LP regional provisional de AOD = 0,25 (0,25 a 0,5) sobre la base que mayores valores de AOD en la región monzónica llevan a lluvias significativamente más bajas, afectando la integridad de la biosfera. La media global AOD en el presente es 0,14, con niveles mucho más altos en algunas regiones y con gradientes muy fuertes de la tierra al océano abierto.

Adicional al efecto directo de AOD sobre el clima regional y la precipitación, las asimetrías de AOD entre el hemisferio norte y sur puede afectar el sistema monzónico en África occidental y en la India, afectando la precipitación regional monzónica al mover la localización de la Zona de Convergencia Intertropical. Las grandes asimetrías en la temperatura de los hemisferios norte y sur provienen de diferencias en emisiones de aerosol naturales y antrópicas y de cubierta del suelo y otros forzantes climáticos. El forzamiento radiativo asimétrico resultante de los efectos del aerosol lleva a un relativo enfriamiento del hemisferio norte y un movimiento hacia el sur en precipitación tropical.

Las diferencias interhemisféricas de AOD y su impacto sobre la precipitación tropical y la disponibilidad de agua son sensibles al tamaño de la partícula y la distribución latitudinal y altitudinal de los aerosoles. Estudios de interacciones aerosol-clima que siguen a erupciones volcánicas indican que la precipitación monzónica se debilita en el hemisferio norte cuando el AOD de este es mayor y la diferencia interhemisférica de AOD es mayor y se intensifica cuando más aerosoles son emitidos en el hemisferio sur (diferencias de AOD interhemisféricas más pequeñas). Este conocimiento es fuertemente consistente con la disminución en la precipitación promedio tropical después de erupciones volcánicas grandes, en observaciones y modelos climáticos globales. El IPCC AR6 ha evaluado que la disminución observada en precipitación monzónica global sobre tierra desde 1950s a 1980s es parcialmente atribuible a emisiones de aerosol humanas en hemisferio norte, así como diferencias interhemisféricas relativamente mayores.

Por tanto, el grupo de investigadores de Stokcholm Resiliance Center propone que la diferencia promedio anual de AOD interhemisférico sea una variable de control globalmente definida para la carga de aerosol. La diferencia interhemisférica al presente día es ~0,076 ± 0,006 (media ± SD), basado en 12 estimados observacionales, alcanzando ~0,1 en la primavera y verano boreal, debido al incremento estacional en tormentas de polvo que dominan el hemisferio norte. El valor promedio anual preindustrial se estima como ~ 0,03, basado en análisis multimodelos. Indicando un incremento en la diferencia AOD interhemisférica de ~0,04 en la era industrial. En el presente, la diferencia de AOD interhemisférica es consistente con el Modelo Acoplado de Intercomparación Proyecto 6 (CMIP6) de inventario de emisiones que muestra más aerosoles antrópicos en el hemisferio norte, con proyecciones futuras.

Se asignó, así un valor de LP de 0,1 para el promedio anual de la diferencia interhemisférica en AOD, con alta incertidumbre sobre la zona de incremento de riesgos, 0,1 a 0,25. Al colocar este límite notaron que los impactos de carga de aerosol sobre el sistema de monzones tropicales ya se han visto hoy, y el impacto no solo está restringido a la lluvia sino que también afecta el clima regional más ampliamente. Las interacciones de las nubes de aerosol pueden exacerbar los efectos de la asimetría de AOD. No está claro la contribu-

ción de las interacciones aerosol-nube a la asimetría de las radiaciones de onda corta reflejadas.

Otro efecto de gran escala de los aerosoles, tal como impactos sobre la calidad del aire en ecosistemas en tierra y marinos, son también evidentes. No se han considerado aerosoles biogénicos, a pesar de su rol en retroalimentaciones en el ST. Una mejor comprensión sistémica y cuantitativa de los efectos hidroclimáticos, ecológicos y biogeoquímicos del forzamiento asimétrico del aerosol es necesario para refinar el límite de carga del aerosol.

11.7. Acidificación de los océanos

La variable de control usada es la concentración de carbonato en agua de mar superficial (especificamente, el promedio global superficial del estado de saturación con respecto a aragonita, arag). Se retiene la cuantificación original del límite ($\geq$ 80% del valor promedio global preindustrial de 3,44 para Ω_{arag}). Un estimado reciente coloca el actual valor de Ω_{arag} en ~2,8, que es aproximadamente 81% del valor preindustrial. Así, la acidificación oceánica antropogénica actualmente yace en el margen del espacio de operación seguro, y la tendencia es a empeorar si las emisiones de CO_2 antropogénico continúan elevándose.

11.8. Cambios en el sistema suelo

Este límite se enfoca sobre los tres mayores biomas forestales que globalmente juegan el mayor rol en empujar los procesos biofísicos: tropical, templado y boreal. La variable de control permanece la misma: la cubierta forestal comparada con el área potencial forestal en el Holoceno. Las posiciones permanecen 85%, 50% y 85% respectivamente.

Sobre la base de observaciones satelitales de 2019, de mapas de clasificación de suelo cubierto, el estado actual de los biomas regionales es similar a 2015. La conversión de uso del suelo y los incendios están causando un rápido cambio en áreas forestales y la deforestación de la selva tropical Amazónica se ha incrementado tal que ahora ha transgredido el LP. Cambios en la metodología y tecnología usada para estimar la cubierta forestal desde 2015 pudieran estar influenciando las diferencias en nivel de biomas reportados aquí y comparados con la última actualización. Sin embargo, hay poca duda de que el área forestal global continúa disminuyendo.

11.9 Flujos de los ciclos biogeoquímicos

Estos ciclos reflejan la perturbación antrópica de los ciclos globales de los elementos. Actualmente, el marco considera solo a nitrógeno (N) y fósforo (P) como los dos elementos que constituyen los bloques constructores fundamentales de la vida, y sus ciclos globales han sido marcadamente alterados a través de la agricultura y la industria.

Los impactos antrópicos sobre el ciclo del carbono son igualmente fundamentales, pero están contemplados en los límites del clima y la integridad de la biosfera. Otros elementos pudieran colocarse en el foco, bajo estos límites, como una comprensión de las perturbaciones humanas de otros ciclos de elementos en avance. Para N y P, la descarga antrópica de formas reactivas, a la tierra y el océano, es de interés, porque alteran el flujo de nutrientes y las razones de los elementos tienen un profundo efecto sobre la composición de los ecosistemas y efectos a largo plazo sobre el ST. Algunos cambios de hoy en día solo serán vistos en escalas de tiempo de la evolución, mientras que otros están realmente afectando el clima y la integridad de la biosfera.

Para P, se retiene el límite planetario a nivel regional y global propuesto por Steffens et al. (2015). El límite global para P es un flujo sostenido de 11 Tg de P año^{-1} del agua dulce a los océanos, para evitar anoxia a gran escala. No se han encontrado estudios más nuevos cuantificando los flujos de P de agua dulce hacia el mar, desde los usados para el marco actualizado en 2015, esto es, un estimado de 22 Tg de P año^{-1}. El límite a nivel regional se coloca como un flujo de 6,2 Tg año^{-1} de fertilizantes a los suelos erosionables, para evitar eutrofización generalizada de ecosistemas de agua dulce. La tasa actual de aplicación de P en fertilizantes a campos de cultivo es 17,5 Tg de P año^{-1}, aunque el P usado se está elevando y estimados mucho mayores de hasta 32,5 TG año^{-1} han sido reportados en otros estudios. Así, tanto los límites regionales como los globales de P han sido excedidos.

El LP para N es la tasa de aplicación del N fijado intencionalmente al sistema agrícola y que alcanza 62 Tg de N año^{-1} (sin cambiar desde Steffens et al., 2015). Actualmente la aplicación de fertilizantes de N fijados industrialmente es 112 TG de N año-1. La cuantificación de la fijación de N biologico antrópico en conexión con

la agricultura es de alta incertidumbre, pero los más recientes estimados están en el rango de ~30 a 70 Tg de N año^{-1}. De acuerdo con la FAO (2022) la introducción total de N fijado antrópico aplicado al sistema agrícola es ~190 Tg año^{-1}, lo que significa que este límite también está globalmente sobrepasado.

11.10. Conclusiones de la actualización del marco de límites planetarios en 2023

Se ha encontrado que actualmente seis límites planetarios se han transgredido (Fig. 5 y Tabla 7).

Para todos los otros límites que se habían identificado previamente como sobrepasados (cambio climático, integridad de la biosfera (diversidad genética), cambios en el sistema suelo, y flujos biogeoquímicos (N y P), el grado de transgresión se ha incrementado desde 2015. El equipo de investigadores ha introducido el índice HANPP (límite de la apropiación humana de la productividad primaria) como una variable de control para el componente funcional de integridad de la biosfera y se ha argumentado que este límite también se ha sobrepasado. Repasando los considerables progresos científicos recientes en refinar el espacio de operación seguro para el agua, las variables de control para agua verde y azul están ahora incluidos en los LP del cambio de agua dulce. Los límites se han transgredidos para ambos componentes.

Se han propuesto límites globales para la carga de aerosoles y las entidades noveles. Para las entidades noveles el límite se ha transgredido. El límite de la carga global de aerosoles no ha sido transgredido, aunque se notan transgresiones regionales.

12. Notas finales

Un grupo de investigadores del *Stockholm Resiliance Center* junto a otros investigadores de renombre mundial en el tema de los problemas ambientales globales, cuya integración como grupo ha sufrido algunos cambios a lo largo de estos últimos 14 años, ha estado dedicado al profundo estudio de los límites planetarios, un novedoso concepto que exponen y defienden ante la comunidad científica desde 2009 y que delimita un ámbito de actividad segura para los seres humanos respecto de la resiliencia de la biosfera. En otras palabras, establecen la capacidad de la biosfera para recuperarse de las perturbaciones (ocasionadas especialmente por los seres humanos) y regresar a un

estado estable. Posteriormente, con el correr de los años, han presentado revisiones de sus importantes hallazgos sobre el tema en cuestión, en varias etapas. Desde su primera conceptualización, el tema ha generado un enorme interés dentro de la ciencia, la política y la práctica.

En su primer momento, en 2009, ya los científicos habían reconocido nueve procesos que regulan la estabilidad y resiliencia del sistema Tierra. A saber: Cambio climático; Tasa de pérdida de la biodiversidad; Ciclo del nitrógeno y del fósforo; Agotamiento de la capa de ozono; Acidificación del océano, Uso global del agua dulce; Cambio en el uso de la tierra; Carga de aerosol atmosférico y Polución química. Pero, solo habían podido cuantificar los límites planetarios de siete de los procesos definidos, quedando como no determinados los correspondientes a polución química (como se denominó en un primer momento) y la carga de aerosoles atmosféricos. Adicionalmente, una conclusión muy relevante de esta primera entrega era que, ya en ese momento, tres límites habían sido sobrepasados. Los correspondientes al proceso denominado en ese momento como Tasa de pérdida de la biodiversidad; Flujo biogeoquímico del nitrógeno y fósforo y el Cambio Climático.

En la revisión y actualización de los límites planetarios realizada en 2015 se cambiaron los nombres de los procesos: “Pérdida de tasa de la biodiversidad” por “Cambio en integridad de la biosfera” y el de “Polución química” por “Introducción de entidades noveles”. En esta oportunidad seguía faltando la cuantificación de estos dos procesos anteriores que aún no estaban determinados: Carga de aerosoles atmosféricos e Introducción de entidades noveles. Y una novedad alarmante, ahora se había agregado una nueva transgresión a los límites: el proceso de Cambio en el uso del suelo, totalizando para esta actualización cuatro LP sobrepasados.

Más reciente, en la actualización de los procesos en 2023, finalmente se habían podido cuantificar los límites de todos los nueve procesos y además se tenían las evidencias de haber cruzado los límites de seis de los procesos. Ahora se agregaba a esta lista los procesos: Incorporación de entidades noveles y el Uso de agua dulce.

Como expresó Richardson (2023), una de las científicas coautoras y ahora lider del grupo:

"*La implementación de simulaciones y modelos informáticos completos ha desempeñado un papel importante en el estudio. Se utilizan modelos informáticos del funcionamiento del sistema terrestre para estudiar las interacciones entre el clima y los sistemas de la biosfera. Se realizaron simulaciones de varios cientos de años en el futuro para permitir no solo procesos que reacciones relativamente rápido al cambio, sino también procesos mucho más lentos que, en última instancia, determinan el resultado del cambio ambiental causado hoy*." (Traducción propia)

Por otra parte, Johan Rockström, ex Director del Centro de Resiliencia de Estocolmo y coautor del estudio, afirma en 2023 que;

"*La ciencia y el mundo en general están realmente preocupados por todos los fenómenos climáticos extremos que afectan a las sociedades de todo el planeta a medida que avanzamos hacia el tercer El Niño amplificado por el hombre en sólo 25 años. Pero lo que nos preocupa, aún más, son los crecientes signos de disminución de la resiliencia planetaria, que se manifiesta en la ruptura de los límites planetarios, lo que nos acerca a puntos de inflexión y cierra la ventana a cualquier posibilidad de mantener el límite climático planetario de 1,5°C.*"

El hecho de que se están cruzando fronteras de los límites planetarios propuestos está incrementando el riesgo de la generación de cambios ambientales abruptos e irreversibles a gran escala. Los investigadores del Stockholm Resiliance Center expresan que los cambios drásticos no necesariamente ocurrirán de la noche a la mañana, pero en su conjunto, los límites cuantificados marcan un umbral crítico para aumentar el riesgo para las personas y los ecosistemas de los que formamos parte todos los habitantes del planeta Tierra. Debemos recordar que los límites están adjudicados a procesos interrelacionados dentro del complejo sistema biofísico de la Tierra y que se debe comprender la interacción de las fronteras, especialmente el clima y la pérdida de biodiversidad, claves para la ciencia y la práctica.

La coautora Sara Cornell, del Centro de Resiliencia de la Universidad de Estocolomo, subraya lo siguiente (2023):

> "*El marco de los LP ayuda a los científicos a rastrear y comunicar cómo estas crecientes presiones están desestabilizando nuestro planeta. La Tierra es un planeta vivo, por lo que las consecuencias son imposibles de predecir. Es por eso que estamos trabajando cada vez más con los responsables políticos, las empresas y la sociedad en general. Intentar mitigar las presiones en todos los límites*."

Como colofón de esta revisión de los denominados límites planetarios, desde su primera etapa hasta hoy, se puede expresar que las perturbaciones antrópicas actuando sobre los procesos clave para la estabilidad y resiliencia del complejo sistema Tierra, son una amenaza que alcanza no solo al planeta sino a todos los seres vivos que lo habitamos. La capacidad de la Tierra para mantener las condiciones naturales que existían ya de larga data cuando apareció el *Homo sapiens,* ha sido desbordada en muchas ocasiones como lo demuestran las transgresiones de los límites planetarios establecidos en estas investigaciones. Esta información, con base científica, es un llamado de alerta para las sociedades humanas que deberían tomar, en consecuencia, las previsiones que correspondan. ¿Y a quienes nos referimos como tales sociedades humanas?, pues a todas, pero quizás con más presión a aquellas que ostentan el título de desarrolladas y que arrastran un modelo de desarrollo económico que no es sostenible y que más pronto que tarde deberíamos revertir cambiando nuestros modos de producción y consumo.

Literatura citada

ATTEMBOROUGH, D.

2021. Una vida en nuestro planeta. Mi testimonio y una visión para el futuro. Editorial Crítica. Barcelona.

BONIFETTI DIETERT, C.

2017. Los límites del crecimiento. Semanario La Ventana Ciudadana. Chile. https://laventanaciudadana.cl/los-limites-del-crecimiento/

CARANDELL BARUZZI, M.

2021. Saberes en acción. 23 abril 2021. IHC-UAB. Museu de Ciències Naturals de Granollers. Primavera silenciosa. Un libro para despertar conciencias. https://sabersenaccio.iec.cat/es/primavera-silenciosa-un-libro-para-despertar-conciencias/

CARPENTER, S. AND E. M. BENNETT

2011. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environ. Res. Lett.* 6 014009DOI 10.1088/1748-9326/6/1/014009.

CARSON. R.

1962. *Silent Spring*. Houghton Miffin, Publ. 400 p.

CLAES (CENTRO LATINOAMERICANO DE ECOLOGÍA SOCIAL)

(2018). Rachel Carson. La mujer que inauguró el ecologismo contemporaneo. https://ambiental.net/2018/05/rachel-carson-la-mujer-que-enfrento-a-las-agroquimicas-e-inauguro-el-ecologismo-contemporaneo/

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.

2001. Promoting a European framework for Corporate Social Responsibility. _Green Paper. https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/committees/deve/20020122/com(2001)366_en.pdf.

CORNELL, S.

2023. Noticias del Stockholm Resilience Center. Descargado en: https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2023-09-13-all-planetary-boundaries-mapped-out-for-the-first-time-six-of-nine-crossed.htm.

CRUZ, R.V., H. HARASAWA, M. LAL AND S. A. WU

2007. Pages 469-506 *in* M. L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P. J. van der Linden and C.E. Hanson, editors. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Sassesment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change.*Cambridge Universitry Press, Cambridge, UK.

DE VRIES, W., J. KROS, C. KROEZE AND S. P. SEITZINGER

2013. Assesing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts. *Journal Current Opinion in Environmental Sustainability.* Volumen 5 (3-4): 392-402. https://research.wur.nl/en/publications/assessing-planetary-and-regional-nitrogen-boundaries-related-to-f.

FAO (FOOD AGRICULTURAL ORGANIZATION)

2022. World fertilizer trends and outlook to 2022 – Summary Report, Rome (2019); www.fao.org/3/ca6746en/ca6746en.pdf.

FERRARA-GINER, G.

2022. Cambio climático y medio ambiente. T*ribuna del Investigador*. Vol. 23.(1). http://hdl.handle.net/10872/21907. Saber UCV. Artículos preimpresos.

IPCC (INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATIC CHANGE)

2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

KENDAL, H. W.

1992. World Scientists Warming to Humanity (PDF), ucausa.org, retrieved 2011-08-26.

KNOLL, A. H.

2021. *Breve historia de la Tierra. Cuatro mil millones de años en ocho capítulos*. Ediciones Pasado & Presente. S.L. Barcelona.

MALLEN RIVERA, C.

2012. Rachel Carson, 50 años de romper el silencio. *Rev. Mex. de Ciencias For.* 3(14): 3-10. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Distrito Federal, México. https://www.redalyc.org/pdf/634/63439002001.pdf.13-9-23.

MEADOWS, D., D. MEADOWS AND J. RANDERS

1992. *Más allá de los límites del crecimiento*.(19-25) Ediciones El País. S.A./Aguilar S.A. de Ediciones Juan Bravo, Madrid. https://es.slideshare.net/nicu43/ms-all-de-los-lmites-del-crecimiento-meadows-donellameadows-dennisranders 13-10-23.

NEWHALL, CH., J. W. HENDLEY II, AND P. H. STAUFFER

1997. U.S. Geological Survey Fact Sheet 113-97. https://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs113-97/

MORA, A., A. LARAQUE Y J. L. LÓPEZ

2017. El Bajo Orinoco: aspectos hidrosedimentológicos, geoquímicos e influencia antrópica. Cap. 5 (109-126) En: Rodríguez-Olarte, D. (Ed). *Ríos en Riesgo en Venezuela. Vol. 1.* Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental de Venezuela.

ONU (ORGANIZACIÓN NACIONES UNIDAS)

1987. Asamblea General. Doc. A/42/427. Informe de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo. Informe . *Nuestro Futuro Común*. https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N87/184/70/PDF/N8718470.pdf?OpenElement

ONU (ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS)

2001. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. https://chm.pops.int/portals/0/repository/convention_text/unep-pops-cop-convtext-full.spanish.pdf

ONU (ORGANIZACIÓN NACIONES UNIDAS)

2015. Transformar nuestro mundo. La agenda 2020 para el Desarrollo Sostenible. Resolución de la Asamblea General. A/Res/70/1. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf

PÉREZ ZABALETA., A.

2017. 30 años de la publicación del Informe Brundtland. Publicaciones Fundación Aquae-Firmas. https://www.fundacionaquae.org/30-anos-desde-la-publicacion-futuro-comun-hito-mundial-pro-del-desarrollo-sostenible/

PERSSON, L., B. ALMROTH, C. COLLINS, S. CORNEL, C. DE WITT, M. DIAMOND, P. FANTKE, M. HASSELLOW, M. MACLEOD, R. P. JORGENSEN, P. VILLARUBIA-GOMEZ, Z. WANG AND M. ZWICKY HAUSCHILD

2022. Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entitities. *Environ. Sci. Tech.* 56: 1510-1521. DOI: 10.1021/acs.est.1c04158. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35038861/

PNUMA (PROGRAMA NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE)

2009. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre COPs. Recuperado de: https://digitallibrary.un.org/record/585171?v=pdf

QUINTANA SOLÓRZANO, F.

2019. *Crisis climática y descarbonización del desarrollo. Las Ciencias Sociales y la Agenda Nacional.* (conferencia) Vol. 5 Medio ambiente, sustentabilidad y vulnerabilidad social. https://www.comecso.com/ciencias-sociales-agenda- nacional/cs/article/view/1998/502.

RAWORTH, K.

2018. *Economía Rosquilla.* Ed. Espasa Libros, S.L.U. Barcelona, España.

RICHARDSON, K., W. STEFFENH, W. LUCHT, G. BALA, W. VON BLOH, G. FEULNER, S. FIEDLER, D. GERTEN, T. GLEESON, M. HOFFMANS, W. HU, M. ISKAMP, M. KUMMU, C. MOHAN, D. NOGUES-BRAVO, S. PETRI, M. PORKKA, M. S. RAHMSTORF, S. SCVHAPHOFF, K. THONICKE, A. TOBIAN, V. VIRKKI, L. WANG-ERLANDSSON, L. WEBER, AND J. ROCKSTROM

2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* 9. eadh2458. Downloaded from https://www.science.org on March 17, 2024.

RICHARDSON, K.

2023. Noticias del Stockholm Resilience Center. Descargado en: https:// www.stockholmresilience.org/research/research-news/2023-09-13-all-planetary-boundaries-mapped-out-for-the-first-time-six-of-nine-crossed.htm.

RIPPLE W. J., C. WOLF, T. M. NEWSOME, M. GALETTI, M. ALAMGIR M, E. CRIST, M. I. MAHMOUD AND W. F. LAURANCE

2017. World scientists' warning to humanity: A second notice. *BioScience,* 67: 1026–1028.

RIPPLE, W., W. CHRISTOPHER, T. M. NEWSOME, W. PHOEBE BARNARD, M. MOOMAW, AND 11,258 SCIENTIST SIGNATORIES FROM 153 COUNTRIES

2020. World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, Vol. 70 (1). https:// academic.oup.com/bioscience.

RIPPLE, W., CH. WOLF, T. H. NEWSOMME, J. GREGG, T. LENTON, I. PALOMO, J. EIKELBOOM, B. LAW, S. HUQ, P. H. DUFFY, AND J. ROOKSTROM

2021. World Scientists Warning of Climate Emergency 2021. *BioScience,* Vol. 71 No 9: 894-898.

RIPPLE, W., CH. WOLF, W. JILLIAN, G., KELLY LEVIN, J. ROCKSTRÖM, T. M. NEWSOME, M G. BETTS, S HUQ, B E. LAW, L KEMP, P KALMUS, AND T M. LENTON

2022. World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2022. *Bioscience*, Vol. 72(12):1-7.

RIPPLE, W., CH. WOLF, J. GREGG, J. ROCKSTRÖM, T. H. NEWSOMME, L. MARQUEZ, T. LENTON, CH. XU, S. HUQ, L. SIMONS AND A. KING

2023. The 2023 state of climate report: Entering uncharted Territory. BioScience, (0): 1-10. https://doi.org/10.1093/biosci/biad080 Advance access publication date: 0 2023 Special Report https://doi.org/10.1093/biosci/biad080.

ROCKSTRÖM, J., W. STEFFEN, K.NOONE, Å. PERSSON, F. STUART CHAPIN, E. F. LAMBIN, T. M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H. JOACHIM SCHELLNHUBER, B. NYKVIST, C. A. DE WIT, T. HUGHES, S. VAN DER LEEUW, H. RODHE, S. SÖRLIN, P. K. SNYDER, R. COSTANZA, U. SVEDIN, M. FALKENMARK, L.KARLBERG, R. W. CORELL, VI. J. FABRY, J. HANSEN, B. WALKER, D. LIVERMAN, K. RICHARDSON, P. CRUTZEN AND J. A. FOLEY

2009a. Earth's boundaries. *Nature*, (461): 447-448. https://doi.org/10.1038/461 447b.

ROCKSTRÖM, J., W. STEFFEN, K.NOONE, Å. PERSSON, F. STUART CHAPIN, E. F. LAMBIN, T. M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H. JOACHIM SCHELLNHUBER, B. NYKVIST, C. A. DE WIT, T. HUGHES, S. VAN DER LEEUW, H. RODHE, S. SÖRLIN, P. K. SNYDER, R. COSTANZA, U. SVEDIN, M. FALKENMARK, L.KARLBERG, R. W. CORELL, VI. J. FABRY, J. HANSEN, B. WALKER, D. LIVERMAN, K. RICHARDSON, P. CRUTZEN AND J. A. FOLEY

2009b. Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society. http://www.stockholmresilience.org/download/18.1fe8f 33123572b59ab800012568/pb_longversion_170909.pdf).

ROCKSTROM, J. ET AL.

2009. *Ecol. Soc.* available from: http://www.stockholmresilience.org/download/ 18.1fe8f3 3123572b59ab800012568/pb_longversion_170909.pdf.

ROCKSTRÖM, J. ET AL.,

2009. Supplementary information. 16 th september 2009. https:// www.stockholmresilience.org/download/18.1fe8f33123572b59ab800016603/ planetaryboundaries-supplementary-info-210909.pdf

ROCKSTRÖM, J.

2023. Noticias del Stockholm Resilience Center. Descargado en: https://www. stockholmresilience.org/research/research-news/2023-09-13-all-planetary-boundaries-mapped-out-for-the-first-time-six-of-nine-crossed.htm.

RUNNING, S. W.

2012. A Measurable Planetary Boundary for the Biosphere. *Science* (337):1458-1459. doi: 10.1126/science.1227620; pmid: 22997311.

STEFFEN, W., P. J. CRUTZEN AND J. MCNEILL

2008. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature. *Ambio A Journal of the Human Environment.* 36(8):614-21. DOI 10.1579/ 0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2

STEFFEN, W., K. RICHARDSON, J. ROCKSTRÖM, S. E. CORNELL, I. FETZER, E. M. BENNETT, R. BIGGS, S. R. CARPENTER, W. DE VRIES, C. A. DE WIT, C. FOLKE, D. GERTEN, J. HEINKE, G. M. MACE, L. M. PERSSON, V. RAMANATHAN, B. REYES, AND S. SÖRLIN.

2015. Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, Vol 347 (6223). doi: 10.1126/science.1259855.

STEFFEN, W., K. RICHARDSON, J. ROCKSTRÖM, S. CORNELL, I. FETZER, E. BENNET, R. BIGGS, S. CARPENTER, W. DE VRIES, C. A. DE WITT, C. FOLKE, D. GERTEN, J. HEINKE, G. MACE, L. M. PERSSON, V. RAMANATHAN, B. REYERS, S, SÖRLIN

2015. Supplementary materials for Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science Express*. DOI: 10.1126/ science.1259855.

STEPHENS, L., D. FULLER, N. BOVIN, T. RICK, N. GAUTIER, S. A. KAY, B. MARSWICK, M. GERALDA, M. BARTON, +111 AUTORS

2019. Archaelogical assesment reveals Earth's early transformation through land use. Science. August 30. Vol. 365. P. 897-202. https://www.researchgate.net/ publication/335481432_Archaeological_assessment_reveals_Earth's_ early_transformation_through_land_use. Consultado: 13-8-2021.

SUPPLEMENTARY MATERIALS FOR PLANETARY BOUNDARIES: GUIDING HUMAN DEVELOPMENT ON A CHANGING PLANET

2015. www.sciencemag.org/content/347/6223/1259855/suppl/DC1.Published online 15 january 2015. 10.1126/science.1259855.

TERRADAS, J.

2009. Los límites planetarios. Ambienta. *La Revista del Ministerio del Medio Ambiente*. España. ISSN: 1577-9491, Nº 89, diciembre 2009.

TRISCHLER, H.

2017. El Antropoceno, ¿Un concepto geológico o cultural, o ambos ? Desacatos 54 Ciudad de México may/agost 2017: 40-57. https://www.scielo.org.mx/ scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1607-050X2017000200040.

USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)

1998. Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002F. https:// www.epa.gov/sites/default/files/201411/documents/eco_risk_assessment 1998.pdf

Unas notas interesantes

Si es cierto que después del comienzo del periodo industrial el hombre ha intensificado su acción degradante sobre la tierra. Sin embargo, desde su origen el hombre ha sido una de las especies mayormente capacitadas para transformar amplios y extensos ecosistemas como ningún otro organismo sobre la tierra. Por ejemplo su transformación de antropoide (frugívoro e insectívoro) y habitante en los bosques, al hombre adaptado a las sabanas y a la persecución de animales para su ingesta carnívora implemento el uso del fuego. Así que deberíamos considerar el Antropoceno un poco más antiguo que la data usada actualmente en la época moderna. Abajo algunas notas que saque de un manuscrito todavía no publicado sobre esta interesante historia evolutiva y ambiental

1. El Antropoceno es algo más que una época geológica, y su inicio es mucho más antiguo que muchas estimaciones recientes que sitúan sus inicios al comienzo de la revolución industrial (Steffen et al 2007; 2011). Si bien relativamente pocos humanos esculpieron grandes porciones de la Tierra, la tasa actual de transformación es realmente profunda debido al número continuamente creciente de seres humanos, los altos recursos per cápita utilizados por muchas personas y los rápidos avances tecnológicos.

STEFFEN, W., P. J. CRUTZEN AND J. R. MCNEILL.
2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *Ambio: A Journal of the Human Environment* 36: 614-621.

W. STEFFEN ET AL.,
2011. The Anthropocene: From global change to planetary stewardship. *Ambio* 40, 739-761

2. Las especies de *Homo* utilizaron fuego 1,5 MYA en Koobi Fora, Kenia y 1,0 MYA en Wonderwerk Cave, Sudáfrica, ambos en asociación con herramientas del Achueliense temprano y huesos rotos quemados. (Hlubik et al., 2017; Berna et al., 2012). El fuego fue utilizado para preparar comida pero también para acorralar y capturar grandes mamíferos.

S. HLUBIK, F. BERNA, C. FEIBEL, D. BRAUN AND J. W. K. HARRIS
2017. Researching the Nature of Fire at 1.5 Mya on the Site of FxJj20 AB, Koobi Fora, Kenya, Using High- 24 Resolution Spatial Analysis and FTIR Spectrometry. *Current Anthropology* 58, 416 S243-S257

F. BERNA ET AL.
(2012). Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean 418 strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. 419 *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, E1215-E1220

3. Los seres humanos han sido identificados como la causa principal del colapso y la extinción de los ecosistemas en el interior de Australia, poco después de su llegada hace 0,050-0,045 millones de años (Miller et al., 2005¸ Rule et al., 2012). El patrón de extinción, deforestación, aumento de la aridificación y transformación de ciclos geoquímicos continúa hasta bien entrado el Holoceno en todos los continentes (Johnson et al 2017; Smith et al 2016; Lyons et al., 2004; Araujo et al., 2017), con grandes porciones de Asia, norte de África, Eurasia, India, Australia y el este del norte América.

MILLER G. H. ET AL.,
2005. Ecosystem Collapse in Pleistocene Australia and a Human Role in Megafaunal Extinction. *Science* 309: 287-290.

S. RULE ET AL.,
2012. The Aftermath of Megafaunal Extinction: Ecosystem Transformation in Pleistocene Australia. Science 335: 1483-1486.

JOHNSON, C. N. ET AL.,
2017. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene. *Science* 356: 270-275.

SMITH, F. A. ET AL.,
2016. Exploring the influence of ancient and historic megaherbivore extirpations on the global methane budget. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 874-879.

LYONS, S. K., F. A. SMITH, J. H. BROWN
2004. Of mice, mastodons and men: human mediated extinctions on four continents. *Evolutionary Ecology research* 6: 339-358.

ARAUJO, B. B. A., L. G. R. OLIVEIRA-SANTOS, M. S. LIMA-RIBEIRO, J. A. F. DINIZ-FILHO, F. A. S. FERNANDEZ
2017. Bigger kill than chill: The uneven roles of humans and 448 climate on late Quaternary megafaunal extinctions. Quaternary International 449 431, 216-222

(Footnotes)

[1] De acuerdo a la escala de tiempo geológica, actualmente estamos en el eón Farenozoico, que comenzó hace 541 millones de años, y dentro de este eón estamos en la era Cenozoica, que comenzó hace 2,6 millones de años, y dentro de esta era estamos en el período Cuaternario, que comenzó hace 2,6 millones de años y dentro de este período estamos en la época del Holoceno que comenzó hace 11.780 años (Knoll, 2021)

[2] De acuerdo con las investigaciones paleo-climáticas se sabe qué desde la aparición de la vida en la Tierra, han existido cinco extinciones globales masivas de especies. Se considera que la última sucedió en la transición de los períodos Cretácico-Paléogeno, alrededor de hace 65,5 millones de años.

ABREVIACIONES

ADHD	Deficit de atención e hiperactividad en niños
AOD	Aerosol Optical Depth
BII	Biodiversity Integrity Index
CFCs	Clorofluorocarbonos
CO_2	Dióxido de Carbono
DDT	Dicloro difenil tricloroetano
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
EWF	Environmental Water Flux
GBP	Global Biophere Programme
HANPP	Human Appropiation Net Primary Production
H_2CO_3	Ácido Carbónico
IPCC	Panel Interncional de Cambio Climático
LP	Límite Planetario
MMF	Medium Mensual Flux
N_2	Nitrógeno
N_2O	Óxido Nitroso
NPP	Net Primary Production
O_3	Ozono
P	Fóstoro
pH	Medida de acidez en el ambiente
$PM_{2.5}$	Partículas Finas
PCBs	Bifenilos Policlorados
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POPs	Persisted Organic Pollutants
PSV	Phylogenetic Species Variabiloity
SO_2	Dióxido de Azufre
SO_x	Gases de Óxido de Azufre
ST	Sistema Tierra
UD	Unidades Dobson
Ω_{arag}	Estado de saturación de la Aragonita
USEPA	United States Environmental Protection Agency

Griselda Ferrara de Giner

Ingeniero Químico (UCV-1966). Magíster Scientiarum en Ingeniería Sanitaria (UCV-1973). Doctor en Ciencias de la Ingeniería (UCV-2008). Profesor Titular UCV. Docencia en Pregrado y Postgrado en UCV y otras universidades en el área de Ingeniería Ambiental. Investigadora en: Calidad del Agua, Química Ambiental, Tratamiento de Líquidos Residuales, Gestión Integral de la Calidad Ambiental y Adaptación al Cambio Climático. Coordinadora de la Cátedra Libre de Cambio Climático-UCV. Co-editora de 3 libros. Autora o co-autora de: 3 libros, 8 capítulos de libros, 30 publicaciones en revistas, 61 ponencias y 7 publicaciones de apoyo a la docencia. Individuo de Número de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat-Sillón XII y Presidente de su Comisión de Ambiente (2018-2023).

CAPÍTULO II

RECURSOS HÍDRICOS EN VENEZUELA. ENFOQUES PARA LA GESTIÓN

1. Introducción

Los recursos hídricos abarcan la totalidad de las fuentes de agua existentes en el planeta y constituyen el elemento base sobre el cual se sustenta toda forma de vida; son también fundamentales para el desarrollo, por lo cual están sometidos a fuertes presiones por su uso y aprovechamiento en las distintas acciones de la vida del hombre: el uso doméstico y la salud, el riego y la producción de alimentos, la industria y el uso recreacional. Administrarlos y gestionarlos adecuadamente implica superar desafíos relacionados con la preservación en cantidad y calidad, distribución con equidad y gobernanza, considerando las afectaciones de los usuarios ubicados aguas arriba de la cuenca a los que están aguas abajo y teniendo presente la preservación de los ecosistemas dependientes.

En consecuencia se impone la necesidad de la gestión integral del recurso para lo cual se requiere mejorar el conocimiento sobre su situación actual, educación para su valoración (derechos, responsabilidades y compromisos) así como el desarrollo de capacidades para la gestión.

La aparición del COVID 19 puso en relieve la importancia de contar con buenos servicios de abastecimiento de agua que permitieran el obligatorio lavado de manos como hábito cotidiano para disminuir contagios de la enfermedad. Así mismo permitió visualizar la necesidad de establecer compromisos políticos de los estados a los fines promover el acceso al servicio de agua potable a toda la población.

Adicionalmente, en el contexto de la variabilidad exacerbada por el cambio climático, se dice que la crisis climática es una crisis del agua siendo que es un elemento con potencial para generar inundaciones de características catastróficas o sequías extremas que limitan la vida y el desarrollo (Castillo, 2023).

Es también importante resaltar que la creciente contaminación de los recursos hídricos compromete seriamente la disponibilidad de agua para sus diferentes usos.

En este capítulo se disertará en relación con el recurso hídrico en Venezuela, el conocimiento con que se cuenta sobre la base de la ingeniería desarrollada en el país y los nuevos enfoques y desafíos que deben enfrentarse para conservarlo y dar sustentabilidad para su uso a futuras generaciones.

Como introducción al tema de recursos hídricos en Venezuela deben destacarse las iniciativas y el enorme esfuerzo desplegado por la ingeniería y profesiones afines venezolanas, que además de la robusta infraestructura hidráulica construida en los últimos 50 años del siglo XX, también desarrollaron Programas y Proyectos como los que a continuación se mencionan, lo cual permitió que Venezuela destacara en el desarrollo hidráulico y que servicios como el agua potable y saneamiento llegaran a coberturas envidiables a nivel latinoamericano; entre otros:

(i) Plan Nacional de Aprovechamiento de Recursos Hídricos (COPLANARH)

(ii) Actualización del Plan Nacional de Aprovechamiento de Recursos Hídricos (Serie Azul)

(iii) Inventario Nacional del Potencial Hidroeléctrico

(iv) Proyecto Saneamiento y Recuperación del Río Tuy

(v) Proyecto Saneamiento del Lago de Valencia

(vi) Saneamiento del Lago de Maracaibo

(vii) Saneamiento de la Costa Oriental

(viii) Planes de Ordenación del Territorio

(ix) Planes de Desarrollo Urbano Local

(x) Proyecto de Descentralización de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento

(xi) Agua en Venezuela: una riqueza escasa (Fundación Empresas Polar)

(xii) Hoja de Ruta del Agua (Grupo Orinoco)

Los programas y proyectos antes mencionados no agotan en lo absoluto todo el esfuerzo desarrollado en el país hasta principios de este siglo; no obstante, a la luz del tiempo transcurrido, se requiere la actualización de muchos de esos trabajos y la realización de nuevas investigaciones, en consonancia con los avances tecnológicos de esta época y las nuevas exigencias por las afectaciones al recurso.

Los desafíos a futuro están dirigidos fundamentalmente a la recuperación de la institucionalidad para la administración y gestión del recurso y los servicios asociados, a la rehabilitación de la infraestructura existente, a desarrollar buenas prácticas para construcción de data y mejorar el conocimiento sobre la base de nueva tecnología así como en la adaptación al cambio climático. Todo lo anterior atendiendo a enfoques de Economía Circular, Instrumentos Multisectoriales y de colaboración (agua, energía y tierra) y con visión multiobjetivos para el logro de la anhelada Seguridad Hídrica, Seguridad Energética y Seguridad Alimentaria.

1.1. Consideraciones preliminares

Una característica de los recursos hídricos es que no hay uniformidad en su distribución espacial y, además, en una misma área geográfica éstos también pueden verse afectados por la temporalidad.

A nivel global, a pesar de que el 75% del planeta está cubierto de agua, solamente el 2,5% es agua dulce, y de ese porcentaje 70% es hielo, 29% son aguas subterráneas y solamente el 1% se encuentra en forma de ríos o lagos. Igualmente se estima que del agua aprovechable, 70% se utiliza para riego, 20% para industrias y 10% para consumo humano (Njie, 2013). La figura 1 nos ilustra sobre la distribución del recurso agua dulce en el mundo.

Las aguas fluyen en el denominado **ciclo hidrológico** (Fig. 2), que contempla los procesos por los que éstas pasan desde la atmósfera a los suelos y de allí nuevamente a la atmósfera. Por esto se dice que es un recurso renovable. Estos procesos dentro del ciclo hidrológico son la precipitación, evaporación, evapotranspiración, sublimación, infiltración, escurrimiento (superficial y subterráneo) y condensación.

El **balance hídrico** nos permite determinar las cantidades de agua que circulan en el ciclo hidrológico. Para su cálculo se utiliza la denominada ecuación de balance hídrico, en la cual, la diferencia entre las entradas de agua a un sistema y las salidas, determinan los cambios en el almacenamiento. La ecuación se establece como:

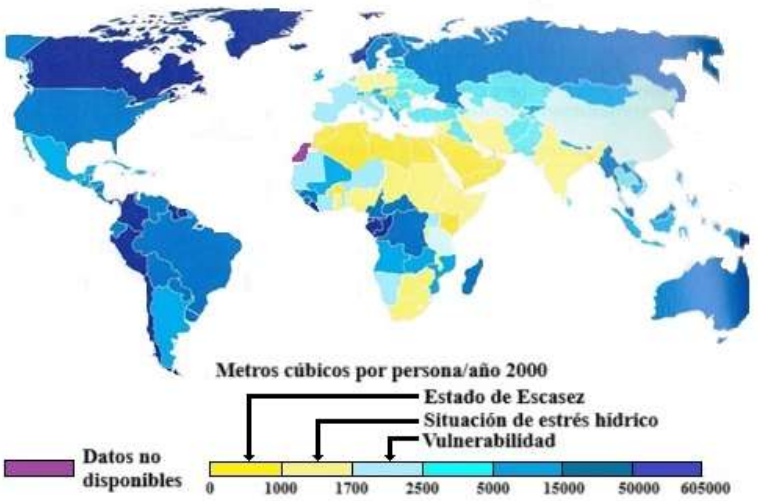


Figura 1. Disponibilidad de agua dulce en el mundo. Fuente: World Resources Institute, 2000.

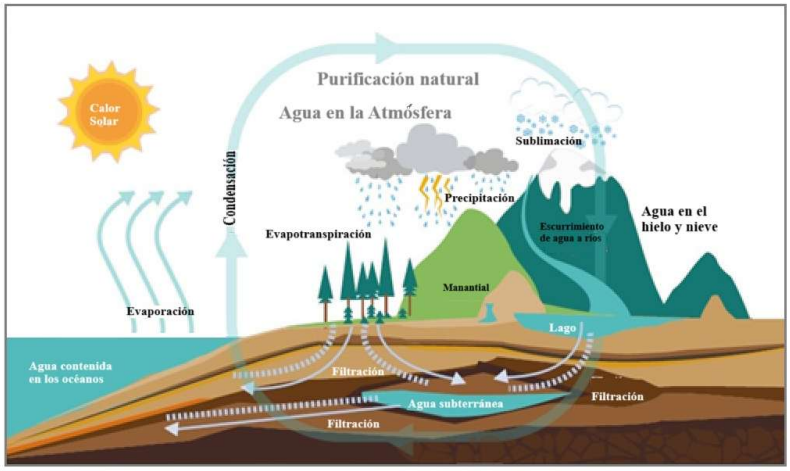


Figura 2. Ciclo hidrológico. Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo, 2020.

$$P - E - Ev - I = DS \qquad (1)$$

Dónde:

P = precipitación; E = escurrimiento superficial; Ev= evapotranspiración
I = infiltración; DS = diferencia en almacenamiento

El escurrimiento, definido como la lámina de agua que circula sobre la superficie de una cuenca de drenaje, está influenciado por diferentes factores:

(i) meteorológicos (precipitación, temperatura, viento);

(ii) fisiográficos (tamaño y forma del área drenada, pendientes, distribución de la red de cursos de agua y existencia de almacenamientos naturales o artificiales);

(iii) tipos de suelos (arenosos, arcillosos o rocosos);

(iv) uso de los suelos (presencia o ausencia de cobertura vegetal que facilite la infiltración).

Por otra parte, se denomina caudal al volumen de agua por unidad de tiempo registrado en un punto determinado, siendo importante resaltar su variabilidad por afectación del clima así como por intervenciones antrópicas. Dentro de los caudales cabe destacar los conceptos de caudal regulado como el que puede ser garantizado a través de un embalse y caudal ecológico, entendido como el necesario para mantener los hábitats naturales, flora y fauna del cauce.

Las aguas subterráneas constituyen parte del ciclo hidrológico y están localizadas en el subsuelo como embalses subterráneos, dentro de poros y fisuras de las formaciones rocosas; son esenciales cuando escasean las fuentes superficiales y pueden constituirse en complemento durante épocas de sequía, siendo en ocasiones una alternativa de aprovechamiento económicamente más conveniente. (Fig. 3)

Los acuíferos (González Sanabria y Coronel Borges, 2015) son estructuras geológicas permeables que almacenan y transmiten aguas subterráneas; los denominados libres transmiten el agua por gravedad y los confinados lo hacen a presión. Los semiconfinados son una combinación de los anteriores.

El límite entre la zona no saturada y la saturada de un acuífero libre se conoce como nivel freático. La facilidad de transmisión del agua en un acuífero se define como conductividad hidráulica (metros/día) y el potencial de almacenamiento de un acuífero se mide como porosidad para acuíferos libres o coeficiente de almacenamiento para acuíferos confinados y semiconfinados.

Las formas más comunes de captación de las aguas subterráneas son a través de manantiales, morichales, o por los efectos del bombeo desde pozos profundos.

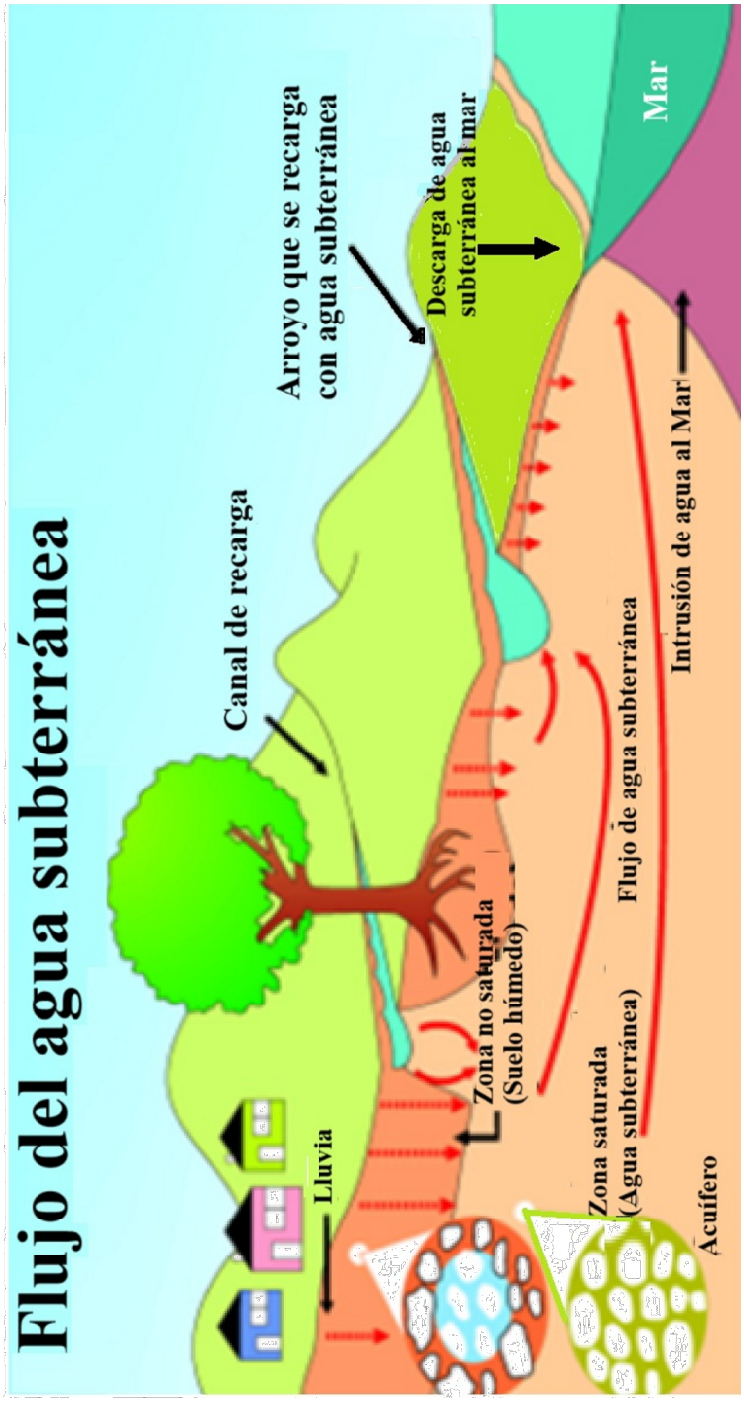


Figura 3, Flujo del agua subterránea. Fuente: (Wikipedia, s.f.)

La **recarga de aguas subterráneas** procede de la lluvia, lagos, ríos, zonas agrícolas, etc. Los procesos de recarga o descarga entre ríos y acuíferos se desarrollan en la zona hiporreica del suelo, formada por el volumen de sedimentos saturados, debajo y a los lados de las corrientes de un río, donde se mezclan las aguas subterráneas y superficiales.

Para el aprovechamiento sostenible de los acuíferos es fundamental conocer las reservas, sus posibilidades de recarga, potenciales contaminantes y definir un esquema adecuado de explotación.

Se estima que en torno al 10% de los alimentos del mundo se cultivan mediante prácticas no sostenibles de sobreexplotación de aguas subterráneas, es decir que se extrae agua a mayor volumen de la capacidad de recarga.

Una **cuenca hidrográfica** (Rosales Hernández & García Montero, 2015) es una unidad geográfica con límites topográficos (línea divisoria de aguas) que representan la cota máxima (divisoria entre cuencas adyacentes) y que conforma un espacio común de drenaje de aguas en el cual la lluvia se acumula y fluye hacia un mismo río, lago o mar. Es la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos y es conocida como la fábrica de agua.

En términos generales se pueden definir la cuenca alta, la cuenca media y la cuenca baja; como excepción al concepto clásico en cuanto a las secciones que se distinguen en la cuenca, surgen las cuencas planas (sin áreas montañosas o verdaderas cuencas altas) como las correspondientes a los ríos Guanipa, Morichal Largo, Tigre y Uracoa de la altiplanicie de los llanos orientales de Venezuela, cuyas fuentes son mayormente afloramientos de agua de los acuíferos de la planicie. La gestión integral de este tipo de cuencas estaría orientada a la protección y manejo sustentable de los acuíferos en términos de evitar su contaminación y sobreexplotación, así como a la conservación de las zonas principales de recarga.

Tendencias recientes proponen modelos y estrategias de gestión de cuencas que tomen en cuenta las relaciones entre aguas subterráneas, aguas superficiales, suelos, clima, cantidad y calidad de las aguas.

2 Infraestructura para el aprovechamiento y depuración de recursos hídricos

Dentro de la diversidad de infraestructura hidráulica utilizada para el aprovechamiento y conservación del recurso hídrico, es importante desta-

car a los **embalses** destinados a la captación de agua en las fuentes a través de la regulación de los caudales del río y las **plantas de tratamiento de aguas servidas** que permiten devolverlas a la naturaleza en calidades aceptables, tanto en la industria de agua potable y saneamiento como las de uso industrial en general.

2.1. Embalses: Obras para la Regulación de Caudales en las Fuentes

Los "embalses", obras de regulación de caudales, constituyen instalaciones para el aprovechamiento y mejor uso de los recursos hídricos, siendo que a través de ellos es posible almacenar excedentes de los períodos de lluvia y abundante escorrentía, para ser usados en períodos de sequía. Así se logran controlar los desequilibrios temporales y espaciales en la distribución del agua así como satisfacer las demandas de manera continua para diferentes usos y lugares. Vale destacar que los embalses pueden ser diseñados para demandas en usos múltiples que abarcan: agua potable, riego, control de crecientes, industrial- energético, recreación e inclusive como dispositivos de recarga de agua subterránea. En al caso venezolano se cuenta con 106 embalses (Fundación de Educación Ambiental-Fundambiente, 2006) construidos en los lapsos que se muestran en la figura 4 (CEDICE. Observatorio Gasto Público).

Es importante señalar la necesidad del adecuado monitoreo y gestión de sus componentes fundamentales (presa, obras de toma y descargas de fondo así como aliviaderos), requeridos para preservar sus condiciones de estabilidad. Así mismo es esencial la consideración de buenas prácticas agrícolas, métodos de arado y de pastoreo en las cuencas proveedoras, cuyo potencial de erosión de los suelos dan lugar a contribuciones excesivas de sedimento al embalse, provocando disminución de su vida útil. Así mismo es muy importante evitar el ingreso excesivo de nutrientes, a través de químicos agrícolas utilizados para mejor rendimiento de cosechas así como descargas de aguas servidas e industriales sin adecuado tratamiento, que alteran la calidad del agua y pueden eutrofizar el cuerpo de agua.

El abordaje de la problemática de los embalses pasa por la evaluación de la capacidad y operatividad de sus componentes con atención al cambio climático y a los crecientes problemas de eutrofización y de afectación al hipolimnion.

2.2. Obras para el Tratamiento de las Aguas Servidas

Las plantas de tratamiento o depuradoras de aguas servidas también constituyen parte de la infraestructura hidráulica fundamental para mante-

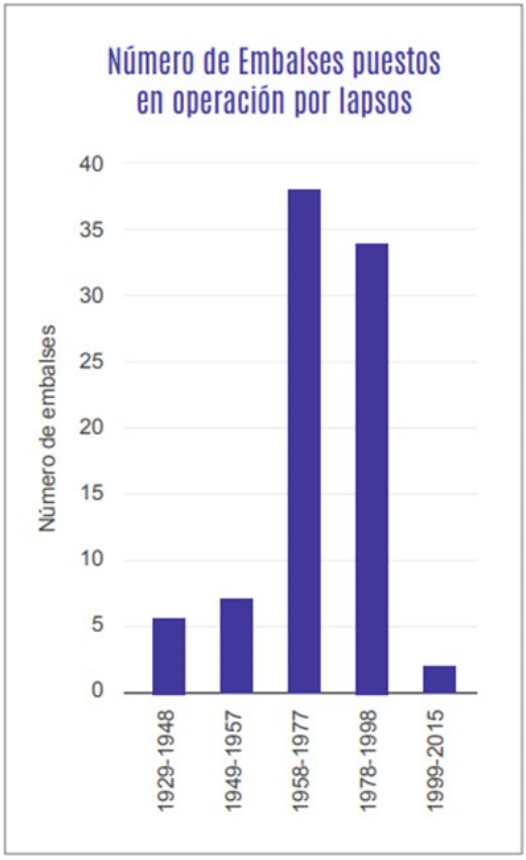


Figura 4. Número de embalses construidos período 1929-2015. Fuente: (CEDICE. Observatorio Gasto Público)(s.f.)

ner la calidad de los recursos hídricos. Vale destacar que este tipo de obras no han sido suficientemente desarrolladas, existiendo a nivel mundial una brecha importante para llegar a las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En el caso venezolano, a finales de la década de los 90, se contaba con sistemas de tratamiento para aguas servidas urbanas en las principales conurbaciones del país (del orden de 60% de cobertura) (Lansdell, comunicación personal, 2025), no obstante, actualmente gran parte de esa infraestructura pública está abandonada, por lo que la cobertura de saneamiento es prácticamente nula. En lo que se refiere a las industrias privadas, el organismo de administración de aguas ha sido más estricto en la fiscalización para la implantación de estas obras, por lo cual se conserva parte de la infraestructura construida.

3 La generación de información básica

La red básica de medición nacional, conformada por estaciones climatológicas, pluviométricas, hidrométricas, hidrogeológicas con pozos de observación, y sensores remotos, constituye la plataforma de generación de datos para la investigación del ciclo hidrológico superficial y subterráneo.

La gestión de datos hidroclimáticos en Venezuela (Sajo-Castelli, Villalta, & Bravo de Guen, 2014) se inicia con el Observatorio Cajigal en 1888; a partir de 1947 el organismo manejaba la red meteorológica a nivel nacional con estaciones en Maracaibo, Mérida, Ciudad Bolívar, Calabozo, Puerto Cabello y la red pluviométrica de cuarenta estaciones esparcidas por todo el territorio; posteriormente este sistema pasa a ser gestionado por el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, a excepción de la estación Cagigal. Luego otras instituciones instalaron y operaron redes de medición para diversos propósitos (MOP, Armada de Venezuela, EDELCA, INIA, UCV). Muchos de los entes a cargo de estas redes desaparecieron o se fusionaron con otras instituciones, por lo que algunas estaciones de medición dejaron de estar operativas. Los antiguos ministerios de Obras Públicas, Agricultura y Cría así como el Instituto Nacional de Obras Sanitarias, transfirieron sus redes al también ahora extinto Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, el cual poseía el mayor volumen de información pluviométrica, hidrométrica y climatológica del país. A partir del año 2009, se establece el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), actualmente adscrito al MINEC, con funciones de integrar los distintos servicios de meteorología e hidrología que ofrecen diferentes instituciones en el país, modernizar la recolección de datos e integrar y generar información a nivel regional y nacional. En lo que se refiere a las aguas subterráneas, estudios realizados por el Ministerio de Minas e Hidrocarburos de los años 70, proponían la instalación de unos 1500 pozos de observación conformados en 35 redes al norte del Orinoco; no se consiguió información sobre la situación de la red existente de pozos de observación.

Vale destacar que con los cambios institucionales desarrollados en los últimos años, se ha diseminado parte de la información y algunos esfuerzos realizados para su recuperación adolecen de la coordinación necesaria para el logro del establecimiento de una plataforma de datos adecuada con un patrón uniforme en cuanto a las tecnologías utilizadas para la captación de datos, con problemas en procesos de migración de estaciones de medición tradicionales a estaciones de medición automáticas; tampoco se ha realizado la carga sistemática y periódica de datos para lo cual se requiere de

talento humano que realice la administración y el mantenimiento de herramientas, con visión a corto y mediano plazo, previendo productos y servicios que consideren nuevas tecnologías de medición tales como sensores remotos, imágenes satelitales y equipos de radiosondeo para su posterior integración.

Vale destacar que la recuperación del sistema de levantamiento, procesamiento y análisis de información hidrometeorológica así como la data y estudios sobre aguas subterráneas, son requeridos para la toma de decisiones basadas en ciencia y evidencia, en los campos de la agricultura, la geología, la minería, la planificación urbana y la gestión del riesgo y del medio ambiente.

La combinación de datos climatológicos y de sensores remotos permite obtener una visión completa de la atmósfera y realizar predicciones más precisas.

4 Abundancia y distribución del recurso hídrico en Venezuela

Venezuela es un país con abundantes recursos hídricos, correspondientes en su mayoría a la cuenca del río Orinoco, uno de los principales ríos del mundo en razón de su caudal. Sin embargo, el patrón de asentamiento de la población hace que esta abundancia sea relativa, ya que el 80% de sus habitantes están ubicados en áreas que tienen del orden de 20% de los recursos hídricos. Por otra parte, el patrón de lluvias (isoyetas) le confiere una limitación temporal a la disponibilidad de los recursos hídricos en muchas de las cuencas, estableciendo dos temporadas marcadas: una de lluvia entre los meses de abril a septiembre y otra seca entre octubre y marzo. Los recursos hídricos aprovechables del país se estiman en el orden de 93 millones de m^3/año correspondientes a las aguas superficiales y 22,3 millones de m^3/año a las aguas subterráneas, que suponen 12% de los recursos hidráulicos totales renovables (Martínez, y otros, 2013).

La disponibilidad de estos recursos, si bien obedece en gran parte a la estacionalidad antes señalada, especialmente en las cuencas situadas al norte del río Orinoco, está siendo alterada por causa de los crecientes problemas de contaminación de los cuerpos de agua que han venido provocando los procesos de urbanización e industrialización sin una adecuada planificación, el uso de agroquímicos no biodegradables, las consecuencias de una actividad minera no controlada y la contaminación proveniente de derrames de crudo por accidentes producidos durante las actividades de explotación y transporte de la industria petrolera nacional así como descargas de aguas servidas de origen doméstico sin tratamiento. Estos problemas, aunque son

incipientes en algunas regiones, en otras están siendo causa de limitaciones severas para usos como el turístico-recreacional y para el mismo abastecimiento a las poblaciones.

5 Las vertientes y cuencas hidrográficas nacionales e internacionales del país. (Fig. 5)

Desde el punto de vista hidrográfico existen dos vertientes marítimas, la del Atlántico y la del Mar Caribe, mientras que las cuencas hidrográficas de Venezuela son seis, las cuales se describen a continuación:

5.1. Cuenca del Río Orinoco

Ocupa 770.000 km^2 en territorio venezolano. En su margen izquierda recoge las aguas que escurren por las vertientes orientales de los Andes y los Llanos Occidentales, el drenaje de la vertiente meridional de la Cordillera de la Costa y de los Llanos Centrales y Orientales.

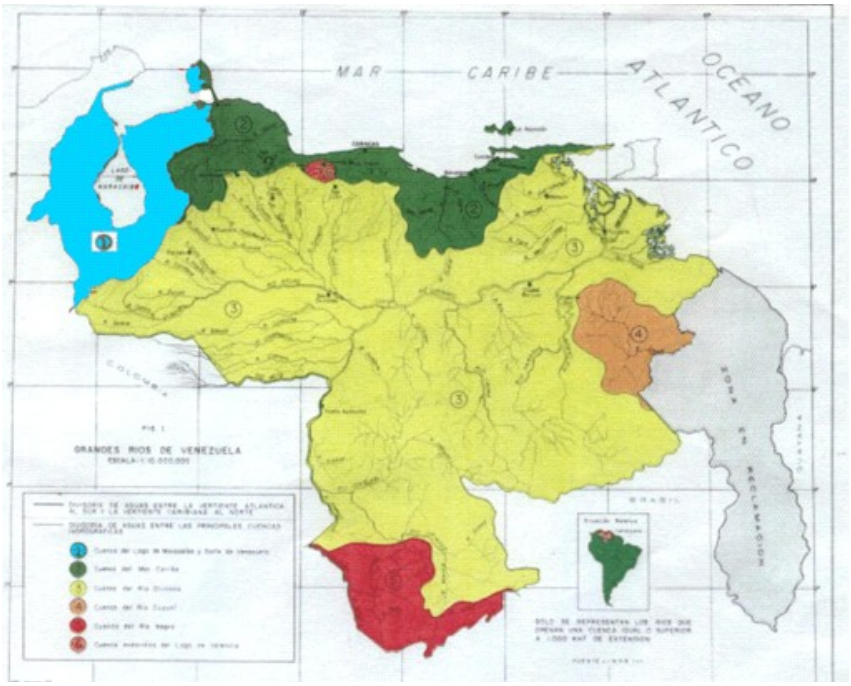


Figura 5. Vertientes y Cuencas hidrográficas de Venezuela. Fuente: COPLANARH, 1969.

Sobre esta margen confluyen diferentes ríos, entre ellos el Apure, que recibe las aguas de los ríos Portuguesa, Guanare, Guárico, Masparro y otros. Recibe los aportes de las cuencas internacionales de los ríos Arauca y Meta y de las cuencas colombianas de los ríos Tomo, Vichada y Guaviare que confluyen con el río Orinoco al sur del río Apure, mientras los ríos Manapiare, Morichal y Pao lo hacen al este de la confluencia con el río Apure. En la margen derecha del río Orinoco desembocan los ríos que drenan el escudo guayanés y son los que tienen mayor potencial hidroeléctrico del país, destacando el Caura y el Caroní.

Esta cuenca representa alrededor del 84% del territorio nacional y en ella se desarrollan importantes actividades económicas. En el área que drena hacia la margen izquierda del río Orinoco se encuentran desarrollos agrícolas de los estados andinos; agricultura tecnificada en los estados Portuguesa y Guárico; desarrollo de la ganadería y de la actividad forestal en los estados Barinas y Apure; y la actividad petrolera, fundamentalmente al sur de los estados Anzoátegui y Monagas.

El área que drena por la margen derecha del río Orinoco, la cual representa alrededor del 40% del territorio nacional con aproximadamente el 5,8% de la población del país, tiene una intensa actividad minero-industrial, ya que en ella se encuentra el 80% de los recursos mineros del país y se ha construido el desarrollo hidroeléctrico del río Caroní, el cual proporciona alrededor del 70% de la energía firme que consume el país, lo que permite un ahorro sustancial de barriles de petróleo al día en el consumo interno.

Adicionalmente, la principal vía fluvial del país la constituye el eje Orinoco-Apure, que atraviesa el territorio nacional en dirección oeste- este y que podría tornarse de gran importancia bajo una orientación del ordenamiento territorial dirigida al poblamiento y a la explotación de los recursos naturales del mencionado eje.

5.2. Cuenca del Lago de Maracaibo

Ocupa 74.000 km^2 en territorio venezolano. En esta cuenca se incluyen los cursos de agua que desembocan en el golfo de Venezuela. La forman los ríos que drenan la vertiente oriental de la cordillera de Perijá-Motilones, la península de la Goajira, la vertiente occidental de los Andes venezolanos y las vertientes norte y oeste de las elevaciones de Lara-Falcón. A esta cuenca también drena la vertiente internacional, ubicada en Colombia, del río Catatumbo.

Su actividad económica depende del petróleo, la cual se desarrolló de forma intensa. Cubría el 80% de la producción nacional de petróleo e hidrocarburos. El alto potencial de los suelos del sur del Lago de Maracaibo, permiten un desarrollo agrícola y ganadero significativo. Fue el primer productor de diversos rubros agrícolas y pecuarios: palma aceitera, uva, leche, queso, ganado bovino, ovino y aves; el segundo en huevos y el tercero en cambur, plátano y ganado caprino. Además, se cultivaba: caña de azúcar, coco, yuca, algodón, frijol, melón y sorgo. La producción forestal también fue significativa, y los recursos marítimos convierten la región en el segundo proveedor de pescado del país.

5.3. Cuenca del Mar Caribe

Ocupa 80.000 km^2. Drena a lo largo de sus casi 2.800 km de costa las vertientes orientales del sistema Lara-Falcón; las planicies costeras del oriente de los estados Falcón y Yaracuy; las vertientes septentrionales de la cordillera de la Costa y la depresión del Unare. Sus ríos principales son: El Tocuyo, Aroa, Tuy, Unare, Neverí y Manzanares. Esta cuenca y la del Lago de Valencia tienen la menor oferta de agua por km^2 por año y al mismo tiempo la densidad de población más alta del país.

Las actividades que se desarrollan en esta cuenca son de la más diversa índole, encontrándose el complejo refinador de crudo, destacado en Latinoamérica, en el estado Falcón y el Complejo Petroquímico de Jose en el Estado Anzoátegui; en el Distrito Federal y los estados Miranda y Vargas, se ubica el principal centro de servicios especializados del país en lo financiero, comercial y de comunicaciones; la industria manufacturera está fuertemente concentrada en el estado Miranda. En esta cuenca se desarrolla en forma importante la actividad pesquera, agrícola y el turismo.

5.4. Cuenca del Río Cuyuní.

Ocupa 40.000 km^2. Forma parte de la cuenca del río Esequibo y drena la vertiente nororiental del escudo guayanés. Su afluente principal en territorio venezolano es el río Yuruari. Las poblaciones más importantes en esta cuenca son Guasipati y El Callao. Este último es un pueblo minero donde existe un importante comercio de compra-venta de oro y diamantes.

5.5. Cuenca del Río Negro:

Ocupa 41.900 km^2 en territorio venezolano. El río Negro pertenece a la cuenca amazónica y constituye la frontera suroeste del país con la República de Colombia. Su principal afluente en territorio venezolano es el brazo Casiquiare en el Estado Amazonas. Gran parte de la cuenca está formada

por áreas definidas como de Régimen de Administración Especial (ABRAE) como son: parte del área del Parque Nacional Serranía de la Neblina y parte del área de la Reserva de Biosfera del Alto Orinoco.

5.6. Cuenca del Lago de Valencia

Ocupa 3.000 km^2. Es la única cuenca endorreica del país. El área que conforma esta cuenca pertenece a los estados Carabobo y Aragua, siendo estos estados también parte de la cuenca del Mar Caribe y del río Orinoco. La actividad económica de Aragua y Carabobo está asociada al desarrollo industrial, agrícola y pecuario.

Contó con industrias como: ensamblaje de vehículos, productos químicos y petroquímicos, combustibles, asfalto, gas licuado, papel, cerámicas para construcción, bebidas alcohólicas y gaseosas, productos alimenticios, envases de cartón, industrias metálicas, productos farmacéuticos, cauchos y electrodomésticos. En cuanto al desarrollo agrícola, fueron de los principales productores de berenjena, pepino, tomate, naranja, quinchoncho y cebolla a nivel nacional. Con relación al sector pecuario, también figuran entre los primeros productores de ganado porcino, aves y huevos del país.

En la tabla 1 se presentan los valores del volumen medio anual escurrido en el territorio de Venezuela incluyendo los aportes de las cuencas internacionales, sin incluir la zona en reclamación y en la tabla 2 se presentan los aportes de las cuencas internacionales.

Vale destacar la gestión sostenible en el contexto transfronterizo, reconocida en la meta 6.5 de los ODS, dado que el agua no conoce de límites político-administrativos y el acceso al agua en cantidad, calidad y temporalidad es indispensable para garantizar la salud, la seguridad alimentaria y las oportunidades económicas de los estados ribereños.

6. La disponibilidad de recursos hídricos en el país

Como se señaló anteriormente, la disponibilidad de los recursos hídricos tiene limitaciones temporales, que obedecen a los patrones climáticos de las diferentes regiones, y limitaciones espaciales, dependiendo de su distribución geográfica.

6.1, Disponibilidades relacionadas con el clima

Por su posición latitudinal (1º a 12º N), al norte de Sudamérica, Venezuela está bajo la influencia de la hondonada intertropical de bajas presiones ecuatoriales, donde convergen los vientos alisios del noreste y del sureste.

Tabla 1. Volumen Medio Anual Escurrido. Cuencas Hidrográficas. Fuente: COPLANARH, 1969.

Cuenca	Volumen (Hm^3)	Q (m^3/s)	%
Río Orinoco	1.071.188	33.967	88,08
Lago de Maracaibo	28.203	894	2,32
Mar Caribe	13.453	427	1,11
Río Cuyuní	26.085	827	2,14
Río Negro	76.905	2.439	6,32
Lago de Valencia	340	11	0,03
TOTAL	**1.216.174**	**38.565**	**100,00**

Tabla 2. Aportes de Cuencas Internacionales. Fuente: COPLANARH, 1969.

Aportes	Volumen (Hm^3)	Q (m^3/seg)
De los ríos Arauca, Meta, Tomo Vichada, Guaviare y otros de **Colombia** al río Orinoco de **Venezuela**	502.426	15.932
De los ríos Catatumbo, Zulia y otros de **Colombia** al Lago de Maracaibo en **Venezuela**	8.220	261
Del río Orinoco - Brazo Casiquiare - Río Negro de **Venezuela** al río Amazonas de **Brasil**	76.905	2.439
Del río Cuyuní de **Venezuela** al río Esequibo de **Guyana**	26.085	827

Como consecuencia de la circulación general de la atmósfera sobre el territorio venezolano es posible distinguir dos períodos denominados comúnmente "verano" (período de sequía) e "invierno" (período de lluvias). De diciembre hasta abril la mayor parte del país está afectada por los vientos Alisios del noreste, donde se produce subsidencia de las masas de aire, que origina fuertes inversiones de temperatura a alturas de 1500 a 2000 msnm (inversiones del Alisio). Por encima de esa altura, el aire carece casi por completo de humedad, por lo que el proceso convectivo de formación de nubes se ve muy limitado, produciendo así la temporada seca sobre Venezuela. La región norte del país se ve afectada con relativa frecuencia por perturbaciones de origen extratropical, especialmente frentes fríos, entre enero y abril, que provocan precipitaciones dentro de la temporada seca.

Desde mediados de abril hasta noviembre, debido al desplazamiento gradual del sistema de presiones hacia el norte, el país está casi en su totalidad bajo la influencia de la zona de convergencia intertropical, franja de muy

intensa actividad convectiva (formación de nubes), que determina la temporada lluviosa sobre Venezuela. La zona sur del país, entre los paralelos 1º y 4º N aproximadamente, está siempre bajo la influencia de la convergencia intertropical, por lo que nunca se presenta un período seco.

En Venezuela se presentan muy diferentes situaciones climáticas; la precipitación varía de menos de 400 mm anuales en parte de la franja costera a más de 4000 mm anuales en el sur del país, y las temperaturas medias diarias oscilan de más de 28ºC a menos de 0ºC en los páramos andinos.

Según la clasificación de Koeppen, en Venezuela existen los siguientes tipos climáticos: (Pardo, s.f.)

(i) **Tropical Desértico (árido)**, ubicado hacia la franja costera de los estados Falcón y Sucre, en el golfo de Cariaco, en las islas de Coche y Cubagua, y en la zona de La Restinga de la Isla de Margarita.

(ii) **Tropical Estepario (semiárido)**, ubicado hacia la parte norte de los estados Zulia y Falcón, la depresión Lara-Falcón, la zona costera central, las zonas costeras de la depresión de Unare y parte del estado Sucre, hacia el golfo de Cariaco y gran parte de la Isla de Margarita.

(iii) **Tropical de Sabana**, ubicado en toda la zona de los llanos, en los piedemontes de las serranías de la Costa y de los Andes, en gran parte de los estados Zulia y Lara, en todo el norte del estado Bolívar, incluyendo la zona de la Gran Sabana, en parte de la costa de los estados Falcón y Yaracuy, y en parte de la costa del golfo de Paria.

(iv) **Tropical Monzónico**, ubicado como una franja transicional entre los climas tropical de sabana y tropical de selva, hacia el piedemonte de Perijá, al sur y parte de la costa oriental y suroriental del Lago de Maracaibo, en parte de las costas del estado Sucre y el piedemonte de Turimiquire, en parte de los estados Delta Amacuro, Bolívar y Amazonas, en el piedemonte de las serranías de San Luis (estado Falcón) y de la costa (estados Yaracuy, Carabobo, Aragua y Miranda).

(v) **Tropical de Selva**, ubicado hacia las sierras de Perijá y San Luis, el sur del lago de Maracaibo, Barlovento, en la parte oriental de los estados Delta Amacuro y Bolívar, en la parte sur del estado Bolívar y en todo el estado Amazonas.

(vi) **Templado de Altura Siempre Lluvioso**, ubicado hacia las zonas más elevadas de los estados Bolívar y Amazonas, en las partes más altas de las serranías de Turimiquire y de Perijá, en ambas vertientes de la cordillera de los Andes y en la zona de El Nula, estado Táchira.

(vii) Templado de Altura, ubicado en gran parte de la cordillera de los Andes.

(viii) Páramo de Altura, ubicado en las zonas localizadas a más de 3000 msnm en la cordillera de los Andes.

(ix) Glacial de Altura, ubicado en los picos nevados de la cordillera de los Andes.

Además de estas diferencias en los climas del país, dentro de cada gran región climática se presentan diferencias espaciales y temporales en el comportamiento de los parámetros climáticos.

6.2. Disponibilidades relacionadas con la distribución espacial

En este punto se consideran dos tipos de disponibilidades: la determinada por la distribución espacial superficial y las relacionadas con los recursos hídricos subterráneos.

6.2.1. Distribución espacial del escurrimiento superficial

La distribución espacial del escurrimiento superficial en Venezuela se caracteriza por los siguientes aspectos:

(i) El volumen medio anual escurrido en el territorio de Venezuela y generado por las precipitaciones que caen sobre él, sin incluir la Guayana Esequiba, se estima en 705 millones de m^3.

(ii) Las cuencas de los ríos ubicadas en los estados Amazonas y Bolívar, que contribuyen al río Orinoco por la margen derecha, generan alrededor del 82% del volumen antes mencionado.

(iii) La región del país situada al norte del río Orinoco genera el 18% restante, del cual un 9% lo aportan los afluentes del río Orinoco de los Llanos Centro Occidentales. El otro 9% corresponde al Lago de Maracaibo, la vertiente del Mar Caribe, la cuenca del Lago de Valen cia y Golfo de Paria.

En la tabla 3 se presentan los volúmenes medios anuales de las diferentes regiones de Venezuela, incluyendo los aportes de las cuencas internacionales.

6.3 Disponibilidades de recursos hídricos subterráneos

Venezuela tiene importantes reservas de aguas subterráneas (tabla 4), que no han sido cuantificadas a cabalidad. En general, son aguas de buena

Tabla 3. Volumen Medio Anual Escurrido por Regiones. Fuente: COPLANARH, 1969.

REGION	AREA (km^2)	VOLUMEN MEDIO ANUAL (m^3 X 10^6)	RENDIMIENTO UNITARIO (m^3 X 10^6)/km^2
Zuliana	54.949	25.146	0,46
Centro-Occidental	74.217	16.966	0,23
Llanos Centrales	146.687	193.550	1,32
Andes	65.632	28.863	0,44
Sur Del Orinoco	451.138	934.215	2,07
Nor-Oriental	88.714	9.733	0,11
Central Y Capital	31.618	7.700	0,24
Totales	912.954	1.216.174	1,33

Tabla 4. Reservas Totales de Aguas Subterráneas por Regiones (al norte del río Orinoco). Fuente: Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1970.

Región COPLANARH	Superficie Miles km^2	Volumen de Reservas Billones de m^3
1 Lago de Maracaibo	61,90	0,9
2 Costa Noroccidental	24,77	0,4
3 Región Centro Occidental	20,66	0,3
4 Llanos Centro Occidentales	140,36	2,5
5 Sur de Apure	68,65	0,4
6 Central	18,54	0,2
7 Centro Oriental	71,02	1,7
8 Oriental	62,15	1,3
Total	**468,05**	**7,7**

calidad utilizadas para el abastecimiento de poblaciones -previo tratamiento primario- y para riego.

Las **provincias hidrológicas** (Fig. 6) (González Sanabria & Coronel Borges, 2015) son regiones con características similares en cuanto a geología, clima, fisiografía e hidrología, vegetación, suelos y tipos de acuíferos.

En Venezuela se diferencian cuatro provincias hidrológicas con capacidades importantes de aprovechamiento:

A Provincia Andina- Vertiente Atlántica y del Caribe
B Provincia Planicies Costeras
C Provincia del Orinoco (Llanos)
D Provincia del Escudo Septentrional o de Guayana

Figura 6. Provincias hidrológicas de Venezuela. Fuente: Decarli González Sanabria & Coronel Borges, 2015.

De los inventarios realizados en Venezuela, los acuíferos se pueden clasificar de la siguiente manera:

(i) Acuíferos de gran potencialidad: mesa de Guanipa en Anzoátegui, Llanos Orientales en Monagas, sistema de riego del río Guárico, lla nos de Barinas y Portuguesa, llanos de Apure.

(ii) Acuíferos con potencial medio: Cuenca del río Motatán en Trujillo, Barlovento en Miranda, Valle de Caracas.

(iii) Acuíferos sobreexplotados o con problemas de salinización: Valle de Quíbor en Lara, acuífero de Coro y península de Paraguaná en Falcón

En cuanto a acuíferos transfronterizos conectados con países vecinos vale destacar (Fundación de Educación Ambiental-Fundambiente, 2006):

(i) Acuífero Roraima entre Brasil y Venezuela

(ii) Acuífero Amazonas entre Colombia, Ecuador, Perú, Brasil y Vene zuela

(iii) Acuífero La Goajira, Carraipía- Paraguachón entre Colombia y Ve nezuela

(iv) Acuífero Táchira- Pamplonita. Eje Villa del Rosario Cúcuta- San Antonio Ureña entre Colombia y Venezuela.

La identificación de estos acuíferos surge de la participación de Venezuela en el programa de Acuíferos Transfronterizos de la Américas, auspiciado por la UNESCO-OEA y el Programa Hidrológico Internacional (PHI).

En lo que se refiere a la calidad de las aguas subterráneas vale resaltar que es mucho más fácil prevenir su contaminación que remediarla. En Venezuela la condición de país petrolero se ha traducido en la afectación de acuíferos; también destacan procesos de contaminación por actividades antrópicas (rellenos sanitarios y sus lixiviados), riego y precipitaciones sobre zonas cultivadas tratadas con pesticidas y fertilizantes así como afectaciones a los acuíferos costeros que por sobreexplotación o variaciones del nivel del mar por el cambio climático, pueden ser objeto de intrusión salina. Vale resaltar que durante los últimos años, dada la discontinuidad de los servicios de agua potable en prácticamente todo el país, la población ha buscado soluciones propias a través de la perforación de pozos y aprovechamiento de los acuíferos, lo cual se viene desarrollando sin el control adecuado requerido para dar sostenibilidad en el uso de estos recursos hídricos.

La adecuada explotación de los recursos hídricos subterráneos requiere mejorar la investigación y el conocimiento de la cantidad y calidad del agua disponible; dicho conocimiento permitirá el desarrollo de políticas y lineamientos para el uso de estas aguas con perspectivas de sostenibilidad ambiental. En ese sentido vale destacar el uso de métodos indirectos con sensores remotos y equipos de prospección geoeléctrica, técnicas nucleares a través de isótopos, modelos de transporte y flujos subterráneos con base en datos de pozos de observación, sistemas de información geográfica aplicados a las aguas subterráneas, instrumentación y protocolos de comunicación de sensores de niveles y calidad de agua.

7 Usos y Demandas de los Recursos Hídricos en Venezuela

Siendo que el agua constituye un elemento fundamental para la vida y para el desarrollo, cualquier actividad humana requiere usar el vital líquido de manera directa o indirecta.

> "*A lo largo de la historia, el progreso humano ha dependido del acceso a agua limpia y de la capacidad de las sociedades para aprovechar el potencial del agua como recurso productivo*"(ABC del este, 2006).

La Asamblea General de las Naciones Unidas reconoce que

> "*el derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos*" (Naciones Unidadas, 2010).

Sobre esto, es importante señalar que para garantizar este derecho, lo más importante y efectivo es administrar adecuadamente los usos del recurso hídrico, mediante la implementación de políticas, legislaciones y prácticas que aseguren la disponibilidad en cantidad y calidad del recurso, de forma sostenible.

La ordenación del uso de los recursos hídricos obedece a múltiples objetivos y navega entre intereses que compiten. Dentro de una nación, esos intereses (familias, agricultores, empresas de generación hidroeléctrica, usuarios de las aguas con fines recreativos, ecosistemas) pueden ser excluyentes y las probabilidades de alcanzar una solución aceptable para las partes se reducen a mayor número de interesados.

Si a esta situación le añadimos las fronteras internacionales, las probabilidades se reducen aún más. Sin mutuo acuerdo, es posible que las partes se encuentren inmersas en una controversia e incluso en conflictos, bien entre ellas, bien con las autoridades estatales. El agua rara vez es la única causa de un conflicto y casi nunca es la causa principal, pero puede agravar las tensiones existentes y, por tanto, ha de considerarse en el contexto más amplio de conflicto y paz.

En el año 1972 como resultado de la iniciativa de planificar el aprovechamiento del agua en Venezuela, se publicó el Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos por la comisión homónima COPLANARH. Allí se definieron "regiones hidrográficas" obedeciendo a la disposición natural del agua por cuenca y a la relación entre sus usos,

demandas potenciales y conflictos del momento; también se consideraron relaciones entre ciudades y poblaciones menores con sus actividades económicas (Useche Kislinger, 2015). Esta regionalización se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Regiones hidrogeográficas de Venezuela (Coplanarh, 1972).

No	Nombre de la Región Hidrográfica	Cuencas
1	Lago de Maracaibo y Golfo de Venezuela	Charrapía, Paraguachón, Limón, Palmar, Apón, Santa Ana, Catatumbo, Escalante, Chama, Motatán, Machango, Pueblo Viejo.
2	Falconiana	Matícora, Hueque, Ricoa, Mitare, Capatárida.
3	Centro Occidental	Tocuyo, Aroa, Yaracuy, ríos que drenan al litoral del Edo. Carabobo.
4	Lago de Valencia	Aragua, Limón, Turmero, Maracay, Carabobo, Cabriales y Las Minas.
5	Central	Tuy, Guapo, Cúpira, Capaya, ríos que drenan al litoral central de los estados Vargas (La Guaira), Miranda y Aragua.
6	Centro Oriental	Unare, Zuata, Pao, Aragua, Manapire, Aracay, Cabrutica, Aribí, Caris.
7	Oriental	Neverí, Carinicuao, Manzanares, Amana, Guarapiche, San Juan, ríos que drenan al litoral del estado Sucre y ríos del estado Nueva Esparta.
8	Llanos Centrales	Guárico, Guariquito y Tiznados.
9	Llanos Centro Occidentales	Portuguesa.
10	Alto Apure	Uribante, Masparro, Sarare, Santo Domingo, Paguey, Suripa y Alto Apure hasta la desembocadura del Sarare.
11	Bajo Apure	Apure, Arauca, Capanaparo, Cinaruco, Cunaviche y Meta.
12	Amazonas	Orinoco, Brazo Casiquiare, Ventuari, Ocamo, Sipapo y Cutucunuma.
13	Caura	Caura, Suapure, Cuchivero y Aro.
14	Caroní	Caroní.
15	Cuyuní	Cuyuní, Yuruari, Yuruani.
16	Delta	Bajo Orinoco, Morichal Largo, Uracoa. Mánamo, Macareo.

7.1. Los usos consuntivos

Son aquellos en los que el agua utilizada no retorna a la fuente de extracción, ya sea porque se evapora, se incorpora a productos o cosechas, o porque es consumida por personas o animales. Estos usos representan una pérdida de agua para el ciclo hídrico y requieren una gestión eficiente para asegurar la sostenibilidad del mismo.

7.1.1. Uso: agua potable para consumo humano y saneamiento. Drenaje urbano.

El desarrollo humano y la tendencia del hombre a aglutinarse en centros poblados de diversos tamaños, en muchos casos en permanente y descontrolada expansión, ha promovido la caracterización del agua como atributo urbano, que pasa por el **reconocimiento de la conversión del agua como recurso natural en la fuente, al agua potable suministrada**

a la población como un servicio público de características monopólicas; en el contexto urbano, el servicio de agua potable debe verse como un bien económico, con requerimientos en obras de infraestructura y tecnologías inherentes a la prestación de dicho servicio. Adicionalmente, toda el agua potable utilizada en los centros urbanos debe ser recogida y tratada a través del servicio de recolección y tratamiento, para ser devuelta a la naturaleza en condiciones al menos aceptables, en términos de evitar impactos en la salud del hombre y de los organismos vivos en general.

Los procesos de producción de agua potable para uso doméstico y recolección y tratamiento de aguas servidas, incluyendo la posible reutilización de estas últimas o de subproductos de los procesos, como por ejemplo los lodos, conforman un ciclo de economía circular del recurso hídrico.

En ese sentido, se presenta la Figura 8 en la cual se ilustra el Ciclo Urbano del Agua con los servicios que lo abarcan:

Figura 8. Fases del ciclo urbano del agua. Fuente: (Agua Ecosocial, s.f.)

En lo urbano es también muy relevante lo concerniente al agua de lluvia, en un ambiente de alteración de la escorrentía natural (cauces) y poca infiltración por asfaltados. Por fenómenos atmosféricos asociados a eventos extremos, que encuentran la impermeabilización de los suelos en la ciudad, se producen inundaciones en zonas bajas o en zonas de riesgo por su alta vulnerabilidad, en muchos casos ocupadas por mal uso de la tierra, desatendiendo las recomendaciones señaladas en los planes de desarrollo urbano local (PDUL); dentro de este aspecto destaca el arrastre de residuos sóli-

dos por aguas pluviales en cauces y quebradas en las que se ven comprometidas sus capacidades y se generan desbordes y severos problemas de drenaje en áreas naturales inundables. En este contexto cobra relevancia la necesidad de afrontar la **gestión de riesgo** como estrategia para la prevención y/o minimización de desastres en los centros poblados.

Como instrumentos para la gestión de los servicios públicos de agua potable y saneamiento así como el riesgo destacan: la planificación, cultura de uso y consumo del agua así como la forma institucional y organizacional para la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento y para atender los problemas de drenaje.

El abastecimiento de agua potable constituye el uso prioritario a la hora de dirimir conflictos en la asignación de derechos de aprovechamiento del recurso agua. Adicionalmente es importante mencionar que es considerado como un derecho humano, tal como se señala en el Objetivo N^0 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), pretendiéndose el logro del acceso universal a este servicio y promoviendo la preservación de la calidad del agua y su uso eficiente. Adicionalmente cabe destacar que proveer agua potable está íntimamente ligado al logro del fin de la pobreza (ODS 1), que en nuestras ciudades, en general, está inscrita en las zonas periféricas que a la vez constituyen las zonas más críticas para la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento. Las personas que no cuentan con este servicio están expuestas a enfermedades diarreicas, cólera, fiebre tifoidea, parásitos y otras.

7.1.1.1 Demandas de Agua Potable

Se entiende como demanda de agua potable la cantidad de agua que utilizarían los habitantes de una población según sus usos y costumbres, en caso de no existir ni pérdidas, ni desperdicios, ni limitaciones al consumo. Se expresa en litros por persona por día (lpd).

En Venezuela, para establecer demandas con fines de planificación y proyectos, se cuenta con el estudio «Actualización de la Metodología y los Parámetros Fundamentales para el Cálculo de la Demanda Urbana» (Azpurua Marturet, 1993), en su primera versión de la década de los 80 y actualizado en 1993 para HIDROVEN. El estudio arroja valores que alcanzan dotaciones que varían entre 160 lpd para ciudades de los estados andinos y Amazonas, hasta los 230 lpd en ciudades de los estados Lara, Nueva Esparta, Zulia y Falcón. Los valores de demandas fueron determinados a través de métodos teóricos, y están compuestos por demandas doméstica,

comercial, industrial, público-educacional y flotante; este estudio fue uno de los pilares sobre los cuales se fundamenta la última actualización, realizada durante la década de los 80, de la serie de documentos que constituyen la denominada Serie Azul, Agua en el Medio Urbano de la «Actualización del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos».

Vale destacar que las tendencias actuales apuntan a establecer incentivos para regular los consumos así como implantar la medición de los mismos para los usos residenciales, comerciales e industriales, toda vez que está probado que solo a través del pago del consumo real medido, es posible evitar demandas excesivas y desperdicios de consumo; además se requiere dar sostenibilidad financiera a los servicios a través, entre otros, de la facturación con tarifas adecuadas, ajustadas al consumo, que permitan la cobertura de costos de los servicios para una buena prestación.

Como valores guía de consumos, la OMS (OMS. Acción contra el hambre, 2021) asume necesarios entre 50 y 100 lpd que permiten cubrir las necesidades básicas, minimizando amenazas para la salud; los Programas de Ayuda Humanitaria fundamentan sus intervenciones con dotaciones entre 75 y 150 lpd.

7.1.1.2. Aspectos institucionales vinculados a los servicios de agua potable, recolección y tratamiento de aguas servidas.

En cuanto a la organización institucional para la prestación del servicio de APyS, a comienzos de la década de los 90, dado el agotamiento institucional centralizado del Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS), se adoptó un modelo desconcentrado para la prestación del servicio que, aunque desde el punto de vista legal sigue vigente, en la práctica no se ha puesto en marcha. En la Figura 9 a continuación se ilustra la transición entre los dos modelos institucionales que se adelantó en la década de los 90, dando participación al sector privado para la prestación de este servicio.

Vale la pena señalar que:

"*los ámbitos de actuación de las Empresas Hidrológicas Regionales definidos a principio de la década de los 90*" (Gabaldón, 2022)

corresponden en gran medida con las Regiones Hidrográficas definidas en el Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH), lo cual obedece a la necesidad de visualizar a la "Cuenca" (Fig. 10) como unidad de gestión.

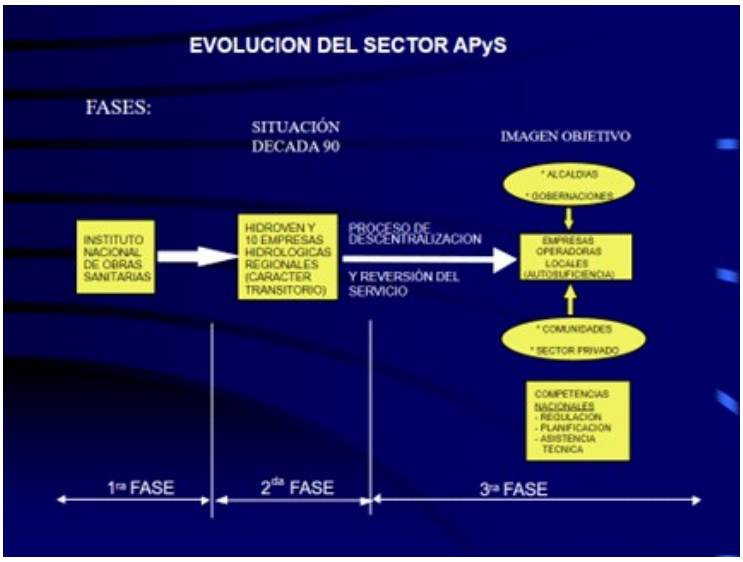


Figura 9. Evolución del sector Agua Potable y Saneamiento Fuente: Flores, 1997.

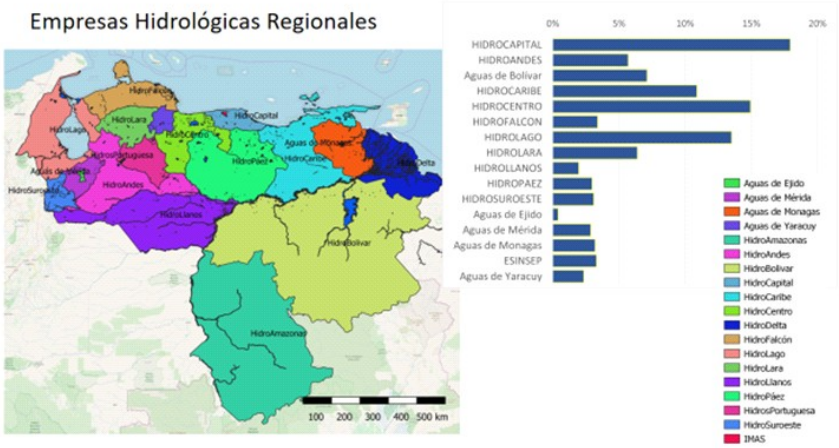


Figura 10. Empresas hidrológicas regionales. Fuente: Elaboración propia. 2019

En lo que se refiere al drenaje urbano, institucionalmente está a cargo de las alcaldías incluyendo la limpieza y el mantenimiento de los cauces y quebradas.

7.1.1.3. Infraestructura para servicios de APyS

Venezuela cuenta con seis sistemas regionales de agua potable con capacidades robustas, los cuales se surten fundamentalmente de fuentes superficiales y en su mayoría tienen requerimientos considerables de energía eléctrica. Estos sistemas fueron diseñados para cubrir las demandas de los grandes centros poblados del país y son: Acueducto Metropolitano de Caracas, Acueducto Regional del Centro, Acueducto Regional del Táchira. Sistema Turimiquire -Clavellinos, Acueducto El Tocuyo- Barquisimeto, Sistema Maracaibo.

En general, el resto de centros urbanos de tamaño medio también cuentan con infraestructura suficiente para la prestación del servicio, aunque actualmente están deterioradas por deficiente mantenimiento y fallas generalizadas de suministro de electricidad.

Durante la década del 70, se desarrolló en Venezuela un concienzudo programa para dar cobertura del servicio en las poblaciones rurales, lo cual se desarrolló a través de la Dirección de Malariología del antiguo Ministerio de Sanidad y Asistencia Social.

Se estima que a nivel nacional la capacidad instalada para suministro de agua potable alcanza unos 112.300 l/s en acueductos urbanos, con un 40% no operativo y 10.000 l/s adicionales en acueductos rurales (Bausson, 2024).

Vale destacar que actualmente no se conoce el nivel de explotación de las aguas superficiales y dadas las restricciones del servicio, la población ha buscado soluciones propias, fundamentalmente a través de perforación de pozos, sin el adecuado control administrativo.

En lo que se refiere al tratamiento de aguas servidas domésticas, se llegaron a construir sistemas de tratamiento en las ciudades de La Asunción- Porlamar- Pampatar, Juan Griego, Barcelona- Pto. La Cruz, Cumaná, Maturín, Pariaguán, Mochima, Valencia- Maracay, El Tigre, El Tigrito, Clarines, Pto. Ordaz, San Félix, Morón, Coro, Pto. Fijo, Machiques, Maracaibo y Los Teques, con cobertura del orden del 60% a nivel nacional (Lansdell, comunicación personal, 2020); no obstante, gran parte o la totalidad de estas instalaciones están abandonadas por lo que la cobertura actual de tratamiento es prácticamente nula.

Para la región andina, la empresa Tahal Consulting Engineers LTD elaboró el Proyecto MERBAR que abarcó los estados Mérida y Barinas, el cual contenía el diseño de colectores y plantas de tratamiento de aguas

servidas; en Barinas se construyeron plantas depuradoras con base en sistemas de lagunas de estabilización y posterior desinfección; sin embargo para el estado Mérida no se construyó la infraestructura diseñada. También se realizaron diseños para el estado Trujillo (Valera y Trujillo) y se construyó un sistema de lagunas. Adicionalmente se cuenta con los diseños de ingeniería para el saneamiento del río Albarregas (colectores marginales para incorporación de descargas en el Albarregas y planta de tratamiento en Ejido) (Espinosa, comunicación personal, 2024).

Vale mencionar que en Venezuela parte importante de los drenajes naturales de aguas de lluvia reciben aguas servidas a lo largo de sus cauces. Además, es común la utilización de sistemas mixtos de cloacas y drenaje.

7.1.1.4 Desafíos

Los retos que impone la modernización del ciclo urbano del agua pasan por desarrollar estrategias hacia la obtención de data, mejora de procesos, adopción de nuevas tecnologías y soluciones digitales así como cambios culturales e institucionales que permitan la utilización del recurso con objetivos de sostenibilidad, entre otros:

(i) Adopción de la institucionalidad prevista en la Ley del Servicio de Agua Potable y Saneamiento, distinguiendo las funciones y responsa bilidades entre rectoría y prestación y que abarca, entre otras dispo siciones, el involucramiento del sector privado en dicha prestación. Así mismo se requiere que en la medida que se mejoren los servicios prestados en términos de continuidad y calidad, se ponga en marcha la medición de consumos y facturaciones con tarifas adecuadas, a la vez que los usuarios cumplan con los pagos que generen los recursos financieros para la sostenibilidad del servicio, así como la corrección de fugas domiciliarias que permitan evitar derroches y consumos exa gerados.

(ii) Para las empresas prestadoras se impone la necesidad de integrar tecnologías (recolección, integración y utilización de datos,digitalización de redes, SIG, gemelos digitales, otros) y telecomunicaciones (IoT, otros) que permitan disminuir fugas en instalaciones públicas; es importante también la conformación de equipos de trabajo con el talento humano calificado y requerido para una gestión eficiente.

(iii) Recuperación y mantenimiento de la infraestructura, particularmente los sistemas de producción y embalses así como los sistemas de de puración de aguas servidas.

(iv) Acoger conceptos como la reutilización, en donde sea posible, con métodos de tratamiento adaptados a la posibilidad de reuso posterior (riego con agua tratada de áreas verdes, como parques, entre otros).

(v) Retención de aguas de lluvia para usos posteriores y posibles recar gas de acuíferos.

(vi) Promover y retomar la elaboración de planes de desarrollo urbano local (PDUL) que incluyan la identificación de zonas de riesgo por inundación; es necesario que dichos planes sean utilizados por los gobiernos locales para la asignación de permisos de construcción y desarrollo de urbanismos, evitando afectaciones en zonas vulnerables o usos de la tierra que tengan propósitos alejados de los usos asignados en dichos planes, considerando también las denominadas Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo de desastres.

(vii) Diseño e implantación de sistemas de predicción y alerta temprana que permitan mitigar daños frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos. Desarrollo de cultura de riesgo frente a este tipo de amenazas.

7.1.2. Uso agrícola

El agua constituye un elemento fundamental en la producción agrícola; la garantía en su disponibilidad así como el control de excesos se traduce en mejores cosechas.

Dentro de este aprovechamiento es importante destacar la importancia del Enfoque Nexo Agua- Energía- Alimentación, estrategia que se formaliza a través de la Conferencia WEF Security Nexus en el año 2011, y se fundamenta en grandes problemas que aquejan a la humanidad como son la escasez de alimentos, el desafío planteado por el desarrollo y la demanda de energía, y el vínculo con el agua. De esta manera se reconoce explícitamente la interrelación entre estos factores y desde entonces se adelantan esfuerzos para el abordaje de esta problemática de manera coordinada y multisectorial, trabajando hacia objetivos comunes a la vez que se busca la optimización de inversiones. También vale resaltar que el uso del agua en la agricultura está íntimamente relacionado con el ODS 2 para reducción del hambre y el logro de la seguridad alimentaria.

La agricultura enfrenta los dos extremos climáticos del agua, por una parte los requerimientos en momentos de sequía que deben ser suplidos con

riego y por otra parte los excesos que inundan los suelos de zonas de baja pendiente y que deben ser drenados con obras hidráulicas para tal fin. A la vez, el uso de químicos agrícolas para aumentar el rendimiento de las cosechas, ocasiona la contaminación difusa en suelos y cursos de agua superficial y subterránea. Prácticas agrícolas inadecuadas originan erosión de suelos que además de disminuir su fertilidad, también afectan negativamente, por sedimentación, a embalses, obras de toma y cursos de agua, poniéndose en evidencia la necesidad de conservación integrada suelo- agua.

En la agricultura (Rojas, 2015) los balances hídricos se estiman con base en:

$$\text{Entradas} + \text{salidas} = \text{cambios de almacenamiento.} \quad (2)$$

Las entradas al sistema son: precipitación, riego y entradas laterales o subterráneas mientras que las salidas son: escurrimiento, evapotranspiración, percolación y flujos laterales efluentes. El almacenamiento está constituido por la humedad del suelo. La Figura 10 a continuación muestra un esquema del sistema suelo–cobertura y los flujos de agua que en él se presentan.

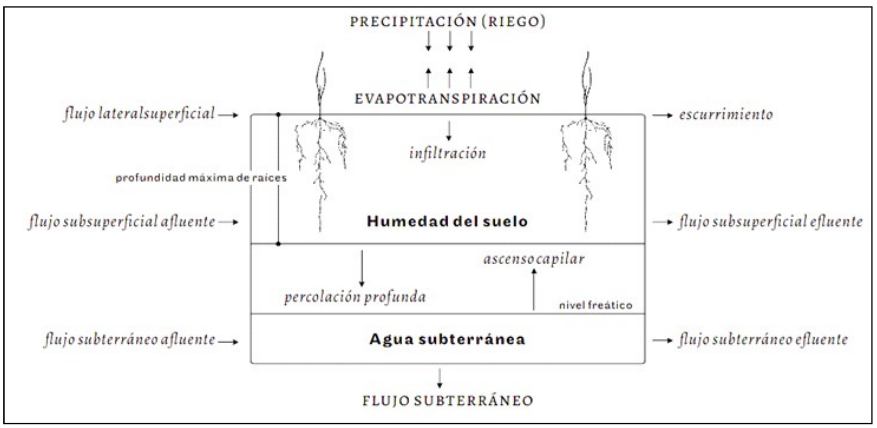


Figura 10. Esquema del sistema suelo-cobertura Fuente: (Rojas, 2015)

Con base en estos balances es posible determinar las necesidades de riego.

Vale destacar que a efectos de planificación es suficiente la elaboración de balances mensuales, sin embargo en la etapa de diseño de obras es necesario que los balances sean diarios, para lo cual es necesario contar con información climatológica de ese nivel y tecnología, a través de modelos hidrológicos, que permita el procesamiento de dicha información.

Los métodos de riego abarcan: inundación, melgas, surcos, aspersión, goteo y subterráneo o subirrigación; estos métodos varían la eficiencia en el uso del agua.

La selección de la fuente de agua para riego requiere de evaluaciones de las alternativas de aguas superficiales más cercanas y con rendimientos suficientes para satisfacer las demandas o de evaluaciones hidrogeológicas para el uso de aguas subterráneas.

La calidad de aguas es también un elemento importante en la selección de la fuente de riego toda vez que la presencia de sedimentos puede afectar las obras de captación, los equipos de bombeo y los goteros y aspersores; adicionalmente las sales y elementos tóxicos pueden afectar los cultivos y a los propios regantes. Vale destacar que las aguas con contaminantes bacteriológicos no pueden usarse en cultivos de consumos fresco; de allí que el riego con aguas servidas debe ser realizado previo tratamiento que garantice la idoneidad en su uso.

A nivel global el uso para riego constituye el de mayor consumo (70%), y la eficacia media de los sistemas de irrigación en el mundo oscila en 40 %.

En Venezuela el recurso agua no es limitante para el desarrollo agrícola y existe capacidad de producción tanto por riego como con agricultura de secano, esta última más afectada por la incertidumbre de las lluvias que resulta en menos productividad.

Es importante señalar la escasa valoración del recurso y nula cultura de pago del agua para riego en el país. Se conoce de casos en los que se han consolidado extensas áreas de riego utilizando agua potable, conducida por largas aducciones que son intervenidas antes de llegar a los centros poblados que debieran ser abastecidos (Sistema Clavellinos y Manuelote-Tulé como ejemplos).

7.1.2.1. El Riego en Venezuela

En el país, las áreas con alta necesidad de riego corresponden a la zona norte del estado Falcón, norte del estado Zulia, zona árida de Lara, Lagunillas–Estanques en Mérida, San Antonio–Ureña en Táchira, Litoral Central, norte de Anzoátegui y Sucre, así como Margarita e islas vecinas.

Las áreas para riego complementario corresponden a las zona de vida bosque seco tropical (bsT), caracterizadas por presentar evapotranspiración mayor que la precipitación; en esa zona están incluidas la mayoría de las

regiones agrícolas del país: Llanos altos occidentales: Táchira, Barinas, Portuguesa, Cojedes y Apure. Zonas circundantes del lago de Maracaibo, Llanos orientales de Anzoátegui y Monagas y Llanos centrales de Guárico.

7.1.2.2. El Drenaje Agrícola en Venezuela

En las zonas con problemas de drenaje confluyen características de altas precipitaciones, problemas de infiltración y topografía plana. La información geográfica disponible a nivel nacional no exhibe la calidad para hacer diagnósticos suficientemente detallados a los problemas de drenaje. No obstante estudios realizados muestran las áreas con suelos mal drenados del país (Fig. 11).

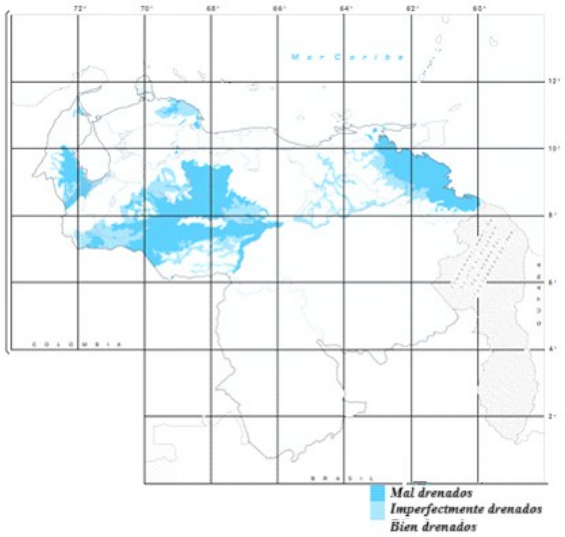


Figura 11. Suelos mal drenados de Venezuela. Fuente: Rojas, 2015.

7.1.3. Infraestructura para riego y drenaje en el país

La infraestructura para riego está constituida básicamente por: a) Obras de captación: embalses, dique-tomas o estaciones de bombeo, b) Obras de conducción: tuberías, canales, c) Obras de distribución: canales o tuberías secundarias o terciarias y d) Obras de control y medición.

Las obras de drenaje suelen ser de amplia cobertura dado que deben abarcar el control de los excesos que se generan aguas arriba del área a sanear así como las posibles afectaciones aguas abajo de dicha área; incluyen control de inundaciones y drenaje superficial y subsuperficial. Para el control de inundaciones destacan: a) Represas de control de inundaciones,

b) Canalizaciones: rectificaciones, revestimientos o dragado de cauce, c) Diques marginales y d) Pólderes. El drenaje superficial abarca: a) El canal principal colector u obra de descarga, b) Los canales secundarios, c) La red de colectores parcelarios y d) Las obras de conformación del terreno. Las obras de drenaje sub–superficial son similares a las obras de drenaje superficial en cuanto a la red colectora; la diferencia está en la necesidad de evacuar agua del perfil del suelo a través de drenes subterráneos como zanjas o tuberías enterradas, usualmente a más de un metro de profundidad.

Los pólderes se originaron en Holanda y consisten en sistemas de diques perimetrales que protegen los terrenos agrícolas contra las inundaciones. El agua que precipita dentro de ellos es eliminada por sistemas de compuertas y por bombeo.

En el siglo pasado, a partir de la década de los cuarenta, se inició la construcción de importantes obras públicas de sistemas de riego, tales como en: Cumaná, San Carlos, El Cenizo, Zuata, Taiguaiguay, Guárico, Guanapito, Las Majaguas, Guanare, Boconó, Santo Domingo, Cariaco y Tocuyo de la Costa, a través de los cuales se ha generado la cultura de riego existente en el país. Por su parte, los productores privados han desarrollado pequeños sistemas de riego, fundamentalmente en los Andes, donde se utilizan aguas superficiales y riego por aspersión así como sistemas medianos en Turén y los Llanos Orientales en la Mesa de Guanipa, donde se utilizan aguas subterráneas y riego por aspersión (Rojas, 2015).

Entre las obras de drenaje más importantes del país se pueden mencionar: Sistema de drenaje de la Colonia Agrícola de Turén, del Boconó–Masparro y obras de saneamiento del sur del lago de Maracaibo y de las tierras del río Chama, Módulos de Apure y sistema de compuertas de la isla Guara (Rojas, 2015).

La infraestructura de riego y de saneamiento de tierras construida por el estado venezolano ofrece capacidad de beneficiar 4.000.000 de hectáreas entre regables y saneables, distribuidas en: treinta y tres (33) grandes y medianos sistemas de riego, un mil ciento sesenta y uno (1.161) pequeños sistemas de riego y nueve (9) sistemas de saneamiento de tierras.

En la tabla 6 se presenta la distribución por regiones de la superficie regada y regable del país (López, Rodríguez, & Zerpa, 1984).

7.1.4 Desafíos

Los retos para la conservación del recurso hídrico utilizado en la agricultura apuntan a la adopción de prácticas agrícolas que promuevan la conser-

Tabla 6. Superficie Regada y Regable del País

Región	Área Regada (ha)			Área Regable (ha)
	Sector Público	Sector Privado	Total	
Central y Capital	16.010	52.590	68.600	88.650
Centro-Occidental	23.128	76.872	100.000	455.850
Andes	12.849	37.151	50.000	294.080
Llanos Centrales	43.227	7.473	50.700	138.250
Nor-Oriental	6.084	18.016	24.100	193.700
Sur del Orinoco	---	600	600	---
Zuliana	92	93.408	93.500	234900
Total Nacional	**101.390**	**286.110**	**387.500**	**1.405.430**

vación de cuencas, considerando el control de erosión de los suelos, así como afectaciones al agua por contaminación; en ese sentido es necesario mejorar el conocimiento del uso del agua en las zonas de riego, optimizar la gestión del suelo y el agua en las explotaciones agrícolas, reduciendo pérdidas y promoviendo un uso responsable de fertilizantes y plaguicidas. A continuación se señalas algunos retos específicos:

(i) Desarrollo de una base de datos especializada en riego y drenaje que pueda ser usada para la planificación, el diseño y la operación de las obras existentes o por construir.

(ii) Control del uso de los grandes sistemas de producción de agua potable en riego, caso Clavellinos y Manuelote-Tulé.

(iii) Desarrollo de Agricultura Inteligente basada en tecnología (sensores, IoT, imágenes de satélite, drones) para optimización del uso de agua para riego y detección de necesidades reales de agua en zonas espe cíficas así como de nutrientes en los cultivos y los suelos, utilizando técnicas de automatización y control, lo cual abarca:

> Mejoras tecnológicas en sistemas de control del volumen de agua con la monitorización del agua utilizada en las captaciones y la instalación de contadores en las parcelas agrícolas para registrar con precisión el consumo real.

> Monitoreo del contenido de agua en el suelo a través de sensores de humedad y teledetección, optimizando el riego en función de las necesidades hídricas de los cultivos, mejorando la eficiencia del uso del agua.

- Monitoreo de los retornos de riego a los cauces superficiales permitiendo medir la calidad y el volumen de agua devuelta a los cauces naturales.
- Monitoreo de los lixiviados que van a las aguas subterráneas, midiendo fertilizantes y plaguicidas, para controlarlos; diseño de mecanismos que reduzcan la contaminación de las masas de agua subterráneas.
- Desarrollo de agricultura de precisión con servicios profesionales que permitan transitar a mejoras en las técnicas de los agricultores.
- Desarrollo de programas de valoración, capacitación y tecnología en el uso del agua.

8.1. Los usos no consuntivos

Son aquellos en los que el agua utilizada retorna a la fuente de extracción.

8.1.1. Uso hidroeléctrico

La energía hidroeléctrica es una energía renovable que se genera gracias a la presencia del ciclo hidrológico, y permite un elevado nivel de eficiencia; es limpia ya que su producción no realiza emisiones contaminantes y prácticamente no produce gases de efecto invernadero. Tiene otras características relevantes: rápida respuesta ante fluctuaciones de la demanda, almacenamiento indirecto de energía en la forma de agua, es un uso no consuntivo del agua, regula las crecientes en aquellos sitios de aprovechamiento de regulación anual o multianual y pueden suplir picos de la demanda.

En Venezuela desde hace varias décadas la fuente principal de generación de energía eléctrica ha sido la hidroelectricidad con participaciones mayores al 60%. Es por todo lo anterior que la gestión del recurso hídrico, para preservarlo y garantizar su disponibilidad para su explotación con estos fines, cobra suma importancia.

Venezuela inició la generación hidroeléctrica en agosto de 1897 con la puesta en operación de la planta El Encantado sobre el río Guaire, con una potencia de 420 kW, y operada por la Electricidad de Caracas (EdC) para abastecer a una ciudad con una población de 72.500 hab (Rodolfo, 2014). A esta planta le siguieron varias más, igualmente puestas en funcionamiento por la EdC, hasta llegar en 1944 a una capacidad instalada de 20.000 kW

(Rodolfo, 2014), la mayoría de estas plantas dejaron de operar entre los años 60 y 70.

La electrificación rural con micro-centrales hidroeléctricas se inició en 1957 con la instalación en Kavanayén, en la Misión del mismo nombre en el Alto Caroní, una con 110 kW de potencia.

En 1949 la Corporación Venezolana de Fomento contrató un plan general de electrificación para el país, resultando en la propuesta de construcción de proyectos en el Bajo Caroní para aprovechar las caídas de agua. Luego en 1953 se crea la Comisión de Estudios para la Electrificación del Caroní y resultado de ello se concluye la Central Macagua I en 1961. Este es el inicio de la explotación a gran escala de la generación hidroeléctrica en el país.

Entre los estudios que se han realizado para identificar el potencial hidroeléctrico del país resaltan dos, por haber cubierto todo el territorio nacional. El primero de ellos publicado en 1969, denominado Potencial Hidro-Eléctrico Bruto Nacional, y el otro identificado como Inventario Nacional del Potencial Hidroeléctrico en 1985.

El primero de dichos estudios arrojó un potencial de 40.300 MW (sin incluir el Territorio en Reclamación), donde resaltaban las regiones: Guayana Oriental (ríos Cuyuní, Caroní y Aro), Guayana Occidental (ríos Caura, Cuchivero y Suapure) y el estado Amazonas (ríos Ventuari, Alto Orinoco y río Negro) con un 76% de participación y la Cordillera de los Andes con un 18% de participación del total nacional.

El segundo estudio, con un nivel de detalle mucho mayor, realizó análisis a tres niveles de detalle, pre-inventario, inventario y reconocimiento. A nivel de pre-inventario se evaluaron 47 cuencas (sin incluir el Territorio en Reclamación), que arrojaron una potencia y energía media de 11.015 MW y 96.500 GWh respectivamente (MARNR, 1984). A nivel de inventario se estudiaron 55 cuencas y se identificaron en ellas alrededor de 400 sitios de posible aprovechamiento hidroeléctrico y se seleccionaron 164 sitios de aprovechamiento para estudios a nivel de reconocimiento que arrojaron una potencia y una energía media de 11.255 MW y 98.599 GWh respectivamente (MARNR, 1985). A nivel de anteproyecto o proyecto se incluyeron sitios con estudios a más detalle y los cuales correspondían a los del Bajo Caroní y el río Masparro con una potencia instalada de 7.037 MW y una energía media de 50.100 GWh (MARNR, 1985).

También se evaluaron, como casos especiales, los aprovechamientos del río Orinoco y la posibilidad de utilizar los embalses construidos con fines hidroeléctricos. Para el caso del río Orinoco se evaluaron 5 sitios de los cuales 4 son excluyentes entre sí, la potencia y energía media estimada estaría entre los 7.000 y 20.000 MW y entre los 40.000 y 85.000 GWh respectivamente. En cuanto a los embalses construidos o en construcción, para ese momento, con usos diferentes al hidroeléctrico y que no presentaron incompatibilidad de uso, se analizaron 21 de ellos, resultando en una potencia firme de 63 MW y una energía garantizada de 480 GWh (MARNR, 1985).

Los proyectos hidroeléctricos utilizan el agua para la producción de energía; para ello hacen circular un caudal de agua a través de dos puntos situados a distinta altitud o cota, el agua adquiere velocidad en la conducción transformando la energía potencial (en el punto de cota más alto) en energía cinética cuando llega a la turbina. La turbina transforma esa energía cinética en mecánica, para que el generador la transforme a su vez en energía eléctrica. Por último, el caudal de agua abandona la turbina y desagua de nuevo al río con la energía potencial que corresponde a la cota del punto de descarga.

A continuación se presentan conceptos básicos sobre aprovechamientos hidroeléctricos, primero los conceptos sobre potencia y energía; posteriormente las formas de aprovechamiento de los cursos de agua y los componentes de un proyecto de generación:

Potencia: trabajo (T) que realiza un determinado volumen de agua (P: peso del volumen de agua) para desplazarse de una cota a otra (H: diferencia entre dos cotas), se expresa de la siguiente forma, T= P H. Si se hacen las correspondientes conversiones para expresar la potencia en términos del caudal, la ecuación resultante es:

$$\text{Potencia} = \eta\ \gamma\ Q\ H \qquad (3)$$

η = eficiencia de la turbina

γ = peso específico del agua

Q = caudal turbinado

H =diferencia entre la cota de entrada y de salida.

La potencia se suele expresar en kW o MW.

Potencia instalada: es igual a la suma de las capacidades de los generadores instalados en la central.

Energía: la potencia entregada durante un tiempo dará como resultado la energía. E= Pot. x t, la energía se expresa en kWh o GWh usualmente.

Energía firme: máxima energía que un aprovechamiento hidroeléctrico puede generar de forma ininterrumpida

Energía secundaria: energía producida con excedentes de escurrimientos que de otra forma serían aliviados

Energía media anual: promedio de la energía generada cada año durante el período hidrológico considerado

Sistema interconectado: conjunto de redes eléctricas de transmisión a niveles de tensión superiores a 230 kV, que puede conectar varios desarrollos hidroeléctricos y/o combinación con otras plantas de producción de electricidad. Para el caso de Venezuela incluye las redes de tensión de 400 kV y 765 kV.

Los componentes de un aprovechamiento con fines hidroeléctrico son: obras de captación y regulación del agua, obras de conducción, y obras de generación.

Las obras de captación y regulación están constituidas por las obras de infraestructura para almacenar y/o elevar el tirante de agua: presas y obras de derivación.

Las obras de conducción se refieren a la infraestructura que encauza las aguas desde donde se captan hasta la central.

Las obras de generación comprenden la casa de máquinas donde están alojadas entre otras, las turbinas (principales tipos: Kaplan, Francis y Pelton), generadores y transformadores.

Existen otros componentes como válvulas de regulación, chimenea de equilibrio, y canal de descarga.

En la figura se muestran los componentes de un proyecto hidroeléctrico.

Las centrales hidroeléctricas pueden ser clasificadas por su tamaño según la potencia instalada como se indica en la tabla 7.

De acuerdo al tipo de regulación, los aprovechamientos hidroeléctricos se clasifican en regulación, derivación, bombeo y maremotriz, los cuales se describen a continuación:

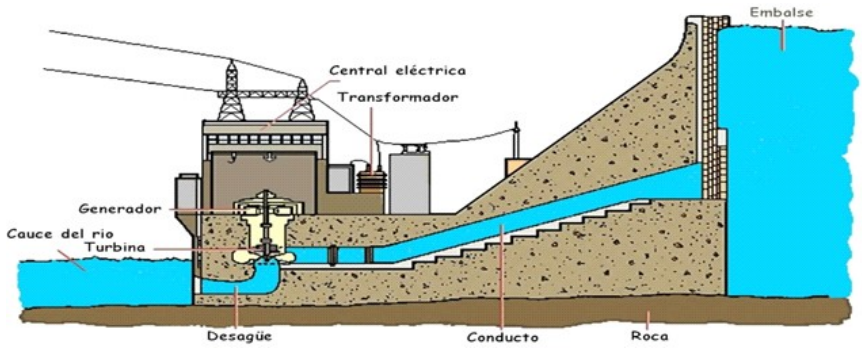


Figura 12: Componentes de un proyecto hidroeléctrico. Fuente: González Arias, 2012.

Tabla 7. Clasificación de las centrales por su potencia instalada. Fuente: (Gómez Medina & Pérez Godoy, 2015).

Tipo	Potencia (MW)
Micro	< 0,1
Mini	< 1
Pequeña	1-100
Media	> 100
Grande	> 500

(i) Central Hidroeléctrica con regulación del río a través de una presa de embalse. Este tipo de aprovechamiento regula la aportación del escurrimiento almacenando el agua por períodos anuales o multianuales.

(ii) Central Hidroeléctrica de Derivación (a Filo de Agua). Este tipo de aprovechamiento se caracteriza porque la infraestructura en el río permite levantar el nivel del agua para desviarla por la conducción hasta una cámara de carga y luego por una tubería forzada que la conduce a presión hasta las turbinas, luego es devuelta al cauce del río, tal como se muestra en la figura 13. Estos aprovechamientos dependen exclusivamente del agua que se puede derivar, es decir no se puede almacenar agua y por ende no se puede decidir sobre la producción de energía.

(iii) Central Hidroeléctrica de Bombeo. Este tipo de aprovechamiento produce electricidad para satisfacer las demandas pico, moviendo agua entre embalses a diferentes elevaciones. En momentos de baja

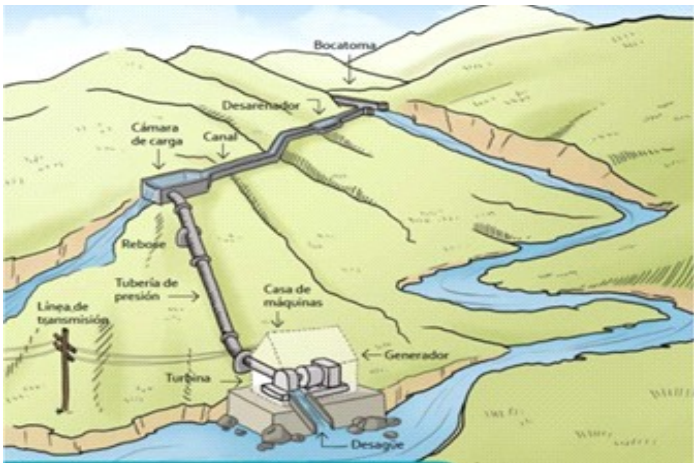


Figura 13. Central Hidroeléctrica con regulación del río a través de una presa de derivación (Filo de Agua). Fuente: https://energiahoy.com/2020/05/28/turbinas-hidroelectricas-y-sus-aplicaciones-ii-de-viii/

demanda eléctrica, el exceso de capacidad de generación se utiliza para bombear agua al embalse más alto. Después, cuando sube la demanda, desde el reservorio superior se produce energía mediante turbinas convencionales, tal como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Componentes de una Central Hidroeléctrica de Bombeo, Fuente: Iberdrola

(iv) Central hidroeléctrica maremotriz, El cuarto tipo de energía hidro eléctrica es la que utiliza la energía proveniente de los cambios en la marea. El principio es el siguiente: cuando sube la marea, se abren las compuertas unidireccionales y se llena un reservorio o depósito, que a continuación libera el agua a través de canales definidos que la conducen a través de una turbina y acciona la rueda hidráulica cuan do la marea cambia de dirección y baja. Los generadores de corrien te funcionan de modo que la marea empuja los rotores de una turbina a medida que entra y sale el agua, su funcionamiento es similar al de las turbinas eólicas, tal como se muestra en la figura siguiente.

Las centrales también pueden ser clasificadas por la altura de carga: Baja, menores de 30 m, Media, entre 20 y 100 metros y Alta, mayores de 100 metros.

De acuerdo al tipo de energía que suplen se clasifican en, de base o firme, mas de 3500 horas anuales de operación, intermedia, entre 1500 y 3500 horas de operación al año, y de punta, menos de 1500 horas de operación al año.

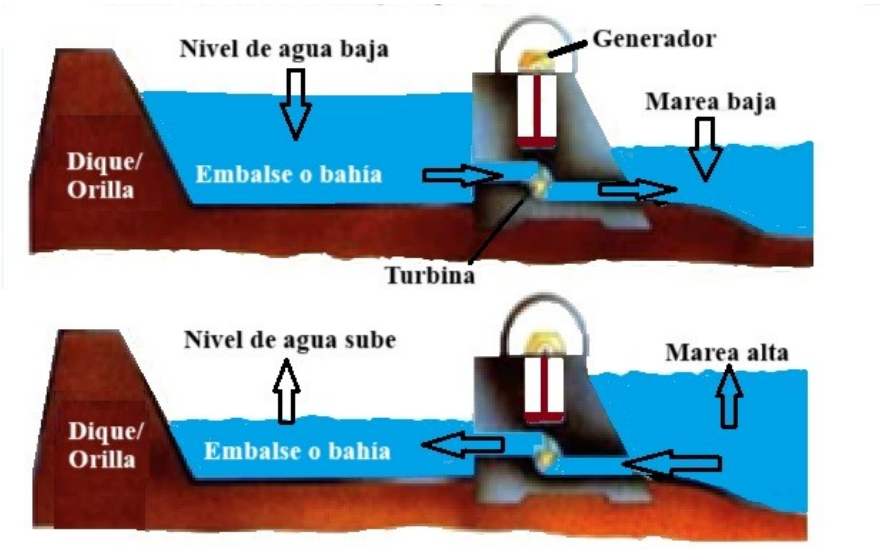


Figura 15. Central Hidroeléctrica Maremotriz. ModificadaTecnología IES Ciudad de Dalías, s.f.)

8.1.2 El uso hidroeléctrico en Venezuela

En Venezuela existen, para el año 2024, ocho centrales hidroeléctricas en operación con una potencia nominal instalada de 16.716 MW y una energía media de 70.729 GWh, dos en construcción con una potencia instalada prevista de 2.620 MW. Estos sitios de aprovechamiento y sus características se muestran en la tabla siguiente. Así mismo existen un total de 7 microcentrales en el Alto Caroní con una potencia instalada total de 1,406 MW y un estimado de 2 microcentrales en la región andina.

La generación media de energía de Venezuela para 1998 era de 78.947 GWh (Datosmacro.com, 1998). La participación de la hidroelectricidad en dicha generación alcanzó el máximo en ese año de 1998 con un valor de 74%, a partir de ese momento tuvo un declive sostenido, para 2017 se situó en 53% y para 2023 estuvo por debajo del 50%.

Según la Agencia Internacional de Energía, para 2023 la energía proveniente de la hidroelectricidad alcanza al 14% del total de generación mundial. Así mismo, la participación de la generación hidroeléctrica a nivel mundial ha experimentado una reducción desde el 17,2% en el año 2000 hasta el 14% de hoy en día.

Para el 2030 se estima que la generación hidroeléctrica continuará reduciéndose hasta el 13%, en contraposición a las energías eólica y solar que crecerán de un 8% hasta un 14% y de un 5% hasta un 16%. El comportamiento de la hidroelectricidad obedece al agotamiento de sitios de aprovechamiento de gran escala, el impacto ambiental que genera la construcción de estas obras y los largos tiempos de desarrollo, por el contrario se ha incrementado el desarrollo de sitios de aprovechamiento de menor escala.

Sin embargo, se espera un aumento en las centrales hidroeléctricas de pequeña escala y proyectos de modernización de infraestructura existente para mejorar la eficiencia y sostenibilidad, igualmente la generación hidroeléctrica continuará jugando un rol clave como respaldo para fuentes intermitentes como la solar y eólica.

Las propuestas del uso hidroeléctrico en Venezuela para los años futuros están condicionadas fundamentalmente por el crecimiento de la demanda y los recursos de inversión disponibles para la rehabilitación y desarrollo del Sistema Eléctrico del país, en el marco de un nuevo plan de desarrollo.

Se han realizado varias propuestas para la recuperación del sector, dentro de estas propuestas para el área de hidroelectricidad, se propone restituir la disponibilidad de la capacidad instalada al 80%.

Tabla 8. Aprovechamientos hidroeléctricos en Venezuela.

Sitio de aprovechamiento	Volumen Almacenado (Hm^3)	Año de incorporación Etapa final	Capacidad Instalada (MW)	Energía Media (GWh)	Capacidad no disponible para 2020 (MW)[1]
EN OPERACION					
RIO CARONÍ			15.511	67.550	7.086
A. José de Sucre (Macagua) (S.R.)	363	1998	3.151	15.200	1.814
Fco. de Miranda (Caruachi) (S.R.)	3.520	2006	2.160	12.950	822
Guri (Simón Bolívar) (Emb.)	111.104	1986	10.200	39.400	4.450
RIO SANTO DOMINGO					
Santo Domingo (J. A. Páez) (Emb.)	5,4	1973	240	750	0
RIOS URIBANTE-CAPARO			860	2.000	405
La Honda (San Agatón L. Ruiz Pineda) (Emb.)	775	1987	300	1.000	150
Borde Seco-La Vueltosa (Emb.) (F. Ojeda) *	5.693	2015	560	1.000	255
RIOS BOCONO-TUCUPIDO					
Peña Larga (Juan A. Rodríguez Domínguez) (Emb.)	3.700	1987	80	300	40
RIO MASPARRO					
Masparro (Manuel Palacio Fajardo) (Emb.)	0,96	2009	25	129	10
TOTAL			**16.716**	**70.729****	**7531**
EN CONSTRUCCIÓN			**2.620**	**13.600*****	
RÍO CARONÍ					
Tocoma (S.R.)			2.160	11.900	
RIO DORADAS					
Complejo Uribante-Caparo (La Colorada) (Emb.)			460	1.700	
EN PROYECTO					
(Cuenca Alta Rio Caroní) (Emb.)			15.762	82.906	

Fuentes: (INPARQUES, 1997) (Aguilar J. G., 2010) (Páez-Pumar, 2017)

Consulta a técnicos del Grupo Ricardo Zuloaga.

S.R.: Sin regulación, Emb.: Embalse

[1] **Aguilar J (s.f)**

*Nunca ha estado en operación la totalidad de su capacidad instalada.

** Aproximadmente 447 Miles Barriles Equivalentes de Petróleo por Día (MBEPD)

*** Aproximadamente78 Miles Barriles Equivalentes de Petróleo por Día (MBEPD)

Otra propuesta, dentro de los planes de expansión, está enmarcada en promover el desarrollo de nuevos aprovechamientos en las cuencas entre los estados Barinas, Mérida y Zulia, por su ubicación en los extremos de la red de transmisión. También se ha propuesto la explotación con fines hidroeléctricos de embalses construidos en dichos estados. Estos aprovechamientos están mas cerca de los centros de consumo y su ubicación disminuye las pérdidas de transmisión que se dan actualmente desde la generación en la cuenca del Caroní hacia el resto del país. También, como parte de esta propuesta, está el desarrollo de otras energías renovables como la solar y la eólica (Gómez, 2019).

8.1.3. Desafíos

Los desafíos inherentes al uso del agua para la generación de electricidad están relacionados a la conservación de cuencas, particularmente el control de erosión en cuencas altas y medias así como la contaminación de los cuerpos de agua. Específicamente es importante:

(i) Recuperar la red hidrometereológica para monitoreo de las cuencas atendiendo a las condiciones de cambio climático.

(ii) Evaluación de las capacidades de los diferentes componentes de las obras de regulación y captación de aguas frente al cambio climático.

(iii) Evaluación de las condiciones de los embalses en cuanto a sedimentación y capacidad de almacenamiento y regulación disponible en la actualidad.

(iv) Control de actividades mineras que afectan la calidad de los embalses con fines hidroeléctricos y ríos de la zona sur del Orinoco (contaminación por mercurio) y que pueden deteriorar la salud de los pobladores que utilizan esas aguas para consumo humano.

8.2. Uso con fines turísticos

La variedad de paisajes y de climas ha determinado en Venezuela la existencia de una rica composición florística y faunística. Las selvas y los bosques naturales son el piso característico de las tierras calientes; las tierras templadas son el dominio de la vegetación herbácea y arbustiva y constituyen la región agrícola y pecuaria por excelencia, y las tierras frías presentan escasez de vegetación alta y poseen vegetación herbácea. Son todos factores determinantes para el turismo.

La actividad turística y recreativa de nuestro país estuvo sustentada en la gestión ambiental para garantizar la disponibilidad de los recursos hídricos,

ya que éstos son actores principales en muchas de nuestras bellezas escénicas, proporcionan el agua potable inherente a la actividad humana y son un factor fundamental para la producción de alimentos (pesca, agricultura y ganadería) que presentan un valor agregado para la actividad turística.

Como recursos escénicos (Fundación de Educación Ambiental-Fundambiente, 2006) del país destacan:

(i) Lagos y lagunas como Los Cedros en Trujillo con pesca de truchas, Laguna Negra y Mucubají en Mérida.

(ii) Embalses como Camatagua, Guárico, Tierra Blanca. El Pilar, algunos de los cuales han perdido sus cualidades para pesca y actividades deportivas por problemas de contaminación.

(iii) Parques Nacionales como Canaima y La Llovizna con saltos de agua de alto interés turístico, incluyendo el internacional.

(iv) Ríos usados para la pesca como el Apure, Apurito, Guárico, Chirgua, Tiznados, Portuguesa, Orituco y Orinoco.

(v) Aguas termales como Las Trincheras en Carabobo, El Hervidero en Sucre, Pozo Azul en Sucre, Aguas Calientes en Táchira, San Juan de los Morros en Guárico, Batatal y Mendoza en Miranda, Aguas Calientes y El Baño en Trujillo

Este uso se está viendo bastante afectado por el problema creciente de contaminación, tanto por disposición de aguas servidas de origen urbano sin tratamiento en cursos de agua, estuarios, lagos y embalses, lixiviados de rellenos sanitarios y derrames petroleros en playas y ríos.

8.3. Uso con fines de navegación

La navegación siempre ha tenido un rol importante para el desarrollo del país. En los tiempos que Venezuela tenía una economía de tipo agropecuario se exportaban productos como el café, cacao, cuero de res y otros hacia Alemania, Francia, Estados Unidos e Inglaterra, lo cual favoreció el crecimiento de ciudades localizadas cerca de los puertos de la Guaira, Puerto Cabello, Maracaibo, Carúpano y Río Caribe. En el período Minero-Petrolero donde nuestro principal y casi único producto de exportación es el petróleo, y donde la mejora del poder adquisitivo de la población dispara un crecimiento de la demanda que es suplido con exportaciones, es la navegación la principal vía de transporte.

Los principales puertos marítimos de Venezuela son la Guaira, Puerto Cabello, Maracaibo y Guanta. La Guaira manejó el 16% de la carga a nivel nacional, Puerto Cabello mueve el 72% de la carga nacional, Maracaibo el 10% y el restante 2% es manejado fundamentalmente por Guanta. En cuanto a la producción de petróleo, la carga sale por los puertos ubicados dentro de las diferentes instalaciones petroleras, siendo la mayor actividad en la cuenca del Lago de Maracaibo con la salida de aproximadamente un 70% de la producción.

En cuanto la navegación fluvial, el mayor desarrollo se ha alcanzado en el eje Orinoco-Apure a través del cual se realizaron esfuerzos para implementar un plan de desarrollo regional con el propósito de impulsar el desarrollo sostenible de la región.

Se disponen de 645 millas náuticas navegables desde Boca Grande hasta Puerto Ayacucho en las siguientes condiciones:

(i) Tramo Boca Grande-Matanzas, con una longitud de 195 millas navegables todo el año, requiere dragado permanente en sectores determinados y permite la navegación de embarcaciones con calado de hasta 42 pies.

(ii) Tramo Matanzas-El Lobal, con una longitud de 530 millas navegables mayo-diciembre, es un caudal natural y permite la navegación de embarcaciones con calado de hasta 12 pies.

(iii) Tramo El Lobal-Puerto Ayacucho, con una longitud de 100 millas navegable todo el año, es un caudal natural y permite la navegación de embarcaciones con calado de 6-8 pies.

Al sur del Orinoco se mantienen tradiciones que datan de varios cientos de años. El medio de transporte es uno de los símbolos de las etnias indígenas que allí habitan. La curiara continua representando su medio más expedito para ir de un lado a otro.

Por su parte, la navegación deportiva tiene un desarrollo limitado que no entra en conflicto con otras actividades.

El uso de los cuerpos de agua para la navegación está muy poco desarrollado. De hecho, solamente existe un bajo volumen de transporte a través del río Orinoco para llevar productos de la industria pesada que se desarrolla en la región de Guayana, a los fines de su exportación o transporte a través del océano Atlántico. Sin embargo, existe un proyecto para el desa-

rrollo de un eje fluvial a través de los ríos Orinoco y Apure, que permitiría una línea de comunicación intermodal al sur del país y la generación de nuevos polos de desarrollo que además facilitarían la desconcentración urbana.

9. Otros usos

Otros usos donde el recurso agua juega un papel muy importante, han sido los programas de aprovechamiento comercial bajo manejo sustentable de la especie baba (*Caiman crocodilus*) de los llanos inundables de nuestro país y del estado Delta Amacuro, llevado adelante por el extinto MARNR, y donde la permanencia de la lámina de agua es indispensable para su desarrollo.

Para las comunidades criollas e indígenas de la zona, los programas significan fuentes de empleo, una importante fuente de proteína y la oportunidad de organizar una empresa artesanal local basada en el aprovechamiento integral de la especie: pieles, carne, vísceras, huesos, etc.

Al igual que en el caso anterior, el antiguo Ministerio del Ambiente implementó programas de "siembra de peces" en diferentes embalses del país (Camatagua, Guanapito, Guárico, entre otros), de manera que las comunidades complementaran sus requerimientos alimenticios a la vez de desarrollar una actividad económica-turística. De la misma manera, el sector privado ha desarrollado en forma comercial la cría de truchas en el estado Mérida y las camaroneras en los estados Falcón, Zulia, Anzoátegui y Sucre a partir de los recursos hídricos de estas regiones.

10. La Calidad del agua. Los problemas de la contaminación

La "calidad" constituye una variable adicional a la cantidad y temporalidad que cada vez cobra más relevancia a la hora de comprobar la disponibilidad del recurso hídrico; se determina por sus características físicoquímicas, biológicas y radiológicas, y será o no adecuada para determinados usos de acuerdo a los requerimientos de cada uno de dichos usos. Así, se establecen requerimientos de calidad más restrictivos para el agua de consumo humano o de uso recreativo, que para el agua de riego o de uso industrial.

En cuanto a los estándares de calidad de las aguas, los utilizados en Venezuela son los definidos en el decreto Nº 883 (MARNR, 1995), en el cual se establecen las normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos; allí las aguas se clasifican en:

Tipo 1 *Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que esta forme parte de un produc-*

to o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él. Se desagregan en:

***Sub Tipo 1A*:** Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.

***Sub Tipo 1B*:** Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.

***Sub Tipo 1C*:** Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.

Tipo 2 *son aguas de uso agropecuario, las del* ***Tipo 3*** *son usadas en cría de peces y moluscos para consumo humano y las de* ***Tipo 4*** *son las aguas destinadas a los balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia.*

A los fines de preservar la calidad de los cuerpos de agua, el Decreto N° 883 también establece las normas para el control de los vertidos a dichos cuerpos, y coloca como objetivo primario el control de la calidad de los mismos, definida en función de sus usos actuales y potenciales. Para el logro de este objetivo, se establecen como instrumentos la fijación de parámetros de vertidos y la elaboración y ejecución de planes de calidad para cada cuerpo de agua, elaborados conforme a un orden de prioridades según la importancia de la problemática planteada en las distintas cuencas del país.

Para el control de los vertidos líquidos, el mencionado Decreto No.883 establece las actividades sujetas a control y clasifica los constituyentes de los vertidos líquidos en dos grupos:

Grupo I: sustancias para las cuales existe evidencia teórica o práctica de su efecto tóxico, agudo o crónico.

Grupo II: sustancias o parámetros que aun cuando no se conozca de su efecto tóxico, agudo o crónico, generan condiciones en el cuerpo receptor que afectan la biota o perjudican cualquier uso potencial de sus aguas.

Los límites de descarga del primer grupo deberán cumplirse, sin excepción, para todas las descargas a cuerpos de agua, medio marino-costero y submarino, redes cloacales y para disposición directa sobre el suelo. Así mismo, deberán cumplirse para la infiltración en el subsuelo.

Los límites de descarga del segundo grupo podrán ajustarse a las características actuales del receptor, sujetas a las restricciones que imponga la capacidad de asimilación de éste, aplicando como criterio general que las descargas no alteren la calidad de mismo.

En el Artículo 12 se prevé la prohibición de descargas al medio marinocostero de efluentes líquidos con temperatura diferente a la del cuerpo receptor.

Adicionalmente prohíbe el uso de sistemas de drenaje de aguas pluviales para la disposición de efluentes líquidos, la descarga de desechos sólidos a los cuerpos de agua y a las redes cloacales y la dilución de efluentes con agua limpia para cumplir con los límites establecidos en el mismo Decreto.

Se establece también la necesidad de realizar actividades de vigilancia y control que permitan chequear el cumplimiento de la normativa ambiental.

10.1. Los problemas de contaminación de aguas en el país.

Hasta la aparición del Arco Minero, las principales áreas con problemas de contaminación en Venezuela se localizaban en la parte norte del territorio. La fuerte presión agrícola, industrial y urbana sobre los recursos agua, aire y suelo ha ocasionado el deterioro de los mismos. Los ríos, los lagos y las aguas costeras están afectados por diferentes tipos de polución, como resultado de las descargas de agua servida sin tratamiento o con tratamiento insuficiente, en la mayoría de los casos provenientes de centros industriales y urbanos, así como de las actividades agrícolas y pecuarias. Aunado a esto, en los últimos años se ha comprobado la contaminación de los ríos de la región suroriental por las actividades mineras de explotación de oro y las actividades de extracción y procesamiento de minerales de hierro y aluminio.

El diagnóstico de la situación actual de Venezuela con relación al problema de la contaminación de las aguas, por efecto de las actividades domésticas e industriales, escurrimiento de áreas agropecuarias, filtración de las operaciones de la minería y rellenos sanitarios se presentan en forma resumida en la tabla 9.

10.2. El índice de calidad del agua (ICA) (Espinosa, 2024)

El ICA se define como el grado de pureza de un agua al momento de una toma de muestra y se expresa como un porcentaje del agua pura; un agua prístina implica un ICA aproximado al 100% y un agua contaminada un ICA aproximado al 0%.

Tabla 9. Contaminación de las Aguas.Fuente: MARNR, 1997.(*)

PROBLEMAS	REGIONES
Contaminación de las Aguas Continentales	
Descarga de aguas residuales industriales	Anzoátegui, Aragua, Bolívar, Carabobo, Dtto. Capital, Falcón, Táchira, Miranda, Monagas, Sucre y Trujillo
Descarga de agua de origen doméstico	Todo el territorio nacional
Arrastre de agroquímicos	Anzoátegui, Aragua, Barinas, Carabobo, Cojedes, Guárico, Lara, Mérida, Miranda, Monagas, Portuguesa, Sucre, Táchira, Trujillo, Yaracuy y Zulia
Disminución del cauce de los ríos y colmatación de embalses por arrastre de sedimentos	Anzoátegui, Monagas, Dto. Federal, Guárico, Yaracuy, Miranda y Mérida.
Contaminación de playas	
Descarga directa de aguas residuales de origen urbano	Anzoátegui, Zulia, Nueva Esparta, Aragua, Miranda, Dto. Federal, Sucre, Yaracuy, Falcón, Carabobo, Vargas
Descarga de efluentes líquidos de origen industrial	Anzoátegui, Zulia, Nueva Esparta, Aragua, Miranda, Dto. Federal, Sucre, Yaracuy, Falcón, Carabobo.
Derrame de hidrocarburos	Falcón, Carabobo, Anzoátegui, Zulia, Monagas.
Descargas submarinas	Nueva Esparta, Falcón, Carabobo, Sucre, Anzoátegui, Miranda, Vargas
Chatarras marinas	Nueva Esparta, Falcón, Carabobo, Sucre, Anzoátegui
Contaminación de aguas por actividad minera	
Minerales metálicos (oro, hierro, bauxita, etc.)	Bolívar, Amazonas
Minerales no metálicos (carbón a cielo abierto, areneras, canteras, arcilleras,	A nivel nacional (especialmente la cuenca del río Tuy y en el Estado Yaracuy)

(*) ver capítulo Calidad de Aguas en este volumen

Países como Estados Unidos, México y Colombia han desarrollado la construcción de dicho índice con alcance nacional; en el caso venezolano se han realizado mediciones en afluentes del Lago de Valencia y se impone la necesidad de desarrollar el ICA, para lo cual debe diseñarse y poner en marcha un programa de muestreo sistemático a nivel nacional, basado en los parámetros contemplados en la normativa vigente.

11 La Gestión de los Recursos Hídricos

La situación de deterioro creciente de los recursos hídricos, constituida en un problema socioeconómico y ambiental en el mundo y en particular en nuestro país, ha generado la necesidad de buscar soluciones de visión amplia, que promuevan el aprovechamiento sustentable de este recurso bajo condiciones de gobernabilidad en la gestión y preservación del recurso. Así, en el caso venezolano se ha adoptado el principio de **Gestión Integral de las Aguas**, reflejado en la **Ley de Aguas aprobada en el año 2007.**

Dicha Ley define como objetivos de la Gestión Integral de las Aguas:

"*1. Garantizar la conservación, con énfasis en la protección, aprovechamiento sustentable y recuperación de las aguas tanto super-*

ficiales como subterráneas, a fin de satisfacer las necesidades humanas, ecológicas y la demanda generada por los procesos productivos del país.

2. Prevenir y controlar los posibles efectos negativos de las aguas sobre la población y sus bienes."

Como criterios para garantizar la disponibilidad en cantidad se mencionan: realizar extracciones ajustadas a balances demanda- disponibilidad, uso eficiente del recurso, reutilización de aguas residuales, conservación de cuencas, manejo integral de fuentes superficiales y subterráneas.

Se definen como Instrumentos de Gestión: los planes de gestión integral, el registro de usuarios de las fuentes de agua, el control administrativo previo para el uso de las aguas (asignaciones de aprovechamiento y licencias de vertidos), el sistema económico- financiero.

Para control y manejo se propone la clasificación de los cuerpos de agua atendiendo a su calidad y usos actuales y potenciales, establecimiento de límites en elementos contaminantes y la elaboración de programas de control y manejo de cuerpos de agua.

Para prevención y control de efectos negativos del agua en la población, además de contemplar la construcción, operación y mantenimiento de las obras existentes y requeridas a tal fin, se prevé la elaboración de planes de gestión integral de las aguas que abarcan análisis sobre la gestión de riesgos en materia de inundaciones, inestabilidad de laderas, movimientos de masa, flujos torrenciales, sequías, subsidencias y otros efectos relacionados al agua.

Especial mención merece el establecimiento de 16 regiones y cuencas hidrográficas integrantes, tal como fueron definidas en COPLANARH, reconocidas como unidades de gestión, para la elaboración del Plan Nacional de Gestión Integral de las Aguas, así como para su manejo y conservación.

Para la Organización Institucional, la ley atiende a los principios de desconcentración, descentralización, eficiencia y eficacia administrativa, participación ciudadana, corresponsabilidad en las decisiones, cooperación interinstitucional y flexibilidad frente a lo particular en lo local.

Se define la Autoridad Nacional de las Aguas fundamentalmente con fines de elaboración de políticas para el establecimiento de la gestión integral, del Plan Nacional de Gestión Integral de las Aguas y coordinación de actuaciones con otros entes públicos; elaboración de normas técnicas, pro-

moción de la construcción de obras de importancia nacional y la creación de los subsistemas de Información de las Aguas y el Registro Nacional de Usuarios.

Se promueve la creación del Consejo Nacional de las Aguas con funciones de asesoría y como instancia de consulta y concertación, integrado por representantes de organismos con competencia en materia de aguas así como representantes de Consejos de Región, de la Asamblea Nacional y de los Usuarios.

Similar al Consejo Nacional se crean los Consejos Regionales (16), que desarrollarán funciones de coordinación entre los varios niveles de gobierno y de concertación con las comunidades organizadas; estarán conformados por representantes regionales de organismos con competencia en agua y además los gobernadores, alcaldes, usuarios, universidades e institutos regionales de investigación, consejos estadales y locales de planificación y coordinación de políticas públicas. Cada Consejo de Región Hidrográfica contará con su Secretaría Ejecutiva a cargo del ministerio que ejerza la autoridad nacional de las aguas y será la encargada de coordinar la elaboración y ejecución del Plan de Gestión Integral de las Aguas de la correspondiente Región Hidrográfica.

Es importante señalar que aunque la ley fue aprobada en el año 2007, prácticamente no se ha puesto en marcha en alguno de sus contenidos; la transformación allí prevista requiere de una gran dosis de voluntad política y de comprensión de la inviabilidad de la forma de gestión actual con las consecuencias negativas socioambientales.

Lograr una gestión sustentable de los recursos hídricos pasa por mejorar la información básica, que permita establecer de manera adecuada y razonable las decisiones básicas para la planificación de los usos, el ordenamiento espacial y las funciones de control y regulación. Sacrificar los presupuestos dedicados a la producción de la información básica es una práctica común, que ha venido deteriorando progresivamente las redes de información y monitoreo, hasta alcanzar niveles críticos. Esto constituye una gran debilidad para la gestión de los recursos, llegando inclusive a limitar las posibilidades de análisis sobre la influencia de los cambios climáticos en los eventos ambientales extraordinarios que vienen sucediendo.

Finalmente, los aspectos relativos a la falta de capacitación y a las grandes brechas tecnológicas que se presentan en los ámbitos de actuación de la gestión de los recursos hídricos, constituyen un grave problema que sobre-

pasa los aspectos técnicos y llega a incidir en lo económico, por cuanto los esquemas rudimentarios de manejo y operación de sistemas de agua, las bajas eficiencias en su uso, el consumo excesivo de sustancias químicas, el incremento de contaminación y la falta de prácticas adecuadas de manejo en las cuencas, se traduce no solamente en pasivos ambientales muy costosos de solventar, sino también en altos costos para la prestación de servicios públicos relacionados con el agua, incremento en los consumos, y una merma progresiva en las disponibilidades de agua para cualquiera de sus usos y aprovechamientos.

Por otra parte si se logra dar al recurso agua un valor económico, que permita que cada usuario pague los costos asociados a su aprovechamiento, ello permitiría que a la larga se disminuyan los consumos y se controlen los procesos de contaminación, lo cual permitiría recuperar los niveles de disponibilidad del recurso y darle mayor eficiencia a una infraestructura que contaría con el financiamiento necesario para programas de mantenimiento permanente y cuyas ampliaciones podrían ser diferidas en el tiempo, disminuyendo las inversiones requeridas para el manejo de los recursos.

Para construir Gobernanza debe establecerse un ambiente de confianza que se traduzca en cooperación y acuerdos de los actores y permita la planificación conjunta hacia estrategias, programas y proyectos jerarquizados de manera consensuada.

Referencias bibliográficas

ABC DEL ESTE

2006. *Un desafío para el desarrollo humano*. Obtenido de https://www.abc.com.py/edicion-impresa/opinion/un-desafio-para-el-desarrollo-humano-949902.html.m

AGUA ECOSOCIAL

(s.f.). *Ciclo urbano del agua*. Obtenido de https://aguaecosocial.com/ciclo-urbano-del-agua/

AGUILAR, J.

(s.f.). *Entendiendo - La destrucción del sistema eléctrico a manos del chavismo*. Obtenido de Tal Cual: https://talcualdigital.com/entendiendo-la-destruccion-del-sistema-electrico-por-el-chavismo

AGUILAR, J. G.

2010. *El Guri y la depresión energética de Venezuela.* Caracas.

AZPURUA MARTURET, J. B.

1993. *Actualización de la Metodología y los Parámetros Fundamentales para el Cálculo de la Demanda Urbana.* HIDROVEN. Caracas.

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
2020. Obtenido de https://www.facebook.com/photo/?fbid=10158648453482664 &set=a.70311782663

BAUSSON, J. N.
2024. comunicación personal.

CASTILLO, J.
2023. *Iagua*. Obtenido de https://www.iagua.es/blogs/jesus-castillo/agua-y-saneamiento-venezuela-crisis-limites#:~:text=En%20ese%20sentido%2C%20los%20recursos,los%20recursos%20hidr% C3%A1ulicos%20totales%20renovables.

CEDICE. OBSERVATORIO GASTO PÚBLICO
(s.f.). Gasto público en el sector del agua potable y saneamiento. En: J. A. Mendible. Caracas.

COPLANARH.
1969. *Inventario Nacional de Aguas Superficiales.*

DATOSMACRO.COM.
1998. *Expansión*. Obtenido de Venezuela - Generación de electricidad: https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-generacion/venezuela?anio=1998

ESPINOSA, C.
2024. comunicación personal.

ESPINOSA, C.
2024. Índice de Calidad de Agua. *Memorias del Primer Simposio Venezolano sobre Calidad del Agua*, (pág. 40). Caracas- Mérida.

FLORES, A.
1997. (Hidroven, Ed.) Caracas.

FUNDACIÓN DE EDUCACIÓN AMBIENTAL-FUNDAMBIENTE
2006. Recursos Hídricos de Venezuela. En Varios. Caracas: Fondo Editorial FUNDAMBIENTE.

GABALDÓN, A.
2022. comunicación personal.

GOBIERNO DE VENEZUELA
1995. Decreto 883 Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos. Gaceta Oficial Extraordinaria 5021. Caracas, Venezuela.

GÓMEZ MEDINA, J., Y J. M. PÉREZ GODOY
2015. El agua y la generación de energía eléctrica. En: *Agua en Venezuela: una riqueza escasa.* Vols. Tomo II, Capítulo 15. Gabaldón y otros eds Fundación Empresas Polar.

GÓMEZ, J.
2019. *Bases para la formación de una matriz de generación eléctrica con elevada participación de energías renovables.* Caracas.

GONZÁLEZ ARIAS, A.
2012. *La energía hidráulica*. Obtenido de https://www.geocities.ws/cytparatodos/vidaytierra/energiahidraulica/index.htm

GONZÁLEZ SANABRIA, M., Y A. CORONEL BORGES
(2015). Agua en Venezuela: una riqueza escasa. Tomo I, Capítulo 4. En M. González Sanabria, & A. Coronel Borges, *Las aguas subterráneas* (pág. 1006). Caracas: Fundación Polar. Editores: Arnoldo José Gabaldón y otros.

IAGUA
2022. *Blog Cambio climático*. Obtenido de COP27: La crisis climática es una crisis del agua: https://www.iagua.es/blogs/laura-f-zarza/cop27-crisis-climatica-es-crisis-agua

IBERDROLA
(s.f.). *Central hidroeléctrica de bombeo*. Obtenido de ¿Sabes para qué sirven las centrales hidroeléctricas de bombeo?: https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/central-hidroelectrica-bombeo

INPARQUES.
1997. *Parques Nacionales de Venezuela.* Caracas.

LANSDELL, M.
2020. comunicación personal.

LANSDELL, M.
2025. comunicación personal.

LÓPEZ, J., RODRÍGUEZ, J., Y M. ZERPA
1984. *Áreas Regadas y Áreas Regables Serie: Agua y Agricultura, Actualización del PNARH.* Técnico, MARNR, Dirección de Recursos Hidráulicos.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES
1984. Inventario Nacional del Potencial Hidroeléctrico. En *Evaluación del Potencial Hidroenergético a nivel de Preinventario* (Vol. Tomo VII Volumen I). MARNR. Caracas.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES
1985. Inventario Nacional del Potencial Hidroeléctrico. En *Metodologias utilizadas y Síntesis de Resultados* (Vol. 2). MARNR. Caracas.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES
1985. Inventario Nacional del Potencial Hidroeléctrico. En *Catálogo de Aprovechamientos Hidroeléctricos* (Vol. Tomo IV). MARNR. Caracas.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES
1995. *Decreto 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos.*

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES
1997. *Contaminación de las aguas.* Dirección Sectorial de Calidad Ambiental.

MARTÍNEZ, Z., R. CASTILLO, I. NOVO, D. DÍAZ-MARTÍN, A. LIZARAZ, Y J. GALLARDO
2013. *Situación de los Recursos Hídricos en Venezuela: Hacia una gestión integrada.* Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/situacion_recursos_hidricos_vzla.pdf

NACIONES UNIDAS
(2010). *Resolución 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento.* Obtenido de https://digitallibrary.un.org/record/687002/files/A_RES_64_292-ES.pdf

NJIE, N.I.
(2013). *Crónica ONU*. Obtenido de Las mujeres y la ordenación de los recursos hídricos agrícolas Un camino hacia la obtención de la igualdad entre los géneros: https://www.un.org/es/chronicle/article/las-mujeres-y-la-ordenacion-de-los-recursos-hidricos-agricolas-un-camino-hacia-la-obtencion-de-la#:~:text=Las%20estimaciones%20actuales%20indican%20que,al%20uso%20personal% 20y%20dom%C3%A9stico.

OMS. ACCIÓN CONTRA EL HAMBRE
2021. Obtenido de ¿Existe el derecho al agua? Esto es lo que dice la ONU: https://accioncontraelhambre.org/es/actualidad/existe-el-derecho-al-agua-esto-es-lo-que-dice-la-onu#:~:text=De%20acuerdo%20con%20la%20Organizaci%C3%B3n,preocupaciones%20en%20materia%20de%20salud.

PÁEZ-PUMAR, E.
2017. *Infraestructura hidráulica para mantener la continuidad del servicio en agua para potabilizar, riego y generación eléctrica, ante fenómenos naturales climatológicos.* Trabajo de Incorporación como Miembro Correspondiente Nacional Academia Nacional de la Ingeniería y el HábitatCaracas.

PARDO, A.
(s.f.). *Tipos de Clima en Venezuela*. Obtenido de Clasificación climática según Köppen: https://docs.google.com/presentation/d/1HykNQtPZhagyI7Azsnhnh4TFWMdccBZGZMXFy_ZODNs/htmlpresent

RODOLFO, T.
2014. *Historia del Desarrollo del Servicio Eléctrico en Venezuela 1880-1998.* Caracas.

ROJAS, R.
2015. El agua y la agricultura. En: *Agua en Venezuela: una riqueza escasa*. Arnoldo José Gabaldón y Otros (eds).Tomo I. Capítulo 13. Caracas: Fundación Empresas Polar.

ROSALES HERNÁNDEZ, A., Y P. GARCÍA MONTERO
2015. La cuencas hidrográficas y su gestión integral (pág. 1006). En: *Agua en Venezuela: una riqueza escasa.* Arnoldo Gabaldón y Otros (eds).Tomo II, Capítulo 22. Caracas: Fundación Empresas Polar. Editores:

SAJO-CASTELLI, A. M., D. VILLALTA y L. BRAVO DE GUEN

2014. Calidad de Datos de la Red de Medición de Lluvia para Venezuela. *Boletin de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales Vol. LXXIV*(3-4): 169.

TECNOLOGÍA IES CIUDAD DE DALÍAS.

(s.f.). *Central mareomotriz*. Obtenido de https://www.slideshare.net/slideshow/central-mareomotriz-61006283/61006283#5

USECHE KISLINGER, A.

2015. La administración del agua. En: *Agua en Venezuela: una riqueza escasa* (Vol. Tomo 2). Gabaldón y otros (eds).

WIKIPEDIA.

(s.f.). *Modelo de agua subterránea*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_agua_subterránea Acceso 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE.

2000. *Bolivia informa*. Obtenido de Revelan la fecha en la que se terminará el agua potable en la Tierra: https://bo.reyqui.com/2016/05/revelan-la-fecha-en-la-que-se-terminara.html

Belkis Rosario Echenique Archiles

Ingeniero Civil (UCV, 1.982). Consultor, libre ejercicio de su profesión en las áreas de recursos hídricos, servicio agua potable y saneamiento, ambiente y financiamiento multilateral. Miembro de la Comisión de Ambiente de la Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat (ANIH) y de la Junta Directiva de la Sociedad Venezolana de Ingeniería Hidráulica (SVIH). Coordinó el Proyecto de Descentralización y Modernización del Servicio de Agua Potable y Saneamiento en Venezuela, financiado por Banco Mundial y Banco Interamericano de Desarrollo (década de los 90); coordinó y participó en equipos para diagnósticos técnicos e institucionales de los servicios de APyS en varias ciudades de Venezuela; formó parte de equipos MARNR que realizaron el "Inventario Nacional del Potencial Hidroeléctrico" y la «Actualización del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos». Ha desarrollado consultorías en equipos de trabajo para estudios de impacto ambiental, cambio climático, estudios de puentes, planes de contingencia en navegación y en Unidades Ejecutoras de proyectos con financiamiento multilateral.

Elena Vega Ribas

Ingeniero Civil (UCAB-1980), Maestría Administración de Empresas (IESA-1989). Inició en 1980 en el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, en Planificación de Recursos Hidráulicos, continuó en CORDIPLAN en preparación, evaluación y seguimiento de proyectos de infraestructura, financiados por organismos multilaterales y participó en la ejecución del programa de reestructuración del sector Agua Potable y Saneamiento (APS) iniciado en 1989. Entre 1991 y 1999, prestó asistencia técnica en el sector APS a Hidroven y luego hasta el 2009 en la procura de servicios de consultoría y control y seguimiento de ejecución de estudios, en las áreas ambientales, como parte de los Planes de Manejo Ambiental de los Proyectos Hidroeléctricos Caruachi y Tocoma. UCAB, Profesor de Prácticas de Ingeniería Hidráulica I y II y de Laboratorio de Mecánica de Fluidos II, 1983 a 1987. Actualmente Comisión de Ambiente, ANIH.

Ángela González Landazabal

Ingeniero Hidrometeorologista (UCV-1979) con Postgrado en Planificación de los Recursos Hídricos (USB- 1981). Especialista en gerencia de programas de desarrollo institucional de servicios públicos, monitoreo, evaluación y control de proyectos . Ha participado activamente en el diseño y desarrollo de empresas regionales en recursos hídricos y modernización del servicio de abastecimiento de agua potable y saneamiento en Venezuela. Gerente de Planificación y Desarrollo de Hidroven. Experiencia en proyectos con organismos multilaterales de financiamiento: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, Corporación Andina de Fomento y Global Environment Facility Trust Fund (GEF). Ha desarrollado una serie de consultorías para apoyar la formulación, evaluación y puesta en marcha de proyectos de recolección, disposición y tratamiento de residuos sólidos, planes de manejo ambiental, estudios de impacto ambiental, evaluaciones expost y medidas de control ambiental y salud ocupacional en obras de aprovechamiento hidráulico.

CAPÍTULO III

CALIDAD DEL AGUA

1. Introducción y definición

Probablemente, el público en general tenga nociones de lo que significa la calidad del agua, según sus necesidades, usos o experiencias.

Según el USGS (2017):

> "*El agua perfectamente apropiada para lavar un automóvil puede no tener la calidad suficientemente adecuada para agua potable a servirse en un banquete en honor de la Reina de Inglaterra…*".

Por lo tanto, no es simplemente decir que:

"*esta agua está buena*" o "*esta agua está mala*".

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, **calidad del agua** es un término usado para describir las características físicas, químicas y biológicas del agua. La calidad del agua depende principalmente del uso que se le va a dar.

Según Blanco et al. (2015), tradicionalmente, la calidad del agua era considerada casi exclusivamente como un problema de salud pública. En consecuencia, la protección de los cuerpos de agua se dirigía fundamentalmente a evitar la descarga de sustancias tóxicas y organismos patógenos que pudieran afectar su posibilidad de uso para abastecimiento humano. Así, el rol de la gestión era seleccionar los parámetros a determinar y los valores que garantizaran la salud de las personas.

En la actualidad, se prefiere hacer referencia al término calidad del ambiente acuático, definido como el conjunto de concentraciones, especificaciones y distribución de sustancias orgánicas e inorgánicas que le confieren una cierta condición a la biota acuática, considerando además los posibles usos intencionales de los recursos hídricos, la necesidad de mantenerse el equilibrio ecológico en un cuerpo de agua en particular y del ciclo hidrológico en general (Ferrara et al., 2007).

2. Niveles en los que se estudia la Calidad del Agua

Se puede abordar la calidad del agua en varias etapas:

(i) En las fuentes: Ríos, lagos, embalses, aguas subterráneas.

(ii) Después de su tratamiento (potabilización).

(iii) En los puntos de uso del agua.

(iv) Después de su recepción (almacenamiento).

A continuación, se detallará un poco más cada paso.

2.1. Calidad del agua en las fuentes

La calidad del ambiente acuático muestra variaciones temporales y espaciales debido a factores internos y externos al cuerpo de agua (Blanco et al., 2015):

Tabla 1. Factores internos y externos que afectan la calidad de las aguas en los ambientes acuáticos.

Internos	Externos
• Características geoquímicas. • Características hidrogeológicas. • Intensidad de las precipitaciones. • Tipo de vegetación. • Abundancia de la vegetación. • Temperatura.	• Descarga de vertidos artificiales, a través de los cuales se introducen al medio acuático sustancias o energía.

Los factores internos se refieren a los relacionados con los materiales que componen la cuenca de drenaje y sus unidades vegetales, además de factores relacionados con el clima. Son los relacionados con el entorno donde se encuentra el recurso. Por su parte, los factores externos se relacionan con agentes que no les son propios del cuerpo de agua y que pueden generar perjuicio a los recursos vivos y a la salud humana, obstaculizando el aprovechamiento del recurso.

El cambio climático es otro factor que afecta la calidad de las aguas en las fuentes, mediante las alteraciones de los patrones de las variaciones de temperatura, precipitaciones y evaporación.

Debe advertirse que, en Venezuela, se han realizado estudios de la calidad en diferentes cuerpos de agua, especialmente en aquellos afectados por

las actividades humanas, ubicados principalmente en la región centro-norte del país y otros emblemáticos como el lago de Maracaibo y los ríos Orinoco y Caroní, pero pocas de estas investigaciones pueden calificarse como sistemáticas, por lo que en muchos casos estos registros pueden estar incompletos o desactualizados (González et al., 2019).

2.1.1. Lagos y embalses

Los lagos son ecosistemas efímeros en tiempo geológico (Powers y Robertson, 1966), y sufren cambios a lo largo de su historia.

Un lago típico puede ser un sistema profundo, prístino, de aguas transparentes, con bajas concentraciones de elementos nutritivos (sustancias nitrogenadas y fosforadas) y, por ende, una baja productividad biológica, reflejada en pocos organismos vegetales y animales presentes en sus aguas. Con el paso del tiempo, los tributarios van aportando nutrientes y materia orgánica a una velocidad mayor a la cual son mineralizados en el lago, y todo ello, aunado a una intensa interacción con los ecosistemas terrestres circundantes, va haciendo que el cuerpo de agua se vaya haciendo menos profundo, sus aguas se vayan tornando más turbias, aumente la productividad biológica y los ecosistemas terrestres vayan ganando terreno sobre el lago. El lago, cada vez más somero, presenta cambios en las comunidades biológicas asociadas, con especies acorde a las nuevas condiciones ecológicas imperantes. Con el correr del tiempo, el lago se va transformando en una ciénaga, luego en una sabana y, finalmente, en un bosque, siguiendo una sucesión ecológica. ¡El lago termina por desaparecer!

Se ha esbozado aquí el proceso de envejecimiento de un lago, el cual se conoce como "eutrofización", y que lleva siglos en completarse. En el caso de los embalses, este proceso es más rápido, siendo su vida útil de unos 60 a 70 años (Margalef, 1983).

Sin embargo, las actividades humanas pueden acelerar este proceso de eutrofización, mediante la descarga de aguas residuales con tratamiento inadecuado o inexistente; la expansión de la frontera agrícola y uso excesivo de fertilizantes químicos; urbanización de las cuencas de drenaje; cría intensiva de ganado vacuno, porcino y avícola; aumento de la acuicultura; construcción de embalses; destrucción de ecosistemas naturales y deforestación; erosión acelerada de las cuencas (González et al., 2020). A este proceso se le conoce como "eutrofización cultural", y puede tomar tan solo unas pocas décadas en alcanzarse (Roldán y Ramírez, 2022).

La Fig. 1 muestra un esquema comparativo entre la eutrofización natural y la cultural.

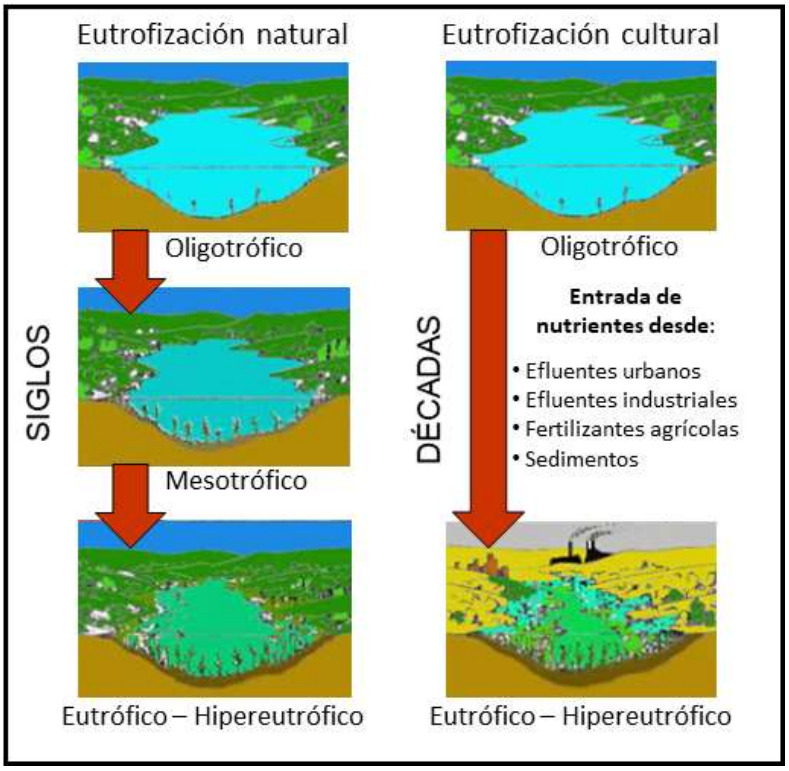


Figura 1. Esquema comparativo entre eutrofización natural y cultural.

Algunos parámetros físicos, químicos y biológicos ayudan a determinar cuándo un lago o embalse se encuentra en un proceso de eutrofización. Algunos de ellos se muestran en la Tabla 2.

Las condiciones de eutrofización se pueden definir según lo que se conoce como estado trófico, el cual representa las condiciones bajo las cuales se encuentra un cuerpo de agua:

Oligotrófico: Contenido pobre en nutrientes y con bajo crecimiento de plantas. Aguas claras y profundas, estratos profundos bien oxigenados, baja productividad biológica.

Mesotrófico: Los lagos presentan características intermedias entre oligotrófico y eutrófico.

Eutrófico: Alto contenido de nutrientes que soportan un elevado crecimiento de plantas. Aguas turbias y someras, condición hipóxica o anóxica en las aguas profundas, alta productividad biológica.

Distrófico: El agua está altamente contaminada y no presenta especies "deseables" debido a la falta de oxígeno y la presencia de toxinas.

La clasificación anterior puede admitir otros términos para definir estados intermedios: ultraoligotrófico, oligo-mesotrófico, meso-eutrófico e hipereutrófico.

Tabla 2. Criterios para determinar el estado trófico. Modificado de Tundisi y Matsumura-Tundisi (2008). En amarillo, parámetros que disminuyen en lagos eutrofizados; en azul, parámetros que aumentan en lagos eutrofizados.

Físicos	Químicos	Biológicos
Transparencia	Concentración de nutrientes	Frecuencia de floraciones
Morfometría	Conductividad eléctrica	Diversidad del fitoplancton
Material suspendido	Déficit de oxígeno hipolimnético (estratos profundos)	Biomasa del fitoplancton
	Supersaturación de oxígeno epilimnético (estratos superficiales)	Clorofila-*a*
		Biomasa del zooplancton y de lo peces
		Diversidad de la fauna bentónica
		Biomasa de la fauna bentónica
		Vegetación litoral

Existen muchos índices para la clasificación del estado trófico de lagos y embalses, siendo los más comunes los de Carlson (1977) para zonas templadas, que emplea los valores de transparencia del agua, la concentración de fósforo total y la concentración de clorofila-*a*, y el de Salas y Martinó (1991) para lagos cálidos tropicales, que se basa en las concentraciones de fósforo total en las aguas.

En el caso de Venezuela, se han realizado varios estudios en los que se determina el nivel trófico de lagos y embalses. Según González y Quirós

(2011), los embalses localizados en áreas protegidas con actividades humanas limitadas o ausentes han podido clasificarse como ultra-oligotróficos u oligotróficos y los embalses ubicados en zonas con escasas poblaciones humanas o con actividad agrícola limitada, como oligo-mesotróficos. Por su parte, aquellos embalses ubicados en cuencas altamente impactadas, reflejan mayores concentraciones de nutrientes y, consecuentemente, presentan una mayor productividad biológica, pudiéndose clasificar como eutróficos e hipereutróficos. Algunos ejemplos son (González et al., 2019):

Ultra-oligotróficos: Guri (Edo. Bolívar), Agua Fría y Taguaza (Edo. Miranda); Oligotróficos: Clavellinos (Edo. Sucre), Lagartijo (Edo. Miranda), Guanapito y El Pueblito (Edo. Guárico); Oligo-mesotróficos: Tierra Blanca (Edo. Guárico) y El Cují (Edo. Anzoátegui); Mesotróficos: El Andino (Edo. Anzoátegui), Camatagua (Edo. Aragua) y El Cigarrón (Edo. Guárico); Eutróficos: La Pereza (Distrito Capital) y Manuelote (Socuy–Edo. Zulia); e Hipereutróficos: Pao-Cachinche (Edos. Carabobo y Cojedes), La Mariposa (Distrito Capital), Quebrada Seca (Edo. Miranda), Suata (Edo. Aragua) y Tulé (Edo. Zulia).

2.1.1.1. Algunas medidas para mitigar la eutofización en lagos y embalses

Jorgensen y Vollenweider (1988) exponen que existe un amplio espectro de técnicas de mitigación Estas medidas van a depender de la fuente que origina los problemas de la eutrofización: **puntual**, que se refiere a las descargas de aguas servidas o de la entrada de un tributario contaminado al cuerpo de agua; o **no puntual**, como la originada por la escorrentía desde áreas agrícolas o urbanas. También se debe considerar en qué lugar se aplica la medida, fuera de los cuerpos de agua (medidas de control externo) o dentro de él (medidas de control interno). En principio, existen dos tipos de medidas de mitigación:

(i) Tecnología ambiental: Este tipo de técnica intenta, por medio del uso de tecnología de tratamiento del agua, eliminar o reducir los componentes indeseados en las aguas servidas que entran al cuerpo de agua. Se usa principalmente para resolver los problemas de fuentes puntuales. Son medidas de control externo.

(ii) Ecotecnología (Ingeniería Ecológica): Este tipo de técnica intenta modificar el ecosistema o sus vecindades para acelerar el proceso de restauración o reducir las concentraciones de los componentes indeseados en el lago o en sus afluentes naturales. Se usa principal

mente para resolver los problemas de fuentes no puntuales, para mejorar la resistencia del ecosistema a la contaminación o para acelerar la transferencia hacia un estado más favorable. Puede ser considerada como medidas de control interno y externo. Estas medidas pueden ser ilustradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Medidas de mitigación. Tomado de Jorgensen y Vollenweider (1988).

I. Medidas de Control Externas
1) Protección de la cuenca de drenaje
a) Reforestación
b) Cambio en el uso de la tierra
c) Tratamiento de aguas servidas
2) Pre-embalses
3) Control de nutrientes en los afluentes
II. Medidas de Control Internas
1) Manipulación física
a) Desestratificación térmica y mezcla
b) Aireación del hipolimnion
c) Extracción selectiva de agua
2) Manipulaciones químicas
a) Precipitación interna de nutrientes
b) Sellado y remoción de sedimentos
3) Manipulaciones de la biota
a) Cosecha mecánica
b) Medidas de control químico (alguicidas, herbicidas, insecticidas)
c) Medidas de control biológico

En Venezuela, se han documentado dos proyectos de recuperación de la calidad del agua en los embalses: 1) La Mariposa, ubicado a 8 km de la ciudad de Caracas, en el que el desarrollo de la planta acuática *Pontederia* (*Eichhornia) crassipes* ha sido controlado mediante su remoción mecánica, aunque no de manera sistemática (González y Matos, 2012); y 2) Pao-Cachinche, en el centro del país, cercano a la ciudad de Valencia, en el que se aplicó desde el año 2001 un proceso de aireación artificial, logrando re-

vertir los efectos de la eutrofización al inactivar los nutrientes mediante su oxidación (Estaba et al., 2006); lamentablemente, el desvío del Río Cabriales hacia los afluentes del embalse en el año 2005 revirtieron los beneficios del proceso de aireación artificial de sus aguas (González y Matos, 2012).

2.1.2. Aguas corrientes (ríos, riachuelos y quebradas)

La característica fundamental de las aguas corrientes es su movimiento, siguiendo un gradiente de gravedad desde su nacimiento hasta su desembocadura, normalmente en otro cuerpo de agua dentro de una unidad funcional, conocida como cuenca hidrográfica (Lacroix, 1992). La cuenca hidrográfica es el sector geográfico que recoge las aguas de un lago o de un curso de agua, la cual está delimitada por una "línea divisoria de aguas", más allá de la cual, éstas desaguan en otros sistemas acuáticos. La cuenca hidrográfica ejerce una influencia notable sobre el caudal y regularidad de los ríos, el tiempo de permanencia del agua en los lagos y la calidad de las aguas. Su superficie determina parcialmente el volumen de las aguas colectadas; su cobertura vegetal influye en la distribución entre las aguas que se evaporan y las aguas que siguen su curso en el canal; además, las aguas aportadas se cargan de materia orgánica y de sales minerales en función de la naturaleza de los medios que atraviesa y de la importancia de las superficies agrícolas, de las industrias y de las regiones urbanizadas.

Las actividades humanas (antrópicas) generan cambios en los cuerpos de agua, constituyendo una amenaza para la preservación de la calidad de los recursos hídricos (Blanco et al., 2015). En el caso de las aguas corrientes, un vertimiento de aguas residuales genera cambios en la concentración de oxígeno disuelto y en la biota, entre otras modificaciones. La turbulencia natural puede permitir la autodepuración, pero esta es limitada y depende de la intensidad y frecuencia de las perturbaciones (Fig. 2).

En la figura, antes de la descarga de aguas servidas o de algún contaminante, las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) son elevadas, con una baja demanda bioquímica de oxígeno (DBO); posterior a este punto, como respuesta al estrés generado, disminuye la concentración de OD debido a su consumo para degradar la materia orgánica y aumenta la DBO por la descomposición de esa materia orgánica, generando un cambio drástico en las comunidades bióticas, prevaleciendo pocas especies tolerantes. A medida que fluye el agua, la turbulencia generada reoxigena las aguas y las comunidades bióticas se restituyen a una condición similar a la previa al punto de descarga.

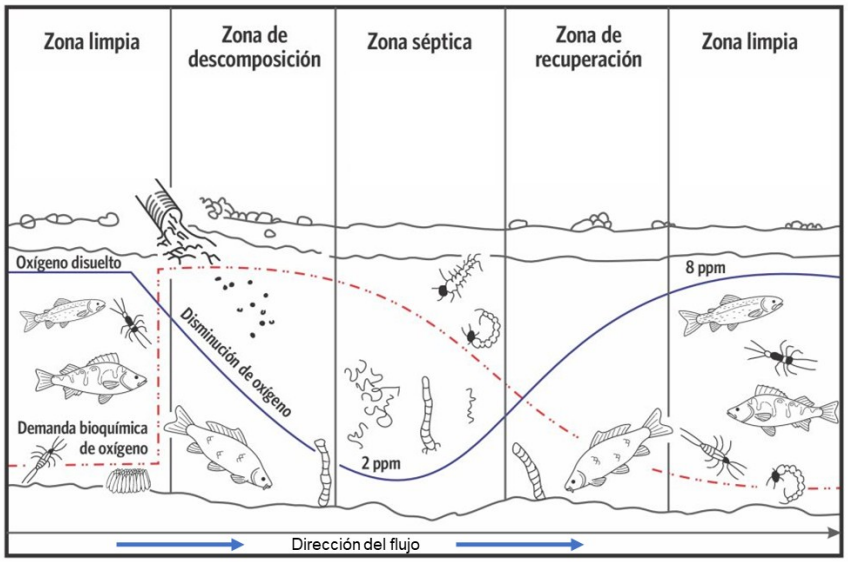


Figura 2. Descarga de aguas residuales y cambios en componentes abióticos y bióticos de un curso de agua. Modificado de Blanco y col. (2015).

La calidad de las aguas de las aguas corrientes, en general, puede ser monitoreada, además de los parámetros físicos y químicos estándares, mediante el uso de macroinvertebrados (bioindicadores), lo cual se basa en el hecho de que dichos organismos ocupan un hábitat a cuyas exigencias ambientales están adaptados (Roldán, 2003). Cualquier cambio en las condiciones ambientales se reflejará en las estructuras de las comunidades que allí habitan.

En varios países de América Latina, se usa el método BMWP (*Biological Monitoring Working Party*), que asigna puntaje a las Familias de macroinvertebrados presentes. El puntaje va de 1 a 10, de acuerdo con la tolerancia de los grupos a la contaminación orgánica. Se presenta, en la Tabla 4, el puntaje asignado en Colombia (BMWP/Col).

Posteriormente, a partir de estos puntajes, se genera una serie de clases de calidad del agua para los sistemas de aguas corrientes (Tabla 5).

2.1.3. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son aquéllas que se localizan en el subsuelo, contenida en sus poros y entre las fisuras de las formaciones rocosas (Coronel Borges y González Sanabria, 2015). Las aguas subterráneas se en-

Tabla 4. Puntaje asignado por el BMWP/Col a las familias de macroinvertebrados. Tomado de Roldán (2003) y González y Roldán (2019).

Familias de macroinvertebrados	Puntajes
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blephariceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hydridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyploclidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7
Aeshnidae, Ancylidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolichopodidae, Sphaeriidae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae	4
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae,	2
Tubificidae	1

Tabla 5. Calidad del agua según el BMWP. Modificado de Zamora-Muñoz y Alba-Tecedor (1996).

Clase	Calidad	BMWP/Col	Significado	Color
I	Buena	> 150 101 – 120	Aguas muy limpias, no contaminadas o poco alteradas	AZUL
II	Aceptable	61 – 100	Aguas ligeramente contaminadas	VERDE
III	Dudosa	36 – 60	Aguas moderadamente contaminadas	AMARILLO
IV	Crítica	16 – 35	Aguas muy contaminadas	NARANJA
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas	ROJO

cuentran en formaciones geológicas porosas llamadas acuíferos, por donde el agua se mueve y se conecta con las aguas superficiales (Valdivieso, 2023). Las aguas subterráneas permiten recargar agua en los ríos, lagos y humedales, fundamentales para un importante número de especies animales y vegetales.

La creciente demanda del agua a escala mundial acompaña a la disminución de su disponibilidad, aunado a la desigual distribución temporal y espacial de la precipitación, a la contaminación de las fuentes y quizás a la influencia de los cambios globales. Esto ha provocado que aumenten los

esfuerzos en buscar fuentes alternativas de agua, orientándose hacia el aprovechamiento de las aguas subterráneas, las cuales pueden estar afectadas por un mal uso, tanto del suelo como del agua (Fig. 3).

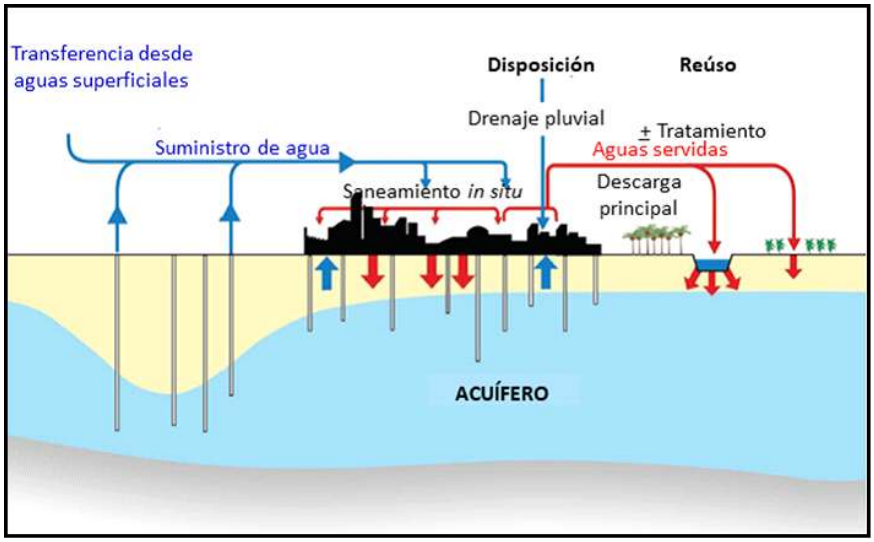


Figura 3. Esquema de uso, disposición y reúso de las aguas subterráneas. Modificado de Hirata (s/f). Las flechas en azul representan el aprovechamiento y en rojo su disposición como aguas servidas.

Según Hirata (s/f), en América Latina y el Caribe en ocasiones existe un conocimiento técnico pobre de la hidrogeología y una reducida percepción de la importancia de las aguas subterráneas.

Principales problemas de esta fuente de agua:

(i) Sobre explotación (elevado número de pozos, muchos de ellos ilegales).

(ii) Contaminación con compuestos orgánicos sintéticos, aguas residuales, otras fuentes de contaminación.

(iii) Salinización o sodificación (áreas cercanas a la costa, por ejemplo).

De acuerdo con Coronel Borges y González Sanabria (2015), la contaminación y la calidad de las aguas subterráneas son afectadas en Venezuela principalmente por la explotación petrolera y la contaminación por las actividades antrópicas, como es el caso de la cuenca del Lago de Valencia, el acuífero del valle de Caracas o el acuífero de la planicie de Maracaibo. Una vez que las aguas subterráneas han sido contaminadas, resulta difícil y cos-

toso detectar esta contaminación, conocer su desplazamiento y evolución e, inclusive, es muy complicado detenerla antes de que alcance los pozos de extracción y manantiales.

Las fuentes naturales de agua han sido clasificadas según sus características. El decreto 883 en Venezuela, determina las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos (Tabla 6). Ello permite establecer su posible uso doméstico y/o agrícola.

Tabla 6. Clasificación (parcial) de las aguas según sus características, según el decreto 883.

Clasificación	Características
Subtipo 1 A	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.
Subtipo 1 B	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
Subtipo 1 C	Aguas que pueden ser acondicionadas por procesos de potabilización no convencional.
Subtipo 2 A	Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.
Subtipo 2 B	Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.

2.2. Calidad de aguas despues de su tratamiento (potabilización)

Las aguas naturales que llegan a las plantas para su tratamiento pueden estar afectadas por:

(i) Fuentes naturales: Materia orgánica, microorganismos, nutrientes, cianotoxinas, contaminantes naturales (Flúor, Arsénico).

(ii) Fuentes domésticas: Aguas pluviales y servidas.

(iii) Escorrentía urbana.

(iv) Desechos industriales:
- o Despulpado: Papel, sulfito, madera.
- o Refinados del petróleo.
- o Procesados de alimentos.
- o Desechos mineros.
- o Lluvia ácida.
- o Desechos tóxicos.

(v) Desechos agrícolas: Fertilizantes, biocidas.

(vi) Contaminantes emergentes: Productos farmacéuticos.

En las plantas de tratamiento (potabilizadoras), las aguas son tratadas para su distribución y consumo. Así la potabilización es el proceso mediante el cual se convierte el agua desde su estado natural hacia agua potable (Fig. 4). La etapa final de la potabilización es la desinfección, la cual se hace con cloro. Suponiendo que las plantas de tratamiento funcionan correctamente, las aguas están listas para su consumo.

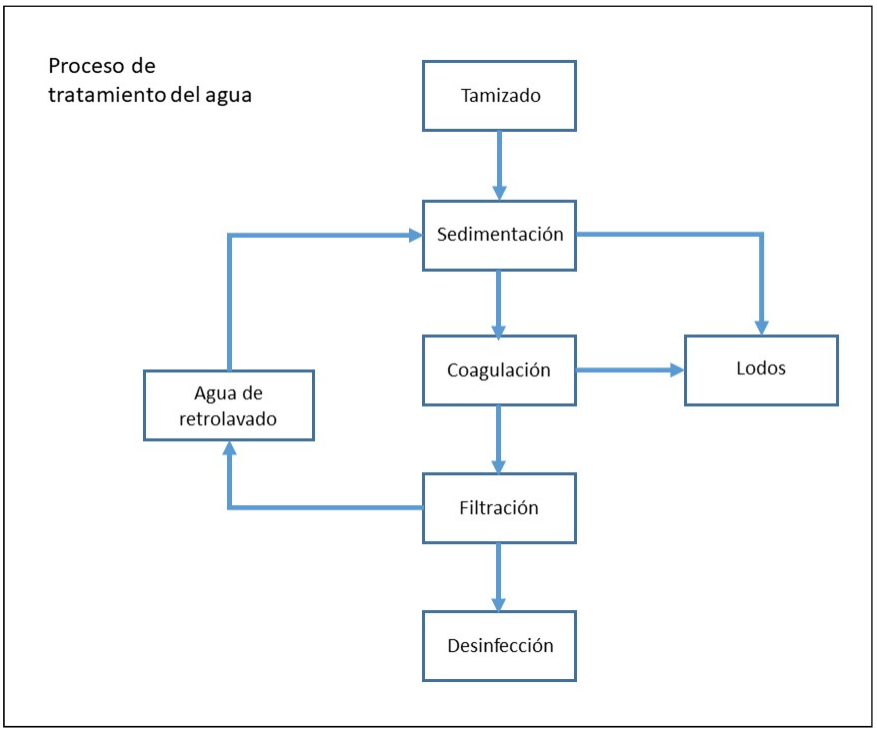


Figura 4. Las aguas naturales, contaminadas o no, se reciben en las plantas de tratamiento, donde reciben un tratamiento estándar y/o especial para luego ser distribuidas. Modificado de MINAGUAS (2023).

En Venezuela, hay 119 plantas potabilizadoras (González et al., 2015), las cuales siguen los pasos mostrados en la Fig. 4. Sin embargo, desde el año 2014, se ha registrado un deterior progresivo de estas plantas, lo cual incide negativamente en la calidad del agua producida y constituye un riesgo para la salud de los consumidores (Najul y Blanco, 2014). Para el año 2019, pocas plantas potabilizadoras estaban trabajando adecuadamente, debido a la caída en la producción de cloro y de sulfato de aluminio, componentes indispensables para la potabilización (Fundación Agua sin Frontera et al., 2018).

Según la Fundación Agua sin Frontera et al., (2018) y HumVenezuela (2021), en el año 2021 más de 20 millones de personas enfrentaron deficiencias de acceso al agua potable y al menos más de 15 millones sufrieron restricciones severas de acceso, lo que forzó a gran parte de la población a recurrir a fuentes alternativas sin control de calidad. Esta calidad del agua inadecuada para consumo humano, conforma una de las formas de escasez del agua para las poblaciones humanas (Diop et al., 2023)

Tal como puede observarse, el tratamiento de las aguas para su potabilización es un punto crítico para la calidad del agua suministrada a la población.

2.3. Calidad de agua en los puntos de uso

En condiciones ideales, las aguas tratadas llegan al punto de captación con la calidad adecuada para su consumo. Sin embargo, en la red de distribución y en el proceso de distribución pueden presentarse factores que afectan esta calidad (Fig. 5):

(i) Racionamiento en el suministro de agua: Se generan presiones negativas (en el corte del servicio) y positivas (en el bombeo), que pueden generar roturas y fugas del agua en las tuberías, muchas de ellas antiguas. Se acumulan o ingresan partículas y organismos indeseados.

(ii) Fugas de agua por deterioro: Entran a la red de distribución partículas, sustancias y organismos indeseados.

(iii) Tomas ilegales: Dañan la red y la distribución del agua.

2.4. Calidad del agua después de su recepción (almacenamiento)

Debido a las fallas en el suministro, el agua se almacena en diversos recipientes, muchas veces inadecuados para ello. El almacenamiento puede modificar la calidad del agua por acumulación de sólidos y crecimiento de organismos (algas y otros microorganismos), representando riesgos para la salud (Fig. 6). Estos envases (tanques) deben ser mantenidos cerrados y limpiados al menos cada 6 meses.

Después del uso del agua en diversos fines, estas son dispuestas y, tratadas o no, vuelven a los cursos y cuerpos de agua, cerrando así un ciclo "antrópico del agua" (Fig. 7).

En este punto debe hacerse una consideración aparte sobre el tratamiento de las aguas residuales. En América Latina, el porcentaje de las

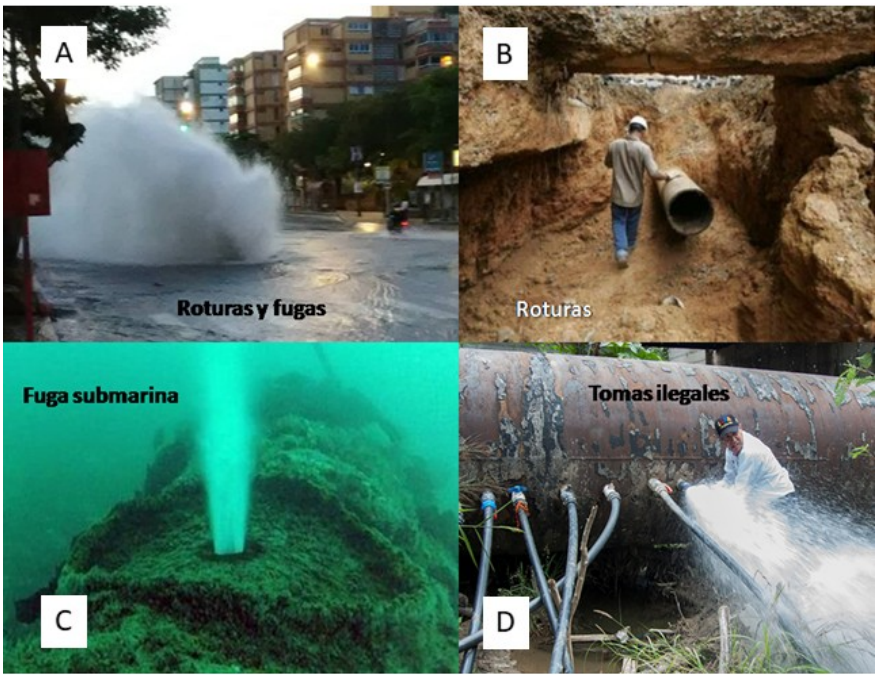


Figura 5. Factores que afectan la calidad del agua en el proceso de distribución y toma. Imágenes de: A) https://www.elnacional.com/venezuela/ruptura-de-tuberia-en-el-cafetal-deja-sin-agua-la-zona. B) https://www.reportero24.com/2011/05/16/caracas-al-menos-200-tuberias-de-aguas-blancas-se-rompen-diariamente. C) https://tenemosnoticias.com/noticia/submarina-socialismo-agua-fuga-516722/1114260. D) https://www.elimpulso.com/2017/09/26/tomas-ilegales-continuan-afectando -servicio-agua-barquisimeto.

aguas residuales tratadas es relativamente bajo (alrededor del 25%), con la excepción de Chile, que trata aproximadamente el 80% de sus aguas residuales (González et al., 2019; Pasten et al., 2019). En el caso de las aguas urbanas, los tratamientos suelen incluir la siguiente secuencia:

(i) Pretratamiento: Se acondiciona el agua residual para facilitar su tratamiento. Emplea rejas, tamices, desarenadores y desengrasadores.

(ii) Tratamiento primario o tratamiento fisicoquímico: Reduce la materia suspendida por precipitación o sedimentación, con o sin reactivos.

(iii) Tratamiento secundario o tratamiento biológico: Se oxida la materia orgánica biodegradable o se degrada usando microorganismos apro-

piados en reactores aerobios o en digestores cerrados de manera anaeróbica, según sea su dependencia del oxígeno.

(iv) Tratamiento terciario (también conocido como avanzado): que incluye operaciones físicas y procesos químicos para remoción de nutrientes, sustancias recalcitrantes y sustancias tóxicas.

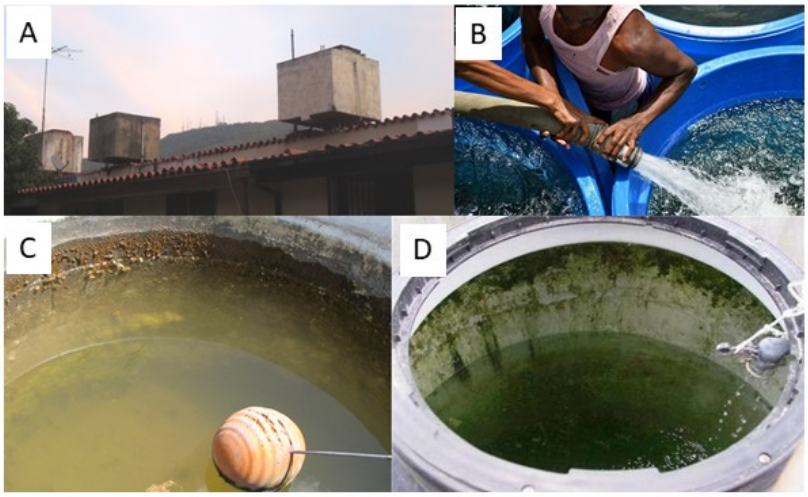


Figura 6. Almacenamiento del agua potable y riesgos de deterior de la calidad del agua. Imágenes de: A) Fotografía de E. González. B) https://www.vtv.gob.ve/gdc-inicia-entrega-de-tanques-de-agua-en-urbanismos-caraquenos. C) https://sanluisopina.com/2014/02/19/vallone-no-da-respuestas-a-los-vecinos-con-la-suciedad-del-agua-potable/agua-sucia. D) https://preguntas.habitissimo.com. mx / pregunta/problemas-con-la-tuberia-1.

En Venezuela, se estima que menos del 30% de las aguas residuales domésticas e industriales son tratadas, contaminando de manera significativa los ecosistemas acuáticos (González et al., 2019). Entre otros factores, este bajo porcentaje se debe a que sólo existen unas 56 plantas de tratamiento de aguas residuales en el país y varias de ellas no están funcionando adecuadamente. Como ejemplo, se puede citar que la ciudad de Caracas, la capital del país, no tiene plantas de tratamiento de aguas para manejar altos volúmenes de aguas de desecho, y las pocas existentes tienen un carácter experimental (Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela, ya desmantelada) o de uso de empresas privadas (planta de tratamiento de empresa –Polar– en la zona este de la ciudad).

Figura 7. Ciclo "antrópico" del agua. Elaboración propia a partir de imágenes libres.

3. La multidimensionalidad de la calidad del agua

¿Qué relación hay entre servicios de agua y saneamiento, y disponibilidad de agua y de tecnologías, situación económica, marco legal, capacidad institucional y políticas del agua? Como puede observarse, los problemas de la calidad del agua radican en la multiplicidad de factores que lo determinan. Normalmente, los problemas relacionados con el agua son tratados de una manera fragmentada, desde las diferentes especialidades o ámbitos de experiencia. Pero la solución de los problemas relacionados con la calidad del agua es compleja y multidimensional (Figs. 8 y 9).

3.1. Factores que afectan la calidad del agua a nivel social

Además de los factores internos y externos que afectan la calidad del agua en los ambientes acuáticos, a nivel social se suman otros factores (Escolero et al., 2016), los cuales se enumeran a continuación:

(i) Aspectos relacionados con la disponibilidad presente y futura del agua.

(ii) Conflictos sociales y políticos.

(iii) Hundimientos del terreno por extracción intensiva de agua subterránea

(iv) Transferencia intersectorial del agua.

(v) Deterioro ambiental de las áreas de captación de agua superficial y de recarga de los acuíferos.

Figura 8. Profesiones, oficios y actividades involucradas en la calidad del agua. Elaboración propia.

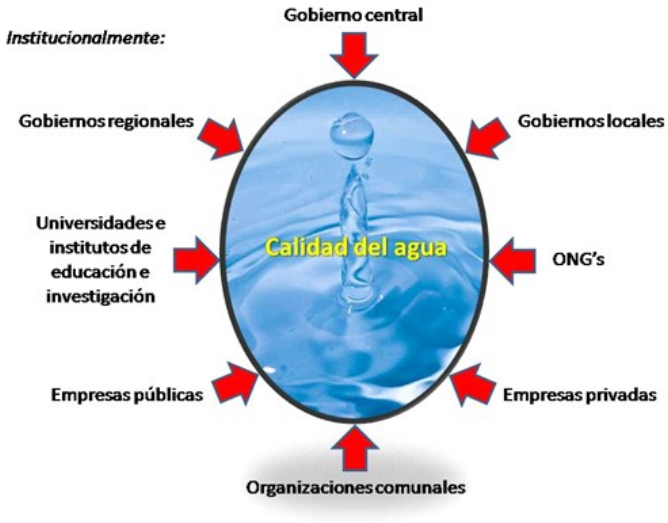


Figura 9. Instituciones involucradas en la calidad del agua. Elaboración propia.

El abordaje de los problemas sociales que afectan la calidad del agua no está en el alcance de este capítulo, pero bien merecen una breve mención, a fin de dar a entender lo complejo del tema y las múltiples dimensiones que deben ser tomadas en cuenta.

3.1.1. Agua y pobreza

El acceso al agua y el saneamiento no sólo dependen de la condición geográfica o de desarrollo del lugar donde se habite, sino que también depende del nivel de ingresos. La pobreza afecta negativamente el acceso al agua potable y el saneamiento, se habite en una ciudad o en una zona rural. Esto trae como consecuencia que se recurra a fuentes de agua poco adecuadas y que pueden representar riesgos para la salud. De igual forma, las aguas de desecho no son dispuestas adecuadamente, contribuyendo con la contaminación del ambiente.

Así, gran parte de los aspectos de acceso al agua potable y al saneamiento están relacionados con la pobreza.

3.1.2. Género y calidad de agua

Un componente importante que muchas veces se pasa por alto en la calidad del agua es su relación con el género, ya que las mujeres son, por lo general, las responsables de la recolección, producción y uso del agua en el hogar y en la producción agrícola (Henry et al., 2019). Se estima que dos tercios de las poblaciones pobres del mundo carecen de acceso a agua segura y confiable.

Una de las recomendaciones clave que surge de éste y otros estudios es que más mujeres deben incorporarse a las instituciones de gestión y toma de decisiones con respecto a este particular, especialmente, en los países en desarrollo.

3.2. Naturaleza social y calidad de agua

El Programa de Aguas de la Red Inter Americana de Academias de Ciencias (Torregrosa et al., 2019) expone que, para entender y resolver los problemas relacionados con el agua y el saneamiento y hacer que las acciones sean parte de una política pública, puede abordarse el tema desde la perspectiva de la **naturaleza social del agua**. Esto significa la posibilidad de pensar la calidad del agua producida socialmente a partir de la cultura, conocimientos, prácticas, ideas, significados, valores que la proveen y la

confronta con la construcción institucional unilateral de lo que se considera el agua y su calidad. Esto implica considerar:

A. Relación agua-sociedad: Una de las formas de concebir esta relación es a través de la idea de la gobernabilidad. Desde mediados del siglo pasado ha venido ocurriendo en todo el mundo, un proceso de concentración de la población en ciudades. En el caso de Venezuela, por ejemplo, se puede afirmar con propiedad que la gestión ambiental urbana pasa a ser la prioridad de la gestión ambiental y como parte de ésta, la gestión del agua en las ciudades. Siendo esto así, la gestión del agua en las ciudades es un punto prioritario y primordial del complejo sectorial, territorial, multi-escalar y multidimensional, que significa esta gestión (Buroz, 2016).

B. Formas de gobierno del agua: Un buen gobierno del agua debería promover la existencia de instituciones que posibiliten garantizar agua en cantidad y calidad suficiente para todos los habitantes. Las condiciones necesarias para la gobernabilidad del agua son:

(i) *Inclusión*: Debe involucrarse al público y que los intereses de todos los grupos de interesados sean incluidos en la gestión de los recursos hídricos.

(ii) *Responsabilidad:* Incluye la prevención de la contaminación por parte de la totalidad de los actores sociales, y los aspectos relacionados con la sostenibilidad financiera del sistema que se adopte.

(iii) *Participación:* El manejo de los recursos hídricos se realiza considerando los intereses y la participación de toda la sociedad, sin distinción de las capas sociales de las cuales provenga.

(iv) *Transparencia:* Las instituciones deben trabajar de manera abierta, tener un lenguaje entendible y accesible para el público en general. La transparencia se construye sobre la base del flujo libre de información.

(v) *Predictibilidad*: Disponer de información representativa, confiable y suficiente, acerca de todos los escenarios que se vinculan a la gestión de los recursos hídricos, es la base que permite realizar los análisis pertinentes para poder predecir a las escalas temporal y espacial. La predictibilidad es una aliada efectiva de la responsabilidad.

(vi) *Receptividad*: Se trata de un efectivo sistema de información construido sobre los cimientos de la movilización social y la libertad de expresión para su apropiación social.

C. Relaciones de poder inmersas en ellas: La construcción hegemónica del agua refiere a un orden social que decide sobre sus significados, sobre los usos del agua, sobre las instituciones, las leyes y las autoridades que se encargan de gestionarla, así como sobre las técnicas y la distribución de los beneficios derivados de su asignación (Linton, 2010). Bajo esta perspectiva, se deja por fuera la naturaleza social del agua y, como consecuencia, se enajena a la sociedad la capacidad de pensarse a sí misma como productora del agua y de su calidad (Torregrosa et al., 2019). La mediación tecnológica hace que el habitante de la ciudad no perciba la fuerza hidrológica que ha sido domesticada por la infraestructura hidráulica, o que su percepción de suficiencia o carencia de agua potable no tenga ninguna relación con la disponibilidad natural del recurso.

¿Cómo lograr calidad en medio de la diversidad?

Según Torregrosa et al., (2019), una premisa de la ecología política es que la circulación del agua es un proceso social y físico combinado, por tanto, la idea de circulación invita a entender cómo los flujos de agua, de capital y de poder están materialmente unidos. Este aspecto será explorado en la siguiente sección.

3.3. Ciclo hidrosocial del agua

El ciclo hidrológico de la Tierra evalúa los procesos cíclicos del movimiento del agua (Wetzel, 2001). Estos procesos incluyen el movimiento del agua desde la atmósfera, la infiltración y el almacenamiento temporal en el suelo, y el flujo hacia el reservorio principal representado por los océanos. Este ciclo consiste en tres fases principales: precipitación, evaporación y la escorrentía superficial y subterránea. Cada fase incluye transporte, almacenamiento temporal y cambio en el estado físico del agua (Fig. 10).

Los recursos hídricos son aprovechados en varias de estas fases del ciclo hidrológico, sobre el cual se superponen otros procesos que ya se han esbozado brevemente en la sección anterior, donde se mencionó un ciclo "antrópico" del agua. Así, además de examinar cómo el agua fluye dentro del ambiente físico (atmósfera, superficie, subsuelo, biomasa), debe tomarse en cuenta que la circulación del agua es un proceso físico y social combinado, conformando lo que se conoce como "ciclo hidrosocial", que considera cómo el agua es manipulada, utilizada, concentrada por los involucrados sociales, cómo se articulan las luchas por el acceso y control del agua y los mecanismos de exclusión y acceso expresados en las instituciones, a través de factores tales como obras hidráulicas, legislación, instituciones, prácticas

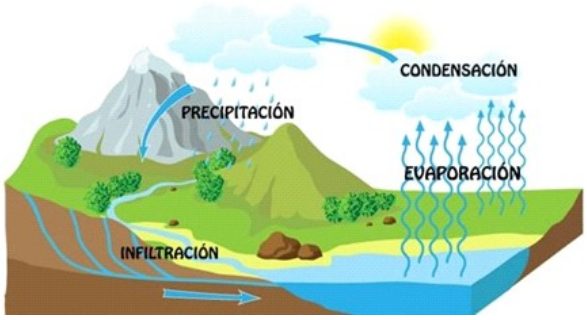


Figura 10. Ciclo hidrológico del agua. Tomado de: https://concepto.de/ciclo-del-agua/

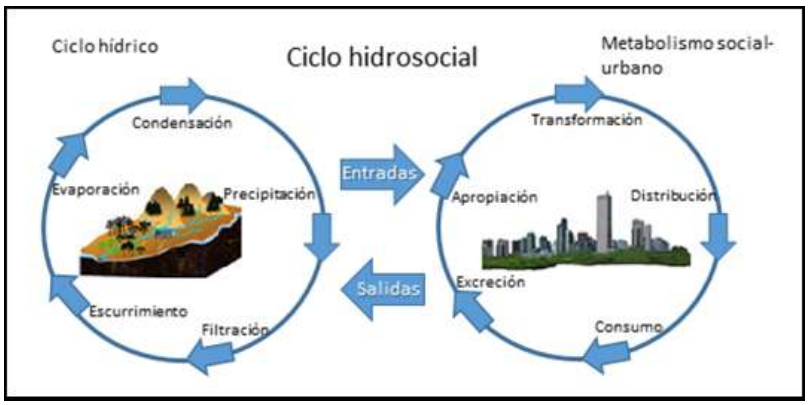


Figura 11. Ciclo hidrosocial del agua. Modificado de Martínez Romero y Peniche Camps (2020).

y significados simbólicos, incluyendo las relaciones involucradas en los usos, calidad y formas en que se produce su disposición final (Fig. 11).

En este ciclo hidrosocial, hay factores que vulneran la disponibilidad del agua en términos de cantidad y calidad, los cuales se pueden resumir en la Tabla 7 (Escolero et al., 2016). En este estudio de autores mexicanos, los factores naturales se superponen con los factores sociales.

Martínez Romero y Peniche Camps (2020) exponen que se requiere tomar conciencia acerca de que el ciclo hidrológico que esquematiza la ocurrencia del agua en la naturaleza, desde un enfoque científico, se tiene que percibir como ciclo hidrosocial, dada la incidencia determinante que tiene la sociedad en el comportamiento de cada uno de los componentes de ese

Tabla 7. Factores que afectan la disponibilidad del agua en términos de cantidad y calidad. Tomado de Escolero y col. (2016).

Vulnerabilidad ambiental	Vulnerabilidad de la infraestructura para suministro de agua	Vulnerabilidad socio-administrativa
Disponibilidad de agua	Estado físico	Conflictos sociales
Calidad del agua en la fuente	Exposición a daños por terceros	Eficiencia económica
Degradación ambiental	Capacidad del sistema	Situación administrativa

ciclo. En este sentido, la toma de conciencia de la construcción social de la calidad del agua es un factor determinante para generar mejores modelos institucionales que posibiliten el buen gobierno del agua, todo lo cual incluye comprender y preservar los equilibrios ecológicos que permiten la vida en el planeta para que los servicios ambientales que presta el medio biofísico sean utilizados armónicamente.

3.4. Experiencias exitosas

En América Latina se han dado experiencias de interacciones positivas entre las comunidades y los entes encargados del servicio de suministro de agua potable y saneamiento, las cuales se mencionan brevemente a continuación.

3.4.1. Mesas técnicas del agua

Desde el año 1999 se conformaron en Venezuela organizaciones comunitarias de base en el área urbano-rural, denominadas Mesas Técnicas de Agua (MTA), dedicadas a mejorar la provisión, mantenimiento y operación del servicio de agua potable y saneamiento (González et al., 2015).

Las MTA canalizan la participación de las comunidades para obtener, mejorar, mantener y vigilar el servicio de agua y saneamiento para sus asentamientos, así como para moldear una cultura del agua que valore y cuide este recurso.

3.4.2. Parques urbanos

En la municipalidad de la ciudad de São Carlos, Estado de São Paulo, Brasil, mediante el decreto N° 170 (17/julio/2017), se crean los “Parques

Urbanos para la Protección, Recreación y Educación Ambiental". Estas áreas, que sirven de linderos de las nuevas urbanizaciones de la ciudad, proveen valores estéticos, culturales y recreacionales a los ciudadanos, pero primero y principal, mejora la salud humana de maneras directas e indirectas (Mascarin, 2015).

3.4.3. Parques lineales

Como paso siguiente de la recuperación y el manejo de las aguas servidas en las ciudades, las riberas deben ser recuperadas y gestionadas (Campuzano et al., 2015). Esto puede ser logrado a través de los llamados "Parques Lineales". Un ejemplo exitoso de esto es el caso de la ciudad de Medellín, Colombia, en la microcuenca de la quebrada "La Presidenta", donde este tipo de parque ayuda a recuperar un corredor natural que contribuye con el mantenimiento de la fauna y la flora del área, y permitiendo su uso para actividades recreativas, haciéndolo un elemento de calidad de vida urbana.

4. Calidad de agua y salud

Según Martínez (2013), la provisión de agua potable y de servicios de recolección de efluentes, aunada a condiciones de pobreza, involucran la aparición de enfermedades de transmisión hídrica, especialmente diarreas en niños. Por su parte, González et al., (2019) reportan que las enfermedades transmitidas por vectores acuáticos representan más de 17% de todas las enfermedades infecciosas, y en los últimos años, la globalización de los desplazamientos y el comercio, la urbanización no planificada y los problemas ambientales, están influyendo considerablemente en la transmisión de este tipo de enfermedades.

Las enfermedades relacionadas con el agua se catalogan según sus rutas de transmisión ambiental, según la clasificación de Bradley (Forde, 2023). Izurieta y Gardellini (2023), ajustaron la clasificación de Bradley de la siguiente forma:

(i) Enfermedades por consumo de agua.

(ii) Enfermedades que se previenen mediante el uso del agua para higiene. También referidas a enfermedades debidas a la escasez de agua o falta de acceso al agua.

(iii) Enfermedades que se transmiten por vectores que habitan en el agua.

(iv) Enfermedades que se transmiten por vectores voladores que se crían en el agua. Enfermedades producidas por vectores que nacen en el agua. En Venezuela, las enfermedades como malaria, leishmaniasis, dengue, Chikungunya y Zika son representativas de este tipo de afecciones, alcanzando cifras elevadas en el país, especialmente en el interior del país (González et al., 2019).

(v) Enfermedades que se transmiten por vegetales que crecen en el agua.

(vi) Enfermedades por patógenos que penetran desde el agua.

La Tabla 8 resume la clasificación de las enfermedades relacionadas con el agua, rutas y mecanismos de infección, así como también presenta algunos ejemplos de estas enfermedades y las medidas para prevenirlas.

Se hace necesario el uso y desarrollo de métodos efectivos de detección para evaluar patógenos en las fuentes de agua, lo cual es un factor crítico para el monitoreo de la calidad del agua (Girardi et al., 2023). De manera adicional, los métodos de detección ayudan en la toma de decisiones sobre la infraestructura de los sistemas de distribución del agua, a fin de seleccionar el mejor tratamiento del agua posible y así prevenir epidemias.

5. Contaminantes

5.1. Contaminantes desde fuentes agrícolas y pecuarias

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), habrá que alimentar a una población de entre unos 9.000 y 10.000 millones de personas en el año 2050. Sin embargo, para producir los alimentos necesarios, se va a requerir grandes volúmenes de agua. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020, 2022), el sector agrícola utiliza elevadas cantidades de agua de extracción hídrica (estimada en más de 400 mil millones de m^3/año). Sin duda, es el sector con mayor consumo de agua dulce en la actualidad (Forde et al., 2019). Garantizar la seguridad alimentaria en el futuro y, al mismo tiempo, la utilización sostenible de los recursos hídricos constituye un gran desafío para esta y para las generaciones sucesivas.

El manejo de tales volúmenes de agua para las actividades agrícolas también implica un impacto notable sobre el agua utilizada, debido al manejo y los residuos generados por estas actividades. Las actividades agrícolas, en general, contaminan en última instancia a los ecosistemas acuáticos. Esta contaminación agrícola se refiere a los subproductos bióticos y abióticos

Tabla 8. Clasificación de las enfermedades infecciosas relacionadas con el agua (Izurieta y Gardellini, 2023).

Ruta de transmisión	Mecanismo	Sistema u órgano afectado	Enfermedades en humanos	Medidas de prevención
Enfermedades por consumo de agua	Fecal-oral	Enfermedades gastrointestinales	**Bacterianas:** cólera, fiebre tifoidea, fiebre paratifoidea, shigelosis, *Escherichia coli*, listeriosis, campilobacteriosis. **Virales:** hepatitis A, hepatitis E, norovirus, rotavirus, poliomielitis. **Parasitarias:** Giardiasis, amebiasis, criptosporidiasis, ciclosporidiasis. **Cianobacterias (a veces referidas como algas verdiazules):** *Microcystis* spp., *Planktothrix* sp, *Anabaena* spp., *Cylindrospermopsis raciborskii, Aphanizomenon* spp.	Hervir el agua o tratarla antes de consumirla, uso de filtros de agua, disposición adecuada de excretas.
Enfermedades que se previenen mediante el uso de agua para higiene	De persona a persona	Enfermedades de la piel, cabello, uñas, y ojos	**Bacterianas:** tracoma, fiebre tifoidea, shigelosis, cólera, lepra, estafilococosis de piel. **Virales**: hepatitis E, hepatitis A, norovirus, poliomielitis, enfermedad de manos, pies y boca. **Parasitosis:** Ascaridiasis, trichuriasis, uncinariasis, giardiasis, criptosporidiasis. Exoparasitosis: escabiasis, *Pediculosis capitis, Pediculosis corporis, Pediculosis pubis*. **Hongos:** *Tinia corporis*, candidiasis.	Lavado de manos con agua y jabón, baño regular, lavado de vestimenta, mejorar el acceso a agua limpia, disposición adecuada de excretas.
Enfermedades que se transmiten por vectores que habitan en el agua	Por sumergirse en aguas contaminadas por el patógeno	Enfermedades que afectan hígado, intestinos, sistema urinario	**Parasitosis**: schistosomiasis, dracunculiasis, paragonimiasis, *Clornorchis sinensis, Opistorchis viverrini, Opistorchis felineus, Amphimerus* spp.	Evitar bañarse o caminar en aguas contaminadas con la presencia de caracoles vectores, consumir agua segura, tratar el agua, control de caracoles acuáticos vectores de enfermedadades, consumir pescado o cangrejos mal cocidos, disposición adecuada de excretas.

Tabla 8. Clasificación de las enfermedades infecciosas relacionadas con el agua (Izurieta y Gardellini, 2023). (cont.)

Ruta de transmisión	Mecanismo	Sistema u órgano afectado	Enfermedades en humanos	Medidas de prevención
Enfermedades que se transmiten por vectores voladores que se crían en el agua	**Por picadura de insectos voladores**	**Enfermedades multiorgánicas**	**Virales: dengue, Zika virus, Chikunguya, fiebre amarilla, Fiebre del Oeste del Nilo, encefalitis japonesa. Parasitosis: malaria, filariasis, oncocercosis, Loasis (gusano africano de los ojos).**	**Eliminación de aguas estan- cadas, uso de repelentes, uso de insecticidas, uso de toldos uso de ropa protectora, mejo-rar los sistemas de drenaje y saneamiento, introducción de control biológico (peces larvívoros)**
Enfermedades que se transmiten por vegetales que crecen en el agua	Por consumo de vegetales regados con agua cortami-nadas con patógenos	Enfermedades multiorgánicas y que afectan el hígado	**Bacterianas:** cólera, fiebre tifoidea, shigelosis, *Escherichia coli*, listeriosis **Virales:** hepatitis A, hepatitis E, norovirus. Parasitarias: Giardiasis, amebiasis, criptosporidiasis, ciclosporidiasis.	Lavado adecuado de los vegetales, cocción adecuada de los vegetales, disposición adecuada de excretas.
Enfermedades por patógenos que penetran desde el agua	Por sumergirse en aguas contaminadas con el patógeno. El riesgo incrementa cuando hay heridas	Enfermedades multiorgánicas, otitis, piel, sistema músculo-esquelético	**Bacterianas:** *Estreptococos piogenes, Aeromonas* spp., *Vibrio vulnificus* ("bacterias come-carne"), úlcera de Buruli, *Pseudomonas aureoginosa,* leptospirosis. **Virales:** Molluscum contagioso, Papiloma Virus Humano HPV (verruga plantar). **Parasitarias**: Strongiloidiasis, *Anquilostoma brasilensis*, *Uncinaria* spp. **Hongos:** *Tinea corporis*, candidiasis.	Evitar bañarse en aguas estancadas o contaminadas, usar calzado protector, evitar nadar con heridas abiertas, lavarse con agua limpia y jabón si hubo exposición, uso de piscinas adecuadamente cloradas.

de las prácticas agrícolas que resultan en la contaminación o degradación del ambiente y los ecosistemas circundantes, y que causan daños a los humanos y sus intereses económicos.

Según Mateo-Sagasta et al. (2018), la agricultura es el mayor productor de aguas residuales por volumen y el ganado genera muchas más excreciones que los humanos. A medida que se ha intensificado el uso de la tierra, los países han aumentado enormemente el uso de pesticidas sintéticos, fertilizantes y otros insumos.

De acuerdo con Ongley (1997), las actividades agropecuarias afectan a los recursos hídricos de diversas formas. A continuación, se resumen algunas de ellas:

(i) Uso de fertilizantes minerales y orgánicos: Se ha multiplicado por diez desde 1960, generando eutrofización.

(ii) Producción pecuaria: Número mundial de cabezas de ganado se ha más que triplicado desde 1970. Esto ha generado una nueva clase de contaminantes: antibióticos, vacunas y promotores hormonales del crecimiento que viajan a través del agua desde las granjas a los ecosistemas y al agua que bebemos.

(iii) Contaminación del agua por materia orgánica: El número mundial de cabeza procedente de la ganadería está mucho más extendida que la contaminación orgánica derivada de las áreas urbanas.

(iv) Uso de plaguicidas: Desde 1970, sus ventas mundiales pasaron de cerca de 1.000 millones a 35.000 millones de US$ anuales, elevando las concentraciones de tóxicos en los ecosistemas acuáticos.

(v) Acuicultura: Se ha multiplicado por veinte desde 1980, liberando cantidades cada vez mayores de excrementos de peces, restos de alimentos no consumidos, antibióticos, fungicidas y agentes antiincruscrustantes en las aguas superficiales.

5.1.1. Fertilizantes minerales

Los fertilizantes minerales, básicamente a base de nitrógeno, fósforo y otros agroquímicos, llegan a los cuerpos de agua por escorrentía (Tundisi et al., 2015). La contribución exacta de la agricultura a la eutrofización del agua superficial y a la contaminación de las aguas subterráneas es difícil de cuantificar. Sin embargo, se calcula que puede ser superior al 50%.

Los problemas relacionados con la eutrofización se pueden resumir como sigue:

(i) Aumento de la producción y biomasa de fitoplancton, algas asociadas y macrófitas.

(ii) Modificación de las características del hábitat debido a la transformación del conjunto de plantas acuáticas.

(iii) Sustitución de especies ícticas deseables (por ejemplo, salmónidos en los países occidentales) por otras menos cotizadas.

(iv) Producción de toxinas por determinadas especies del fitoplancton.

(v) Aumento de los gastos de operación de los sistemas públicos de abastecimiento de agua, además de problemas de gusto y olor, especialmente durante los períodos de proliferación de algas.

(vi) Desoxigenación del agua, especialmente al finalizar las situaciones de proliferación de algas, lo que normalmente da lugar a una mortandad de peces.

(vii) Colmatación y obstrucción de los canales de riego por las macrófitas.

(viii) Reducción de la posibilidad de utilización del agua para fines recreativos, debido al lodo, proliferación de macrófitas y malos olores producidos por la descomposición de las algas.

(ix) Impedimentos a la navegación debido al crecimiento de densas masas de macrófitas.

(x) Pérdidas económicas debidas a la modificación de las especies ícticas, mortandad de peces, etc.

5.1.2. Fertilizantes orgánicos

Este tipo de fertilizantes también contribuye con nutrientes hacia los cuerpos de agua, así como también con otros contaminantes, los cuales generan consecuencias negativas en los ecosistemas acuáticos:

(i) Fertilización de las aguas superficiales.

(ii) Contaminación de las aguas subterráneas como consecuencia de la lixiviación, especialmente por nitrato.

(iii) Contaminación de metales pesados, ya que el estiércol de ganado porcino puede contener cantidades significativas de cobre.

(iv) Acidificación como resultado de la emisión de amoníaco (volatilización) procedente de las instalaciones ocupadas por el ganado y, lugares de almacenamiento de estiércol y de su aplicación como abono en la tierra.

Los fertilizantes orgánicos incluyen el estiércol producido por el ganado vacuno y porcino y por las aves de corral, el cual es utilizado en todo el mundo. A ello hay que añadir el uso de excretas humanas, especialmente en algunos países de Asia. Los fertilizantes orgánicos pueden generar graves problemas, particularmente cuando en determinadas zonas de ganadería intensiva, la producción de estiércol supera con creces la capacidad de la tierra de asimilar esos desechos.

5.1.3. Actividades pecuarias

La producción pecuaria es una de las causas principales de los problemas ambientales más apremiantes del mundo, como el calentamiento del planeta, la degradación de las tierras, la contaminación atmosférica y del agua, y la pérdida de biodiversidad (Steinfeld et al., 2009).

Según Pérez Espejo (2008), los principales problemas generados por la actividad pecuaria y de corral son los siguientes:

(i) Contaminación por excretas: los principales contaminantes son los nutrientes (N y P), la materia orgánica, las bacterias y patógenos, los residuos de medicamentos y los metales pesados; estos contaminantes pueden llegar al agua por rutas puntuales y difusas.

(ii) Residuos del procesamiento de productos ganaderos: los rastros son una importante fuente de contaminación local y las curtidurías son emisoras de un amplio rango de contaminantes orgánicos y químicos.

(iii) Contaminación por producción de alimento animal: las fuentes principales son los nutrientes de los fertilizantes minerales, los pesticidas y los sedimentos originados por la erosión.

(iv) Impacto en el ciclo del agua: el pastoreo intensivo y la conversión de uso del suelo alteran el ciclo del agua.

5.1.4. Plaguicidas

Además de los fertilizantes, la gran mayoría de los procesos agrícolas de nuestro tiempo emplean productos químicos para el cultivo y la producción de los alimentos. Estos productos se filtran a través de canales subterráneos

que, en la mayoría de los casos, acaban en las redes de agua que utilizamos para nuestro consumo. Esta agua difícilmente será tratada para que vuelva a los canales aptos para el consumo.

Ongley (1997) expone que existe una gran variedad de herbicidas, fungicidas, insecticidas, acaricidas, nematocidas, fumigantes de suelos, insecticidas de suelos, fungicidas de suelos, productos degradados, dando cuenta de más de 130 productos químicos que se utilizan como plaguicidas.

Los efectos ecológicos de los plaguicidas en el agua están determinados por los siguientes criterios (Ongley, 1997):

(i) Toxicidad para mamíferos y no mamíferos. La respuesta tóxica puede ser aguda (muerte) o crónica (cáncer y tumores, deficiencias reproductivas, inhibición del crecimiento, efectos teratogénicos, etc.).

(ii) Persistencia. Se refiere al tiempo que demora en degradarse en el ambiente. Los plaguicidas modernos suelen tener vidas medias breves, que reflejan el período durante el cual la plaga debe ser controlada.

(iii) Productos degradados: El proceso de degradación puede llevar a la formación de "productos degradados", cuya toxicidad puede ser mayor, igual o menor que la del compuesto original. Por ejemplo, el DDT se degrada en DDD y DDE, altamente tóxicos.

(iv) Destino (ambiental): Depende de la afinidad natural del producto químico con respecto de uno de los cuatro compartimentos ambientales (materia sólida, líquido, forma gaseosa –volatilización– y biota).

Los plaguicidas tienen diferentes tipos de repercusión en los organismos vivos. Los mecanismos son (Fig. 12):

Bioacumulación: Se trata del movimiento de un producto químico desde el medio circundante hasta el interior de un organismo. El principal sumidero" de algunos plaguicidas es el tejido graso ("lípidos").

Biomagnificación: Con este término se designa la concentración creciente de un producto químico a medida que la energía alimentaria se transforma dentro de la cadena trófica.

Así, los efectos negativos de los plaguicidas (Ongley, 1997), se pueden enumerar a continuación:

(i) Muerte del organismo.

(ii) Cáncer, tumores y lesiones en peces y animales.

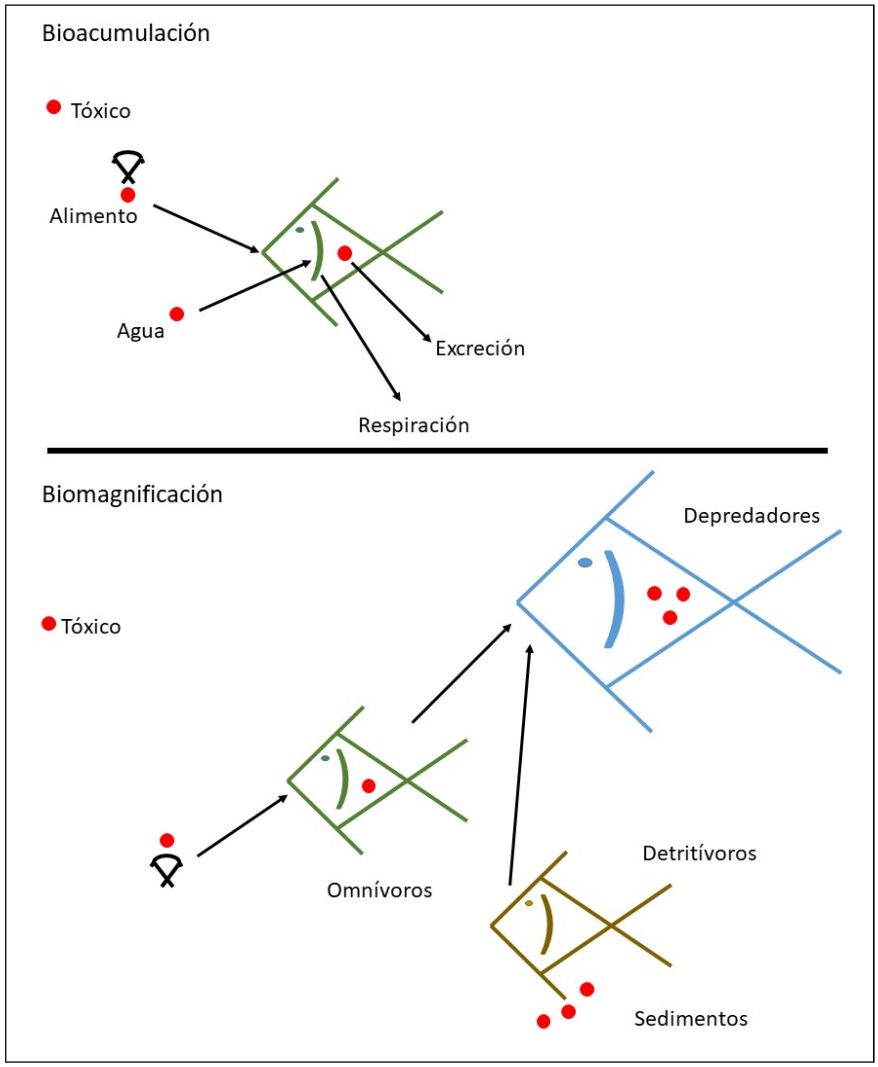


Figura 12. Bioacumulación y biomagnificación de sustancias tóxicas en la trama trófica. Modificado de: Lagos (2018).

(iii) Inhibición o fracaso reproductivo.

(iv) Supresión del sistema inmunitario.

(v) Perturbación del sistema endocrino (hormonal).

(vi) Daños celulares y en el ADN.

(vii) Efectos teratogénicos (deformidades físicas, como las que se observan en el pico de algunas aves).

(viii) Problemas de salud en los peces revelados por el bajo coeficiente entre células rojas y blancas, el exceso de mucílago en las escamas y agallas de los peces, etc.

(ix) Efectos intergeneracionales (que sólo se observarán en las generaciones futuras del organismo).

(x) Otros efectos fisiológicos, como disminución del grosor de la cascara de los huevos.

5.1.5. Acuicultura

Las actividades de acuicultura, y particularmente aquéllas que se ejecutan dentro de los propios cuerpos de agua, aportan gran cantidad de nutrientes a las aguas y sedimentos a partir de los residuos de los alimentos para los peces y de las excretas de estos organismos, contribuyendo así con el proceso de eutrofización. Además, este proceso puede atentar contra la propia actividad, debido a que puede originar mortandad masiva de los peces que se cultivan.

5.1.6. Otro problema de las actividades agrícolas: la sedimentación

Aunque la agricultura contribuye en muchas formas a deteriorar la calidad del agua, la sedimentación y erosión antrópica es un problema mundial que suele estar especialmente asociado a la agricultura. Si bien no hay cifras mundiales, es probable que la agricultura, en sentido amplio, sea la causante de gran parte del aporte mundial de sedimentos a los ríos, lagos, estuarios y, finalmente, a los océanos mundiales (Ongley, 1997).

Las malas prácticas agrícolas y las condiciones geográficas en algunos países favorecen el aumento de sedimentos en los ríos y afectan la capacidad de almacenamiento de los reservorios y embalses (Izurieta et al., 2019).

Las actividades agrícolas (incluyendo la actividad pecuaria, cultivo de animales de corral y la acuicultura), se realizan por la ingente necesidad de alimentar a miles de millones de personas en el mundo. Sin embargo, la búsqueda de ampliar los cultivos y la producción, así como los esfuerzos por aumentar su eficiencia, en muchos casos sin considerar aspectos fundamentales relacionados con la sostenibilidad, han generado graves daños ambientales y en la calidad de las aguas. Se impone, por lo tanto, el uso racional de agroquímicos y la sustitución de estos por otros más ecológi-

camente sustentables, acompañados de medidas de conservación de los ecosistemas boscosos y acuáticos. La formulación de regulaciones adecuadas, incentivo a la investigación para mejorar los cultivos, la inversión en mejores tecnologías de cultivo y cría y la participación de todos los actores involucrados, son aspectos importantes a tomar en cuenta. Igualmente, se impone aumentar los esfuerzos en el reúso del agua con fines agrícolas, así como el control y tratamiento de sus aguas residuales de estas actividades, con la finalidad de mitigar los efectos negativos sobre el ambiente, la biodiversidad y la propia actividad agrícola, además de reducir los riesgos sobre la salud pública.

5.2. Antibióticos y antiparasitarios

Enormes cantidades de drogas son excretadas al ambiente por humanos y animales, las cuales eventualmente llegan a los ecosistemas acuáticos (Guariglia et al., 2008; Vammen, 2023). En ciertos ambientes, como hospitales e industrias agropecuarias, se seleccionan bacterias resistentes a los antibióticos, que también llegan a los ríos, lagos, embalses y mares. Allí, la transferencia horizontal de genes mantiene a los plásmidos que confieren esta resistencia dentro de la población bacteriana de estos ambientes acuáticos. Esto ha traído como consecuencia la selección de una amplia variedad de cepas resistentes a los agentes antimicrobianos, lo que ha disminuido su eficacia y ha traído como consecuencia serios problemas de salud pública.

La resistencia de los microorganismos a múltiples sustancias es un problema de salud pública observado a nivel mundial, en especial después de la aparición y uso masivo de los antibióticos y antiparasitarios (Ramos y Alonso, 2011; Moreno Morales, 2015). Está generalmente aceptado que la causa de este problema ha sido, y todavía es, el extendido e inapropiado uso de estos productos en la clínica, la agricultura y en la práctica veterinaria.

Los **antibióticos** son medicamentos que combaten las infecciones bacterianas en personas y animales. También se aplican a plantas. Funcionan eliminando las bacterias o dificultando su crecimiento y multiplicación.

(i) En plantas: Rodríguez-Eugenio et al., (2019) manifiestan que el número de países que monitorean el uso de antibióticos en horticultura y cultivos agrícolas es muy bajo, comparado con las áreas médicas y veterinarias. Taylor y Reeder (2020) exponen que el uso de antibióticos se recomienda en las siembras de arroz, tomate, cítricos y otras frutas, pimentón, papa, repollo, berenjena, calabaza, cebolla y maíz.

La aplicación de antibióticos en agroecosistemas presenta circunstancias únicas que podrían tener un efecto en el aumento y persistencia de los genes de resistencia en el ambiente. El uso de antibióticos en áreas extensas, ha creado una situación análoga al ambiente clínico donde los pacientes inmunocomprometidos viven en condiciones de hacinamiento –ambientes relacionados con la proliferación y dispersión de los genes de resistencia a los antibióticos. Es improbable que los antibióticos utilizados en las plantas sean más puros que los usados para tratar animales y pueden ser, ellos mismos, el origen de genes de **resistencia** a los antibióticos en los agroecosistemas.

(ii) En animales: Arenas y Moreno Melo (2018) exponen que se utilizan para:

- Incrementar la producción.
- Reducir costos de alimentos, agua, engorde eficaz y calefacción y/o ventilación, según corresponda.
- Uso veterinario:
  - Tratamiento de enfermedad o uso terapéutico: Los animales se exponen a altas dosis en cortos períodos de tiempo.
  - Como profilaxis o para prevenir infecciones: Los animales se tratan a concentraciones sub-inhibitorias por períodos más prolongados.
  - Promoción de crecimiento: Se usan a muy bajas concentraciones (incluyendo la dieta del animal). En aves de corral y cerdos, se realiza intensamente.

La crianza animal demanda una fuerte presión selectiva para prevenir brotes de infecciones pero que también podría resultar en la emergencia de cepas **multidrogorresistentes**.

Se ha comprobado que, desde hace varios años atrás, ha habido un alarmante aumento mundial del número de casos en que seres humanos tratados con antibióticos para combatir infecciones no respondían a estos (Swaffham Prior, 1999). La situación en el campo veterinario no es tan grave como en la medicina humana, pero es motivo de inquietud creciente, principalmente por la relación entre el uso de antibióticos en los animales (especialmente los antibióticos que se emplean como promotores del crecimiento en la producción pecuaria intensiva) y la aparición de **resistencia** a los antibióticos en el ser humano.

Por ejemplo, en el embalse La Mariposa (en las afueras de la ciudad de Caracas), Mendoza (1999) encontró que las 28 cepas bacterianas eran resistentes al menos a un antibiótico. Una situación similar fue encontrada por Toba et al., (2018) en el embalse Pao-Cachinche (Edos. Carabobo y Cojedes). Adicionalmente, encontraron:

(i) El 90% de las cepas fueron resistentes al menos a 4 antibióticos.

(ii) El 20% de las cepas fueron resistentes al menos a 9 antibióticos.

(iii) *Oerskovia* sp. fue resistente a 10 antibióticos.

Esto representa un grave riesgo de salud pública, por cuanto las aguas de estos embalses se utilizan para el suministro de agua potable a la población que, en conjunto, suman más de cinco millones de habitantes en las ciudades de Caracas, Maracay, Valencia y San Carlos, en la región centro-norte de Venezuela.

En relación con los parásitos de seres humanos y animales, estos se pueden encontrar en diversos medios acuáticos naturales. Algunos de ellos son:

(i) Nemátodos (Ejemplos: *Dracunculus medinensis*, *Schistosoma mansoni*, *S. haematobium*, *S. japonicus*, *S. intercalatum*).

(ii) Protozoarios (Ejemplos: *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia*).

(iii) Apicomplexa (Ejemplo: *Cryptosporidium* spp., *Plasmodium* spp.).

Para combatir los parásitos y efectos nocivos, se han desarrollado una gran cantidad de **antiparasitarios**, los cuales pueden ser agrupados de la siguiente manera (SENASA, 2017):

(i) Vermicidas: Son antiparasitarios que matan a los parásitos adultos que viven en el interior del animal. Los principales vermicidas son los fasciolicidas, que matan a las fasciolas maduras o adultos.

(ii) Tenicidas: Matan a las tenias.

(iii) Nematocidas: Matan a los gusanos redondos.

(iv) Larvicidas: Estos antiparasitarios eliminan a las larvas de los parásitos.

(v) Ovicidas: Antiparasitarios que eliminan los huevos del parásito normalmente internos y/o externos. Algunas veces los huevos pueden

caer al pasto, pero ya no forman larvas de modo que la carga parasitaria y contagio en el animal disminuye.

(vi) Acaricidas: Estos antiparasitarios eliminan a los ácaros.

(vii) Garrapaticidas: Estos antiparasitarios matan a las garrapatas.

(viii) Insecticidas: Son antiparasitarios que matan insectos; su uso inadecuado conduce a envenenamientos fatales.

Algunas de estas drogas, luego de excretadas por los animales y los humanos, mantienen su actividad fuera de ellos, matando e intoxicando a otros organismos en el medio acuático natural. Se puede generar resistencia, debido a una disminución de la acumulación de la droga en el interior celular por un aumento en el eflujo de la misma. Las células producen, en forma exagerada, un transportador de membrana responsable de la excreción de drogas. El exceso de antiparasitarios puede provocar intoxicación y daños por acumulación en los órganos (por ejemplo, hígado y riñones) de animales y humanos. Esto configura un cuadro de riesgo severo a la salud pública.

5.3. Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes representan una fuente de preocupación sobre la calidad del agua en la actualidad (Vammen y Vaux, 2019). Estos son productos químicos sintéticos que están asociados con nuevas tecnologías o procesos que se han desarrollado recientemente y que tal vez estén experimentando una adopción rápida y generalizada. Estos productos químicos son motivo de especial preocupación porque, por lo general, se sabe poco de sus efectos sobre la salud y otros efectos secundarios. Los contaminantes emergentes representan una amenaza para los ecosistemas y las poblaciones de todos los países.

Se define como contaminante emergente a todo aquél previamente desconocido o no reconocido como tal, cuya presencia en el ambiente no es necesariamente nueva, pero sí la preocupación por las posibles consecuencias de la misma (Barceló, 2014). La detección de estos contaminantes en el medio ha sido posible sólo recientemente gracias al desarrollo de nuevas y más sensibles tecnologías analíticas.

La principal fuente de entrada de estos compuestos en el ambiente acuático son las aguas residuales, aunque también cabe destacar el papel de la agricultura y ganadería como fuentes de contaminación difusa de pesticidas y antibióticos, respectivamente.

A continuación, se describen brevemente algunos de estos contaminantes emergentes y sus efectos:

(i) Productos farmacéuticos humanos y veterinarios: Muchos son persistentes y lipofílicos, pudiendo ser bioacumulados. Otros son parcialmente metabolizados por el organismo y sus metabolitos, al ser excretados, son lanzados al ambiente, donde también pueden causar efectos a la biota y a los humanos. Entre las consecuencias más importantes de los productos farmacéuticos en los ecosistemas acuáticos se cuenta la generación de resistencia de las bacterias patógenas a los antibióticos, lo cual es un riesgo potencial para la salud.

(ii) Hormonas:

- *Estrógenos*: Los efluentes de aguas residuales contienen una mezcla compleja de productos químicos, incluidos productos farmacéuticos, que no se eliminan completamente durante el tratamiento (Schwindt et al., 2014). Entre ellas se encuentran los estrógenos esteroideos, tales como 17α-etinilestradiol (EE2), que contienen las píldoras anticonceptivas, y que según ha sido demostrado afectan negativamente a la reproducción de los peces. Un ejemplo de esto es el estudio de Schwindt et al., (2014), quienes encontraron que la exposición del pez *Pimephales promelas* a EE2 redujo su supervivencia y reproducción; los efectos fueron irreversibles.
- *Analgésicos y antipiréticos (ibuprofeno):* Gallego-Ríos et al. (2021) encontraron que concentraciones superiores a los 50 µg/L de ibuprofeno, pueden causar una reducción significativa de la calidad de la esperma y, por ello, representar una amenaza para la reproducción del bagre *Pseudoplatystoma magdaleniatum.*
- *Viagra*: El sildenafil, también conocido como PDE-5i, es un inhibidor de la enzima fosfodiesterasa que se emplea en medicamentos para tratar la disfunción eréctil (p. ej., Viagra). Ha sido detectado en aguas superficiales de Argentina, según el Centro de Investigaciones del Medio Ambiente – CIM de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina (Delgado, 2019). El sildenafil en las aguas causa estrés oxidativo en las branquias y el hígado de peces, así como cambios metabólicos, daños histológicos y neurológicos. Su remoción de las aguas requiere el uso de carbón activado en polvo (Delgado, 2019).

- *Antidepresivos*: A veces, en el proceso de potabilización, luego de la ozonificación, el cloro reacciona con el grupo amino del Prozac para formar una toxina llamada "nitrocloroformo" (Shi y McCurry, 2020). La fluoxetina (Prozac), genera efectos negativos en los peces, tales como alteración de genes responsables del desarrollo del cerebro y del comportamiento, machos ignoran a las hembras, hembras producen menos huevos y machos pueden matar a las hembras, desaparición de comporta - miento individual, disminución de su capacidad para adaptarse a los cambios en el entorno y reducen notoriamente sus indicadores de resiliencia (Thomas y col, 2012; Correia et al., 2023).

(iii) Productos de higiene personal: Se refieren a los cosméticos, fragancias, compuestos antimicrobianos, antioxidantes y cremas preservativas, insecticidas, repelentes y protectores solares, cuyo consumo mundial ha ido aumentando exponencialmente en la última década. Esta clase de compuestos produce altos índices de contaminación del agua, provocando que la misma no pueda ser reutilizada. Además, los vertederos de aguas, por lo general, desembocan en océanos, ríos o lagunas y la presencia de la espuma en ella provoca la contaminación de las aguas.

(iv) Desinfectantes: Los antisépticos y desinfectantes son utilizados extensivamente para la prevención, vigilancia y control de las infecciones. Entre los más utilizados se encuentran los compuestos catiónicos de amonio cuaternario (QACs) y los que contienen una base fuerte de amplio espectro antimicrobiano, como el polimetineldiúrea (Ramos y Alonso, 2011). El uso y abuso cotidiano de estos compuestos ha conllevado a la selección de cepas bacterianas resistentes.

(v) Compuestos de uso industrial: Entre estos compuestos se encuentran el bisfenol A, alquilfenoles, bifenilos policlorados, ftalatos, compuestos perfluorados (PFC) y los retardantes de llama (se añaden a los materiales combustibles para evitar incendios o disminuir la propagación del fuego), entre otros. Muchos de ellos son persistentes en el ambiente y, en los humanos, pueden causar problemas en el desarrollo cerebral.

(vi) Drogas ilícitas: En las aguas residuales se ha llegado a detectar *Cannabis*, anfetaminas, cocaína y opiáceos, que son las clases más consumidas (Montagner et al., 2017). Estas drogas no son totalmen-

te removidas por las estaciones de depuración de las aguas residuales, lo cual constituye un riesgo para la salud.

(vii) Tensioactivos o surfactantes: Son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (p. ej., dos líquidos insolubles uno en otro). Están presentes en detergentes, champús, lubricantes, dulces, cremas, pinturas y algunos alimentos procesados, entre otros (Brand Romero, 2019). Entre sus efectos negativos se pueden contar:

- Elevan el pH del agua, alterando el ciclo de vida de las especies acuáticas.
- Incrementan los nutrientes en las aguas, contribuyendo a su eutrofización.
- Contienen iones y metales pesados que se disuelven en agua y pueden ser ingeridos por la población, causando alteración de la cadena trófica y perjuicios genéticos en las especies.
- Aumentan la concentración de organoclorados, los cuales pueden causar efectos mutagénicos y cancerígenos.
- Producen condiciones de anoxia (agotamiento del oxígeno), causando la muerte de la fauna y flora acuática.
- Algunos son tóxicos para microorganismos y organismos superiores.
- Contaminan las aguas subterráneas.
- Generan grandes cantidades de espuma en aguas. Pueden afectar el atributo “atractivo del paisaje”.

(ix) Toxinas de algas: Las floraciones de algas nocivas en agua dulce son una preocupación cada vez mayor en todo el mundo. Es una consecuencia de la eutrofización de los cuerpos de agua. Algunas algas pueden producir toxinas que son perjudiciales para los seres humanos y los animales. Estas toxinas pueden generar complicaciones en los suministros de agua potable, ya que no son removidas por los sistemas convencionales del tratamiento de las aguas. Algunas cianobacterias poseen toxinas más potentes que el cianuro.

(x) Microplásticos: Son pequeñas piezas de plástico que contaminan el ambiente. Sus impactos se encuentran estrechamente relacionados con las propiedades químicas de los polímeros plásticos (Vammen y Vaux, 2019). Por ejemplo, pueden absorber contaminantes orgánicos

persistentes en su superficie, filtrarlos al agua, transportar bacterias dañinas, alterar cadenas completas de alimentos en los ecosistemas marinos y bioacumularse en el tejido muscular de los peces y otros productos acuáticos, causando deterioro de los ecosistemas (Fig. 13).

(xi) Disruptores endocrinos (hormonales): Agentes que interfieren con la síntesis, secreción, transporte, unión o eliminación de las hormonas naturales en el cuerpo que son responsables para el mantenimiento de la homeostasis, la reproducción, el desarrollo y/o comportamiento (USEPA, 1996). Entre los efectos adversos están: incremento de de terminados tipos de tumores, malformaciones, disfunciones del aparato reproductor, neurotoxicidad y fracaso en la respuesta inmune.

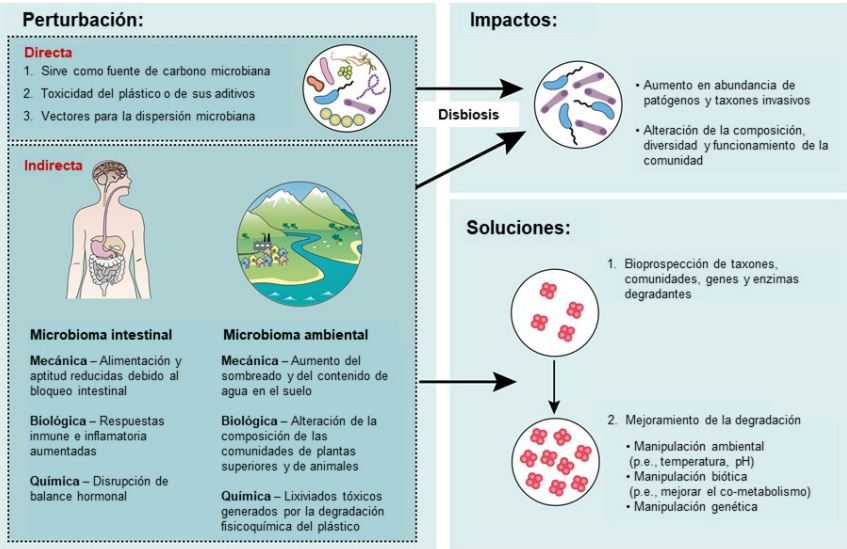


Figura 13. Impactos de los microplásticos en las comunidades de microbiomas. Modificado de Lear y col. (2021).

Actualmente existe un creciente interés por los contaminantes emergentes, ya que son compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia en el ambiente, o las posibles consecuencias de los mismos, han pasado en gran medida inadvertidas, causando problemas ambientales y de riesgo para la salud. No se había puesto el foco de investigación en ellos, por encontrarse en concentraciones muy bajas (microgramos por litro -µg/L- y nanogramos por litro -ng/L-), así que solamente el avance de las técnicas analíticas es lo que ha permitido centrarse en ellas.

La falta de capacidad para evaluar nuevos contaminantes emergentes significa que la incapacidad de discriminar entre sustancias químicas tóxicas y no tóxicas aumenta la amenaza para el ambiente, la salud y el bienestar humano. Las metodologías para su detección y cuantificación a niveles traza se encuentran poco disponibles, por lo que debe aumentarse el esfuerzo para su detección y eliminación de los cuerpos de agua. Así mismo, deben emitirse normas de regulación adecuadas.

6. Organismos responsables del Sector Hidrológico y de la prestación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Venezuela

De acuerdo con la Ley de Aguas del año 2007 (GORBV, 2007), la organización institucional de la gestión de las aguas la comprende:

1) El Ministerio con competencia en la materia, que ejercerá la Autoridad Nacional de las Aguas; actualmente es el Ministerio del Poder Popular de Atención de las Aguas.

2) El Consejo Nacional de las Aguas, compuesto por: ministerio con competencia en materia de ambiente, quien lo presidirá; de planificación y desarrollo; de agricultura y tierras; de participación y desarrollo social; de economía popular; de la defensa, a través del componente correspondiente; de minas, industrias básicas; y de ciencia y tecnología, además de un representante de cada uno de los Consejos de Región Hidrográfica, un representante de la Asamblea Nacional, un representante de los usuarios o usuarias de las institucionales de las aguas y un representante del Instituto Nacional de Tierras Indígenas.

3) Los Consejos de Región Hidrográfica, o entes de coordinación entre el Gobierno Nacional y los gobiernos estatales y municipales, y al mismo tiempo entes de concertación con las comunidades y grupos vecinales organizados.

4) Los Consejos de Cuencas Hidrográficas, integrados por el ministerio que ejerza la Autoridad Nacional de las Aguas, gobernaciones y alcaldías, los organismos que formen parte del Consejo de Región Hidrográfica que tengan presencia en la cuenca los usuarios o usuarias de las aguas, los Consejos Comunales, y los pueblos y comunidades indígenas donde los hubiere.

5) Los usuarios o las usuarias institucionales.

6) Los Consejos Comunales, las Mesas Técnicas y Comités de Riego.

7) El Instituto Nacional de Tierras Indígenas.

8) El Ministerio con competencia en materia de defensa, a través del componente correspondiente.

9) Los Consejos Estadales de Planificación y Coordinación de Políticas Públicas.

10) Los Consejos Locales de Planificación Pública.

La prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en Venezuela es competencia del Estado. El reciente Ministerio del Poder Popular de Atención de las Aguas, creado a través del Decreto N° 3.466 del 15 de junio del 2018 y publicado en la Gaceta Oficial N° 41.427 del 26 de junio de 2018 (GORBV, 2018b), tiene entre sus competencias lo relativo al cuidado, tratamiento, vigilancia y protección del agua potable, aguas servidas, cuencas hidrográficas, recursos hídricos y embalses, así como la ejecución de políticas públicas para la regulación y control de la prestación del servicio.

Según la Gaceta Oficial referida (GORBV, 2018b) quedan adscritos a este Ministerio entre otros organismos, la C.A. Hidrológica Venezolana «Hidroven» y todas sus empresas Hidrológicas Filiales como son: Hidrocapital, Hidrocaribe, Hidrocentro, Hidrolago, Hidrofalcón, Hidropáez, Hidroandes, Hidrosuroeste e Hidrollanos, las cuales son las empresas operativas responsables de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en el país.

La empresa hidrológica Hidrocapital tiene su ámbito de competencia en los Estados Miranda, Vargas y Distrito Capital. Hidrocaribe en los Estados Anzoátegui, Sucre y Nueva Esparta. Hidrocentro en los Estados Aragua, Carabobo y Cojedes. Hidrolago en el Estado Zulia, Hidrofalcón en el Estado Falcón, Hidropáez en el Estado Guárico, Hidroandes en los Estados Barinas y Trujillo, Hidrosuroeste en el Estado Táchira e Hidrollanos en el Estado Apure. Además de estas empresas hidrológicas, se tienen las empresas descentralizadas Aguas de Mérida, Hidrolara, Aguas de Monagas, Aguas de Yaracuy, Hidrosportuguesa, Hidrobolivar, Hidrodelta e Hidroamazonas, dependientes de las Gobernaciones de los respectivos Estados para la prestación de estos servicios.

7. Legislación relacionada con la calidad de aguas en Venezuela

De acuerdo con González et al., (2019), Venezuela cuenta con un marco jurídico adecuado en lo referente a la legislación sobre los recursos hídricos.

(i) Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (1999): El Régimen Jurídico representa el conjunto de normas del marco regulatorio para la Calidad de las Aguas en Venezuela. La Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (1999) establece, en el Capítulo de los Derechos Ambientales, la obligación fundamental de garantizar que los elementos del ambiente, entre ellos el agua, sean especialmente protegidos. El artículo 304 declara que todas las aguas son del dominio público, y responsabilidad del mismo Estado.

Igualmente, en su Capítulo IX "De los derechos ambientales", artículo 127, establece que es una obligación fundamental del Estado, con la activa participación de la sociedad, garantizar que la población se desenvuelva en un ambiente libre de contaminación, en donde el aire, el agua, los suelos, las costas, el clima, la capa de ozono, las especies vivas, sean especialmente protegidos, de conformidad con la ley.

(ii) Ley Plan de La Patria (GORBV, 2013): El Plan de la Patria, Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación, 2013-2019, contempla cinco grandes objetivos históricos, conformados por un conjunto de directrices nacionales e institucionales, como son las Metas Macroeconómicas y Macrosociales, los Objetivos Históricos, Nacionales, Estratégicos y Generales y las Políticas y Programas para los sectores, Económico, Social, Político, Territorial, Internacional y Ambiental, este último desde una perspectiva Ecosocialista, en tre las cuales destaca "Universalizar el servicio de agua potable y la disponibilidad oportuna para toda la población, garantizando la equidad" y "Asegurar un ambiente sano mediante el manejo adecuado de las aguas servidas".

(iii) Ley Orgánica del Ambiente (GORBV, 2006): Establece las disposiciones y los principios rectores para la gestión del ambiente, que incluye la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y del agua como recurso en particular (Artículos 2 y 4), respecto a la calidad de las aguas, regula la gestión integral del recurso, en función de la sostenibilidad del ciclo hidrológico (Artículo 55). Sobre la sustentabilidad de los recursos hídricos, señala la necesidad de conservar los suelos, las áreas boscosas, las formaciones geológicas y la capacidad de recarga de los acuíferos (Artículo 56).

(iv) Ley Orgánica para la Ordenación del Territorio (1983): La ordenación del territorio (GORV, 1983), es uno de los aspectos básicos la

Constitución (Artículo 128). El Artículo 3 establece que la Ordenación Territorial comprende, entre otros aspectos, «La protección del ambiente y la conservación y racional aprovechamiento de las aguas, los suelos, etc., en función de la ordenación del territorio».

Esta Ley dispone la declaratoria de Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE), entre las que figuran las Zonas Protectoras que incluyen las de los cuerpos de agua, Zonas de Reserva para la Construcción de Presas y Embalses, Hábitats Acuáticos Especiales para Explotación o Uso Intensivo Controlado, las planicies indudables, Reservas Nacionales Hidráulicas y las Áreas Críticas con prioridad de tratamiento (Artículos 15 y 16).

(v) Ley de Aguas (2007): Tiene por objeto (GORBV, 2007) establecer las disposiciones que rigen la Gestión Integral de las aguas, como elemento indispensable para la vida, el bienestar humano y el desarrollo sustentable del país (Artículo 1). La gestión integral de las aguas es el eje central de las disposiciones de la ley, donde la Cuenca Hidrográfica es la unidad básica de gestión.

En materia de conservación y aprovechamiento sustentable de las aguas, la Ley ratifica lo señalado en la Ley Orgánica del Ambiente sobre la Gestión Integral del Recurso (**Artículo 12)**.

La Ley crea unidades espaciales de referencia para la organización institucional y el manejo de las aguas: Regiones Hidrográficas y Cuencas Hidrográficas, referidas a las aguas superficiales y las Provincias y Cuencas Hidrogeológicas, referidas a las aguas subterráneas, señalando la obligatoriedad de establecer programas, proyectos y acciones para la conservación.

La Ley establece Áreas Bajo Régimen de Administración Especial para la gestión integral de las aguas, en los términos de la Ley Orgánica para la Ordenación del Territorio: 1) zonas protectoras de cuerpos de agua y 2) reservas hidráulicas.

En cuanto al control del uso de las aguas, la Ley señala cuáles son los usos que no están sometidos a control: domésticos, para abrevar ganado y la navegación; y los de aprovechamiento, sujetos a concesiones, asignaciones y licencias.

Respecto a las descargas a los cuerpos de aguas, los generadores de efluentes deben adoptar las medidas necesarias para minimizar la cantidad y mejorar la calidad de sus descargas (Artículo 13).

La Ley otorga competencias a la Autoridad Nacional Ambiental para tomar medidas preventivas, correctivas o mitigantes de los daños a la calidad del agua. Y establece un conjunto de sanciones por hechos atentatorios contra la calidad de las aguas, tales como acciones que provoquen la degradación del medio físico o biológico (Artículo 119); realizar actividades prohibidas en zonas protectoras (Artículo 122); incumplimiento de los controles de calidad de las aguas (Artículo 125).

El Reglamento de la Ley de Aguas se aprobó según Decreto N° 3.367 de fecha 12 de abril de 2018, y se publicó en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 41.376 de esa misma fecha (GORBV, 2018a).

(vi) Ley de la Calidad de las Aguas y el Aire (2015): Esta ley (GORBV, 2015) establece las normas sobre la gestión de la calidad de las aguas y del aire; las molestias ambientales, y las condiciones bajo las cuales se debe realizar el manejo de los residuos líquidos y gaseosos.

En materia de calidad del agua, establece los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos (Artículo 2).

También prevé el Cronograma de Adecuación contenido en la norma técnica, indicando que deberán presentarlo los establecimientos e instalaciones que no hayan cumplido con los límites establecidos.

(vii) Ley Penal del Ambiente (GORBV, 2012): En materia de calidad de las aguas (superficiales y subterráneas, Articulo 102), establece un capítulo para los hechos que causen degradación, alteración, deterioro de las aguas y para las demás acciones capaces de causarle daños, estableciendo como delitos modificar el sistema de control o las escorrentías de las aguas, obstruir el flujo o el lecho natural de los ríos, o provocar su sedimentación (Artículo 56).

Igualmente, castiga con pena de prisión y multa la contaminación y envenenamiento de aguas de uso público; el vertido de materiales degradantes en cuerpos de agua, en contravención a las disposiciones técnicas dictadas por el Ejecutivo Nacional.

(viii) Decreto N° 883. Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua Vertidos y Efluentes Líquidos (GORV, 1995): Gran parte de las normas del Decreto Nº 883 (GORV, 1995)

fue modificada o llevada textualmente a la Ley de Calidad de las Aguas y el Aire, pero mantiene su vigencia en cuanto a la determinación de las actividades sometidas a control, la clasificación de los constituyentes en los vertidos líquidos y el establecimiento de los límites máximos de descargas contaminantes, manteniéndose como norma técnica de la Ley Penal del Ambiente.

Cabe señalar que están vigentes otras normas, como las de la Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento (GORBV, 2001), que tienen relación con la calidad de las aguas y con la operatividad y regulación de los servicios. Sin embargo, se recogen aquí las principales disposiciones regulatorias, estrictamente desde el punto de vista de la calidad ambiental.

(ix) Plan Nacional de Derechos Humanos 2016-2019 (GORBV, 2016b): En el año 2014, mediante el Decreto N° 876, publicado en la Gaceta Oficial Nº 40.386, el Presidente de la República Bolivariana de Venezuela creó el Consejo Nacional de Derechos Humanos, con el propósito de seguir fortaleciendo la política pública del Estado venezolano en esta materia (GORBV, 2014).

Este Consejo Nacional de Derechos Humanos propuso el Plan Nacional de Derechos Humanos 2016-2019, el cual fue aprobado mediante el Decreto N° 2.254, publicado en la Gaceta Oficial extraordinaria N° 6.217, con fecha 2 de marzo de 2016. La construcción de esta iniciativa fue el resultado de un proceso de revisión y diagnóstico interactivo y participativo, sobre la situación de Derechos Humanos en el país, que inició en el año 2011 con la participación en el Examen Periódico Universal ante el Consejo de Derechos Humanos de la ONU.

El Plan Nacional de Derechos Humanos 2016-2019 definió en el Objetivo N° 5, Línea Estratégica N° 3 y Acción Programática N° 11, 3. “Intensificar las políticas para asegurar el acceso al agua potable y el saneamiento”.

Luego de reseñar el marco legal venezolano, puede llegarse a la conclusión de que es adecuado para una gestión de la calidad de las aguas de Venezuela, tanto preventiva, como correctiva. Sin embargo, la aplicación o cumplimiento de ese marco legal está en deuda con el desarrollo del mismo (González et al., 2019).

8. A modo de integración y ejemplo: Factores que afectan la calidad del agua en la Cuenca del Río Orinoco

En Venezuela, la mayor cuenca es la del río Orinoco, cuya superficie es cercana a un millón de km², y tiene una presencia en el 65% del territorio. El tamaño de dicha cuenca la hace la tercera de América del Sur, y la misma da origen a un caudal de unos 33 mil m³/s, haciendo del río Orinoco el tercero más caudaloso del mundo, y también uno de los más valiosos desde el punto de vista de los recursos naturales renovables (Castillo, 2023). Durante su curso de 2060 km de longitud, drena un área de aproximadamente 90.000 km² localizados en Colombia y Venezuela (Fig. 14). El volumen servido representa cerca del 80% de los recursos hídricos del país y una de las mayores reservas de agua de América del Sur (ANRBV, 2018).

El río Orinoco es considerado un río de aguas blancas y con abundantes sedimentos en suspensión (200 x 10^6 t/año). Debido a su poca inclinación (4-5 m/10 km) y las abundantes lluvias (media 1500 mm), sus aguas son parcialmente represadas por el mar, permitiendo una vasta expansión lateral, y así, creando uno de los mayores humedales de América del Sur (Machado-Allison et al., 2020). Dados su extensión y su volumen, y debido a la

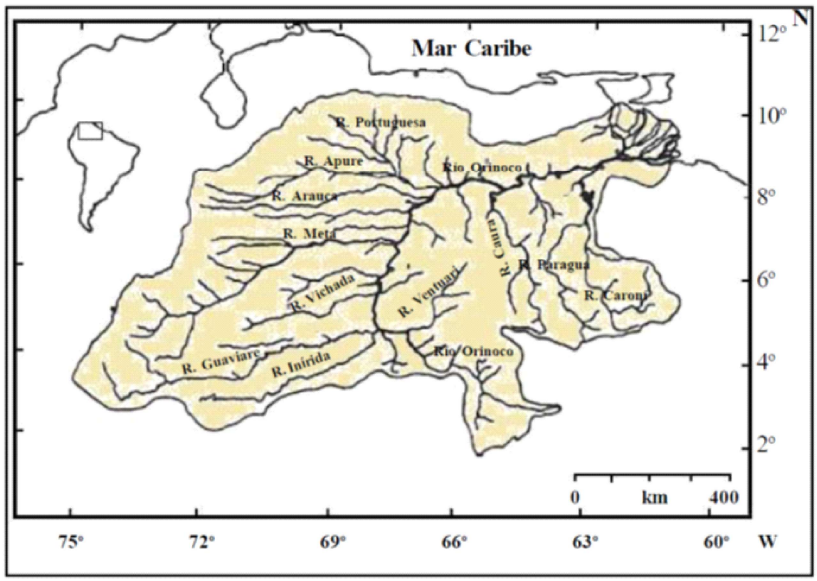


Figura 14. Cuenca del Río Orinoco y sus principales tributarios. Machado-Allison y col. (2020).

importancia que representa por su enorme diversidad de recursos naturales renovables, se presenta esta cuenca como un ejemplo de integración de los factores que afectan la calidad del agua en los ecosistemas.

Dos ciclos climáticos gobiernan generalmente la cuenca: 1) un período de lluvias (junio a noviembre) en la cual ocurre una extensiva sedimentación en la región deltaica y aparecen numerosas lagunas en los márgenes a lo largo de los principales afluentes; la inundación de áreas planas de sabana (llanos) ocurre a lo largo de miles de kilómetros cuadrados de Colombia y Venezuela; y 2) un período de sequía (diciembre--marzo) cuando en estas áreas inundadas las aguas se retraen o se aíslan del canal principal y eventualmente se secan (Fig. 15).

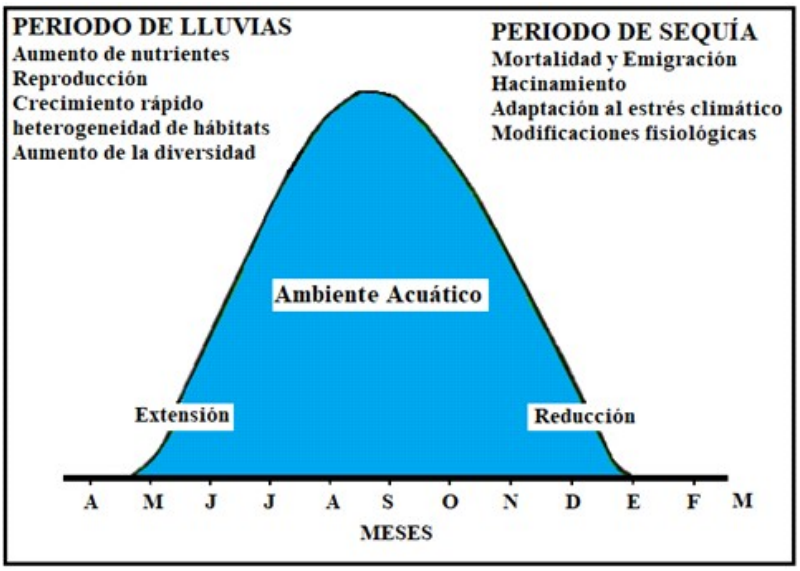


Figura 15. Ciclo hidrológico-biótico en la cuenca baja del río Orinoco. Modificado de: Machado-Allison y col. (2020).

Numerosos factores climáticos, ambientales y biológicos controlan las condiciones estacionales de estas áreas de la Orinoquia en Venezuela. Así, durante el período de lluvias las aguas cubren extensas regiones de sabana formando lagunas poco profundas, denominadas esteros, y llenando las lagunas de rebalse permanentes situadas a lo largo de los grandes afluentes y del propio Orinoco. Estos esteros y lagunas están caracterizadas por tener altas temperaturas (26--29°C), pH variable pero cercano al valor neutro (6,0 a 7,5) y pobres en oxígeno disuelto (1 a 4 mg/L). La variación en pH y

el oxígeno disuelto dependen del grado de degradación de la materia orgánica (López-Hernández et al., 1986a,b) (Fig. 16).

Figura 16. Vista aérea de esteros (salida de la estación lluviosa o bajada de aguas) en el Estado Apure. Tomado de Google Earth (2006). Image Terrametrics.

En estos ambientes, se produce igualmente un intercambio cíclico de materia que es importante para el desarrollo de una gran variedad de organismos acuáticos. El ambiente acuático en este período, se encuentra dominado y altamente protegido por la presencia de una gran variedad y densidad de plantas acuáticas flotantes y arraigadas, tales como *Eichhornia crassipes, Paspalum repens, Oxycarum cubense, Ludwigia helmintorriza, Ludwigia sediodes, Salvinia auriculata, Hymenachne amplexicaulis* y algunas especies de *Eleocharis*. Tales plantas son, generalmente, utilizadas por larvas y juveniles de peces como refugio, protección o fuente de alimentos. Durante este mismo período se produce un explosivo incremento en las poblaciones de los organismos acuáticos: fito y zooplancton, larvas de insectos acuáticos (Odonata, Trichoptera, Plecoptera, Diptera, Coleoptera y Ephemeroptera) y crustáceos, tales como el "camarón de río" (*Machrobrachium yelski*), y "caracoles" (*Pomacea* spp.), todos ellos formando parte de la dieta natural de muchas especies de peces. Por todas estas razones, las lagunas marginales permanentes y/o sabanas inundables periódicas (esteros) y lagunas de rebalse a lo largo de los principales afluentes del río Orinoco, han sido consideradas como áreas de cría (*nursery*) para numerosas especies de peces de aguas continentales, muchas de ellas de importancia económica y consumidas principalmente por las comunidades rurales (Lowe-McConnell, 1987; Machado-Allison, 1990; 1992; 1994a,b; 2017a; Machado-Allison et al., 2020; Mago--Leccia, 1970, 1978; Winemiller, 1989a,b, 1990).

Durante el período de sequía, una reducción drástica en el nivel de las aguas en el canal principal que drena las sabanas inundadas, los esteros y las lagunas, lo cual resulta en la eliminación de miles de kilómetros cuadrados de hábitats acuáticos. El agua queda limitada a pequeñas áreas profundas aisladas y rodeadas por inmensas áreas secas de sabana o protegidas entre los densos bosques de rebalse que acompañan a los principales ríos, sobre todo en las regiones del medio, bajo Orinoco y Delta. Los cuerpos de agua presentes, como pozos o lagunas, están caracterizados por tener altas temperaturas (30 a 38°C) y pH neutro (7-7,2). Estos factores, en conjunto con la carencia de la circulación de agua y la descomposición de la materia orgánica acumulada en el fondo, eliminan el poco oxígeno disuelto, resultando en condiciones anóxicas generalizadas. Estas áreas también se caracterizan por la presencia de abundante material límico en suspensión y muy poca transparencia (menor de 10 cm) a la penetración de luz y, posteriormente, se secan completamente (Fig. 17).

Figura 17. Panorama de un estero en sequía. Al fondo se observa el espejo de agua remanente. Foto: G. Echeverría.

Las condiciones abióticas se combinan para producir cambios en la abundancia y diversidad orgánica en el ecosistema. Así, durante estas condiciones extremas, se produce una eliminación de gran cantidad de elementos de la flora y fauna. Algunas especies de algas filamentosas invaden áreas poco profundas y los elementos faunísticos pasan, en general, a una etapa de dormancia (estivación). Las pocas especies de peces que pueden soportar estas condiciones sobreviven, gracias al desarrollo de mecanismos respiratorios que les permite tomar aire atmosférico, como ha sido evidenciado en peces como las "guabinas" (*Hoplias malabaricus*), "curitos" (*Hoplosternum littorale*), "corronchos" (*Hypostomus* spp.,

Pterygoplichthys multiradiatus), la "pavona" (*Astronotus mikolj*), la "anguila de río" (*Synbranchus marmoratus*), el "temblador" (*Electrophorus electricus*) o modificaciones para obtener oxígeno de la capa superficial del agua (SAR), como se pueden observar en juveniles de "cachamas" (*Colossoma macropomum*) y "arencas" (*Triportheus* spp.).

En resumen, estas áreas están gobernadas por un sistema que comprende dos periodos climáticos naturales al año (lluvias o inundación y sequía/drenaje). Estas dos estaciones regulan los ciclos biológicos de los componentes florísticos y faunísticos que los integran. Así, cualquier cambio en el clima o hidráulica natural podría afectar parcial o totalmente los elementos bióticos en el sistema, como se expondrá a continuación.

8.1. Factores ambientales naturales que controlan las comunidades acuáticas y terrestres en la Cuenca del Río Orinoco.

Las áreas inundables de sabanas y bosques situadas en las márgenes de los ríos que forman la Cuenca del río Orinoco, están caracterizadas por una alta y poco variable temperatura anual que varía entre los 28º a 38ºC y la radiación solar de aproximadamente 12 + 1 h/d anual. Sin embargo, ocurren variaciones estacionales periódicamente con el efecto de los fenómenos denominados "El Niño" y "La Niña", los cuales representan parte de un ciclo natural-global conocido como ENSO (El Niño/-Oscilación Sur). El Niño representa una fase cálida y seca mientras que La Niña una fase fría y lluviosa. Estos dos procesos climáticos a pesar de que ocurren en el lado del Pacífico de América del Sur, afectan también el área del Caribe, al norte del continente. Estas fluctuaciones de temperatura/humedad afectan igualmente las variaciones en intensidad de las lluvias en las zonas correspondientes a la cuenca del río Orinoco. En resumen, esta variación en calidad e intensidad fluctuante se expresa de variadas formas (Tabla 9).

8.2. Factores antrópicos productores de cambios en la calidad de aguas y ciclo biológico natural de las especies silvestres

> "*América del Sur es una de las pocas áreas del mundo que incluye vastas zonas de hábitats naturales todavía no perturbados. Estas áreas son el albergue de, aproximadamente la mitad de las especies de plantas y animales del mundo.*" (Hamlett, 1992: v).

La cita anterior muestra la importancia de la preservación de áreas de hábitat naturales en América. Sin embargo, es sólo durante las últimas cuatro décadas del siglo XX, que hemos notado un leve cambio en nuestro

Tabla 9. Cambios observados en los ecosistemas debido a la ciclicidad climática natural. Fuentes: Colonello et al., (1986); Machado-Allison (1990) y Machado-Allison et al., (2020).

Incremento en la complejidad de hábitat: Durante esta estación, el agua cubre sabanas y bosques de galería, transformando tierras secas en ambientes acuáticos nuevos y temporales, tales como canales secundarios, caños, esteros, lagunas, remansos, bosques inundados permitiendo la invasión de organismos acuáticos.
Incremento en la productividad primaria y secundaria: Las nuevas condiciones favorecen la reproducción y crecimiento explosivo de los componentes arbóreos de *terra firme* y del fito y zooplancton, insectos acuáticos y crustáceos en el medio acuático. Estos grupos de organismos son utilizados como recurso alimenticio por los primeros estadios de insectos e invertebrados terrestres y de formas larvales de animales acuáticos.
Cambios fisicoquímicos en la calidad del agua: Durante este período se producen cambios en las condiciones extremas que caracterizan el período anterior (sequía). La entrada de nuevas aguas incrementa la transparencia. El pH se acidifica levemente, la temperatura disminuye y el oxígeno disuelto aumenta. Estas nuevas condiciones permiten el asentamiento y desarrollo de una gran diversidad de organismos acuáticos (plantas y animales), así como también la atracción de decenas de especies de vertebrados semiacuáticos o terrestres (aves y mamíferos).
Crecimiento rápido y sostenible: Durante el período de lluvias e inundación se produce un incremento en el número, volumen y diversidad de plantas acuáticas y se produce la floración y fructificación en plantas terrestres.
Procesos de descomposición: Las aguas que cubren las extensas sabanas y bosques de rebalse comienzan un proceso de descomposición del material vegetal en el suelo cubierto o sumergido. Este factor, junto con el incremento de la temperatura a finales de la estación lluviosa, disminuye la concentración de oxígeno disuelto y al final de este período produciendo migración de elementos acuáticos hacia los canales principales de los ríos.
Reducción de la productividad primaria y secundaria: La vegetación terrestre y acuática, el fito y zooplancton y los insectos y crustáceos reducen sus poblaciones, debido a las condiciones extremas presentes, desapareciendo o creando órganos de resistencia que permanecen en los terrenos áridos y secos. Los huevos de dípteros, por ejemplo, permanecen adosados a paredes o bancos a la espera de las primeras lluvias para eclosionar.

Tabla 9. Cambios observados en los ecosistemas debido a la ciclicidad climática natural. Fuentes: Colonello et al., (1986); Machado-Allison (1990) y Machado-Allison et al., (2020). (continuación)

Reducción de nichos y desarrollo de mecanismos fisiológicos de resistencia: Durante este período, los peces viven en condiciones ambientales extremadamente severas (altas temperaturas, bajas concentraciones de oxígeno, baja transparencia, altas densidades, etc.), las cuales tienen la tendencia de obstaculizar o paralizar los procesos o actividades biológicas, otras que no sean la preparación para la reproducción. En muchas especies se reduce o elimina completamente la incorporación de alimento. Esto incluye especies consideradas como carnívoros obligatorios o depredadores.
Altas mortalidades y/o emigración hacia el canal principal: Durante este período, cientos de miles de juveniles y adultos emigran hacia el canal principal de los afluentes, donde existe una garantía de supervivencia. Pocos ambientes ("matas") terrestres se utilizan como refugios de fauna.

comportamiento debido al conocimiento mundial de al menos cuatro hechos y/o desgracias ambientales que nos producen cierto temor acerca del futuro:

(i) La publicación del libro *Silent Spring*, de R. Carson (1962), cuyo texto nos introduce sobre los peligros públicos de los desechos domésticos e industriales vertidos en aguas;

(ii) La cobertura mundial dada al llamado "Accidente de Minamata" en el cual cientos de toneladas de mercurio fueron descargados en la Ba hía de Minamata en Japón (1950), contaminando la cadena trófica y afectando miles de personas;

(iii) El conocimiento mundial del caso del *Love Canal* en Estados Unidos, caso que abrió los ojos al mundo desarrollado y produjo una extensa discusión acerca de la descarga y disponibilidad de desechos tóxicos industriales; y

(iv) La Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro (1992) y los acuerdos posteriores de Montreal y Kyoto, en los cuales la comunidad interna cional ha llamado la atención acerca del aceleramiento de cambios globales, la pérdida de biodiversidad y la necesidad de preservación de áreas para lograr una calidad ambiental que garantice el futuro de

la humanidad (IUCN, 1993). Más recientemente, en el año 2000, 192 países se comprometieron a desarrollar el llamado Objetivos de De sarrollo del Milenio. El Objetivo N° 7 estaba dedicado a garantizar la sostenibilidad del Medio Ambiente (ONU, 2023).

A pesar de esto, todavía se está en presencia de actividades humanas que colocan en peligro numerosos ambientes acuáticos en América del Sur. Variadas y extensas áreas de bosques tropicales son taladas cada año con la finalidad de ampliar una frontera agrícola poco eficiente y no adaptada a nuestro medio. El "saneamiento de tierras" (término ingenieril que transforma áreas anegadizas en terrenos secos) con propósitos urbanísticos, la desviación o bloqueo de aguas y la contaminación de ríos por actividades domésticas e industriales, son algunas de estas actividades.

Como un ejemplo de lo anteriormente indicado, a continuación, se desarrollarán algunas generalidades de acciones o actividades humanas que han impactado la ecología de las comunidades acuáticas en la cuenca del río Orinoco. Las intervenciones se pueden clasificar de esta manera:

(i) Represamiento de aguas con propósitos domésticos, agrícolas o industriales;

(ii) Deforestación para usos agrícolas y urbanos;

(iii) "Saneamiento de tierras" para uso agrícola o doméstico;

(iv) Explotación mineral (petróleo, oro, bauxita, coltán y otros);

(v) Transporte fluvial, la introducción de especies exóticas o foráneas y los planes potenciales de aprovechamiento del eje "Apure-Orinoco" (PROA, 1993).

Todas estas acciones causan algunos cambios en los ciclos naturales hidrológicos y biológicos, los cuales afectan directa o indirectamente las comunidades acuáticas en la cuenca del río Orinoco.

Represamiento de aguas con fines agrícolas, domésticos industriales. Las represas o diques para uso agrícola o doméstico industrial fueron extensivamente construidas en los últimos 70 años, cuyo resultado es la evidente captura de casi todas las cabeceras de los principales afluentes colocados en el margen norte y nor-oeste del canal principal del río Orinoco. Las cabeceras de los ríos: Apure, Boconó, Cojedes, Guanare, Guárico, Masparro, Portuguesa, Sarare y Santo Domingo, entre otros han sido afectados (Fig. 18).

Las represas han producido cambios en la siguiente forma:

Alteración o regulación del régimen anual hidrológico. Debido a estas construcciones en los últimos 70 años, numerosos ríos han perdido su régimen hidráulico natural. Los cambios en los regímenes anuales (sequía e inundaciones), afectan los ciclos biológicos (migración-reproducción) de las especies acuáticas y favorecen la desaparición de "esteros", calificados como áreas de cría y pérdida de hábitats naturales.

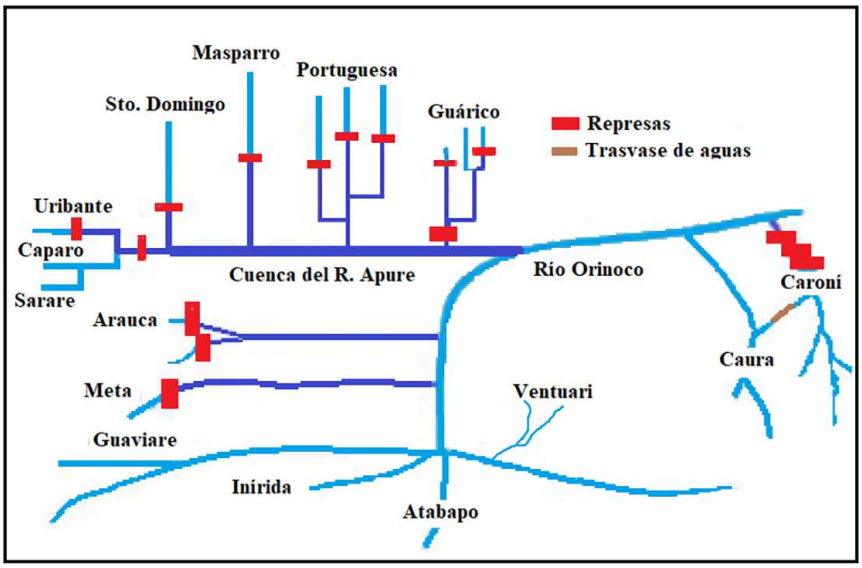


Figura 18. Esquema de la cuenca del Orinoco con los ríos afectados por represamientos con fines agrícolas, domésticos o industriales. Los cuadros rojos pueden representar más de una represa, mientras que en azul oscuro se representan las aguas modificadas. Tomado de: Machado-Allison y col. (2020).

Contaminación doméstica, agrícola e industrial (Fig. 19). Las aguas represadas y utilizadas en áreas urbanas (uso doméstico o industrial) y/o desarrollo agrícola, son posteriormente descargadas como aguas residuales en muchos casos sin tratamiento y altamente contaminadas. Así, los detergentes, hidrocarburos, fertilizantes, y una alta variedad de pesticidas y residuos industriales, como metales pesados, entran al medio acuático natural, produciendo alteración en la calidad del agua y daños bioquímicos o fisiológicos en los organismos que la habitan. Estos contaminantes afectan a las comunidades, principalmente durante el período de lluvias, cuando extensas áreas urbanas ("síndrome de río urbano", Meyer, 2005; Rodríguez-

Olarte, 2017; 2020) y agrícolas son "lavadas" por éstas. Es así como, año a año, se reportan grandes mortandades de peces en zonas cercanas a Turén, Central Portuguesa, Guanare y La Unión en el río Portuguesa, por el uso del DDT (Madriz et al., 1990).

Deforestación con propósitos urbanos o agrícolas. Las cabeceras de los principales afluentes del río Orinoco en las regiones andinas de Colombia y Venezuela, han sido extensa e intensivamente deforestadas (Centeno, 1999; Pacheco et al., 2014). Las deforestaciones principalmente se han realizado con fines agrícolas y pecuarios, aumentando sus fronteras.

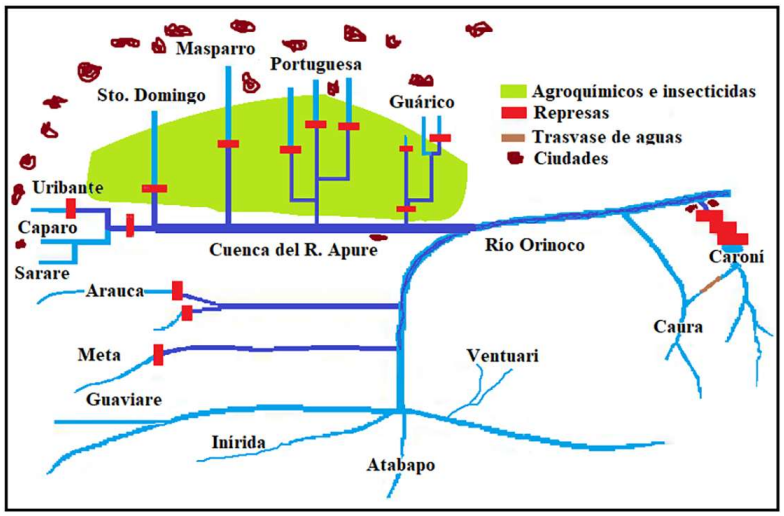


Figura 19. Esquema de la cuenca del Orinoco con los ríos afectados por represamientos, ciudades y contaminación agrícola.

"**Saneamiento**" **o** "**recuperación**" **de tierras con fines urbanos o agrícolas**. Existe una percepción común en el mundo y una creencia popular, que los pantanos o sabanas inundables son tierras inservibles/peligrosas para la salud, y que las inundaciones son una amenaza inaceptable para las tierras y la vida. Con esto en mente, los diferentes gobiernos han introducido el concepto de "saneamiento" (Hetier y López-Falcón, 2003; Comerma, 2009) para definir todas aquellas actividades que conllevan drenaje, relleno y "recuperación" de tierras con fines urbanos o agrícolas. Las inundaciones en los llanos de Venezuela no han escapado a esta interpretación y periódicamente el público en general es testigo de la transmisión de información en la prensa o hablada con este concepto en mente, donde se condena este

ciclo climático natural como una catástrofe, calamidad humana o desastre natural, y no como respuesta a las irregularidades urbanísticas o al desconocimiento de los riesgos que implica el construir viviendas en estas zonas de planicies de inundación.

Minería e industria petrolera (Fig. 20). La cuenca del río Orinoco en Colombia y Venezuela es considerada (y ha sido probada) como uno de los reservorios más grandes de petróleo pesado y gas natural del mundo. La Fig. 20 muestra el área en Venezuela que potencialmente pudiera ser afectada si un desarrollo pleno de actividades exploratorias y de extracción comienza a llevarse extensamente en un futuro cercano. Es de hacer notar que existe una congruencia total del área y las zonas inundables del medio Orinoco y los llanos. Sin embargo, ya existen severos impactos ecológicos, por los momentos restringidos a las áreas elevadas (mesas) del Estado Anzoátegui y tierras bajas y morichales de los estados Monagas y Delta Amacuro (Baynard, 2011). Los ríos en estas zonas son excepcionales; son ríos denominados "negros" por el color oscuro que tienen y adicionalmente ser naturalmente ácidos, producto de la descomposición natural de las sustancias húmicas de los vegetales que producen ácidos húmicos. En su gran mayoría, tienen asociados un bosque acompañante dominado por una palma (palma moriche), *Mauritia flexuosa*, por lo que comúnmente se les conoce como "morichales". El río corre por un fondo predominantemente arenoso y sus aguas casi puras tienen muy poca capacidad amortiguadora, por lo que son considerados muy frágiles (Machado-Allison et al., 1987; Mora Polanco et al., 2008).

Los impactos producidos en estos ecosistemas tienen que ver directamente con los procesos de extracción del petróleo que implican el uso de grandes cantidades de agua a alta temperatura y que es utilizada para poder calentar el petróleo y separarlo de las arenas. Las aguas utilizadas son subterráneas y tienen un alto contenido de sales. Después de ser utilizadas, estas aguas, mezcladas con productos residuales derivados del petróleo tales como aceites, fenoles y bencinas o contaminantes como azufre, son depositados en pozos colocados cerca de las torres de extracción.

Más reciente es el desarrollo de la minería extractiva (formal e informal) de metales preciosos dentro de la cuenca. La prospección y explotación de minerales preciosos en las cabeceras del Orinoco y otros ríos importantes como el Caura, Caroní, Cuyuní, Ventuari y muchos otros que, aunque desarrollada en menor escala, hoy día se estimula desde el gobierno central mediante la creación del "Arco Minero del Orinoco" (GORBV, 2016a), con un

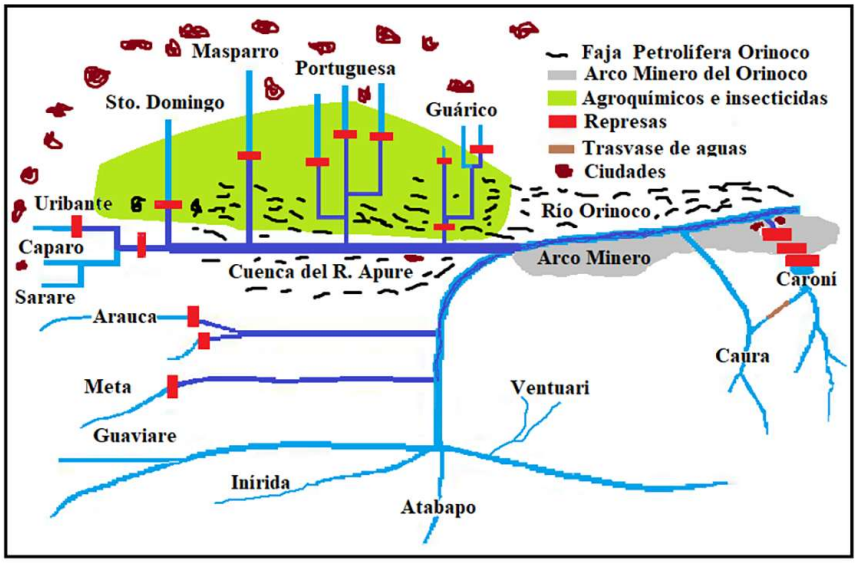


Figura 20. Esquema de la cuenca del Orinoco con los ríos afectados por represamientos, ciudades, contaminación agrícola y doméstica, petróleo y minería. Modificado de: Machado-Allison y col. (2020).

cuerpo doctrinario rector que promueve la explotación extensiva del mineral de oro y coltán en un área de 111.843,70 km^2 al norte del estado Bolívar y colindante con la mayoría de los ríos más importantes del área.

Aunque esta actividad todavía es incipiente en la Cuenca del Orinoco, comparada con los ejemplos provenientes de cuencas vecinas (Cuyuní) en nuestro país, son suficientemente dramáticos como para poner una atención especial en esta actividad. La Red Ara (2010), SOS Orinoco (2021), Machado-Allison (2000, 2015, 2017b), USPDA (1984, 1989) entre muchos otros, presentan cifras preocupantes de pérdida de ambiente y sus organismos y el daño producido sobre la salud humana tanto en comunidades indígenas del área como en pobladores cercanos a los desarrollos mineros. En trabajos sobre la presencia de mercurio en peces (Nico y Taphorn, 1994; Farina et al., 2009; Trujillo et al., 2010; Milano, 2014) se presentan evidencias concretas sobre este problema nacional, al igual que el aumento de enfermedades como la malaria (Grillet et al., 2018; Grillet, 2022).

Esta situación coloca a Venezuela en flagrante violación de acuerdos internacionales sobre la utilización de las aguas y la afectación que puede producirse en otros países. Este tema de la utilización del mercurio es de

actual discusión tanto dentro del país como a nivel regional y mundial, principalmente en naciones con ríos compartidos (Gleick, 1998; Petts et al., 1989; Machado-Allison, 2017b; Machado-Allison et al., 2012, Díaz-Ariaga, 2014).

8.3. Recomendaciones

En los apartes anteriores se ha tratado de realizar una descripción sucinta de los factores naturales y antrópicos que regulan la calidad de aguas naturales y/o modifican los ciclos biológicos de los organismos y que pudieran afectar el destino de los ecosistemas acuáticos en la Cuenca del Río Orinoco. Se ha hecho énfasis en aquellas actividades humanas que colocan en peligro directo a las comunidades acuáticas. Como científicos y docentes que tenemos la intención de tener cierto equilibrio entre desarrollo y conservación, cabe preguntarse inicialmente cómo se comportan estos ecosistemas (biótica y abióticamente); segundo, se debe considerar la importancia de los ecosistemas en términos biológicos, productivos, sus servicios ambientales y su uso adecuado por las poblaciones humanas. Finalmente, se debe educar al ciudadano, colocado a diferentes niveles de decisión o autoridad, sobre cómo puede realizarse un manejo adecuado para garantizar un recurso sostenible.

> "*El manejo de los ríos en el mundo requiere un acercamiento ecosistémico holístico que debe ser centrado en las zonas riparinas, pero también debe involucrar las pesquerías y factores exógenos a las grandes represas y reservorios como partes importantes del desarrollo del río*." (Traducido de Petersen et al., 1987: 166).

> "*Los grandes desarrollos de ingeniería de aguas deben proveer las bases para un mantenimiento sostenible de los recursos, ya que los mismos contemplan integralmente un plan general de captura; los objetivos y operaciones de estos proyectos deben ser radicalmente revisados y las regulaciones secundarias deben ser incorporadas en todos los niveles para el mantenimiento de los ecosistemas río abajo. Estas medidas deben colocar énfasis particular en el mantenimiento del ecotono de las planicies y el bosque riparino*." (Traducido de Petts, 1990a: 394).

Estas dos citas ilustran la importancia del desarrollo sostenible de los sistemas acuáticos. Numerosos simposia, reuniones o programas internacionales, tales como: EMINWA (*Environmental Sound Management of Inland Waters*) propuesto por la UNEP (*United Nations Environmental*

Programme) y la *Unesco's International Hydrological Programme* y los Reportes Bienales del Uso de Recursos de Agua Dulce (1998-2018), han presionado, estimulado y recomendado investigaciones, programas educativos, entrenamiento y convenios interinstitucionales, necesarios para el desarrollo de estrategias ecológicamente aceptables para el uso y explotación de los recursos acuáticos (incluyendo las aguas continentales) en los ambientes tropicales (Gleick, 1998; Lovejoy, 1981; Petts, 1990a,b; Petts et al., 1989a,b; Pringle, 1997; Pringle et al., 2000). Estos programas deben ser adoptados por nuestros gobiernos y agencias privadas antes que se produzcan mayores daños en nuestras aguas continentales y sus sistemas biológicos.

El establecimiento de un manejo efectivo de los recursos acuáticos y la coordinación de los diversos planes de desarrollo dentro de una misma cuenca, son requeridos urgentemente. Por otro lado, con respecto al problema del desarrollo y explotación minera dentro de la cuenca del río Orinoco, tal como lo es la extracción de petróleo extra-pesado proveniente de la Faja Bituminosa, la explotación de oro y diamantes en las cabeceras, o de planicies aluvionales en el margen norte del Escudo de Guayana, unido al uso extensivo e intensivo de plaguicidas en las planicies de los principales afluentes que bajan de la Cordillera de Los Andes, y las descargas industriales o urbanas de los asentamientos industriales y humanos cercanos a cuencas hidrográficas, necesitan atención y se deben dar ciertas recomendaciones:

(i). El manejo adecuado y control de estas actividades deben ser efectivos, de forma tal de impedir una mayor destrucción física de los ecosistemas o la contaminación de las aguas por desechos tóxicos.

(ii). Las diferentes normativas establecidas en la Ley Penal del Ambiente deben ser rigurosamente seguidas, desde el inicio del proyecto hasta la coordinación permanente de la actividad.

(iii). La aplicación de regulaciones internacionales (p.e., las de la U.S. Environmental Protection Agency) al uso de plaguicidas debe ser es tablecida y cumplida, ya que además de la contaminación de las aguas y la vida silvestre, muchos de los productos agrícolas no pueden en trar en el mercado internacional debido al uso excesivo de estos productos.

(iv). Debe educarse al pueblo, indicándole que los metales pesados tales como el mercurio y el plomo, así como también los plaguicidas organoclorados y organofosforados que penetran en el ambiente acuático y son transferidos en la cadena alimenticia, son altamente tóxicos no solamente para la vida silvestre, sino que también pueden causar mal-

formaciones genéticas, desordenes nerviosos y la muerte en huma nos (Fig. 21).

(v) Es necesario, igualmente, promover estudios científicos que permitan dar una base de apoyo técnico para regular estos desarrollos agrícolas que impactan los ambientes naturales: La sustitución de insecticidas por parte de controladores biológicos o el desarrollo de plantaciones resistentes, son opciones aceptables en nuestra agricultura.

Figura 21. Esquema de transferencia de contaminantes a través del ciclo natural-ambiental como medio educativo. Tomado de: Machado-Allison y col. (2020).

Finalmente, unas palabras de cierre de este capítulo son necesarias. La Cuenca del Orinoco, incluyendo sus amplias áreas inundables de los llanos y el delta, representan uno los mayores humedales de la Región Neotropical (Hamilton y Lewis, 1990; Machado-Allison, 1990; Marrero, 2011, 2021). Dado el grado de duda científica, debido a no poseer toda la información bioecológica disponible de todos los hábitats, debe darse una especial atención a la conservación de pocas cuencas, pero cuidadosamente seleccionadas (Chernoff, 1996; Chernoff et al., 2002; Machado-Allison et al., 2002; Lasso et al., 2010; 2011). Por otro lado, en los ríos que ya han sido regulados por diques y represas, se deben incorporar programas de manejo secunda-

rio y revisión de las operaciones, de forma tal de mitigar los impactos producidos aguas abajo. Cualquier desarrollo industrial, agrícola o humano (como, por ejemplo: el Plan de Desarrollo del Eje Apure-Orinoco, La Faja Petrolera o el Arco Minero del Orinoco), deben considerar la importancia de las zonas inundables y sus bosques acompañantes como garantía de la conservación de los recursos naturales (incluyendo pesquerías), necesarios para el mantenimiento futuro de nuestras poblaciones. Finalmente, el desarrollo de información científica y la adquisición de nuevas herramientas técnicas para la exploración y determinación de fuentes de agua y usos de tierras debe ser nuestro principal objetivo y, además, deben estar íntimamente coordinados, de forma tal de garantizar la conservación de los ecosistemas naturales y un desarrollo sostenible del género humano. No podemos eludir nuestra responsabilidad como generación humana que actualmente está haciendo uso de nuestro mundo. La preservación de un ambiente adecuado y de alta calidad de vida debe ser nuestro norte para garantizar que las generaciones futuras puedan desarrollarse en un medio, donde la vida silvestre y humana puedan ser parte integral del mismo.

9. Consideraciones finales

La definición de la calidad del agua depende de los usos que se pretenda dar al recurso. Tal como se ha descrito, de manera extensiva, aunque no exhaustiva, en este capítulo, la calidad del agua puede abordarse en diferentes puntos (fuentes, potabilizadoras, distribución y almacenamiento). El recurso hídrico es aprovechado a partir de varias de sus fases en el ciclo hidrológico, sobre el cual se superpone un ciclo social que afecta su calidad, que se ha definido como ciclo hidrosocial del agua. Se ha descrito, igualmente, una serie de factores que contaminan las aguas, entre los que se destacan las aguas servidas domésticas e industriales, las aguas de escorrentía desde áreas agrícolas y urbanas, y un motivo de preocupación creciente, como lo son los diversos contaminantes emergentes. Todo ello genera riesgos para la salud humana y de los propios cuerpos de agua.

Venezuela cuenta con un marco legal adecuado para atender los temas de la calidad de las aguas, pero su aplicación es deficiente aún. Debe prestarse mayor atención a los temas de monitoreo ambiental, tratamiento de las aguas servidas y hacer un uso más eficiente de las aguas, debiéndose procurar mecanismos para su reúso.

Finalmente, el caso de los factores que afectan la calidad del agua en la cuenca del Río Orinoco, la que concentra más del 80% de los recursos hídricos con los que cuenta el país, es un claro ejemplo de los complejos meca-

nismos que influyen sobre las características físicas y químicas de las aguas que discurren por sus ríos y cuerpos de agua y cómo afectan a las comunidades bióticas y, en última instancia, a las poblaciones humanas que habitan en la región.

Por lo antes expuesto, queda claro que la calidad del agua es un tema que involucra a todos los habitantes e instancias institucionales del país, porque cada uno de ellos, en diversos grados, impacta sobre los recursos hídricos.

Referencias bibliográficas

ARENAS, N. E. y V. MORENO MELO

2018. Producción pecuaria y emergencia de antibiótico resistencia en Colombia: Revisión sistemática. *Infectio,* 22(2): 110-119. https://doi.org/10.22354/in.v22i2.717.

ASAMBLEA NACIONALDE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (ANRBV).

2018. La Ley Orgánica de la Megareserva de Agua Dulce y Biodiversidad del Sur del Orinoco y la Amazonía Venezolana, sancionada por la Asamblea Nacional el 27 de noviembre de 2018.

BARCELÓ, D.

2014. Los contaminantes emergentes: Descripción y tratamientos. En: https://www.iagua.es/blogs/damia-barcelo/contaminantes-emergentes-descripcion-y-tratamientos. Consulta: 4 de octubre de 2023.

BAYNARD, C. W.

2011. The landscape infrastructure footprint of oil development: Venezuela's heavy oil belt. *Ecological Indicators*, 11: 789-810.

BLANCO, H., M. V. NAJUL y R. SÁNCHEZ

2015. Calidad del agua (253-286). En: Gabaldón, A.; Rosales, A.; Buroz, E.; Córdova, J.R.; Uzcátegui, G. (eds.). *Agua en Venezuela: Una riqueza escasa.* Fundación Empresas Polar. Caracas.

BRAND ROMERO, D. L.

2019. Efecto de los tensoactivos en el medio ambiente. Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial. Repositorio Institucional: 1-15.

BUROZ, E.

2016. *El agua en Venezuela: Pasado, Presente y Futuro*. *Parte II: Diseñando la Carta de Navegación*. Academia Nacional de Ciencias Físicas Matemáticas y Naturales. Trabajo de Incorporación como Individuo de Número. Caracas.

CAMPUZANO, C.P., G. ROLDÁN, A. E. TORRES ABELLO, J. LARA-BORRERO, S. L. GALARZA-MOLINA, J. D. GIRALDO OSORIO, M. DUARTE, S. MÉNDEZ FAJARDO, L. J. MONTOYA JARAMILLO y C. D. RUIZ

2015. El agua urbana en Colombia. En: *Desafíos del agua urbana en las Américas. UNESCO - Programa Hidrológico Internacional*. Roldán, G.; Torregrosa, M.L.; Vammen, K.; González, E.J.; Campuzano, C.; Hidalgo, H.; de la Cruz Molina, A. (eds.)., Inter American Network of Academies of Sciences (IANAS), Inter Academy Pannel (IAP), México: 174-207.

CARLSON, R. E.
1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2): 361-369.

CARSON, R.L.
1962. *Silent spring*. Houghton Mifflin. New York, 602 p.

CASTILLO, J.
2023. Agua y saneamiento en Venezuela: una crisis sin límites. En: https:// www.iagua.es/blogs/jesus-castillo/agua-y-saneamiento-venezuela-crisis-limites. Consulta: 21 de marzo de 2025.

CENTENO, J.
1999. Deforestación fuera de control en Venezuela. http://www.ciens.ula.ve/-j.centeno/DEFOR-ES.html.

CHERNOFF, B. (ED.)
1996. Technical Preliminary Report. Aqua-RAP (Aquatic Rapid Assessement Program). (mimeo). Field Museum/Conservation International, 34 p.

CHERNOFF, B., A. MACHADO-ALLISON, K. RISENING AND J. MONTAUBALT (EDS.)
2002. *A biological assessment of the aquatic ecosystems of the Caura River basin, Bolívar State, Venezuela*. RAP Bulletin Biological Assessment 28. Conservation International, Washington, D.C., 284 p.

COLONELLO, G., S. CASTROVIEJO Y G. LÓPEZ
1986. Comunidades vegetales asociadas al Río Orinoco en el sur de Monagas y Anzoátegui (Venezuela). *Memorias de la Sociedad de Ciencias Naturales La Salle*, 46(125/126): 127-166.

COMERMA, J. A.
2009. Suelos mal drenados en Venezuela. *Agronomía Tropical*, 59(1): 25-32.

CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
1999. Gaceta N° 36.860. 30 de diciembre de 1999. Caracas.

CORONEL BORGES, A. Y M. GONZÁLEZ SANABRIA
2015. Las aguas subterráneas (145-186). En: *Agua en Venezuela: Una riqueza escasa*. Gabaldón, A.; Rosales, A.; Buroz, E.; Córdova, J.R.; Uzcátegui, G. (eds.). Fundación Empresas Polar. Caracas:

CORREIA, D., I. DOMINGUES, M. FARÍA AND M. OLIVEIRA
2023. Effects of fluoxetine on fish: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of the total environment*, 857(2): 159486. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159486

DELGADO, N. Y.
2019. *Diagnóstico y remoción de contaminantes emergentes en aguas superficiales y cloacales.* Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería. La Plata, 217 p.

DÍAZ-ARRIAGA, F.

2014. Mercurio en la minería del oro: Impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16(6): 947-957.

DIOP, S., G. DONOSO, M. FORDE, E. GONZÁLEZ, H. HIDALGO, E. NAAH, K. VAMMEN AND H. VAUX JR

2023. Water scarcity on two continents: A preliminary report. Network of African Science Academies (NASAC), InterAmerican Network of Academies of Sciences (IANAS). Córdoba: 81 p.

ESCOLERO, O., S. KRALISCH, S. E. MARTÍNEZ Y M. PEREVOCHTCHIKOVA

2016. Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3): 409-427.

ESTABA, M., E. J. GONZÁLEZ Y M. L. MATOS

2006. Desestratificación artificial en el embalse Pao-Cachinche: Primer y exitoso caso de mejoramiento de la calidad del agua en Venezuela (429-455). En: *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gestão.* Tundisi, J.G.; Matsumura-Tundisi, T.; Sidagis-Galli, C. (eds.). Rede EUTROSUL, PROSUL, Instituto Internacional de Ecología. São Carlos:

FARINA, O. D. M. PISAPIA, M. GONZÁLEZ Y C. LASSO

2009. Evaluación de la contaminación por mercurio en la biota acuática, agua y sedimentos de la cueca alta del río Cuyuní, Estado Bolívar, Venezuela. Capítulo 4. En: *Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos de la Cuenca del Alto Cuyuní, Guayana Venezolana.*: Lasso, C.; Señaris, C.; Rial, J.; Flores, A. (eds.). Conservation International. Washington, D.C. Rap. Bulletin of Biological Assessement.

FERRARA, G., M. V.NAJUL Y R. SÁNCHEZ

2007. Calidad del recurso hídrico. Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT-ULA). Mérida, 366 p.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS)

2020. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, 202 p.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS)

2022. AQUASTAT. En: https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html?lang=es. Consultado: 15 de mayo de 2023.

FORDE, M.

2023. Water and health: Water-washed diseases. (10-14). En: Izurieta, R.; Vammen, K.; Campos, A.; Hoare, I.; Terán, E. (eds.). *Water and health in the Americas.* IANAS Water Program. Córdoba.

FORDE, M., R. IZURIETA, B. ÖRMECI, M. ARELLANO Y K. MITCHELL

2019. Agua y salud (29-38). En: *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades*. Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México.

FUNDACIÓN AGUA SIN FRONTERAS; FUNDACIÓN AGUACLARA, CLIMA 21; MESAS TÉCNICAS DEL AGUA DEL MUNICIPIO BARUTA

2018. Complex Humanitarian Emergency in Venezuela. Right to Water. National Report. Caracas.

GALLEGOS-RÍOS, S., V. J. ATENCIO-GARCÍA Y G. A. PEÑUELA

2021. Effect of ibuprofen in vivo and in vitro on the sperm quality of the striped catfish *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13245-6.

GIRARDI, V., J. S. GULARTE, M. DEMOLINER AND F. R. SPILKI

2023. Present data and future prospects for environmental surveillance of waterborne viruses and water-related viral diseases (23-32). En: *Water and health in the Americas.* Izurieta, R.; Vammen, K.; Campos, A.; Hoare, I.; Teram, E. Inter American Network of Academies of Sciences (IANAS), InterAcademy Partnership (IAP). Córdoba

GLEICK, P.

1998. *The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press. Washington, D.C., 307 p.

GONZÁLEZ, E.J., E. BUROZ CASTILLO, R. LAIRET CENTENO, M. J. NAJUL, H. BLANCO, R. SÁNCHEZ, J. PAOLINI, R. MONTERO, H. ÁLVAREZ, S. ASTIZ, C. ESPINOSA JIMÉNEZ, V. FOCÀ, M. A. CABEZA DÍAZ, S. VIELMA ANGARITA, L. RIESTRA, A. MACHADO-ALLISON Y P. R. GARCÍA MONTERO

2019. Calidad de las aguas en Venezuela (633-659). En: Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades*. Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México.

GONZÁLEZ, E. J. Y M. L. MATOS

2012. Manejo de los Recursos Hídricos en Venezuela. Aspectos Generales (437-447). En: *Diagnóstico del Agua en las Américas*. Jiménez-Cisneros, B.; Tundisi, J.G. (eds.). Red Interamericana de Academias de Ciencias–Programa de Aguas, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. México.

GONZÁLEZ, E. J.; M. L. MATOS, E. BUROZ, J. OCHOA-ITURBE, A. MACHADO-ALLISON, R. MARTÍNEZ, Y R. MONTERO

2015. Agua Urbana en Venezuela (574-619). En: *Desafíos del Agua Urbana en las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias*. Roldán, G.; Torregrosa, M.L.; Vammen, K.; González, E.J.; Campuzano, C.; de la Cruz, A. (eds.). Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) – Programa de Aguas, con apoyo de IHP-UNESCO. México

GONZÁLEZ, E. J. AND R. QUIRÓS
2011. Eutrophication of reservoirs in Venezuela: Relationships between nitrogen, phosphorus and phytoplankton biomass. *Oecologia Australis*, 15(3): 458-475.

GONZÁLEZ, E. J. AND G. ROLDÁN
2019. Eutrophication and phytoplankton: Some generalities from lakes and reservoirs of the Americas. En: Vítová, M. (ed.). Microalgae – From Physiology to Application. *IntechOpen*, London: 25-44. DOI: 10.5772/ intechopen.89010.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2001. Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento. Gaceta Extraordinaria N° 5.568. 31 de diciembre de 2001. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2006. Ley Orgánica del Ambiente. Gaceta N° 5.833. 22 de diciembre de 2006. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2007. Ley de Aguas. Gaceta N° 35.595. 2 de enero de 2007. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2012. Ley Penal del Ambiente. 2012. Gaceta N° 39.913. 2 de mayo de 2012. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2013. Plan de la Patria, Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación 2013-2019. Gaceta Extraordinaria N° 6.118. 4 de diciembre de 2013. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2014. Consejo Nacional de Derechos Humanos. Decreto N° 876. Gaceta N° 40.386. 3 de abril de 2014. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2015. Ley de la Calidad de las Aguas y el Aire. 2015. Gaceta Extraordinaria N° 6.207. 28 de diciembre de 2015. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2016a. Decreto N° 2.248 de Creación de la Zona de Desarrollo Estratégico Nacional «Arco Minero del Orinoco». Gaceta N° 40.855. 24 de febrero de 2016. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2016b. Plan Nacional de Derechos Humanos 2016-2019. Decreto N° 2.254. Gaceta Extraordinaria N° 6.217. 1° de marzo de 2016. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2018a. Decreto N°3.367. Ministerio del Poder Popular para Atención de las Aguas. Gaceta Ordinaria N° 41.376. 12 de abril de 2018. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
2018b. Decreto N°3.466. Ministerio del Poder Popular para Atención de las Aguas. Gaceta Ordinaria N° 41.427. 26 de junio de 2018. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
1983. Ley Orgánica para la Ordenación del Territorio. Gaceta Extraordinaria N° 3.238. 11 de agosto de 1983. Caracas.

GORBV (GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)
1995. Normas para Ia clasificación y el control de Ia calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Decreto N° 883 del 11 de octubre de 1995. Gaceta Extraordinaria N° 5.021. 18 de diciembre de 1995, Caracas.

GRILLET, M. E.
2022. *Deforestación y transmisión de malaria en las Américas: Un desafío para su eliminación*. Trabajo de Ingreso. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. 21 p.

GRILLET, M. E., L. VILLEGAS, J. F. OLETTA, A.; TAMI, AND J. E. CONN
2018. Malaria in Venezuela requires response. *Science*, 359(6375): 528.

GUARIGLIA, V., K. RIZZOLO, Y. RAMOS Y G. ALONSO
2008. Estudio de los determinantes de resistencia y de las propiedades conjugativas de los plásmidos presentes en aislados bacterianos venezolanos. *Memorias del Instituto de Biología Experimental*, 5: 101-104.

HAMILTON, S. AND W. M. LEWIS
1990. Physical characteristics of the fringing floodplains of the Orinoco River, Venezuela. *Interciencia*, 15(6): 491-500.

HAMLETT, W.
1992. *Larval ecology of fish of the Orinoco basin*. Springer-Verlag, New York, pág. v.

HENRY, F., M. CABRERA MALDONADO, N. BADRIE, M. MORAES, M. E. GARCÍA, C. VILLAMAR, B. ÖRMECI Y D. ÁLVAREZ
2019. Género, la mujer y la calidad del agua (444-465). En: *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades.* Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México.

HETIER, J. M. Y R. LÓPEZ-FALCÓN
2003. *Tierras Llaneras de Venezuela. Series Suelo y Clima*. Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT-ULA). Mérida, 549 p.

HIRATA, R.
s/f. Perspectiva de la gobernanza en las aguas subterráneas en áreas urbanas. Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS), Universidade de São Paulo. São Paulo, 15 p.

HUMVENEZUELA
2021. Impacto de la emergencia humanitaria compleja en Venezuela con la pandemia de COVID. Informe de seguimiento sobre los impactos de la emergencia humanitaria compleja en Venezuela con la pandemia de COVID. UE y Oxfam. Caracas, 41 p.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN)

1993. The Convention on Biological Diversity: An explanatory guide (Draft). IUCN Environmental Law Centre, Bonn, Germany, 143 p.

IZURIETA, R., A. CAMPAÑA, J. CALLES, E. ESTÉVEZ Y T. OCHOA

2019. Calidad del agua en Ecuador (284-306). En: *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades.* Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México.

IZURIETA, R. AND T. GARDELLINI

2023. Water and Health. Conferencia presentada en la Second African and First South-South Health Harm Reduction Conference. Marrakesh, Marruecos. September 26-29.

JORGENSEN, S. E. AND R. A. VLLENWEIDER

1988. Remedial techniques (99-114). En *Principles of lake management. 1*.: Jorgensen, S.E.; Vllenweider, R.A. (ed.). Guidelines of Lake Management. International Lake Environment Comitee. United Nations Environment Programme. Shiha:

LACROIX, G.

1992. *Lagos y ríos. Medios vivos. Ecoguías*. Plural de Ediciones. Barcelona, 255 p.

LAGOS, L.

2018. ¿Podemos comer lo que pescamos en Montevideo? Asociación Oceanográfica Uruguaya. En: https://asociacionoceanograficauruguaya.wordpress.com/2018/04/02/ podemos-comer-lo-que-pescamos-en-montevideo. Consulta: 4 de octubre de 2023.

LASSO, C., J. S. USMA, F. TRUJILLO Y A. RIAL (EDS.)

2010. *Biodiversidad de la cuenca del río Orinoco. I. Bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso biológicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, World Wildlife Fund Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Sale de Ciencias Naturales, Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad de Colombia). Bogotá, 609 p.

LASSO, C., A. RIAL, C. L. MATALLANA, W. RAMÍREZ, J. C. SEÑARIS, A. DÍAZ-PULIDO, G. CORZO Y A. MACHADO-ALLISON, A. (EDS.)

2011. *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco. II Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible*. Inst. de Inves. de Rec. Biol. Alexander von Humboldt, Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, WWF Colombia, Fund. Omacha, Fund. La Salle de Cienc. Nat. e Inst. de Est. de la Orinoquia (Univer. Nac. de Colombia). Bogotá, D.C., Colombia. 304 pp.

LEAR, G., J. M. KINGSBURY, S. FRANCHINI, V. GAMBARINI, S. D. M. MADAY, J. A. WALLBANK, L. WEAVER AND O. PANTOS

2021. Plastics and the microbiome: Impacts and solutions. Environmental Microbiome, 16:2. https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w.

LINTON, J.
2010. *What is water? A history of a modern abstraction*. University of Vancouver. British Columbia Press. Vancouver, 352 p.

LÓPEZ-HERNÁNDEZ, I., M. NIÑO, L. GARCÍA, M. SOSA Y F. TOVAR
1986a. Balance de elementos en una sabana inundable (Módulo Experimental de Mantecal, Edo. Apure, Venezuela). I. Entradas y salidas de materiales. *Acta Científica Venezolana*, 37: 174-181.

LÓPEZ-HERNÁNDEZ, I., M. NIÑO, L. GARCÍA, M. SOSA Y F. TOVAR
1986b. Balance de elementos en una sabana inundable (Módulo Experimental de Mantecal, Edo. Apure, Venezuela). II. Balances de entradas y salidas. *Acta Científica Venezolana*, 37: 182-184.

LOVEJOY, T. E.
1981. Prepared statement. En: Tropical deforestation, an overview, the role of international organizations, the role of multinational organizations. Hearing before the Subcommitee of International Organizations of the Commitee of Foreing affairs. House of Representatives, 96th Congress. Washington, D.C.

LOWE-MCCONNELL, R.
1987. *Ecological studies in tropical fish communities*. Cambridge Univ. Press, New York, 382 p.

MACHADO-ALLISON, A.
1990. Ecología de los peces de las áreas inundables de los llanos de Venezuela. *Interciencia,* 15(6): 411-423.

MACHADO-ALLISON, A.
1992. Larval ecology of fish of the Orinoco basin (45-59). Chapter 3. En: *Reproductive biology in South American vertebrates.* Hamlett, W. (ed.). Springer Verlag, New York.

MACHADO-ALLISON, A.
1994a. Los esteros de las zonas inundables de Venezuela. Ictiofauna y conservación. *Tribuna del Investigador*, 1(2): 76-89.

MACHADO-ALLISON, A.
1994b. Factors affecting fish communities in the flooded plains of Venezuela. *Acta Biologica Venezuelica*, 15(2): 59-75.

MACHADO-ALLISON, A.
2012. Notas sobre el problema del derrame de petróleo en el Río Guarapiche, Estado Monagas, Venezuela. *Revista Natura Digital.* http://www.natura-digital.com/ index.

MACHADO-ALLISON, A.
2015. La minería en Guayana, sus efectos ambientales y sobre la salud humana. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, 75(1): 9-30.

MACHADO-ALLISON, A.

2017a. La conservación de ambientes acuáticos: Petróleo y otras actividades mineras en Venezuela. Capítulo 9 (189-211). En: *Ríos en Riesgo en Venezuela. Volumen I. Valor de Patrimonio y eventos transversales.* Rodríguez-Olarte, D. (ed). Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto:

MACHADO-ALLISON, A.

2017b. Mining in Venezuela: Its effects on the environment and human health (347-362). En: *Ecotoxicology in Latin America*. Shinn, C.; Araújo, C.V.M. (eds). Nova Publishers. New York:

MACHADO-ALLISON, A., O. BRULL Y C. MARRERO

1987. Bases para el diseño de medidas de mitigación y control de las cuencas hidrográficas de los ríos Caris y Pao, Edo Anzoátegui. Sección de Fauna Acuática. UCV-Meneven, Informe Final Proyecto Meneven Car-33, 1984-1987. Caracas, 80 p.

MACHADO-ALLISON, A., B. CHERNOFF, F. PROVENZANO, P. WILLINK, A. MARCANO, P. PETRY Y B. SIDKLAUSKAS

2002. Identificación de áreas prioritarias para conservación en la cuenca del Río Caura, Estado Bolívar, Venezuela. *Acta Biologica Venezuelica*, 22(3-4): 37-65.

MACHADO-ALLISON, A., B. CHERNOFF, R. ROYERO-LEÓN, F. MAGO-LECCIA, J. VELÁSQUEZ, C. LASSO, H. LÓPEZ-ROJAS, A. BONILLA-RIVERA Y F. PROVENZANO

2000. Ictiofauna de la cuenca del Río Cuyuní en Venezuela. *Interciencia*, 25(1): 13-21.

MACHADO-ALLISON, A., R. DE LA FUENTE, E I. MIKOLJI

2020. *Los peces de los llanos de Venezuela: Un ensayo sobre su historia natural* (4ª edición aumentada, Digital). Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH-UCV). Caracas, 399 p.

MADRIZ, E., L. ARIAS, R. BELLO Y G. LARA

1990. El sistema de riego del Río Guárico. Diagnóstico socio-económico ambiental. Informe Final CDCH/UCV, Caracas (mimeo).

MAGO-LECCIA, F.

1970. Estudios preliminares sobre la ecología de los peces de los llanos de Venezuela. *Acta Biologica Venezuelica*, 7(1): 71-102.

MAGO-LECCIA, F.

1978. *Los peces de agua dulce de Venezuela.* Cuadernos Lagoven. Caracas, 35 p.

MARGALEF, R.

1983. *Limnología*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, 1010 p.

MARRERO, C.

2011. Humedales de los llanos venezolanos. Trabajo de Ascenso. Universidad Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora. Guanare, 158 p.

MARRERO, C.

2021. *Humedales: la red vital que nos conecta*. Fundación Editorial Unellez. Barinas, Estado Barinas, Venezuela. 210 pp.

MARTÍNEZ, R.
2013. La gestión del agua potable y el saneamiento en el Área Metropolitana de Caracas. Instituto Latinoamericano de Investigaciones Sociales (ILDIS). Oficina en Venezuela de la Fundación Friedrich Ebert. Caracas, 23 pp.

MARTÍNEZ ROMERO, G. Y S. PENICHE CAMPS
2020. Aproximaciones para caracterizar el ciclo hidrosocial del agua urbana desde la economía ecológica. *Impluvium.* Publicación digital de la Red del Agua UNAM. Edición Especial: 95-101.

MASCARIN, I. F.
2015. Parque Urbano em São Carlos. Um experimento plástico. Trabalho de Graduacao Integrado II. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Carlos, 140 p.

MATEO-SAGASTA, J., S. MARJANI ZADETH AND H. TURRAL
2018. More people, more food… worse water? - Water Pollution from Agriculture: a global review. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. Roma, 228 p.

MENDOZA, J.
1999. Variaciones del plancton y de las bacterias en el embalse La Mariposa (Distrito Federal, Venezuela): Período noviembre 1998 – mayo 1999. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Escuela de Biología. Caracas.

MEYER, J. L., M. J. PAUL AND W. K. TAULBEE
2005. Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. *Journal of the North American Benthological Society*, 24: 602-612.

MILANO, S.
2014. La realidad de la minería ilegal en países amazónicos. *Sociedad Peruana de Derechos Ambientales*. Lima: 219-247.

MINISTERIO DEL PODER POPULAR DE ATENCIÓN DE LAS AGUAS – MINAGUAS
2023. Plantas de tratamiento de agua potable y residuales. En: https://minaguas.gob.ve/?page_id=248. Consulta: 25 de septiembre de 2023.

MONTAGNER, C.C., C. VIDAL Y R. D. ACAYABA
*2017. C*ontaminantes emergentes em matrizes aquáticas do brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Quimica Nova,* 40(9): 1094-1010. *http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170091.*

MORA POLANCO, A., L. SÁNCHEZ CALDERÓN, C. MAC-QUAHE ROMERO, F. VISÁEZ SALAZAR Y M. CALZADILLA
2008. Geoquímica de los ríos morichales de los llanos orientales venezolanos. *Interciencia,* 33: 717-724.

MORENO MORALES, J. C.
2015. Evaluación del impacto ambiental generado por lactonas macrocíclicas (ivermectinas) eliminadas en la materia fecal de ganado bovino sobre diferentes familias de escarabajos estercoleros en fincas ganaderas del altiplano

boyacense. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias. Escuela de Posgrados de la Facultad de Ciencias. Programa de Maestría en Ciencias Biológicas. Tunja, 96 p.

NAJUL, M. V. Y H. BLANCO

2014. Estrategias de mejora continua en plantas potabilizadoras venezolanas. *Revista de la Facultad de Ingeniería* UCV, 29(1): 37-50.

NICO, L. G. AND D. C. TAPHORN

1994. Mercury in fish from goldmining regions in the upper Cuyuni river system, Venezuela. *Fresenius Environmental Bulletin*, 3: 287-292.

ONGLEY, E. D.

1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. Serie Estudio FAO: Riego y drenaje, N° 55. Roma, 115 p.

ONU (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS)

2023. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Datos básicos. En: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2023/08/fast-facts. Consulta: 30 de septiembre de 2023.

PACHECO C. E., M. I. AGUADO AND D. MOLLICONE

2014. Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images. *Acta Amazonica*, 44: 185-196.

PASTEN, P., A. VEGA, P. GUERRA, J. PIZARRO Y K. LIZAMA

2019. Calidad del agua en Chile: Avances, desafíos y perspectivas (170-200). En: *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades.* Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México.

PÉREZ ESPEJO, R.

2008. El lado oscuro de la ganadería. Problemas del Desarrollo. *Revista Latinoamericana de Economía*, 39(154): 217-227.

PETTERSEN, R., B. MADSEN, M. WILZBACH, C. MAGADZA, A. PAARLBERG, A. KULLBERG AND K. CUMMINS

1987. Stream management: emerging global similarities. *Ambio*, 16(4): 166-179.

PETTS, G. E.

1990a. Regulation of large rivers: Problems and possibilities for environmentally sound river development in South America. *lnterciencia*, 15(6): 388-395.

PETTS, G. E.

1990b. The role of ecotones in aquatic landscape management (227-261). En: *The role of ecotones in aquatic landscapes*: Naiman, R.J.; Décaamps, H. (eds.). Parthenon Press, London:

PETTS, G. E., H. MOLLER AND L. ROUX

1989a. *Historical change of large alluvial rivers: Western Europe.* Wiley. Chichester, UK, 335 p.

PETTS, G. E., J. G. IMHOF, B. MANNY, J. MAHER AND S. WEISENBERG
1989b. Management of fish population in large rivers. *Canadian Special Publ. Fisheries and Aquatic Sciences*, 106: 429-443.

POWERS, C. F. AND A. ROBERTSON
1966. The aging Great Lakes. *Scientific American*, 215(5): 94-106.

PRINGLE, C. M.
1997. Expanding scientific research programs to address conservation challenges in freshwater ecosystems. En: Pickett, S.T.A.; Ostfield, R.S.; Schachak, M.; Likens, G.E. (eds.). *The ecological basis of conservation: Heterogeneity, ecosystems, and biodiversity.* Chapman and Hall, New York: 305-319.

PRINGLE, C. M., M. C. FREEMAN AND B. J. FREEMAN
2000. Regional effects of hydrological alterations on riverine macrobiota in the New World: tropical-temperate comparison. *BioScience,* 50: 807-823.

PROA (PROGRAMA EJE FLUVIAL ORINOCO-APURE)
1993. Informe general sobre el estudio de factibilidad de ejecución para ampliación de navegabilidad del río Apure. MARNR Caracas, 129 p.

RAMOS, Y. Y G. ALONSO
2011. Evaluación de la resistencia a agentes desinfectantes de bacterias aisladas de ambientes naturales. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 31(2): 130-137.

RED ARA
2013. *La contaminación por mercurio en la Guayana Venezolana: Una propuesta de Diálogo para la acción*. Red Ara. Caracas, 38 p.

RODRÍGUEZ-EUGENIO, N., M. MCLAUGHLIN Y D. PENNOCK
2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. Roma, 130 p.

RODRÍGUEZ-OLARTE, D. (ED.)
2017. *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 1*. Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, 236 p.

RODRÍGUEZ-OLARTE, D. (ED.)
2020. *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 3.* Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, 193 p.

ROLDÁN, G.
2003. *La bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín, 170 p.

ROLDÁN, G. Y J. J. RAMÍREZ
2022. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. 3ª edición. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Bogotá, 782 p.

SALAS, H. AND P. MARTINÓ

1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*, 25(2): 341-350.

SCHWINDT, A. R., D. L. WINKELMAN, K. KETELES, M. MURPHY AND A. M. VAJDA

2014. An environmental oestrogen disrupts fish population dynamics through direct and transgenerational effects on survival and fecundity. *Journal of Applied Ecology*, 51: 582-591. doi: 10.1111/1365-2664.12237.

SENASA (SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD AGRARIA)

2017. Manual de prevención y control de enfermedades parasitarias. Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal del año 2017. Meta 37. Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA). Lima, 45 p.

SHI, J. L. AND D. L. MCCURRY

2020. Transformation of *N*-Methylamine drugs during wastewater ozonation: Formation of nitromethane, an efficient precursor to halonitromethanes. *Environ. Sci. Technol*., 2020, 54, 4, 2182–2191. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04742.

SOS ORINOCO

2021. Deforestación y cambios en la cobertura vegetal y de usos de la tierra dentro del denominado Arco Minero del Orinoco entre 2000-2020. SOS Orinoco. Caracas, 24 p.

STEINFELD, H., P. GERBER, T. WASSENAAR V. CASTEL, M. ROSALES AND C. DE HAAN

2009. La larga sobra del Ganado. Problemas ambientales y opciones. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, 465 p.

SWAFFHAM PRIOR, L. S.

1999. El uso de antibióticos en producción animal y la resistencia antimicrobiana. Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización Mundial de la Salud (OMS). XI Reunión Interamericana de Salud Animal. RIMSA11/10. Washington, D.C., 18 p.

TAYLOR, P. AND R. REEDER

2020. Antibiotic use on crops in low and middle-income coutries based on recommendations made by agricultural advisors. CABI *Agriculture and Bioscience*, 1: 1. https://doi.org/10.1186/s43170-020-00001-y.

THOMAS, M. A., P. P. JOSHI AND R. D. KLAPER

2012. Gene-class analysis of expression pattern induced by psychoactive pharmaceutical exposure in fathead minnow (*Pimephales promelas*) indicates induction of neuronal systems. *Comparative Biochemistry and Physiology* Part C: *Pharmacology*, *Toxicology and Endocrinology*, 155(1): 109-120. doi: 10.1016/j.cbpc. 2011.05. 014.

TOBA, F., A. FALCO, C. A. ARANAGA Y G. ALONSO

2018. Caracterización de bacterias aisladas en un reservorio de agua en Venezuela. Una aproximación a la multirresistencia bacteriana en ambientes naturales. Capítulo 3. En: *La contaminación industrial de aguas. Una mirada microbiológica y molecular*. Editorial USC. Santiago de Chile: 93–117.

TORREGROSA, M. L., M. ARELLANO, Y K. KLOSTER

2019. Agua y sociedad. La Multidimensionalidad de la calidad del agua (22-28). En: *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades.* Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México.

TRUJILLO, F.C., C. LASSO, M. C. DÍAZ-GRANADOS, O. FARINA, L. PÉREZ, A. BARBARINO, M. GONZÁLEZ, Y S. J. USMA

2010. Evaluación de la contaminación por mercurio en peces de interés comercial y de la concentración de organoclorados y organofosforados en el agua y sedimentos de la Orinoquía. En: *Biodiversidad de la cuenca del río Orinoco. I. Bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso biológicos.* Lasso, C.; Usma, S.; Trujillo, F.; Rial, A. (eds.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, World Wildlife Fund Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Sale de Ciencias Naturales, Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad de Colombia). Bogotá: 339-355.

TUNDISI, J. G. Y T. MATSUMURA-TUNDISI,

2008. *Limnologia*. Oficina de Textos. São Carlos, 632 p.

TUNDISI, J. G., C.E.M TUCCI, F. R. SPILKI, I. HESPANHOL, J. A. CIRILO, M. C. BARNSLEY SCHEUENSTUHL Y N. A. PERIOTTO

2015. El agua urbana en Brasil. En: En: Roldán, G.; Torregrosa, M.L.; Vammen, K.; González, E.J.; Campuzano, C.; de la Cruz, A. (eds.). *Desafíos del Agua Urbana en las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias*. Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) – Programa de Aguas, con apoyo de IHP-UNESCO. México: 88-115.

USEPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)

1984. Ambientwaterqualitycriteriafor Mercury-1984. EPA/440/5-84-026. En: http://www.epa.gov/ost/pc/ambientwqc/mercury1984.pdf. Consulta: 29 de septiembre de 2023.

USEPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)

1996. Special report on environmental endocrine disruption. An effects assessment and analysis. EPA/630/R-96/012. Risk Assessment Forum. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., 111 p.

USEPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY)

1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund, vol. 1, Human Health Evaluation Manual,* EPA/540/1-89/002. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.

USGS (U.S. GEOLOGICAL SURVEY)

2017. La Ciencia del Agua para Escuelas. En: https://water. usgs.gov/gotita/waterquality.html. Consulta: 2 de octubre de 2023.

VALDIVIESO, A.

2023. Qué son las aguas subterráneas. En: https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-subterraneas. Consulta: 2 de octubre de 2023.

VAMMEN, K.

2023. Presence of antibiotics in water resources and the developing of bacterial resistance in humans (46-52). En: *Water and health in the Americas.* Izurieta, R.; Vammen, K.; Campos, A.; Hoare, I.; Teram, E. Inter American Network of Academies of Sciences (IANAS), InterAcademy Partnership (IAP). Córdoba:.

VAMMEN, K. Y H. VAUX JR

2019. Una visión general de la calidad del agua en las Américas. En: Roldán, G.; Tundisi, J.G.; Jiménez, B.; Vammen, K.; Vaux, H.; González, E.J.; Doria, D. (eds.). *Calidad del agua en las Américas. Riesgos y oportunidades.* Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México: 12-19.

WETZEL, R. G.

2001. *Limnology. Lake and river ecosystems.* 3rd edition. Academic Press. San Diego, 1006.

WINEMILLER, K. O.

1989a. Patterns in life history among South American fishes in seasonal environments. *Oecologia*, 81: 225-241.

WINEMILLER, K. O.

1989b. Ontogenetic diet shifts and resource partitioning among piscivorous fishes in the Venezuelan llanos. *Environmental Biology of Fishes*, 26: 177-199.

WINEMILLER, K. O.

1990. Spatial and temporal variation in tropical fish trophic networks. *Ecological Monographs*, 60(3): 331-367.

ZAMORA-MUÑOZ, C. Y J. ALBA-TECEDOR

1996. Bioassessment of organic polluted Spanish rivers, using a biotic index and multivariate methods. *Journal of the North American Benthology Society*, 15(3): 332-352.

Ernesto José González Rivas

Licenciado en Biología (UCV-1987). Doctor en Ciencias, mención en Ecología (UCV-1996). Profesor Titular UCV. Docencia en Pregrado y Postgrado en UCV y otras universidades en el área de Ecología Acuática y Limnología. Líneas de investigación: Limnología de embalses, Interacciones fitoplancton-zooplancton, Eutrofización de cuerpos de agua. Jefe del Laboratorio de Limnología, Instituto de Biología Experimental (IBE-UCV). Participación en el dictado de 13 cursos y talleres internacionales sobre Ecología Acuática. Coautor de 3 libros. Autor o coautor de 70 artículos en revistas científicas y capítulos de libros, 18 informes técnicos y 1 artículo en Internet. Presentación de 171 conferencias y ponencias en congresos y encuentros científicos nacionales e internacionales. Miembro de la Comisón de Ambiente y Salud y de la Secretaría Técnica de Cambio Climático de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Punto Focal de Venezuela en el Programa de Aguas de IANAS.

Antonio Machado-Allison

Biólogo UCV y PhD de George Washington University-Smithsonian Institution, Profesor Titular (J) adscrito al Instituto de Zoología y Ecología Tropical y Museo de Biología de la UCV. Sillón III de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (ACFIMAN). Miembro de la Academia de Ciencias de América Latina (ACAL). Investigación en sistemática, evolución, ecología y conservación de la biodiversidad y de los ambientes acuáticos neotropicales. 30 libros, capítulos y más de 100 trabajos científicos en revistas nacionales e internacionales. Miembro del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICIT) y Coordinador del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la UCV. Internacionalmente, Investigador Asociado al Museo Field de Chicago, Museo Americano de Historia Natural (New York) y del Instituto Smithsoniano (Washington D.C.). Actualmente, Menakka and Essel Bailey ’66 Distinguished Visiting Scholar (Research Fellow 2018-2019),(Research Associate 2020-2021) y University Professor (2022-2028) College of the Environment, Wesleyan University.

CAPÍTULO IV

LA VIDA DE LOS PECES EN AGUAS ÁCIDAS CONTINENTALES NEOTROPICALES

1. Introducción

El hombre (*Homo sapiens*) es el único organismo que conocemos, tiene la capacidad de recibir estímulos del entorno, procesarlos y responder para asegurar su reconocimiento o habitabilidad en una determinada región o área. En este proceso, reconoce la importancia particular que tiene la inteligencia para que pueda relacionar e integrar comparativamente información "ganada" o "recordada" de experiencias pasadas o presentes. Así, la "construcción de nuestro hábitat", tiene varios componentes naturales que permiten la acción y reacción innata morfológica/fisiológica/genética, y otros componentes (comportamiento y previsión, por ejemplo) que forman parte de la experiencia adquirida.

A diferencia del hombre, el resto de las especies en la tierra, solo pueden construir su **habitabilidad** (vivir en un ambiente adecuado) en función de su capacidad de producción morfológica o fisiológica (metabólica) innata de procesos que les permitan sobrevivir en un área en particular y con el tiempo obtener modificaciones mediante procesos genéticos que permitan transmitir esos atributos a la progenie futura.

Hoy día dado los cambios ambientales antrópicos producidos, la crisis climática y las amenazas sobre la habitabilidad de los organismos y sobre todo el hombre como especie, se producen discusiones y propuestas sobre la habitabilidad o la capacidad de los organismos para colonizar y sobrevivir en ambientes críticos de la Tierra (o fuera de la Tierra), y la detección y comprensión de los orígenes de los seres vivos, sus procesos y los patrones de formas de vida en otros planetas. Esta tarea no es fácil, porque:

(i) No tenemos gran información científica sobre la vida o habitabilidad de organismos en hábitats críticos en nuestro propio planeta (áreas abisales en océanos, picos o cimas de montañas, adaptaciones en ambientes libres de agua/oxígeno, aguas sulfurosas o ácidas, etc.); y

(ii) La información intergaláctica es tan escasa y gran parte de los datos se utilizaron para crear escenarios de ciencia ficción con una pobre rigurosidad científica.

Por lo tanto, nuestro propósito es revisar y reportar las condiciones de vida observadas incluyendo los procesos, patrones y las "adaptaciones" o "estrategias" resultantes que permiten o permitieron que una rica fauna de peces neotropicales de agua dulce explote ambientes críticos representados por aguas ácidas o "negras". (Goulding, 1980; Goulding et al., 1988; Saint-Paul et al., 2000; Winemiller y Jepsen, 2004) ¿Porqué tantas especies? ¿Qué condiciones o factores influyeron en las comunidades? y finalmente, discutir su fragilidad para apoyar los cambios producidos por las actividades humanas, las amenazas y la conservación y uso sustentable de estos importantes hábitats.

2. El Ambiente

La química del agua proporciona parámetros importantes para cuantificar los ciclos biogeoquímicos y determina las opciones de manejo en sistemas fluviales y humedales. Las poblaciones precolombinas categorizaban los ríos y afluentes amazónicos por el color de su agua, y tanto los habitantes nativos como los coloniales del Amazonas y el Orinoco sabían que el color del agua estaba relacionado con propiedades ecológicas específicas como la riqueza de peces o la fertilidad del suelo (Junk et al., 2011; Sanoja y Vargas, 1974). La primera clasificación científica de los cuerpos de agua amazónicos fue elaborada por Sioli (1967, 1968, 1975) quien utilizó el color del agua, la transparencia, el pH y la conductancia eléctrica para explicar las características limnológicas de los principales afluentes de la cuenca del río Amazonas.

Las "aguas negras" naturales o aguas cristalinas ácidas son hábitat de agua dulce muy comunes en la región neotropical y forman parte importante de los principales drenajes en América del Sur -cuencas del Amazonas, Orinoco y Paraná-Paraguay-. Estas aguas se caracterizan por ser un ambiente hipo osmótico (pobre nutriente bajo en sodio, calcio y otros elementos iónicos), y un ambiente ácido (pH entre 4,0 a 5,5) (Sioli, 1967).

Como hemos indicado anteriormente, los estudios históricos encontraron que la mayoría de las clasificaciones de aguas dulces neotropicales provenían de cualidades ópticas (aguas blancas claras, turbias o negras), que reflejan la influencia combinada de la geoquímica, los suelos y características de la vegetación (Sioli, 1975). Los ríos de aguas negras tienen pocas

concentraciones de sólidos suspendidos y un pH bajo (4,0-5,5). Por lo tanto, estos sistemas pobres en nutrientes representan el otro extremo de un continuo de los sistemas productivos de aguas blancas (turbias) con alto contenido de sólidos suspendidos y aguas neutras (pH 7). La transparencia de las aguas negras (1,3-2,3 m) se ve algo reducida por los altos niveles de ácidos húmicos[1] que tiñen el agua y dan un aspecto de té. Los ríos de aguas negras generalmente se originan en suelos de arena blanca donde ocurre un proceso de podzolización[2]. Sioli (1975) señaló que la ausencia de material suspendido se explica por la falta casi completa de partículas de arcilla en el horizonte superior de las cuencas arenosas.

En América del Sur, los drenajes de aguas negras y aguas blancas pueden estar presentes en la misma región, lo que refleja la distribución irregular de podzoles (Fig.1) (Lewis et al., 1995). En contraste con los ríos de aguas blancas y aguas claras, los ríos de aguas negras suelen soportar muy poca producción primaria y crecimiento de macrófitos, presumiblemente debido a la baja disponibilidad de nutrientes, la mayoría de ellos provienen de origen vegetal degradado (hojas, ramas y troncos) directamente a las aguas o del suelo de los bosques densos rodeados (ver más abajo).

Sin embargo, estos ambientes con poca producción primaria *in situ* aparente pueden, sin embargo, soportar una impresionante riqueza de peces y biomasa. Muchos ríos de aguas negras pobres en nutrientes en América del Sur sustentan una importante biodiversidad y pesquerías, pero la producción basal que sustenta esta producción secundaria y terciaria no es evidente. Las redes de consumo de estos sistemas oligotróficos a menudo se ven aumentadas, en diversos grados, por fuentes alóctonas terrestres (Goulding,

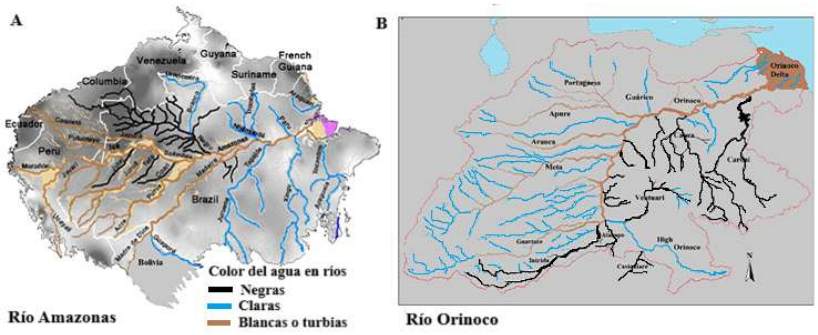


Figura 1. Clasificación de los principales drenajes por tipo de agua en las cuencas de los ríos (**A**) Amazonas y (**B**) Orinoco. (Modificado de Ríos-Villamizar et al., 2014; Machado-Allison y Chernoff, 2020).

1980; Goulding et al., 1988; Lowe-McConnell, 1987; Machado-Allison et al., 2020; Machado-Allison y Chernoff, 2020; Marrero et al., 1997), o el intercambio estacional de especies (Machado-Allison y Chernoff, 2020; Winemiller y Jepsen, 2004).

Un hábitat ácido particular es el "morichal", que es una comunidad arbórea estructurada principalmente por la palmera *Mauritia flexuosa* también conocida como "buritÍ", "canangucho" o "moriche". Esta comunidad crece rodeando depresiones húmedas, áreas pantanosas o manantiales en tierras secas y/o húmedas de América del Sur tropical. El "morichal" es una comunidad arbórea muy apreciada por los asentamientos rurales humanos. Se aprovecha todo el árbol, por lo que tiene un gran valor en las sabanas y selvas tropicales del Amazonas y Guayana. Otra importancia de esta palmera es que puede construir comunidades ribereñas abierta, "cerradas" y "mixtas" siempre asociadas a cuerpos de agua cristalinos y ácidos (Lasso et al., 2015; Marrero et al., 1997).

Los morichales son "oasis" dispersos en las llanuras bajas secas de las principales cuencas fluviales. Sus aguas ácidas (claras o negras) se originan a partir de compuestos orgánicos en descomposición de suelos podzolizados llamados "turberas"[3] o "turbas".

Un gran papel juega estos ecosistemas ya que actúan como refugio para organismos terrestres: aves, ciervos, chigüire o capibara, monos, jaguares, y otros; así como una rica fauna acuática: caimanes, nutrias, serpientes de agua, tortugas y cientos de especies de peces. Pero también ofrece varios otros servicios ambientales, como la captación de CO_2, la retención de agua y otros (ver adelante).

Los "morichales" (Fig. 2) son importantes también para el mantenimiento de las poblaciones indígenas humanas. La cosecha de la fruta de *M. flexuosa* ha sido tradicionalmente solo para consumo local y esta especie de árbol contribuye a la seguridad alimentaria de los seres humanos y la vida silvestre. Sin embargo, sus frutos y semillas tienen gran potencial en la industria farmacológica y estética. Las fibras provenientes de la palma se utilizan para producir artesanías tales como platos y hamacas que tienen un gran potencial en el comercio regional. El tronco y las hojas se utilizan para la construcción de viviendas rurales. Los aborígenes lo llaman el "árbol de la vida", que es la traducción literal de Buriti y la palma forma parte de la mitología de numerosas poblaciones originarias en el Amazonas y Orinoco (Machado-Allison et al., 2020; Ponce et al., 2000; Suarez, 1966; Uldarico et al., 2013).

Figura 2. Morichales en el Escudo de Guayana (A) Bolívar; y (B) Delta del Orinoco (Delta Amacuro). Fotos I. Mikolji.

Un tercer hábitat ácido particular está formado por bancos de plantas de la familia Podostemaceae (Fig. 3) que constituyen un microhábitat especializado con la presencia de muchas especies de peces y otros organismos acuáticos asociados (Chernoff et al., 2003; Flausino Junior, 2008; Machado-Allison y Chernoff, 2020). Se han identificado dos subfamilias (Podostemoideae y Tristichoideae) y al menos seis especies de los géneros *Mourera, Monostilis, Trictichia* y *Wedellina* de estas plantas acuáticas en las regiones de rápidos y cataratas de ríos en América del Sur. La comunidad de peces que explota (protección o alimento) estas áreas es de particular importancia ya que son únicas y se encuentran íntimamente asociadas con estos microhábitats. Asociados a estas áreas (Alto y Bajo Caura) registramos más de 40 especies de peces (Machado-Allison y Chernoff 2020a, b). Todos ellos representan una comunidad extremadamente interesante desde el punto de vista biológico, paisajístico y de diversidad.

3. Origen de los ácidos húmicos

Los suelos en las regiones de bosques en el Neotrópico son ricos en minerales como el aluminio y los óxidos de hierro en asociación con materia orgánica de alta densidad. En las cuencas del Río Negro, Atabapo y Caura, por ejemplo, los podzoles se desarrollan a expensas de las lateritas deprimidas en arcilla a través de localizados frentes espectaculares de meteorización. Este proceso natural conduce a la re-movilización de materia orgánica (MO) previamente acumulada que se redistribuye dentro de los perfiles del suelo y se exporta hacia los ríos, de ahí su coloración negra típica (Fig. 4). La mayoría de las sustancias extraíbles en la capa superficial de hojarasca son ácidos húmicos, típicamente provenientes de material vegetal en descomposición. Los científicos han concluido que una mayor entrada de resto vegetal conduce a una mayor entrada de sustancias húmicas en las aguas subterrá-

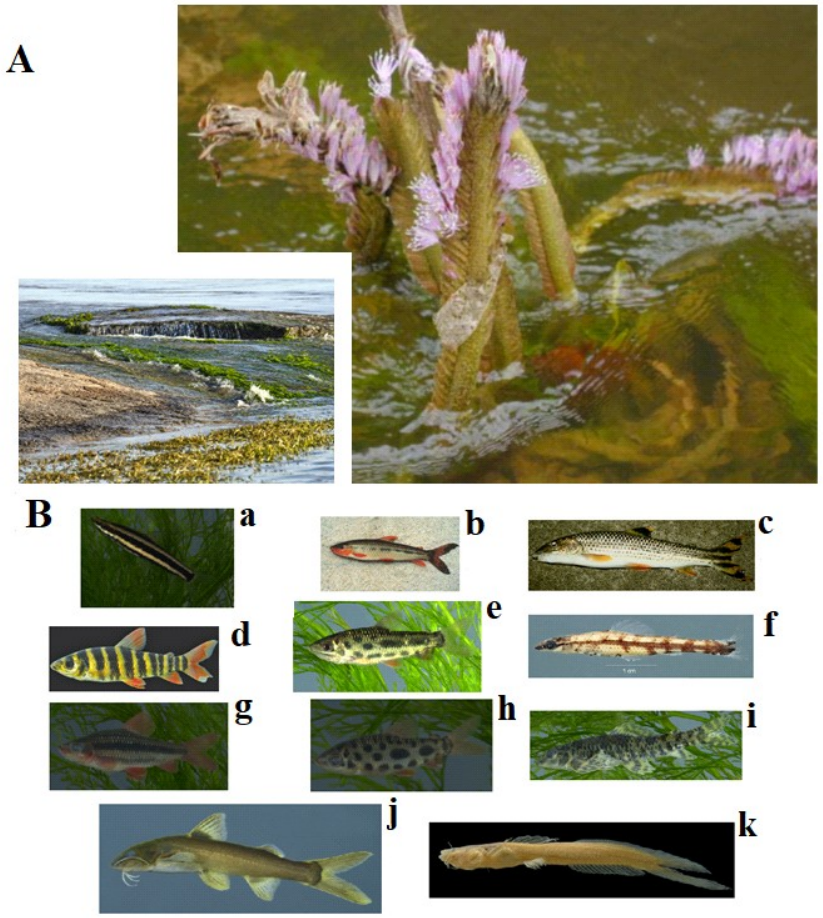


Figura.3. A. Rápidos rocosos cubiertos por plantas de la familia Podostemaceae en el río Caura. **B**. Peces asociados a este microhábitat: a. *Anostomus anostomus*; b. *Leporinus brunneus*; c. *Leporellus vittatus*; d. *Leporinus fasciatus*; e. *Leporinus granti*; f. *Ammocryptocharax elegans*; g. *Leporinus tepui*; h. *Leporinus maculatus*; i. *Characidium* cf. *declivirostri*; j. *Cetopsorhamdia orinoco*; k. *Gladioglannis machadoi.* Fotos I. Mikolji y B. Chernoff.

neas. La investigación mostró que una gran variedad de horizonte orgánico del suelo (fuente, edad y fuente de agua) produce una variedad química de aguas ácidas y la identificación de compuestos específicos abre una nueva perspectiva para rastrear un "origen podzólico" de MO en las redes de drenaje (Allard et al., 2011; Bardy et al., 2011).

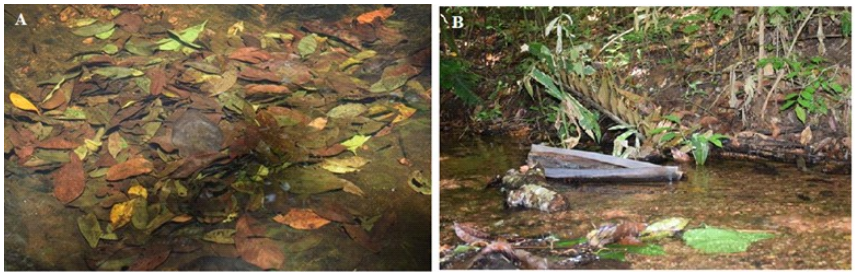


Figura 4. Material vegetal en descomposición (MO) en el suelo del bosque (**A**) y en los lechos de los ríos (**B**) fuentes de ácidos húmicos.

4. El papel del bosque inundable (varzea) y los morichales en la producción y mantenimiento de los ríos de aguas negras

El bosque inundable y los morichales (buritales) son ecosistemas de las llanuras aluviales de la cuenca del Amazonas y el Orinoco. Estas áreas están sujetas a fuertes cambios (lluvia y sequía); Durante la mayor parte del año permanecen bajo el agua y en las estaciones secas quedan expuestas inmensas playas y grandes áreas de tierra firme. Estas condiciones climáticas dinámicas y anuales generan un complejo mosaico de ambientes. Algunos investigadores consideran que tales ecosistemas son humedales fluviales o macrosistemas dinámicos en los que el agua, los nutrientes, los sedimentos y los organismos no son estáticos, sino móviles (Allard et al., 2011; Goulding, 1980; Goulding et al., 1988).

Los humedales fluviales son retardantes de la escorrentía, ya que los elementos llegan a ellos desde los tramos superiores del río y se transforman y vuelven a su curso cuando comienza la inundación. Así, varios autores consideraron que las "varzeas" o bosques inundados, de galería y morichales son las fuentes primarias de materia orgánica para preservar estas aguas y sustentar la vida en ellas (Figura 5 y 6). (Allard et al., 2011; Amazonia de Colombia, 2008; Goulding et al.,1988; Machado-Allison y Chernoff, 2020; Machado-Allison et al., 2018; 2020; Marrero et al., 1997).

¿Son las aguas negras ambientes aislados?

Esta es una excelente pregunta que tiene un profundo significado en los vínculos bioecológicos en América del Sur. A diferencia de los ambientes terrestres que han sido clasificados o definidos discretamente con fronteras casi completamente definidas, los ambientes acuáticos en llanuras o regiones tropicales bajas tienen una condición especial debido a sus límites dinámicos dados los pulsos anuales del río (sequía / inundación). Los bosques y

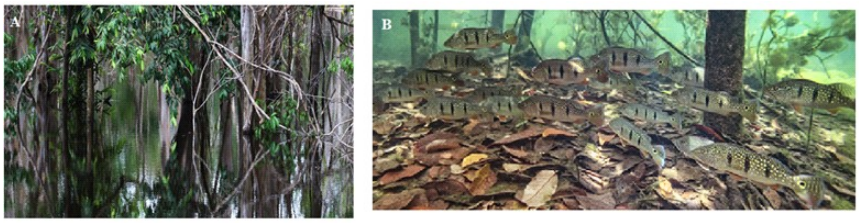


Figura 5. **A**) Varzea o bosque inundado en la región de Guyana; **B**) cardumen de peces (*Cichla orinocensis*) nadando sobre el suelo del bosque inundado, cuenca del Orinoco, Venezuela. Foto I. Mikolji.

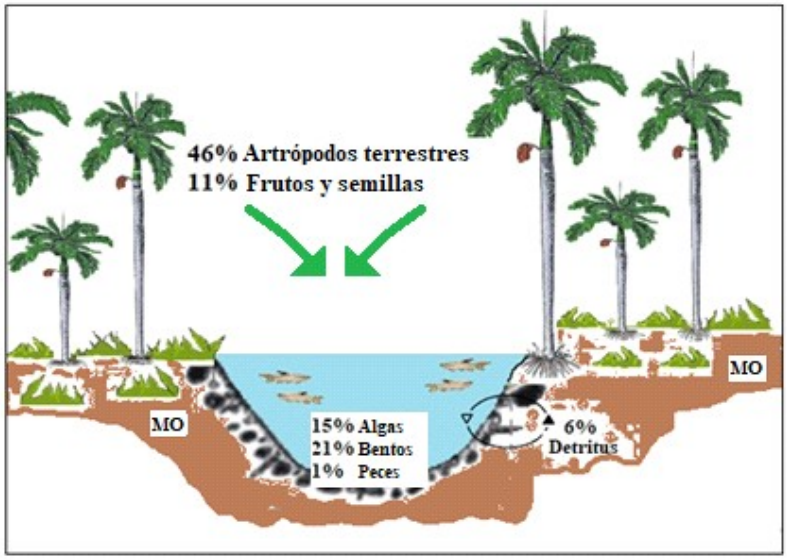


Figura 6. Dibujo esquemático de un morichal que muestra porcentajes de la fuente de alimento para los organismos acuáticos y la materia orgánica (MO). Modificado de Marrero et al., 1997; Machado-Allison et al., 2020.

sabanas considerados ambientes terrestres firmes son cubiertos periódicamente por agua al menos seis meses al año, proceso que ha promovido adaptaciones a organismos terrestres y acuáticos. Estos ciclos de periodos estacionales dinámicos ofrecen nuevas áreas (fronteras móviles) utilizadas como refugio y/o nutrición de las diferentes fases del desarrollo de las especies (Machado-Allison y Chernoff, 2020; Machado-Allison et al., 2020; Saint-Paul et al., 2000).

Los peces son posiblemente los organismos acuáticos más conspicuos y favorecidos, ya que pueden penetrar en estas nuevas áreas ricas en la ofer-

ta de material orgánico nutritivo y útil. Este intercambio permanente transporta ampliamente las áreas neotropicales como los mayores humedales conocidos. En las llanuras aluviales amazónicas y del Orinoco, el ciclo de inundación del río se está convirtiendo en el factor estacional dominante, y se encuentra que las comunidades de peces fluctúan mucho durante el año. Como ejemplo, durante la inundación:

(i) los peces migran a los bosques de llanuras aluviales y sabanas inundadas para alimentarse de frutas y semillas;

(ii) las larvas y los juveniles logran un crecimiento y desarrollo completo;

(iii) algunos adultos penetran para reproducirse; y

(iv) los peces que ingresan a las áreas de aguas negras deben tener la capacidad de tolerar aguas hipo osmóticas y ácidas (Goulding, 1980; Goulding et al., 1988; Lowe-McConnell, 1975, 1987; Machado-Allison et al., 2020; Saint-Paul et al., 2000).

Especies de aguas blancas o claras como *Mylossoma* spp. (palometas), *Colosoma macropomum* (Cachamas), *Piaractus orinoquesnsis* (morocoto), *Cichla* spp. (pavones), *Pygocentrus* spp. (caribes o pirañas), *Semaprochilodus* spp. (coporos y sapoaras) y numerosas especies de bagres, pequeños carácidos (tetras) y cíclidos, generalmente penetran en ambientes de aguas negras durante las inundaciones periódicas para comer, protegerse y reproducirse o participar activamente en las redes alimentarias (Goulding 1980; Goulding et al*.,* 1988; Machado-Allison et al., 2020; Saint-Paul et al*.,* 2000; Winemiller y Jepsen, 2004).

5. ¿Son las aguas negras o claras ácidas ambientes "pobres" o "altamente especializadas"?

En general, los ambientes acuáticos de aguas negras y ácidos han sido considerados "pobres" (hábitats inhabitables, altamente especializados o hábitats críticos). Esta evaluación se basó posiblemente en la influencia de estudios limnológicos (basados en nutrientes disueltos) y/o biomasa animal (pesquerías) producidos. Sin embargo, desde el punto de vista de la diversidad acuática como valor de riqueza, se han desarrollado muy pocos estudios para determinar con precisión su valor comparativo considerando: a) capacidad de carga; b) heterogeneidad y entornos disponibles; c) área cubierta, y/o cualquier otro factor que pueda influir en el número de especies capaces de habitar estas áreas. Trabajos recientes muestran que los ambientes hipo osmóticos y ácidos tienen una riqueza comparativa cuando se contrastan

con ambientes neutros o de aguas blancas del mismo tamaño y estructura (Tabla 1).

Tabla 1. Especies por grupos de aguas negras, blancas y compartidas en áreas cercanas de igual tamaño y estructura (modificado de Saint-Paul et al., 2000).

Familia	Negras o Ácidas	Blancas	Compartidas
Potamotrygonidae	2	1	1
Clupeidae	4	2	2
Engraulidae	1	4	1
Ageneiosidae	7	5	4
Auchenipteridae	7	5	4
Callichthyidae	2	1	1
Cetopsidae	3	2	1
Doradidae	16	7	4
Hypophthalmidae	3	3	3
Loricariidae	9	18	3
Pimelodidae	13	12	10
Electrophoridae	1	1	1
Rhamphichthyidae	1	1	0
Sternopygidae	3	1	1
Anostomidae	10	8	3
Characidae	17	15	9
Chilodontidae	1	0	0
Ctenoluciidae	3	0	0
Curimatidae	12	10	6
Cynodontidae	4	3	3
Erythrinidae	2	3	1
Hemiodontidae	12	7	7
Prochilodontidae	2	3	2
Serrasalmidae	18	14	8
Cichlidae	19	19	10
Sciaenidae	4	2	2
Total	**175**	**146**	**88**

Por otro lado, cuando la comparación se basa en grupos de especies (por ejemplo, familias), los datos mostraron que hay numerosas familias que comparten especies en ambos ambientes o que las especies se intercambian permanentemente durante períodos de alta conexión (por ejemplo, Chilodontidae y Ctenolucidae en aguas negras y Loricariidae en aguas blancas). La Tabla 1 muestra algunos de estos resultados.

6. Condiciones adaptativas (morfológicas y fisiológicas) en peces que viven en ambientes hipo osmóticos y ácidos

¿Cómo pueden los peces soportar o adaptarse a aguas ácidas permanentes?

En la mayoría de los hábitats neotropicales de agua dulce, el pH es cercano a 6,5 a 7, con pequeñas variabilidades estacionales durante los periodos de lluvia y sequía. Sin embargo, en aguas ácidas de morichales o "negras" como los ríos Caura y Caroní (pH 4,0-5,5) los principales efectos de su exposición al medio ácido promoverían la inhibición del transporte de iones a través de las branquias y la asfixia de los peces debido al pobre intercambio de Oxígeno y Dióxido de Carbono.

Investigaciones sobre los procesos que actúan, han identificado hasta ahora, dos estrategias para que los peces defiendan la homeostasis o equilibrio iónico en un entorno ácido:

(i) El funcionamiento de un mecanismo de captación activa de sodio ($Na^{+)}$ de alta capacidad y afinidad que es en gran medida insensible al desafío ácido, como el visto en el "neón tetra" (*Paracheirodon innesi*), el "cardenal tetra" (*Paracheirodon axelrodi*) y el "tetra de falda negra" (*Gymnocorhymbus ternetzi*) (González y Preest, 1999; González y Wilson, 2001; González y otros, 1997); o,

(ii) Una insensibilidad del flujo de sodio (Na^+) a la exposición ácida como es observada en especies como: "rayas" (*Potamotrygon* spp.) (Wood et al., 2002) y varias especies de peces óseos incluyendo el "pez ángel" (*Pterophyllum scalare*) (González y Wilson, 2001) y carácidos del género *Hemigrammus* (González et al., 2002).

Además, la química del agua también puede contribuir a medir la tolerancia a los ácidos en algunas especies de peces. Por ejemplo, en las "rayas" *Potamotrygon* spp. (Wood et al., 2003) y en el "cara e caballo" *Geophagus* sp. (González et al., 2002), el flujo de salida de iones como el sodio (Na^+) fue significativamente mayor cuando se midió en experimentos con agua acidificada.

Estos resultados revelan una compleja red de respuestas reguladoras que acompañarían a la exposición ácida, (González y Wilson, 2001; González et al., 2002; Kwong et al., 2014; Marshall, 2002). tales como:

(i) Modulación de la expresión génica;
(ii) Regulación del movimiento trans y para celular de iones;
(iii) Control hormonal;
(iv) Remodelación y morfogénesis intracelular desarrollo de células es pecializadas;
(v) Cambios en la permeabilidad de la membrana epitelial; y
(vi) proliferación celular excretora.

Estas respuestas finalmente permiten que estos peces mantengan el equilibrio (balance) de sodio e hidrógeno (Na^+/H^+), la entrada de oxígeno (O_2) y salida del dióxido de carbono (CO_2) durante su adaptación a un ambiente ácido. La Figura 7, muestra un esquema del epitelio branquial mostrando la complejidad de intercambios iónicos para garantizar ese balance y permitir el intercambio de gases en la respiración de los peces.

Esta información puede ayudar a ampliar nuestra comprensión de la base evolutiva de la adaptación fisiológica a ambientes ácidos. En última instancia, esperamos que surjan nuevos modelos que se integren a través de múltiples sistemas que interactúan para ayudar a explicar cómo se logra el equilibrio iónico y ácido-base en peces que habitan en aguas ácidas.

Finalmente, hay un campo inexplorado sobre los mecanismos que mantienen la homeostasis en los peces. El trabajo integrado para nuestras especies en ambientes ácidos aún no se ha hecho. Las nuevas herramientas moleculares podrían ayudar a dilucidar las contribuciones de los procesos de transporte de muchas membranas a la regulación del equilibrio ácido-base, al transporte iónico y a la excreción de metabolitos asociados con estos procesos. Sin embargo, hay algunos desafíos. En términos de fisiología y anatomía celular excretora, necesitamos integrar diferentes disciplinas para obtener una imagen clara de cómo funcionan las branquias y cómo funcionan los procesos mencionados antes de determinar el bienestar, o la habitabilidad de los peces en aguas ácidas.

7. ¿Porqué hay tantas especies en ríos de aguas negras y ácidas?

En los últimos 50 años, grupos de científicos de una amplia variedad de campos dirigen la atención para explicar por qué la región neotropical tiene tantas especies. Así, se han planteado varias hipótesis para explicar la ex-

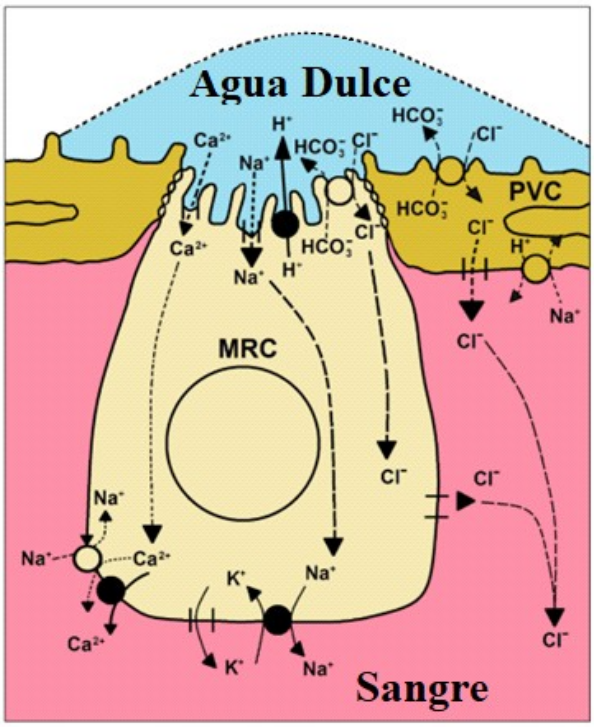


Figura 7. Esquema simplificado del complejo intercambio de iones (balance Agua dulce-ácida-Sangre). Las líneas continuas indican transportes activos; Las líneas punteadas indican difusión o intercambio a través de canales de membrana o a través de la célula. Las bombas (transporte activo) están representadas por círculos sólidos negros; el antipuerto[4] por círculos abiertos y los canales iónicos por líneas paralelas. MRC. Célula del epitelio branquial. PVC Células de revestimiento. Modificado y adaptado de Marshall 2002.

traordinaria riqueza y biomasa en estas aguas (Tabla 3). Están de acuerdo en que la complejidad de la fauna en las regiones tropicales ha sido una respuesta a una manifestación continua de una serie de factores, como el tiempo o la edad geológica, la heterogeneidad espacial, la estabilidad o previsibilidad del clima, la competencia y la depredación (Endler, 1982; Haffer, 1969; Hoorn, 1994; Huber y Renno, 2006; Lowe-McConnell, 1968, 1975, 1987; Lundberg, 1998; Lundberg et al., 1998; Nores, 1999; Pianka, 1978; Prance, 1973; Roberts, 1973; Vanzolini, 1973; Whitemore y Prance, 1987) entre muchos otros. En este capítulo discutiremos algunas de las hipótesis para explicar la riqueza en hábitats acuáticos en especial aquellos con aguas ácidas.

Tabla 2. Resumen de la hipótesis biogeográfica y de riqueza de especies propuesta en ambientes acuáticos neotropicales.

1. Tiempo o edad geológica. Esta hipótesis asume que la diversidad aumenta con la edad de una comunidad y se describe como un registro de acumulaciones de especies a través del tiempo geológico, editado por extinciones (Lowe-McConnell, 1975; Lundberg, 1998; Lundberg et al., 1998; Pianka, 1978).

1.1. Hipótesis paleológica. Los cambios geológicos resultantes de la dinámica de los frentes montañosos durante el Terciario (Hoorn e*t al*., 1995; Patton y otros, 1994; Patton y Da Silva, 1998; Räsänen et al., 1990, 1992).

1.2. Hipótesis del río. Fragmentación de la biota terrestre y unión de la biota acuática después del establecimiento final de drenajes amazónicos, Orinoco y Paraná durante el Terciario Tardío (Bates et al., 1998; Hall y Harvey, 2002; Patton et al., 1994; Wallace, 1852).

1.3. Hipótesis perturbación-vicariante. El enfriamiento climático (glaciación) resultó en un hábitat ecológicamente inadecuado: (extinción de grupo) (Colinvaux, 1987, 1993; Colinvaux et al., 1996).

1.4. Hipó tesis de refugios forestales. Las fluctuaciones climatológicas del Pleistoceno condujeron a fragmentaciones alternativas (aislamiento) del ecosistema forestal (Haffer, 1969, 1997; Prance, 1982; Whitemore y Prance, 1987).

1.5. Hipótesis del refugio fluvial. Los refugios mejoraron la diferenciación alopátrica y el aislamiento de «protoespecies» entre ríos (Ayres y Clutton-Brock, 1992; Haffer, 1997).

1.6. Hipótesis del museo. Especies originadas por diferenciación alopátrica en bosques estables de montaña durante la introgresión marina (Glaciación), posteriormente acumuladas por dispersión en las tierras bajas; así que estos rìos de zonas bajas actúan como "museos" o "sumideros": (Fjeldsa, 1994; Roy et al.,1997; Nores, 1999).

7.1. Tiempo o edad geológica

Esta hipótesis asume que la diversidad aumenta con la edad de una comunidad y se describe como un registro de acumulaciones de especies a través del tiempo geológico, editado por extinciones (Lowe-McConnell, 1975;

Tabla 2. Resumen de la hipótesis biogeográfica y de riqueza de especies propuesta en ambientes acuáticos neotropicales. (Cont.).

2. Heterogeneidad espacial y disponibilidad de nicho. La "construcción" o "disponibilidad" de nuevos nichos (aguas negras, morichales, etc.) y la gran heterogeneidad espacial observada en numerosos cuerpos acuáticos tropicales de América y África son, sin duda, dos factores que aumentan la riqueza de los ecosistemas (Lowe-McConnell, 1975; Machado-Allison 2005; Machado-Allison et al., 2020; Mago-Leccia, 1970, 1978; Roberts, 1973; Bienvenido, 1979).
3. Estabilidad climática y previsibilidad. La comparación de las condiciones climáticas en áreas templadas o altitudes altas en áreas tropicales versus el clima en áreas tropicales bajas, como un factor que afecta la diversidad biótica, se ha discutido a fondo (Regier y Cowell, 1972; Van Dobben y Lowe-McConnell, 1975; Woodwell y Smith, 1969).
4. Competencia y depredación. La gran diversidad y complejidad faunística de las regiones tropicales promueve la competencia. En muchos casos, las fluctuaciones anuales que ocurren en los ecosistemas acuáticos -inundación/llanura, por ejemplo- dan como resultado una alta concentración de peces durante la estación seca. (Lowe-McConnell, 1987; Machado-Allison, 2005, Machado-Allison et al., 2020).
5. Hipótesis del gradiente de altitud. El fuerte gradiente ambiental influye en la riqueza de la biota (Endler, 1977, 1982).
6. Otras interacciones entre organismos o poblaciones. Interacciones como el parasitismo, la proto-cooperación, el mutualismo también se ha propuesto como factores que podrían haber influido en el aumento de la diversidad en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Goulding, 1980; Machado-Allison, 2005; Machado-Allison et al.,2020; Pianka, 1978).

Lundberg, 1998; Lundberg et al., 1998; Pianka, 1978). Muchos de los ecosistemas tropicales de África y América tienen una historia común que se remonta a la iniciación del supercontinente Gondwana, su separación en el Cretácico (65-70 millones de años) y las condiciones geológicas y climáticas pasadas y presentes. Sin embargo, durante finales del Terciario y el Cuaternario se han formado numerosos ambientes acuáticos nuevos que han dado lugar a un notable aumento de hábitats, permitiendo el desarrollo y evolución de numerosas comunidades. Así, por ejemplo, Colombia y Venezuela, al norte de América del Sur poseen una estructura hidrológica com-

pleja con ecosistemas acuáticos de aguas negras, claras y blanco-turbios asociados con el Escudo Guayanés (aprox. 600 millones de años) con una historia antigua, mezclada con ríos más recientes causados por a) levantamiento de los Andes; b) la eliminación del mar interior; y c) la formación de los Llanos (40MY-reciente), (Fig. 8).

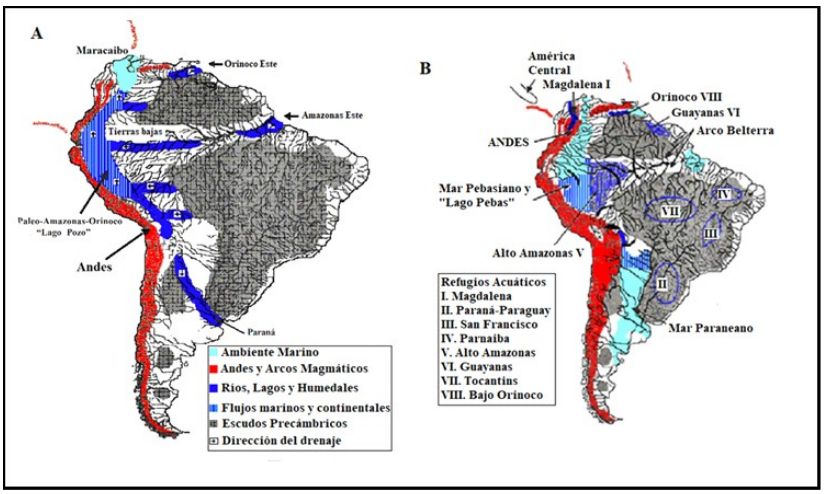


Figura. 8. Origen y estructura fluvial en América del Sur. **A**. Eventos importantes durante el Terciario (43-10 MY). **B**. Eventos más recientes, Terciario tardío y Pleistoceno (11-10 MY), con refugios de agua dulce propuestos. Tomado y modificado de Huber & Renno 2006; Lundberg et al., 1998; Machado-Allison 2000; Machado-Allison et al., 2020).

En un simple ejercicio geográfico, superponemos la distribución actual de ríos de aguas negras y áreas morichales de mayor densidad (ríos ácidos) en la cuenca del Orinoco en Colombia y Venezuela. La figura 9 muestra que los ríos de aguas negras están asociados principalmente con la antigua formación del Escudo Guayanés, mientras que la mayoría de los morichales están asociados con tierras bajas, sabanas o llanuras aluviales formadas más recientemente. Con base en esa hipótesis, esperamos que los ríos nacidos en Guayana sean más ricos (más viejos) que los morichales y / o ríos blancos (turbios) de tamaños comparables, Tabla 4.

Los datos disponibles (Fig. 10), mostraron que la variación en el número de especies entre ríos no muestra una tendencia clara que nos permita apoyar la hipótesis anterior. Hay algunos ríos morichales, de agua clara y aguas turbias que por edad (más recientemente formados) son más ricos que, un río de aguas negras (viejo) del mismo tamaño. Además, los datos mostraron

Tabla 4. Riqueza comparativa de especies de peces en ríos de la Cuenca del Orinoco.

Ríos	Tamaño (Km)	Especies (n)	Fuente
Agua negras			
Atabapo	131	238	Royero, et al., 1992; Lasso et al., 2009.
Caroni/Paragua	952	257	Lasso et al., 2004; Lasso et al., 2008.
Caura	723	153 (470)	Machado & Chernoff 2020, 2025.
Cuyuní	560	125	Lasso et al., 2009; Machado-Allison et al. 2000.
Inírida	1300	280	Lasso et al., 2009
Ventuari	520	152 (245)	Lasso et al., 2006.
Morichales y aguas claras ácidas			
Morichal Largo	200	180	Antonio y Lasso, 2001.
Aguaro-Guariq.*		330	Machado-Allison et al., 2018. Taphorn et al., 2005.
Morichales (total)		394	Machado-Allison et al., 2013.
Cinaruco	480	238	Lasso et al., 2004.
Capanaparo	650	178	Lasso et al., 2004.
Ríos Blancos (Turbios) Aguas neutras			
Apure	820	390	Lasso et al., 2004.
Arauca	1050	191	Lasso et al., 2004.
Meta	804	378	Lasso et al., 2004.
Guaviare	1500	224	Lasso et al., 2009.
Orinoco (total)	2150	+1.200	Lasso et al., 2004; Machado-Allison et al., 2010.

*Varios pequeños morichales ocupando un área cercana a los 60.000 Km^2

que no hay una tendencia clara (coincidencia) de que la riqueza se deba al tamaño.

Entonces, para explicar la riqueza en un río en particular hay que agregar otros procesos históricos relacionados, tales como: A) la *Hipótesis del Río* que estableció que la diversidad aumenta por la fragmentación de la biota terrestre y la unión de la biota acuática después del establecimiento

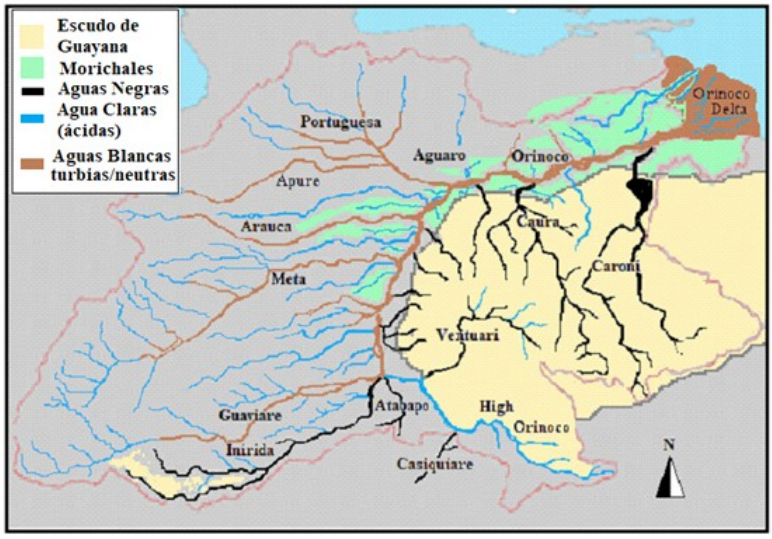


Figura 9. Distribución de los principales ríos claros, turbios, negros y morichales en la cuenca del Orinoco. Modificado de Machado-Allison y Chernoff, 2020.

final de los drenajes amazónicos, Orinoco y Paraná durante el Terciario Tardío como se muestra en la Figura 8 A y B) (Bates et al., 1998; Hall y Harvey, 2002; Patton *et al*., 1994); o B) *Hipótesis de refugios forestales y fluviales*. Así, las fluctuaciones climatológicas del Pleistoceno (por ejemplo) condujeron a fragmentaciones alternativas (aislamiento) del ecosistema forestal y sus hábitats acuáticos asociados (Fig. 8B). Los refugios mejoraron la diferenciación alopátrica y el aislamiento de "proto-especies" o "especies incipientes" entre ríos (Ayres y Clutton-Brock, 1992; Haffer, 1969, 1997; Prance, 1982; Whitemore y Prance, 1987).

Entonces, para explicar la riqueza en un río en particular hay que agregar otros procesos históricos relacionados, tales como: A) la *Hipótesis del Río* que estableció que la diversidad aumenta por la fragmentación de la biota terrestre y la unión de la biota acuática después del establecimiento final de los drenajes amazónicos, Orinoco y Paraná durante el Terciario Tardío como se muestra en la Figura 8 A y B) (Bates et al., 1998; Hall y Harvey, 2002; Patton *et al*., 1994); o B) *Hipótesis de refugios forestales y fluviales*. Así, las fluctuaciones climatológicas del Pleistoceno (por ejemplo) condujeron a fragmentaciones alternativas (aislamiento) del ecosistema forestal y sus hábitats acuáticos asociados (Fig. 8B). Los refugios mejoraron la diferenciación alopátrica y el aislamiento de "proto-especies"o "espe-

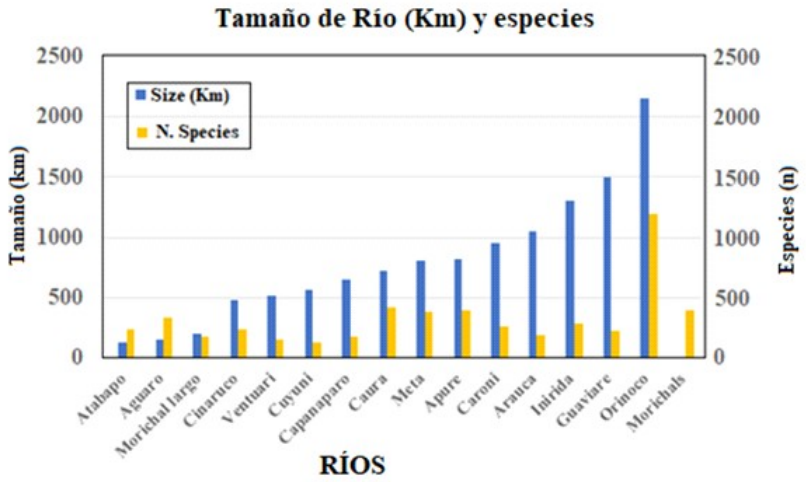


Figura 10. Distribución de los ríos por tamaño y número de especies (datos de la Tabla 4).

cies incipientes" entre ríos (Ayres y Clutton-Brock, 1992; Haffer, 1969, 1997; Prance, 1982; Whitemore y Prance, 1987).

Existen otros escenarios o proposiciones para explicar la riqueza (habitabilidad) en algunas aguas ácidas. Una de ellas es la *Hipótesis del Museo* que propuso que las especies se originaron por diferenciación alopátrica en bosques estables de montaña durante la introgresión marina[1] (refugios acuáticos), posteriormente acumulada por dispersión en las tierras bajas; por lo tanto, estos hábitats de tierras bajas actúan como "museos" o "sumideros" (es decir, colección de especies) (Fjeldsa, 1994; Huber y Renno, 2006; Nores, 1999; Roy et al., 1997). La nueva dinámica del agua (edad) en las tierras bajas atraería a especies de diferentes orígenes. Por lo tanto, estos nuevos hábitats adecuados formados durante el Pleistoceno promueven la atracción (colonización) por especies provenientes de los Andes y el escudo guayanés. Los datos mostraron cierta tendencia de riqueza similar cuando se comparan ríos del mismo tamaño en tierras bajas y altas. (por ejemplo, Atabapo, Cinaruco y Capanaparo *vs* Caura, Ventuari y Caroni). Aunque, la riqueza comparable de ríos ácidos *vs* turbios, podría deberse a los mismos procesos, o esta riqueza podría explicarse por un gran número de especies que no son habitantes permanentes de esos ríos que tienen un intercambio de especies debido a cambios locales estacionalmente climático-hidrológicos como los bosques y sabanas inundables.

7.2. Heterogeneidad espacial y disponibilidad de nichos en aguas negras o aguas ácidas en tierras bajas.

La disponibilidad de nuevos nichos y la gran heterogeneidad espacial observada en numerosos cuerpos acuáticos tropicales de tierras bajas en América y África son, sin duda, dos factores que aumentan la riqueza de los ecosistemas (Lowe-McConnell, 1975, 1987; Machado-Allison et al., 2020; Mago-Leccia, 1970, 1978; Roberts, 1973; Bienvenido, 1979). Factores como la disponibilidad de recursos alimentarios, que en áreas templadas o más altas pueden estar limitados estacionalmente, no parecen ser un factor limitante en las tierras bajas tropicales debido a:

(i) la disponibilidad casi continua de alimentos en diferentes cuerpos de agua temporales y permanentes;

(ii) la gran mayoría de las especies incorpora una gran variedad de tiposde alimento de origen vegetal y animal. Además, esto se manifiesta con cambios en la dieta según la cantidad y calidad del alimento disponible, cambios con el crecimiento, o cambios en el hábitat, como en el caso de los peces que sólo cumplen parte de su desarrollo en las sabanas inundadas de los ríos en las llanuras bajas (por ejemplo, el "curito" *Hoplosternum littorale*, los "caribes" o "pirañas" *Serrasalmus* spp. y *Pristobrycon* spp. las "cachamas" *Colossoma macropomum y* las "palometas" *Mylossoma albiscopum*, los "coporos" (*Prochilodus* y *Psemaprochilodus* spp. Así como numerosas especies de carácidos, cíclidos y bagres (Machado-Allison y García, 1996; Machado-Allison et al., 2020; Mago-Leccia, 1978; Winemiller, 1989).

(iii) el uso de recursos estacionalmente en diferentes momentos durante el día, o en diferentes lugares dentro del mismo hábitat (Characiformes *vs* Siluriformes) (Mago-Leccia 1970); y

(iv) la gran cantidad de material nutriente de otros ecosistemas adyacentes (bosques de galería, sabanas inundadas y morichales (Figs. 5 y 6) que es una parte importante del material orgánico alóctono suministrado a estos cuerpos de agua y aumenta tanto la disponibilidad de nuevos recursos alimenticios como la posibilidad de desarrollar especializaciones en los grupos de peces que los explotan (Goulding, 1980; Lowe-McConnell, 1975, 1987; Machado y Royero, 1986; Machado-Allison et al., 2010, 2020; Marrero et al., 1997).

Un claro ejemplo de este último aspecto es la gran cantidad de especies de peces que utilizan "ictiocoría" (consumo de frutos y semillas) como me-

dio de supervivencia durante el período de inundación de los bosques y que generalmente se coordina con la floración y fructificación de plantas ribereñas incluyendo los morichales (Gottsberger, 1978; Goulding, 1980; KnabVispo et al., otros, 2003; Lowe-McConnell, 1987; Machado-Allison, 1982a,b, 2005; Machado-Allison et al., 2020; Machado-Allison y Chernoff, 2020). Ademas, Castro-Lima (2010) nos da información detallada sobre la dispersión y depredación de semillas por peces en las aguas blancas, claras y negras del Orinoco. Sus resultados indican que se registraron 99 especies de plantas dispersadas por peces y otras 49 son consumidas pero las semillas fueron destruidas. Mientras que Goulding (1980), discute el valor co-evolutivo de estas relaciones planta-animal y la posibilidad de influir en los procesos de dispersión y especiación en ambos grupos.

7.3. Estabilidad y predictibilidad climática

La comparación de las condiciones climáticas en áreas templadas o altitudes altas en áreas tropicales *versus* situaciones en áreas tropicales bajas, como un factor que afecta la diversidad biótica, se ha discutido a fondo (ver simposios editados por Woodwell y Smith, 1969 y Regier y Cowell, 1972; Van Dobben y Lowe-McConnell, 1975), llegándose a generalizar que las regiones tropicales son más estables y por lo tanto han permitido una mayor oportunidad para el éxito de los diferentes procesos de especiación. Sin embargo, como se señaló, las regiones tropicales también han sufrido enormes cambios geológicos y climáticos, principalmente desde el Cretácico: separación del supercontinente Gondwana, levantamiento de los Andes, origen de la cuenca del río Orinoco, formación de las llanuras y los períodos glaciales e interglaciales que resultaron en tiempos secos, introgresiones y regresiones marinas y períodos lluviosos más largos que pudieran haber afectado la diversidad en esas épocas. Slobodkin y Sanders (1969) han incorporado en esta discusión la importancia de la "predictibilidad" o "previsibilidad" del medio ambiente como uno de los elementos actuantes que afectan a la diversidad. Estos autores establecen que los ambientes en latitudes y tierras bajas son más probables, en comparación con los presentes en latitudes y tierras altas, y concluyen que la riqueza relativa de especies en ambientes altamente predecibles es la manifestación continua de una serie de procesos que aumentan la probabilidad de especiación e inmigración, y disminuyen la posibilidad de extinción y emigración. Estos procesos, junto con las consecuencias de mejorar la interacción competitiva, son más ventajosos en entornos predecibles. El problema ahora se centra en si los cambios ambientales observados históricamente en áreas tropicales (por ejemplo, llanuras y bosques inundados, morichales, etc.) son altamente

predecibles o no y en particular necesitamos estudios que puedan indicar que áreas por donde discurren los ríos de aguas negras o de abundancia y densidad de morichales son más ventajosos que aquellos de aguas turbias presentes en la misma área geográfica y de ciclos climáticos similares.

7. 4. Competencia y depredación

La gran diversidad y complejidad faunística en las regiones tropicales de tierras bajas y, en muchos casos, las fluctuaciones anuales (lluvia-sequía) que ocurren en los ecosistemas acuáticos de las llanuras, dan como resultado altas concentraciones de peces que ocurren en áreas restringidas y durante el período seco. Los datos obtenidos para estas áreas indican que existe una enorme interrelación dentro y entre especies. La competencia por refugio, alimento o pareja y por otro las relaciones alimentarias (p.e. depredación dentro de la trama trófica), han actuado en la generación de facultades adaptativas para así evitar estos conflictos y la potencial desaparición de las poblaciones en un lugar determinado (Lowe-McConnell, 1967; Machado-Allison y Royero, 1986; Machado-Allison, 2005; Machado-Allison et al., 2020: Mago-Leccia, 1970).

Un aspecto importante observado sobre los hábitos alimenticios en algunas de las especies aisladas durante el período seco, parece indicar que su dieta proviene en mayor grado del uso de tejido graso (engorde) almacenado durante el período de bonanza o lluvia. Por otro lado, otra estrategia a resaltar sobre la posible competencia por el recurso alimenticio es su reducción mediante su explotación diferencial horaria o en diferentes áreas del cuerpo acuático (Lowe-McConnell, 1967, 1975; Mago-Leccia, 1970; Machado-Allison, 2005; Machado-Allison et al., 2020).

7.5. Otras interacciones entre los organismos y las poblaciones

Interacciones como el **parasitismo**, el **comensalismo**, la **proto-cooperación**, y el **mutualismo** también se han propuesto como factores que pueden haber influido en el aumento de la diversidad en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Pianka, 1978). Se han sugerido algunos ejemplos claros de proto-cooperación entre especies de peces y dispersión de plantas para los bosques inundables (varzeas de aguas negras) del Amazonas (Gottsberger, 1978; Goulding, 1980) y tierras bajas del Orinoco (bosques de galería y morichales) (Castro-Lima, 2010; Knab-Vispo et al., 2003; Machado-Allison, 1982b). Especies como: *Colossoma macropomum* (cachama), *Piaractus orinoquensis* (morocoto), *Mylossoma albiscopum* (palometa) y *Brycon* (*B. whitei, B. falcatus*) palambras, tienen hábitos herbívoros donde

la ingesta de frutos y semillas (icticoría) es común. Estas especies, entonces, se convierten en potenciales dispersores de semillas, principalmente aquellas plantas que forman parte de la galería o bosque desbordante que acompañan a los ríos y "remansos" de las zonas llanas bajas como se señaló anteriormente.

Otros casos, como la **evolución morfológica especializada** para lograr un hábito **lepidófago** (devorador de escamas) o **pterigiófago** (comedor de aletas) en peces caracoideos (por ejemplo, *Exodon paradoxus*, *Catoprion mento*, *Roeboides* spp., y *Serrasalmus* spp.), se denominan tanto un tipo de parasitismo especial como depredación (Roberts, 1973; Sazima, 1984), y posibles respuestas, como el desarrollo de escamas diminutas y accesorias en " cachanas" y "palometas" (por ejemplo, *Colosoma* y *Mylosoma*) y/o aletas engrosadas o con marcas o bandas oscuras terminales y subterminales observadas en especies de los géneros: *Brycon, Prochilodus, Moenkhausia, Pygocentrus, Pristobrycon, Serrasalmus, Hypostomus, Pterygoplichthys, Hoplosternum*), podrían plantearse como resultado de tales interacciones poblaciones y que pudieran incorporarse como atributos únicos para la separación evolutiva definitiva de las especies.

Por otro lado, las condiciones físico-químicas fluctuantes en los ríos neotropicales de América del Sur, y en particular, los componentes acuáticos de las llanuras bajas (por ejemplo, sabanas inundables, "caños", morichales, ríos de aguas claras y negras, lagunas temporales y permanentes) son factores de cambio. Estos cambios, físicos, químicos y de nutrientes, unido a factores ambientales de larga duración y/o cambios geomorfológicos que implicarían la captura de ríos, anastomosis temporal de cuerpos de agua y formación de nuevos ambientes, podrían en el pasado y pueden en el presente dar grandes oportunidades para la evolución de especies en áreas semi o completamente aisladas (Lasso et al., 2016; Lundberg, 1998; Lundberg et al., 1998; Machado-Allison et al., 2020; Mago-Leccia, 1978; Winemiller y Jepsen, 2005).

En las áreas bajo estudio, caracterizadas por estas condiciones, las presiones selectivas, tanto bióticas como abióticas, son particularmente importantes estacionalmente. La condición de que la mayoría de las especies se reproduzcan en el período lluvioso, que los hábitos alimenticios de las formas larvales sean generalmente zooplantófagos (variando en adultos) y que utilicen las áreas inundadas para su crecimiento, que existan especies diurnas y nocturnas, así como el desarrollo de adaptaciones fisiológicas (respi-

ratorias y metabólicas) para responder a condiciones extremas (aguas ácidas), son algunas de las respuestas evolutivas obvias que han dado numerosos grupos de peces en estos cuerpos de agua de Venezuela (Machado-Alllison, 1990, 1992; Machado-Allison et al., 2020).

La evolución de las comunidades de peces en estos bosques inundados, sabanas y morichales, así como en ríos ácidos de aguas claras o negras, está estrechamente relacionada con la evolución de las comunidades de peces de los ríos de llanura (turbios) en su conjunto. Los ambientes acuáticos de la sabana dependen en gran medida del suministro de nutrientes de las inundaciones periódicas y de las aguas altas del escudo de los Andes y Guayana, y del equilibrio de las comunidades de peces establecidas durante el período lluvioso: reproducción, inmigración *versus* emigración y mortalidad durante el período seco (Lowe-McConnell, 1964, 1969; Lundberg, 1998; Machado-Allison et al., 2020; Machado-Allison y Chernoff, 2020).

8. Factores que producen cambios en el ciclo biológico y amenazas a la habitabilidad

> *América del Sur es una de las pocas áreas en el mundo que incluye vastas áreas de hábitats naturales no perturbados. Estas áreas son el refugio de aproximadamente la mitad de las especies de plantas y animales* (Hamlett, 1992, v).

La cita anterior muestra la importancia de preservar las áreas de hábitat natural prístinas en el mundo. Sin embargo, es solo durante las últimas cuatro décadas del siglo XX y las dos décadas del siglo XXI, que hemos cambiado ligeramente nuestro comportamiento hacia la comprensión de la vida de la tierra. Estos cambios fueron influenciados por el conocimiento global de al menos cuatro hechos ambientales y/o desgracias que nos dan cierto temor sobre el futuro:

(i). La publicación del libro *Silent Spring*, Carson (1962), cuyo texto nos introduce en los peligros públicos de los residuos domésticos e industriales;

(ii). La cobertura global dada al llamado Accidente de Minamata en el que se descargaron cientos de toneladas de mercurio en la bahía de Minamata en Japón (1950), afectando a miles de personas que comen pescado contaminado;

(iii). Conocimiento global del Canal del Amor (love canal) en Estados Unidos, caso que le abrió los ojos al mundo desarrollado y produjo una

extensa discusión sobre la descarga y disponibilidad de desechos industriales tóxicos; y

4. La Reunión de Río (1992) y los posteriores acuerdos de Montreal y Kioto, en los que la comunidad internacional ha llamado la atención sobre la aceleración del cambio global, la pérdida de biodiversidad y la preservación de áreas para lograr una calidad ambiental que garantice el futuro de la humanidad (UICN, 1993).

A pesar de esto, seguimos siendo testigos de actividades humanas que ponen en peligro numerosos ambientes acuáticos en América del Sur y, en particular, aquellos que son más frágiles, como cuerpos de aguas negras, bosques inundables y morichales;

(i). Cada año se talan áreas variadas y extensas de bosque tropical para ampliar una frontera agrícola ineficiente;

(ii) "Saneamiento de tierras" (un término de ingeniería que transforma las áreas de humedales en tierras secas) para fines de planificación urbana o agrícola, causando desvío o bloqueo de agua; y

(iii) la contaminación fluvial por actividades domésticas, mineras e in dustriales son algunos de estos factores. Como ejemplo de lo anterior, desarrollaremos algunas generalidades de las acciones o actividades humanas que han impactado la ecología de las comunidades acuáti cas en la cuenca del río Orinoco, particularmente en los ecosistemas correspondientes a este ensayo como los morichales y ríos prístinos de aguas negras en la Guayana venezolana como por ejemplo el pro yecto nacional "Arco Minero del Orinoco".

Podemos clasificar algunas de estas intervenciones como:

(i) Gestión del agua para fines domésticos, agrícolas o industriales;

(ii) Deforestación y uso de productos químicos para usos agrícolas; y

(iii) Explotación mineral (petróleo, oro, bauxita, coltán y otros).

Todas estas acciones provocan algunos cambios en los ciclos hidrológicos y biológicos naturales, que afectan directa o indirectamente a las comunidades acuáticas de la cuenca del río Orinoco (Machado-Allison, 1994, 2015; Machado-Allison et al., 2020).

8.1. Presas de agua para fines agrícolas, domésticos o industriales (Fig. 11)

En los últimos 70 años se construyeron ampliamente presas y desvíos de agua para uso doméstico agrícola o industrial, lo que resultó en la captura obvia de casi todas las cabeceras de los principales afluentes ubicados en la orilla norte y noroeste del canal principal del río Orinoco y el río Caroní, uno de los principales ríos de aguas negras en el escudo de Guayana. Debido a este factor, el río perdió su régimen hidrológico natural eliminando su ciclo anual de inundación/secado afectando los ecosistemas acuáticos y el desarrollo biológico de los organismos acuáticos. Por lo tanto, el bloqueo de los ríos de peces migratorios y las áreas inundadas de bosque y sabana utilizadas por larvas y fases juveniles de peces ya no están disponibles, lo que provoca un agotamiento de la población y las especies de peces.

8.2. Los productos químicos para usos agrícolas domésticos e industriales (Fig. 11).

El agua utilizada en áreas urbanas (uso doméstico o industrial) y / o desarrollo agrícola se descarga posteriormente como aguas residuales en muchos casos sin tratar y altamente contaminadas. Así, detergentes, hidrocarburos, fertilizantes, una alta variedad de pesticidas y residuos industriales como metales pesados ingresan al medio acuático natural, produciendo alteración en la calidad del agua y daños bioquímicos o fisiológicos en los organismos que la habitan. Estos contaminantes afectan a las comunidades, principalmente durante el período lluvioso cuando las grandes áreas urbanas ("síndrome del río urbano", Meyer, 2005; Rodríguez-Olarte *et al*., 2017) y la agricultura son "arrastradas" río abajo. Estas aguas contaminadas afectan en gran medida a ecosistemas frágiles de aguas negras como los situados cerca de asentamientos urbanos, industriales o agrícolas como en el oriente del país, en el Escudo Guayanés (ríos Caroní y Caura) y el Delta del Orinoco (Machado-Allison 1994; Machado-Allison et al., 2020).

*8.**3. Industria minera y petrolera***

La cuenca del río Orinoco en Colombia y Venezuela se considera (y ha sido probada) como uno de los mayores reservorios de petróleo pesado y gas natural del mundo. La Figura (11) muestra el área en Venezuela que podría verse afectada si en un futuro próximo comienza a llevarse a cabo un desarrollo completo de las actividades exploratorias y de extracción de petróleo / gas. Cabe señalar que existe una total congruencia de la zona y las zonas inundables del Orinoco y sus llanuras. Sin embargo, su habitabilidad

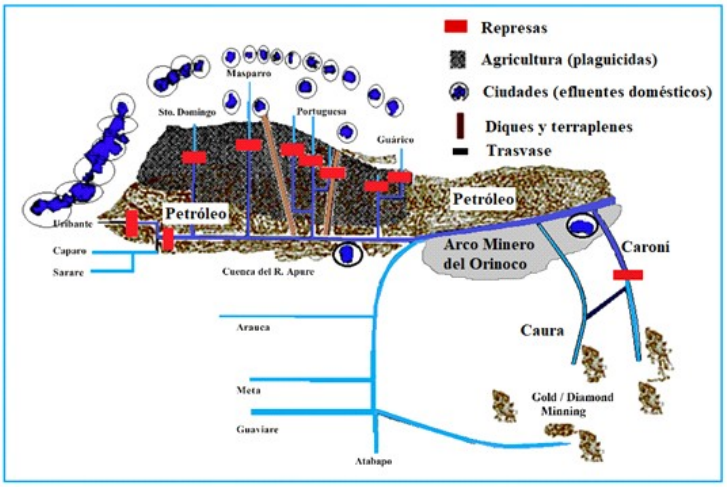


Figura 11. Mapa esquemático que muestra la cuenca del río Orinoco y las actividades promotoras del impacto ecológico y los posibles cambios en la habitabilidad de los ecosistemas acuáticos.

está en riesgo porque ya existen severos impactos ecológicos, a veces restringidos a las áreas elevadas (altiplanos) del Estado Anzoátegui y tierras bajas y morichales de los estados Monagas y Delta Amacuro. Los ríos en estas áreas son excepcionales; Son ríos llamados "negros" porque son oscuros (color te) naturalmente ácidos, producto de la descomposición natural de la materia orgánica. En su mayor parte, tienen un bosque de ribera dominado por la palma "moriche" (*Mauritia flexuosa*), fondos arenosos de cuarzo, aguas claras y prístinas y se consideran "frágiles" por su escasa o poca capacidad de amortiguación (Mora-Polanco et al., 2008; Machado-Allison, 2017; Machado-Allison et al., 2008, 2020).

El "Arco Minero del Orinoco" merece un párrafo especial debido a su importancia y al daño real o potencial a la vida orgánica en los hábitat terrestres y acuáticos. El área del proyecto ocupa 112.000 km^2, localizados en la región sur de Venezuela (Fig. 11). En esta región el gobierno está desarrollando una extracción extendida de minerales preciosos como: oro, diamantes, coltán y otros (RBV, 2016). Tradicionalmente, estas actividades habían causado impactos generalizados en el bosque siempre verdes de Guayana y la destrucción y contaminación de cuerpos de agua (Fig. 12) tales como: destrucción del bosque, aumento de sedimentos en el agua, contaminación del agua por mercurio, pérdida de biodiversidad, aumento de la transmisión de insectos y enfermedades tóxicas, explotación humana y trata

Figura 12. Las imágenes cronológicas de la destrucción del bosque y afluentes (Río Amarillo) del río Cuyuní (Bolívar, Venezuela) resultante de la extracción de oro. Fotos Ch. Brewer-Carias.

de personas (Grillet et al., 2009, 2021; Gutiérrez-Torres, 2022; Machado-Allison, 2015; Machado-Allison et al., 2000; RAISG, 2021).

Finalmente, la toxicidad del mercurio y de otros metales pesados provenientes del sistema agrícola y petrolero descargados en las aguas es bien conocida como una de las principales amenazas para nuestra vida silvestre y para los seres humanos. En las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco hay evidencia del daño causado a diferentes poblaciones, principalmente indígenas y rurales por la ingesta de peces y otros organismos acuáticos que acumulan grandes cantidades de mercurio y otros metales pesados en sus tejidos (Machado-Allison 2015; Machado-Allison et al., 2020; Madriz et al., 1990) (Fig. 13 y 14).

Figura 13. Dibujo esquemático que representa la ruta de insecticidas y metales pesados en nuestro sistema corporal. Tomado de Machado-Allison et al., 2020.

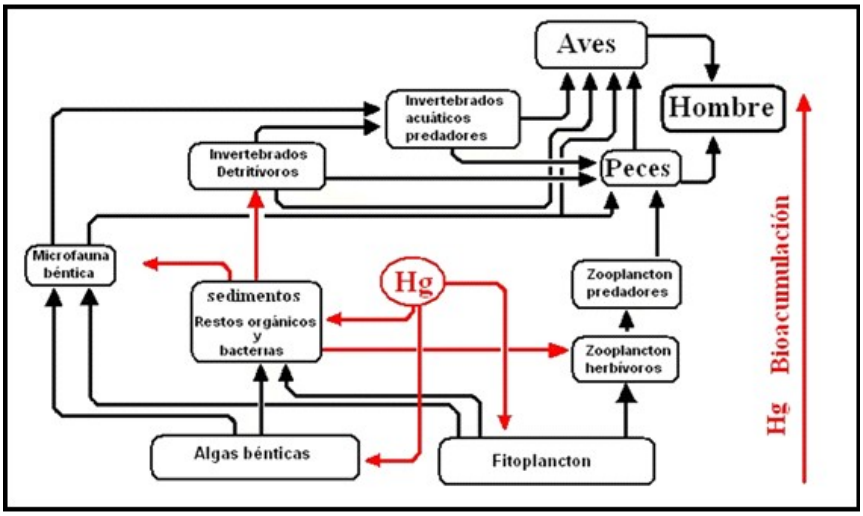


Figura 14. Diagrama de flujo simplificado de la transferencia y bioacumulación del metil mercurio a través de los compartimientos y la cadena trófica en los ecosistemas acuáticos. Tomado de Machado-Allison, 2015.

9. A manera de conclusión

Terminamos este capítulo como lo iniciamos. Hemos tratado de demostrar como los organismos acuáticos (peces) han desarrollado mecanismos que por varios millones de años les han permitido sobrevivir en ambientes naturales variables, dinámicos, nutritivos, estresantes y de alguna manera previsibles. Sin embargo, hoy día dado los cambios ambientales antrópicos producidos, la crisis climática y las amenazas sobre la habitabilidad de los organismos y sobre todo el hombre como especie, se producen discusiones y propuestas sobre la capacidad que podemos tener los organismos para sobrevivir a los impactos producidos en una región determinada o la capacidad de los organismos para colonizar y sobrevivir (o adaptarse) en ambientes críticos de la Tierra como parte de su legado histórico-genético, la detección y comprensión de los orígenes de los seres vivos, sus procesos y los patrones de formas de vida.

Esta tarea no ha sido fácil debido a que generalmente nos falta mucha información sobre la vida acuática y habitabilidad de una enorme diversidad de organismos en nuestro planeta que ocupan áreas poco accesibles técnicamente (profundidades de océanos, diversidad de ríos, picos y cimas elevadas, ambientes libres de oxígenos, aguas calientes y sulfurosas, aguas ácidas, etc).

Esperamos con este capítulo dar nuestra contribución reportando particulares condiciones naturales de vida de los peces en ambientes poco conocidos, pero abundantes e importantes en nuestro país, como lo son los grandes ríos de aguas ácidas llamados “negros” por su color como: Atabapo, Alto Orinoco, Caroní, Carrao, Casiquiare, Caura, Paragua, Cuyuní, Sipapo, Ventuari entre otros y los morichales: Aguaro-Guariquito, Caris, Guanipa, Morichal Largo, Oritupano, Provincial y río Tigre que ocupan grandes áreas de nuestro territorio. Así entonces reportar sus cualidades, orígenes histórico-geológico, las adaptaciones, procesos y las hipótesis que han surgido para explicar el resultado de su riqueza e importancia biótica.

Sin embargo, mostramos igualmente una alta preocupación al discutir que estos ambientes acuáticos son altamente frágiles, que están sometidos a variadas amenazas por el desarrollo humano, y que esto hace peligrar su conservación y el potencial uso sustentable que deberíamos garantizar, como parte de nuestra responsabilidad hacia la preservación de la vida en nuestro planeta los humanos incluidos.

Notas

[1] Los **ácidos húmicos** son una sustancia química producida por la descomposición de la materia orgánica (plantas y otros organismos).

[2] **Podzolización**: Un proceso de formación del suelo, especialmente en regiones húmedas, que implica principalmente la lixiviación de las capas superiores con acumulación de material en las capas inferiores y el desarrollo de horizontes característicos. https://www.merriam-webster.com/dictionary/podzolization.

[3] **Turbera** es un tipo de humedal ácido en el que la materia vegetal orgánica descompuesta se ha acumulado en forma de turba.

[4] **Antipuerto** o **antiportador** es un mecanismo de transporte de la membrana celular que transporta dos moléculas a la vez a través de la membrana en direcciones opuestas. https://medical-dictionary.thefreedictionary. com/antiport.

[5] **Trangresiones marinas** (introgresión y regresión) son eventos geológicos-climáticos en el que el nivel del mar aumenta o disminuye en relación con la tierra. Estos eventos causan inundaciones y modificaciones en la línea costera y cuencas bajas. Pueden ser causadas por el hundimiento de la tierra o por el llenado de agua de las cuencas oceánicas. Durante el en Mioceno Tardío y el Paleogeno, los continentes (Particularmente América del Sur) manifestaron numerosos eventos en los cuales el aumento del agua oceánica invadió las tierras bajas continentales (llanos del Orinoco, Costa Oriental del Amazonas (Brasil) y del Río Paraná (Argentina). Posteriormente, el agua se retiró y los continentes recuperaron sus tierras bajas.

Literature Citada

ALLARD, T., T. WEBER, C. BELLOT, M. BARDY, N. R. NASCIMENTO, E. FRITSCH AND M. F. BENEDETTI

2011. Tracing source and evolution of suspended particles in the Rio Negro Basin (Brazil) using chemical species of iron. *Chemical Geology*, 280 (1-2):79-88.

ANTONIO-CABRÉ, M. E. Y C. A. LASSO

2001. A Los peces del río Morichal Largo, estados Monagas y Anzoátegui, Cuenca del río Orinoco, Venezuela. *Mem. Fund. La Salle de Cien. Nat.* 156:1-119.

AYRES, J. M. C. AND T. H. CLUTTON-BROCK

1992. River boundaries and species range size in Amazonian primates. *The American Naturalist,* 140:531-537.

BARDY, M., S. DERENNE, T. ALLARD, M. F. BENEDETTI, AND E. FRITSCH

2011. Podzolization and exportation of organic matter in black waters of the Rio Negro (upper Amazon basin, Brazil). *Biogeochemistry,* 106:71–88. doi:10.1007/s10533-010-9564-9.

BATES, J. M., S. J. HACKETT AND J. CRACRAFT

1998. Area-relationships in the Neotropical lowlands: an hypothesis based on raw distributions of passerine birds. *Journal of Biogeography*, 25: 783-793.

BOHLKE, J., S. WEITZMAN AND N. MENEZES

1978. The status of systematic studies of South American freshwater fishes. *Acta Amazónica*, 8:657-677.

CARSON, R.

1962. *Silent Spring*. Houghton Miffin, Publ.

CASTRO-LIMA, F.

2010. Flora de la cuenca del Orinoco útil para el sostenimiento de la diversidad íctica regional (385-407). En: Lasso *et al*. ed. *Biodiversidad de la Cuencas del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, WWF Colombia, Fund. Omacha, Fund. La Salle e Inst. De Estudios de la Orinoquia (Univ. Nacional de Colombia). Bogotá, Colombia.

CHERNOFF, B. (ED)

1996. Technical Preliminary Report. AquaRAP (Aquatic Rapid Assessement Program). (mimeo). Field Museum/Conservation International.

CHERNOFF, B., A. MACHADO-ALLISON, K. RISENG AND J. R. MONTAMBAULT (EDS.)

2003. *A Biological Assessment of the Aquatic Ecosystems of the Caura River Basin, Bolívar State, Venezuela.* RAP Bulletin of Biological Assessment 28. Conservation International, Washington, DC.

COLINVAUX, P.

1987. Amazon diversity in light of the paleo-ecological record. *Quaternary Science Reviews*, 6: 93-114.

COLINVAUX, P.

1993. Pleistocene biogeography and diversity in tropical forests of South America (473-499). In: (ed. by P. Goldblatt) *Biological relationships between Africa and South America*, Yale University Press, New Haven, CT.

COLINVAUX, P.A., P. E. DE OLIVEIRA, J. E. MORENO, M. C. MILLER AND M. B. BUSH

1996. A long pollen record from lowland Amazonia: forest and cooling in glacial times. *Science*, 274: 85-88.

ENDLER, J. A.

1977. *Geographic variation, speciation, and clines*. Princeton University Press, Princeton.

ENDLER, J. A.

1982. Pleistocene forest refuges: fact or fancy? (641–657). In: *Biological diversification in the Tropics* (ed. by G.T. Prance), Columbia University Press, New York.

FJELDSA, J.

1994. Geographical patterns for relict and young species of birds in Africa and South America and implications for conservation priorities. *Biodiversity and Conservation*, 3: 207-226.

FLAUSINO JUNIOR, N., F. A. MACHADO, J. S. ZUANON AND E. J. FERREIRA

2008. The fish fauna of sessile hydrophytes stands *(Mourera* spp.: Podostemaceae). in the Dardanelos Waterfalls, Rio Aripuanã, Brazil. *Aqua, International Journal of Ichthyology.* 22(3): 133-144.

GONZÁLEZ, R. J. AND M. R. PREEST

1999. Ionoregulatory specializations for exceptional tolerance of ion-poor, acidic waters in the neon tetra (*Paracheirodon innesi*). *Physiol. Biochem. Zool.,* 72: 156-163.

GONZÁLEZ, R. J. AND R. W. WILSON

2001. Patterns of ion regulation in acidophilic fish native to the ion-poor, acidic Rio Negro. *J. Fish Biol.,* 58:1680-1690.

GONZÁLEZ, R. J., V. M. DALTON AND M. L. PATRICK

1997. Ion regulation in ion-poor acidic water by the blackskirt tetra (*Gymnocorymbus ternetzi*), a fish native to the Amazon River. *Physiol. Zool.,* 70: 428-435.

GONZÁLEZ, R. J., R. W WILSON, C. M. WOOD, M. L. PATRICK AND A. L. VAL

2002. Diverse strategies for ion regulation in fish collected from the ion-poor, acidic Rio Negro. *Physiol. Biochem. Zool.,* 75: 37-47.

GONZALEZ, R. J., R. W. WILSON AND C. M. WOOD

2005. Ionoregulation in tropical fishes from ion poor, acidic blackwaters (397-442). In: *Fish Physiology* (ed. A. L. Val, V. M. F. de Almeida-Val and D. J. Randall), Waltham, MA: Academic Press.

GOTTSBERGER, G.
1978. Seed dispersal by fish in the inundated region of Huamita Amazonia. *Biotropica*, 10(3): 170-183.

GOULDING, M.
1980. *The fishes and the forest*. University of California Press, Berkeley, California.

GOULDING, M., M. L. CARVALHO, AND E. G. FERREIRA
1988. *Río Negro: Rich life in poor water*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands.

GREGORY-WODZICKY, K. M.
2000. Uplift history of the Central and Northern Andes: a review. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 1091-1105.

GUTIÉRREZ-TORRES, J.
2022. Venezuelan Amazon deforestation expands due to lawlessness, mining, fires: Reports. https://news.mongabay.com/2022/08/venezuelan-amazon-deforestation-expands-due-to-lawlessness-mining-fires-reports/

GRILLET, M. E.
2009. Focos calientes de transmisión de malaria: Implicaciones para un control orientado y efectivo en Venezuela. Artículos Originales. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*. XLIX (2):193-208

GRILLET, M.E., J. MORENO, J. HERNÁNDEZ-VILENA, M. F. VICENTI-GONZÁLEZ, O. NOYA, A. TAMI. A. PANIZ-MONDOLFI, M. LLEWELLYN, R. LOWE, A. ESCALANTE AND J. CONN
2021. Malaria in Southern Venezuela: The hottest hotspot in Latin America. *Plos Neglected Tropical Diseases Top of Form*. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008211.

HAFFER, J.
1969. Speciation in Amazonian Forest. Birds. *Science,*16(5):131-137.

HAFFER, J.
1997. Alternative models of vertebrate speciation in Amazonia: an overview. *Biodiversity and Conservation*, 6: 451-476.

HALL, J. P. AND D. J. HARVEY
2002. The phylogeography of Amazonia revisited: new evidence from rionid butterflies. *Evolution*, 56: 1489-1497.

HAMLETT, W.
1992. *Larval ecology of fish of the Orinoco basin*. Springer-Verlag, N.Y., pag. v.

HOORN, C.
1993. Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: results of a palynostratigraphic study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 105: 267-309.

HOORN, C. 1994.
An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle–Late Miocene, NW Amazonia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 112: 187-238.

HOORN, C., J. GUERRERO, G. A. SARMIENTO AND M. A. LORENTE

1995. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology*, 23: 237–240.

HUBERT, N. AND J. F. RENNO

2006. Historical biogeography of South American freshwater fishes. *Journal of Biogeography,* 33: 1414-1436.

IUCN.

1993. The Convention on Biological Diversity: an explanatory guide (Draft). IUCN Environmental Law Centre, Bonn, Germany.

JUNK, W. J., M. T. F. PIEDADE, J. SCHÖNGART, M. COHN-HAFT, J. M. ADENEY AND F. A. WITTMANN.

2011. Classification of Major Naturally-Occurring Amazonian Lowland Wetlands. *Wetlands*, 31: 623-640.

KNAP-VISPO, C.; F. DAZA; C. VISPO Y N. GONZÁLEZ

2003. The diet of morocoto (*Piaractus brachypomus*) in the lower Rio Caura in relation to its ecological role and its conservation. *Scientia Guaianae*, 12:367-391.

KWONG R. W. M., Y. KUMAI AND S. F. PERRY

2014. The physiology of fish at low pH: the zebrafish as a model system (Review). *The Journal of Experimental Biology*, 217: 651-662.

LASSO, C. A., A, GIRALDO, O. M. LASSO-ALCALÁ, O. LEÓN-MATA, C. DONAS-CIMIENTO, N. MILANI, D. RODRÍGUEZ-OLARTE, J. C. SEÑARIS Y D. TAPHORN

2006. Peces de los ecosistemas acuáticos de la confluencia de los ríos Orinoco y Ventuari, Estado Amazonas, Venezuela: resultados del AquaRAP (114-122). En: Lasso, Señarìs, Alonso & Flores (Eds). *Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos en la Confluencia de los ríos Orinoco y Ventuari, Estado Amazonas (Venezuela).* Boletín RAP de Evaluación Biológica 30. Conservation International. Washington DC, USA.

LASSO, C. A., A, GIRALDO, O. M. LASSO-ALCALÁ, J. C. RODRÍGUEZ, O. LEÓN-MATA, C. DONASCIMIENTO, D. TAPHORN, A. MACHADO-ALLISON Y F. PROVENZANO

2008. Peces del alto río Paragua, cuenca del Caroní, Estado Bolívar, Venezuela: Resultados del AquaRAP alto Paragua (110-115). In: Senaris, J.C., C.A. Lasso y A.L. Flores (eds.) 2008. *Evaluación Rapida de la Biodiversidad de los Ecosistema*s Acuáticos de la Cuenca Alta del Rio Paragua, Estado Bolívar, Venezuela. RAP Bulletin of Biological Assessment 49. Conservation International, Arlington, VA, USA.

LASSO, C., J. I. MOJICA, J. S. USMA, J. A. MALDONADO-O., C. DONASCIMIENTO, D. C. TAPHORN, F. PROVENZANO, Ó. M. LASSO-ALCALÁ, G. GALVIS, L. VÁSQUEZ, M. LUGO, A. MACHADO-ALLISON, R. ROYERO, C. SUÁREZ Y A. ORTEGA-LARA

2004. Peces de la cuenca del río Orinoco. Parte I: lista de especies y distribución por subcuencas. *Biota Colombiana* 5 (2) 95-158.

LASSO, C. A., L. MESA, J. I. MOJICA, O. M. LASSO-ALCALÁ, A. MARCANO, A. GIRALDO, D. PISAPIA, O. FARINA, A. MACHADO-ALLISON, F. PROVENZANO Y K. GONZÁLEZ-OROPEZA

2009. Peces de los ríos Cuyuní y Uey, cuenca del Cuyuní, Estado Bolívar (Venezuela): inventario, distribución, conservación y algunos aspectos ecológicos (106-120). En: C. A. Lasso, J. C. Señaris, A. Rial y A. L. Flores, eds. *Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos de la Cuenca Alta del Río Cuyuní, Guayana Venezolana*. RAP Bulletin of Biological Assessment 49. Conservation International, Arlington, VA, USA.

LASSO, C. A., A. RIAL Y V. GONZÁLEZ-B. (EDITORES)

2013. *VII. Morichales y canangunchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia - Venezuela. Parte I.* Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia.

LASSO, C. A., J. S. USMA OVIEDO, F. VILLA, M.T. SIERRA-QUINTERO, A. ORTEGA-LARA, L. MESA, M. PATIÑO, O. LASSO-ALCALÁ, M. MORALES-BETANCOURT, K. GONZÁLEZ-OROPESA, M. QUICENO, A. FERRER, Y C. SUÁREZ

2009. Peces de la Estrella Fluvial Inírida: ríos Guaviare, Inírida, Atabapo y Orinoco (Orinoquia colombiana). *Biota Colombiana*, 10(1-2): 89-122.

LASSO, C. A., J. S. USMA, F. TRUJILLO Y A. RIAL (EDITORES)

2010. *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: I. bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad Nacional de Colombia). Bogota, D. C., Colombia.

LASSO, C., A. RIAL, C. MATALLANA, C. SEÑARIS, A. DÍAZ-PULIDO CORZO Y A. MACHADO-ALLISON (EDITORES)

2011. *Biodiversidad de la Cuenca del Orinoco. II. Áreas Prioritarias para la Conservación y Uso Sostenible.* Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle de Ciencias Naturales e Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá, D.C., Colombia.

LASSO, C. A Y C. MATALLANA (COMP.)

2012. IV Taller binacional para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad en la cuenca del Orinoco: avances, perspectivas y propuestas de trabajo conjunto bajo el contexto del cambio global. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.

LASSO,C. D. TAPHORN Y A. MACHADO-ALLISON

2016. Fishes and aquatic habitats of the Orinoco River Basin: diversity and conservation. *Journ. Fish Biology*. https://doi.org/10.1111/jfb.13010

LOWE-MCCONNELL, R.

1964. The fishes of the Rupununi Savanna District of British Guiana. Pt. I. Grouping of fish species and effects of the seasonal cycles on the fish. *Journ. Linn. Soc*. (Zool.), 45:103-144.

LOWE-MCCONNELL, R.
1969. Speciation in tropical freshwater fishes. *Biol. Journ. Linn. Soc*., 1: 51- 75.

LOWE-MCCONNELL, R.
1975. *Fish Communities in Tropical freshwaters.* Longman, N.Y.

LOWE-MCCONNELL, R.
1987. *Ecological studies in tropical fish communities*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

LUNDBERG, J. G.
1998. The temporal context for the diversification of Neotropical fishes. (49-68). En: Malabarba, Reis, Vari, Lucena & Lucena (eds). *Phylogeny and Classification of Neotropical Fishes*. Edipucrs, Porto Alegre.

LUNDBERG, J. G., L. G. MARSHALL, J. GUERRERO, B. HORTON, M. C. S. L. MALABARBA AND F. WESSELINGH
1998. The stage for Neotropical fish diversification: a history of tropical South American rivers (13–48). En: Malabarba, Reis, Vari, Lucena & Lucena (eds.) *Phylogeny and classification of Neotropical fishes*. Edipucrs, Porto Alegre.

MACHADO-ALLISON, A.
1982a. Studies on the systematics of the Subfamily Serrasalminae (Pisces, Characidae). Ph.D. Thesis. The George Washington University. Washington, D. C.

MACHADO-ALLISON, A.
1982b. Estudios sobre la Subfamilia Serrasalminae (Teleostei, Characidae). Parte l. Estudio comparado de los juveniles de las "cachamas" de Venezuela (Géneros *Colossoma* y *Piaractus*). *Acta Biol. Venez*. 11 (3): 1-102.

MACHADO-ALLISON, A.
1990**.** Ecología de los peces de las áreas inundables de los Llanos de Venezuela. *Interciencia*, 15 (6): 411-423.

MACHADO-ALLISON, A.
1992. Larval Ecology of fish of the Orinoco Basin (Chapter 3:45-59). In: *Reproductive Biology in South American Vertebrates*, W. Hamlett Editor.

MACHADO-ALLISON, A.
1993. La Fauna de ayer y Hoy. En: *500 años de la América Tropical*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas.

MACHADO-ALLISON, A.
2015. *Los peces de los llanos de Venezuela. Un ensayo sobre su historia natural*. 3rd. Ed. CDCH-UCV. Caracas, Venezuela.

MACHADO-ALLISON, A.
2017. La conservación de ambientes acuáticos: petróleo y otras actividades mineras en Venezuela (p.189-201). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en Riesgo de Venezuela Vol. 1.* Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

MACHADO-ALLISON, A.

2019. Is the Colombia-Venezuelan climatic cycle a blessing or a calamity? different human perspectives of the Orinoco River Basin. Think-Tank (2018-2019). College of the Environment. Wesleyan University.

MACHADO-ALLISON, A. Y B. CHERNOFF

2020. El Río Caura: desde la pristinidad a su destrucción. (Capítulo 1: 39-56). In: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela.* Volumen 3. Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

MACHADO-ALLISON, A., B. CHERNOFF, R. ROYERO, F. MAGO-LECCIA, J. VELÁSQUEZ, C. LASSO, H. LÓPEZ, A. BONILLA, F. PROVENZANO Y C. SILVERA

2000. Ictiofauna del Río Cuyuni. *Interciencia,* Vol. 25(1): 13-21.

MACHADO-ALLISON, A. R. DELA FUENTE E I. MIKOLJI

2018. *Catálogo ilustrado de los Peces del Parque Nacional* "*Aguaro-Guariquito*". Serie Peces de Venezuela. ACFIMAN-IZT-FUDECI (Edic. Digital), Caracas, Venezuela.

MACHADO-ALLISON, A. R. DELA FUENTE E I. MIKOLJI

2020. *Los peces de los llanos de Venezuela. Un ensayo sobre su historia natural*. 4ta. Ed. (digital) CDCH-ACFIMAN. Caracas, Venezuela.

MACHADO-ALLISON, A., L. MESA Y C. LASSO

2013. Peces de los morichales y cananguchales de la Orinoquia y amazonia colombo-venezolana: una aproximación a su conocimiento, uso y conservación. (Cap. 15: 289-334). En: *Morichales y Cananguchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia-Venezuela.* (Parte 1). Lasso, C. A., A. Rial y V. González-Boscán. (Editores). Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia.

MACHADO-ALLISON, A., F. PROVENZANO, L. MESA Y L. MARCANO

2008. Estudio ambiental específico para la microlocalización de la refinería de Cabruta, Estado Guárico. Informe Final PDVSA-Fundación UCV, Caracas Venezuela.

MACHADO-ALLISON, A., A. RIAL Y C. LASSO

2011. Amenazas e impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos de la Orinoquia venezolana (63-88). En: Lasso Rial, Matallana, Señaris, Díaz-Pulido Corzo y Machado-Allison (eds). *Biodiversidad de la Cuenca del Orinoco. II. Áreas Prioritarias para la Conservación y Uso Sostenible.* Instituto A. Von Humboldt, Bogotá Colombia.

MACHADO-ALLISON, A. Y R. ROYERO

1986. Biomasa total y hábitos alimentarios en peces de un ecosistema riverino restringido en Venezuela. *Acta Cient. Venez*., 37(1): 94-95.

MADRIZ, E., L. ARIAS, R. BELLO Y G. LARA

1990. El sistema de riego del río Guárico. Diagnóstico socio-económico ambiental. Informe Final CDCH/UCV, Caracas (mimeo).

MAGO-LECCIA, F.
1970. *Lista de los Peces de Venezuela*. Ofic. Nac. de Pesca, MAC. Caracas.

MAGO-LECCIA, F.
1970. Estudios preliminares sobre la ecología de los peces de los llanos de Venezuela. *Acta Biol. Venez*., 7 (1): 71-102.

MAGO-LECCIA, F.
1978. *Los peces de agua dulce de Venezuela*. Cuadernos Lagoven. Caracas.

MARRERO, C., A. MACHADO-ALLISON, V GONZÁLEZ Y J. VELÁSQUEZ
1997. Ecología y distribución de los peces de los morichales de los llanos orientales de Venezuela. *Acta Biol. Venez.,* 17(4): 65-79.

MARSHALL, W. S.
2002. Na^{+}, Cl^{-}, Ca^{2+} and Zn^{2+} Transport by fish gills: retrospective review and prospective synthesis. *Journal of Experimental Zoology*, 293: 264-283.

MEYER, J. L., M. J. PAUL, AND W. K. TAULBEE
2005. Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. *Journal of the North American Benthological Society*, 24: 602-612.

MORA POLANCO, A., SÁNCHEZ CALDERÓN, L., MAC-QUAHE ROMERO, C. VISÁEZ SALAZAR, F. Y M. CALZADILLA
2008. Geoquímica de los ríos morichales de los llanos orientales venezolanos. *Interciencia*, 33: 717-724.

NORES, M.
1999. An alternative hypothesis to the origin of Amazonian bird diversity. *Journal of Biogeography*, 26: 475-485.

PATTON, J. L. AND M. N. F. DA SILVA
1998. Rivers, refuges and ridges: the geography of speciation of Amazonian mammals (202-216). In: *Endless forms: species and speciation* (ed. by S. Berlocher and D. Howard), Oxford University Press, New York.

PATTON, J. L., M. N. F. DA SILVA AND J. R. MALCOLM
1994. Gene genealogy and differentiation among arboreal spiny rats (Rodentia: Echimyidae) of the Amazon basin: a test of the riverine barrier hypothesis. *Evolution*, 48:1314-1323.

PIANKA, E.
1978. *Evolutionary ecology* (2ª ed.). Harper y Row Publications.

PONCE, M. E., F, W. STAUFFER, M. L. OLIVO Y M. A. PONCE
2000. *Mauritia flexuosa* L. F. (Aracaceae). Una revisión de su utilidad y estado de conservación en la cuenca amazónica, con especial énfasis en Venezuela. *Acta Botánica Venezuélica,* 23(1):19-46.

PRANCE, G.
1973. Phytogeographic support in the theory of Pleistocene Forest Refuge in the Amazon basin, based on evidence form distribution patterns in Carycaraceae, Chysobalanaceae, Dichapetalaceae and Lecythidaceae. *Acta Amazonica*, 3:5-28.

PRANCE, G. T. (ED.)

1982. *Biological diversification in the tropics*. Columbia University Press, New York.

RÄSÄNEN, M. E., J. S. SALO, H. JUNGNERT, AND L.R. PITTMAN

1990. Evolution of the western Amazon lowland relief: impact of Andean foreland dynamics. *Terra Nova*, 2: 320-332.

RÄSÄNEN, M. E., R. NELLER, J. S. SALO AND H. JUNGNER

1992. Recent and ancient fluvial deposition systems in the Amazonian foreland basin, Peru. *Geological Magazine*, 129: 293-306.

RBV (REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA)

2016. Decreto para la Creación de la Zona de Desarrollo Estratégico Nacional "Arco Minero del Orinoco". Decreto N° 2.248. Gaceta Oficial Nº 40.855, 24 de Febrero de 2016.

REGIER, H. AND E. COWELL

1972. Aplications of ecosystem theory succession, diversity, stability, stress and conservation. *Biological Conservation*, 4(2):83-8.

RÍOS-VILLAMIZAR, E. A., M. T. F. PIEDADE, J. G. DA COSTA, J. M. ADENEY AND W. J. JUNK

2014. Chemistry of different Amazonian water types for river classification: a preliminary review (17-28). Conference. Water and Society II. WIT *Transactions on Ecology and The Environment*, Vol 178.

ROBERTS, E.

1973. Ecology of fishes in the Amazon and Congo basins (239-254). In: B. Meggers, E. Ayensu y D. Duckworth (eds.). *Tropical forest ecosystems in Africa and South America: A comparative review*. Smithsonian Institution Press.

RODRÍGUEZ-OLARTE, D., M. B. GÓMEZ, C. J. MARRERO Y L. M. MARCO

2017. Río Turbio: un síndrome urbano en la vertiente andina del Orinoco (59-74). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 1*. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

SAINT-PAUL, U., J. ZUANONB, M. A. VILLACORTA CORREA, M. GARCÝA, N. N. FABRE, U. BERGERA AND W. J. JUNK

2000. Fish communities in central Amazonian white- and blackwater floodplains. *Environmental Biology of Fishes,* 57: 235-250.

RAISG (RED AMAZÓNICA DE INFORMACIÓN SOCIOAMBIENTAL)

2021. Minería y deforestación alimentan focos de malaria en Venezuela. https:// www.raisg.org/es/radar/mineria-deforestacion-venezuela/

ROY, M. S., J. M. C. SILVA, P. ARCTANDER, J. GARCÍA-MORENO AND J. FJELDSA

1997. The speciation of South American and African birds in montane regions (325-343). In: D.P. Mindell (ed.) *Avian molecular evolution and systematics.* Academic Press, New York.

ROYERO, R. A. MACHADO-ALLISON, B. CHERNOFF AND D. MACHADO-ARANDA
1992. Los Peces del Río Atabapo. *Acta Biol. Venez.* 14 (1): 41-56

SAZIMA, I.
1984. Scale-eating in characoids and other fishes (9-23). In: T. Zaret, (ed) *Evolutionary Ecology on Neotropical Freswater Fishes*. Dr. W Junk Publ. The Hague.

SIOLI, H.
1967. Studies in Amazonian waters. En *Atas do Simposio sobre a Biota Amazonica, 3 (Limnología*): 8-50.

SIOLI, H.
1968. Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. *Amazoniana*, 1(3): 267-277.

SIOLI, H.
1975. Tropical rivers as an expression of their terrestrial environment. (275- 288). In F. Golly and Medina (eds.) *Tropical ecological systems*. Springer Verlag, Berlin.

SLOBODKIN, L. AND H. SANDERS
1969. On the contribution of environmental predictability to species diversity. *Contr. Woods Hole Oceanog. Inst*., 2378:82-95.

SUÁREZ, M. M.
1966. Les utilization de palmier "moriche" (*Mauritia flexuosa* L. f.) ches les waraos du Delta d l'Orenoque. Journal Agriculture Tropical Botany Applied 13: 33-38.

TAPHORN B., D. C., D. RODRÍGUEZ-OLARTE, N. HURTADO Y A. BARBARINO
2005. Los peces y las pesquerías en el Parque Nacional "Aguaro-Guariquito", Estado Guárico, Venezuela. *Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales* (2004), 161-162: 19-40.

ULDARICO M., C. RODRÍGUEZ AND M. C. VAN DER HAMMEN
2013. Los cananguchales, el mundo de la boa y los peces: visión Upichía (Matapí) de las áreas inundables en la Amazonia colombiana y su conservación. p.: 277-287. In: VII. Morichales y cananguchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia - Venezuela. Parte I. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia.

VAN DOBBEN, V. AND R. LOWE-MCCONNELL (EDS.)
1975 *Unifying concepts in Ecology*. Junk, La Haya.

VANZOLINI, P.
1973. Paleoclimates, relief, and species multiplication in equatorial forests (255-258). En B. Meggers, E. Ayensu y W Duckworth, eds. *Tropical forest ecosystems in Africa and South America: a comparative review*. Smithsonian Institution Press.

WALLACE, A. R.
1852. On the monkeys of the Amazon. *Proceedings of the Zoological Society of London,* 20: 107-110.

WELCOME, R.
1979. *Fisheries ecology of floodplain rivers*. Logman, London & N.Y.

WESSELINGH, F. P., M. E. RÄSÄNEN, G. IRION, H.B. VONHOF, R.KAANDORP, W. RENEMA, L. ROMERO PITTMAN AND M. GINGRAS
2002. Lake Pebas: a palaeoecological reconstruction of a Miocene, longlived lake complex in western Amazonia. *Cainozoic Research*, 1:35-81.

WHITEMORE, T. C. AND G. T. PRANCE
1987. *Biogeography and Quaternary history in tropical America*. Oxford University Press, Oxford.

WINEMILLER, K. AND D. B JEPSEN
2004. Migratory Neotropical fish subsidize food webs of oligotrophic blackwater rivers (Chapter 8: 115-132). In: Polis, Power and Huxel (eds.) *Food webs at the landscape level*. University of Chicago Press, Chicago.

WINEMILLER, K. AND D. B JEPSEN
2005. Effects of seasonality and fish movement on tropical river food webs. *Journ. Fish Biology.* https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1998.tb01032.x

WOOD, C. M., A. Y. O. MATSUO, R. J. GONZÁLEZ, R. W. WILSON, M. L. PATRICK AND A. L. VAL
2002. Mechanisms of ion transport in *Potamotrygon*, a stenohaline freshwater elasmobranch native to the ion-poor blackwaters of the Rio Negro. *J. Exp. Biol.,* 205: 3039-3054.

WOODWELL, G. AND H. SMITH
1969. Diversity and stability in ecological systems. Brookhaven Symposia Biology, 22: 1-263. Assoc. Univ. Inc. Ans U.S. Atomic Energy Comm. (BNL 50175 C-36).

ZUANON, J. AND I. SAZIMA
2005. Free meals on long-distance cruisers: the vampire fish rides giant catfishes in the Amazon. *Biota Neotrop*. 5(1). http://dx.doi.org/10.1590/S167606032005000100012.

Antonio Machado-Allison

Biólogo UCV y PhD de George Washington University-Smithsonian Institution, Profesor Titular (J) adscrito al Instituto de Zoología y Ecología Tropical y Museo de Biología de la UCV. Sillón III de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (ACFIMAN). Miembro de la Academia de Ciencias de América Latina (ACAL). Investigación en sistemática, evolución, ecología y conservación de la biodiversidad y de los ambientes acuáticos neotropicales. 30 libros, capítulos y más de 100 trabajos científicos en revistas nacionales e internacionales. Internacionalmente, Investigador Asociado al Museo Field de Chicago, Museo Americano de Historia Natural (New York) y del Instituto Smithsoniano (Washington D.C.). Actualmente, Menakka and Essel Bailey '66 Distinguished Visiting Scholar (Research Fellow 2018-2019),(Research Associate 2020-2021) y University Professor (2022-2028) College of the Environment, Wesleyan University.

CAPÍTULO V

SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

1. Introducción

El hombre desde sus inicios ha buscado tener un suministro adecuado de agua para su subsistencia. Por ello las grandes civilizaciones antiguas se situaron cerca de grandes ríos como el Nilo, el Ganges, los ríos Éufrates y Tigris, y el Yangtzé en China.

La expansión poblacional, con mayor ocupación de áreas, llevo a la humanidad a ubicarse algunas veces lejos de las fuentes y otras veces, por haber crecido la población local, encontrar fuentes adicionales de suministro, alejadas de la ciudad, para su abastecimiento constante y seguro. Ello llevo a la creación de canales, acueductos, cisternas, etc. Un claro ejemplo temprano de almacenamiento preventivo es la evidencia de una presa alrededor del 2750 A.C, en Egipto, llamada Saad El-Kakara probablemente para almacenaje de agua en épocas de sequía. (Biswas, 1967). Igualmente, los canales de riego en Mesopotamia de la época de Nabucodonosor muestran una temprana gestión del recurso para cubrir necesidades (Ibid.).

Sin embargo, la constante búsqueda de seguridad hídrica, inclusive en ciudades como Roma, que se consideraba bien abastecida por varios acueductos y canales, obligo a buscar soluciones más confiables. Es así como en las viviendas recogían aguas pluviales del techo y las almacenaban en cisternas o piletas, sistemas llamados *impluvium* (previendo cualquier inconveniente en el suministro desde los canales y/o los acueductos).

Quizás la cisterna más famosa del mundo es la de Constantinopla, que garantizaba suministro de agua a la ciudad en caso de ser atacada y sitiada (aproximadamente 100.000 metros cúbicos de agua).

La situación actual de stress hídrico[1] en muchas partes del planeta, así como las variantes condiciones producidas por el cambio climático, han llevado a una búsqueda de gestionar los recursos hídricos con mayor eficien-

cia y cuyo fin último es siempre que el agua alcance para todos en cantidad y calidad suficiente. Una línea de acción que apunta en ese sentido es el uso de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

El concepto básico de los sistemas urbanos de drenajes sostenibles es el de retener las aguas pluviales en el sitio donde caen, para su potencial aprovechamiento. Concepto que contrasta con la práctica, hasta ahora usual, de evacuar las aguas llovidas en las ciudades lo antes posible, para evitar interrupciones de tráfico, inundaciones, daños a personas y bienes.

La situación de estrés hídrico llevó al desarrollo de pensar en ese concepto de retener las aguas de lluvia in situ para tratar de aprovecharlas. Esto porque hay lugares en el planeta donde una pluviosidad alta podría permitir que un cierto porcentaje de precipitación pueda ser almacenada, y utilizada bajo ciertas condiciones como se verá más adelante.

Los SUDS, en su desarrollo, permiten modificaciones urbanas que hacen más amigable el ambiente al introducir jardines, lagunas y otras formas de captación de aguas en la ciudad mejorando, además, el ornato de las ciudades. Asimismo, reducen los picos de los hidrogramas de escorrentía y, en algunos casos, la disminución del tamaño de los colectores de drenaje lo que permite ahorrar en costos de instalación de dichas tuberías. Igualmente, esa agua retenida permite su posterior uso para riego de jardines, limpieza de calles, etc. Dependiendo del sistema de captación y almacenaje puede inclusive ayudar a recuperar el acuífero local.

2. Definición

"*Los sistemas urbanos de drenajes sostenible (SUDS) son técnicas de gestión de aguas pluviales y planeamiento urbano que pretenden imitar procesos hidrológicos en el desarrollo urbanístico, controlando la escorrentía en el paisaje urbano*" (www.iagua.es)

Aun cuando esta definición pareciese abarcar solo la lluvia precipitada sobre las ciudades, lo cierto es que hoy en día el radio de acción de estos sistemas se ha ampliado a una mayor área de influencia, incluyendo inundaciones costeras, calidad de aguas y reúso de aguas servidas. Todo ello dentro del concepto de lograr la ciudad sustentable, objetivo número 11 de la ODS (Objetivos de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas) (ONU, 2015). Es por ello por lo que se justifica que se realice un muy breve análisis de dicho objetivo y su relación con los SUDS.

2.1. Las SUDS y el OBJETIVO No.11 (UN, 2015).

OBJETIVO 11: "Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles" (ONU, 2015).

Dentro de este objetivo general los SUDS tienen definitivamente un papel que jugar. Si a continuación se realiza una corta revisión y análisis a los subobjetivos más representativos (mostrados en cursivas), podremos ver la directa relación entre la sostenibilidad de las ciudades y los SUDS.

Subobjetivo 11.1 *De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales*

En este objetivo el suministro de servicios básicos incluye por supuesto el agua, elemento principal dentro del análisis de los SUDS, con el uso consuntivo del agua de lluvia para distintas necesidades como riego de jardines, limpieza de calles, etc. Incluso la posibilidad de tratamiento, en algunos casos, para consumo humano.

Subobjetivo 11.3 *De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países*.

Este objetivo, al hablar de planificación y gestión, incluye intrínsicamente el desarrollo de los SUDS, como puede deducirse de la definición inicial de los sistemas urbanos de drenaje sustentable, al tratar de controlar y almacenar la escorrentía en el medio urbano, así como mejorar el paisajismo al integrar algunas técnicas de captación de agua dentro del paisajismo y hacer más agradable el urbanismo.

Subobjetivo 11.5 *De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo hincapié*[2] *en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulne rabilidad*.[3]

Uno de los propósitos de los SUDS, como se tratará más adelante, es la de mitigar caudales, evitando inundaciones o al menos hacerlas menos dañinas a la población mediante el almacenamiento del agua pluvial en lagunas o mediante pozos de infiltración al subsuelo.

Subobjetivo 11.6 *De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales.*

Dentro de la gestión de las aguas pluviales urbanas suele incluirse el manejo de desechos municipales, dado que en muchos sitios la basura es arrojada a quebradas y canjilones, o a los sistemas tradicionales de drenaje urbano (sumideros), causando, por obstrucción, inundaciones puntuales localizadas, y la creación de zonas de alta potencialidad para la cría de plagas al producir pequeñas lagunas por estancamiento de las aguas.

Subobjetivo 11.7 *De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad.*

Una de las fortalezas de las SUDS es precisamente el rediseño de canales o quebradas intervenidas, la creación de zonas de infiltración, lagunas de retención y/o amortiguamiento (como se señala más adelante) para diseñar paisajismos más verdes y de mejor aspecto visual, algo que ha sido demostrado que ayuda al bienestar físico y mental de los ciudadanos.

Subobjetivo 11.b *De aquí a 2020, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles* (ONU, 2015)

Este subobjetivo abarca uso eficiente de recurso, cambio climático, resiliencia ante desastres; todos ellos relacionados con el uso de los SUDS.

2.2. Conclusión Objetivo 11 ODS.

Como puede apreciarse en este breve repaso de los varios subobjetivos (de la ciudad sustentable), en alguna u otra forma aparece el elemento agua, ya sea como abastecimiento, como factor ambiental o como causante de desastres por inundaciones. De allí su inclusión dentro la aplicabilidad de los sistemas urbanos de desarrollo sustentable. El Banco Mundial señala que:

"*si se quieren lograr los objetivos relacionados con el clima y el desarrollo, el agua debe estar en el centro de las estrategias de adaptación.*" (www.bancomundial.org).

Mas aún indica que:

"*nueve de cada diez desastres naturales se relacionan con el agua.*" (Ibid.)

Es por tanto el elemento agua un factor importante en la ciudad deseada. Acotar, sin embargo, a esa ciudad sustentable ha sido difícil, no en cuanto a su propia definición, sino en cuanto a lograr llegar a ese objetivo. De hecho,

"*La ciudad sustentable, para que realmente responda a su nombre es, en sí, un conjunto de políticas públicas, de concientización ciudadana y de ocupación de espacios que hace a la urbe más vivible para sus ocupantes.*" (Ochoa, 2017).

Es un todo de acciones, públicas y privadas, que en armonía y en común con todos los ciudadanos busquen esa sustentabilidad. Sin embargo, llegar a ese logro en un 100% no luce totalmente factible si se observan las condiciones que la urbanización trae sobre el uso de los recursos naturales.

Entre otros aspectos, la Organización de Naciones Unidas (2015), detallan los motivos que llevan a plantear el problema:

i. *La mitad de la humanidad, 3500 millones de personas, vive hoy en día en las ciudades y se prevé que esta cifra aumentará a 5000 millones para el año 2030.*

ii. *Las ciudades del mundo ocupan solo el 3% de la tierra, pero representan entre el 60% y el 80% del consumo de energía y el 75% de las emisiones de carbono.*

iii. *La rápida urbanización está ejerciendo presión sobre los suministros de agua dulce, las aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública*

Esta situación, en la cual la ciudad cada vez demanda más y mejores servicios y productos, es lo que lleva a fijar el objetivo 11 como uno de los más importantes dentro del grupo de los ODS y difícil de realizar totalmente. Como bien señalaba Wolman las entradas de insumos y la salida de otros es una actividad muy intensa en las ciudades. Como insumos se tiene bási-

camente el agua, la energía (electricidad, gasolina), comestibles. Como salida o efluentes de la ciudad, la basura, flujos de aguas servidas, contaminación atmosférica (Wolman, 1965). Ramos (2014), lo denomina apropiadamente **Metabolismo Urbano**, dado el sistema de intercambio de energía y materia, propio de un proceso metabólico animal o vegetal.

Vale la pena, para concluir este breve análisis con comentarios sobre la visión de la ciudad sustentable citando a Bettini (1998), cuando hablando de la sustentabilidad de las ciudades en la edad media escribía:

"*la Edad Media, fértil de tecnologías y de invenciones, ofrece una imagen de la ciudad que reflejaba la imagen del hombre, una ciudad inconscientemente ecológica que nuestra sociedad, nuestro mundo, excesivamente científico e informado, debería saber reproducir.*"

Esas ciudades, muchas amuralladas, se abastecían del entorno cercano e inclusive de algunos rubros producidos dentro de la misma ciudad. Algo improbable de realizar hoy en día, dado el tamaño de las ciudades y de su población.

La ciudad sustentable:

"*es aquella que ofrece una buena calidad de vida a sus ciudadanos y minimiza sus impactos al medio rural, preserva sus activos ambientales y físicos para generaciones futuras, y a través de ello promueve su competibilidad. De la misma manera, cuenta con un gobierno local con capacidad fiscal y administrativa para llevar a cabo sus funciones urbanas con la participación activa de la ciudadania*." (BID, citado por Ramos, 2014)

3. El agua urbana y su gestión

El concepto de gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) bien puede aplicarse, en su escala, a las ciudades. A estas les llega el agua bajo dos formas, una construida por el hombre, principalmente por tuberías que le surten agua tratada y potable proveniente de embalses y costosos sistemas de aducción que incluyen bombas, tuberías de gran diámetro, así como costos significativos de operación y mantenimiento, entre otros. La otra forma, que puede llegar a tener un significado importante en la ecuación de agua "disponible", sobre todo en eventos de emergencia, es la lluvia que precipita directamente sobre el área urbana o la de algún rio que atraviesa la ciudad. Igualmente, el tratamiento terciario de aguas servidas o grises pue-

de contribuir al riego de parques y jardines, optimizando así que el agua potable que entra a la ciudad por acueductos se destine solo para uso humano.

Desde un punto de vista histórico, como se ha mencionado, las ciudades generalmente disponían del agua de un río o lago cercano. Sin embargo, el crecimiento urbano y la ocupación de cuencas altas, con su descarga de efluentes cloacales, industriales o agrícolas (fertilizantes y pesticidas) no tratados, fue eliminando esa opción, lo que llevo, en consecuencia, a construir embalses en ríos cada vez más distantes, y a la construcción de los sistemas costosos ya citados.

En la década de 1960-1970, aproximadamente, a nivel mundial se realizaron grandes inversiones en materia de abastecimiento y saneamiento, logrando una mejora sustancial en la salud de los habitantes. Sin embargo, todavía alrededor de 2000 millones en todo el mundo no tienen acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura. (www.banco mundial.org).

En Venezuela igualmente se han construido varias obras de abastecimiento de agua (por ejemplo, para Caracas el Tuy I, Tuy II y Tuy III). Esos sistemas, salvo algunas mejoras y ampliaciones, son los que actualmente surten de agua a las principales ciudades de Venezuela.

Estos sistemas hacen viable la vida en la ciudad, pero están lejos del concepto de sustentabilidad, dado sus altos costos de operación y mantenimiento. Es aquí donde el concepto de usar las aguas pluviales, mediante su almacenaje, toma un cierto sentido práctico. Si se lograse almacenar parte de esas aguas pluviales se produce una baja en el suministro desde sitios alejados, bajando costos de operación y mantenimiento, y a la vez permitiendo a la cuenca productora utilizar esa agua "no trasvasada" para sus propias necesidades y fines, o para almacenaje y uso futuro.

Como un pequeño ejemplo de la magnitud de las aguas pluviales y su posible incorporación a ser usado por las ciudades, aclarando nuevamente que es solo un ejemplo hipotético, se tiene el caso de la cuenca del río Guaire, río que atraviesa la ciudad de Caracas en dirección oeste a este. La pluviosidad anual promedio de la cuenca está en unos 900 mm (0,9 m^3/m^2/ año). Si se pudiese captar toda esa agua (lo cual se sabe que no es factible) en toda el área de la cuenca de unos 433 kilómetros cuadrados (433 millones de metros cuadrados) daría un volumen de 389.700.000 metros cúbicos por año. La ciudad de Caracas consume unos 20 m^3/seg (630 millones de m^3 aproximadamente en un año).

Aun cuando se sabe que es imposible captar toda el agua de lluvias, esta representa, en este ejemplo en particular, el 62 % del consumo de agua de la ciudad, es decir que los sistemas de aducción no tendrían que ser de mayor magnitud y disminuirían los costos de operación y mantenimiento.

El hipotético e irreal ejemplo solo pretende destacar el uso de los SUDS como una alternativa para cierto consumo local, factible de ser captado y utilizado *in situ*, especialmente en momentos de crisis por algún evento catastrófico que pudiesen afectar los sistemas de aducción, ayudando a la resiliencia de la ciudad.

Recientemente han ocurrido eventos de inundaciones urbanas de carácter catastrófico en diferentes ciudades del mundo (por ejemplo, la DANA[1] en Valencia, España, 2024). El uso de los SUDS, combinados con otras medidas, pueden contribuir a atenuar el efecto dañino de crecientes extraordinarias. Efectivamente las lagunas de retención ya realizan un efecto de amortiguamiento al escurrimiento. Si a esto se añaden medidas como restauración de humedales, siembra de vegetación en las partes altas de las cuencas, regulación del uso de la tierra, etc. (UNESCO, 2018) se podría reducir el pico de la creciente. Burek et al., citados en el estudio de la UNESCO, señalan que la reducción del pico podría llegar hasta un 15 %, mencionando que esa reducción, aunque pequeña, puede:

"*marcar la diferencia entre una inundación y un desastre.*" (Ibid)

4. Crisis actual de agua a nivel mundial

Como se señala previamente ya existen ciudades en el planeta que sufren de estrés hídrico, definido como la situación que ocurre cuando la demanda de agua supera la disponibilidad real en un cierto periodo de tiempo. También cuando la calidad del agua es tan baja que su uso es restringido, y por tanto no disponible para cubrir la demanda.

Muy recientemente hubo un caso destacado a nivel mundial que ocurrió en la Ciudad del Cabo, en Sudáfrica. Una larga sequía entre los años 2015 y 2018, una sequía con periodo de retorno de 400 años predecía que la ciudad se quedaría sin agua. De hecho, se limitaba la distribución a ciertos puntos (149) donde los ciudadanos debían buscar su agua (25 litros por persona y por día) ya que las tuberías estarían secas. (https://www.wikipedia.org/wiki/Cape_Town_water_crisis#cite_note-37).

Conciencia social, buena comunicación entre gobierno y ciudadanos, y soluciones ingenieriles, lograron que la ciudad resistiera la situación y moti-

vo a buscar soluciones futuras para mayor resiliencia ante este tipo de eventos. (https://www.brookings.edu/articles/cape-town-lessons-from-managing-water-scarcity/#:~:text=Between%202015% 20and%202018%2C%20 Cape,communications%20and%20innovative%20engineering% 20 solutions).

Cifras recientes muestran que según nuevos datos del *Aqueduct Water Risk Atlas* de WRI muestran que 25 países, que albergan a una cuarta parte de la población mundial, enfrentan cada año un estrés hídrico extremadamente alto y consumen regularmente casi todo su suministro de agua disponible. Y al menos el 50 % de la población mundial (alrededor de 4 mil millones de personas) vive en condiciones de gran escasez de agua durante al menos un mes al año. (Kuzma et al., 2023).

Los efectos del cambio climático ya se perfilan hacia un futuro de mayor escasez de agua en algunas regiones del planeta, lo que aumenta las posibilidades de mayor estrés hídrico ante una creciente demanda de agua y la disminución del recurso.

Los SUDS, ante este escenario, definitivamente ayudan a paliar la demanda de agua, que, si se suman a otras medidas como mejoras en los sistemas de riego, disminución de las perdidas en acueductos, un mejor uso de agua en las industrias, equipos ahorradores de agua en las viviendas, etc. permitirían afrontar los requerimientos de la población en cuanto a cantidad de agua (obviamente que la calidad de esta también debe ser atendida).

Dentro de las otras posibles fuentes para cubrir la creciente demanda se encuentra la desalación y el reúso mediante tratamiento de las aguas servidas (especialmente para riego), temas que no corresponden al objeto de este capítulo y su mención solo se realiza con carácter informativo general.

5. Los SUDS y su legislación

Como toda iniciativa que implica nuevas normas y reglamentos los SUDS, para que puedan ser aplicados legalmente deben obedecer a ciertos criterios de diseño y condiciones de aplicabilidad. Ya en algunos países han aparecido legislaciones que los conceptualizan y dan un marco de referencia para su planificación y uso.

Países como Inglaterra, Canadá, Estados Unidos, España y otros ya tienen, al menos parcialmente, normas de diseño, manuales y guías de buenas prácticas en el uso de los SUDS.

Todas estas guías, normas etc. varían, dado que las condiciones de aplicación no son siempre iguales y deben ser adaptadas a las distintas regiones

por sus características topográficas, de tipos de suelo y uso de la tierra y, por supuesto, a la intensidad y duración de la precipitación local del área. Condiciones para la correcta aplicación de un sistema de drenaje sustentable.

En España el ministerio para la transición ecológica señala:

> "*el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), en su artículo 126 ter. 7, establece que: Las nuevas urbanizaciones, polígonos industriales y desarrollos urbanísticos en general, deberán introducir sistemas de drenaje sostenible, tales como superficies y acabados permeables, de forma que el eventual incremento del riesgo de inundación se mitigue. A tal efecto, el expediente del desarrollo urbanístico deberá incluir un estudio hidrológico-hidráulico que lo justifique.*" (Guías de adaptación al riesgo de inundación: sistemas urbanos de drenaje sostenible, 2019).

En Inglaterra, país de vanguardia en el uso de los SUDS, existen normas y guías para el país y para distintas regiones. En sus estándares nacionales señalan como objetivo para los SUDS el manejar la rata de flujo y el volumen de escurrimiento para así reducir el riesgo de inundación y polución del agua. Asimismo, señalan que estos sistemas reducen la presión sobre los colectores de aguas servidas (poseen colectores mixtos) y pueden mejorar la biodiversidad y el bienestar colectivo como beneficio lateral. (*Flood Water and Management Act* 2010) (Department for environment, food and rural affairs, 2011). Como dato interesante existe un grupo de expertos que deben aprobar el uso o no de los SUDS en las ciudades, denominado cuerpo de aprobación de los SUDS (*Suds Approving Body-SAB*). Este cuerpo determina si el urbanismo puede o no utilizar los sistemas de drenaje sustentable, haciendo exenciones en virtud de costos muy altos (por ejemplo) u obligando a restricciones más duras en los drenajes tradicionales en conjunto con autoridades locales. (ver caso en: ***Lagunas de retención***).

Como ejemplo adicional de como los países van elaborando y adoptando nuevas normas relativas al uso de los sistemas de drenaje sustentable, y considerando los efectos del cambio climático, están las normas de construcción en la ciudad de Miami en el estado de Florida de los Estados Unidos de Norteamérica (Departamento de transporte del estado-FDOT). Allí, recientemente el 18 de junio de 2024, y tomando conciencia del cambio climático y sus futuros efectos sobre la ciudad y su ya comprometido sistema de drenajes, se publicó un informe conceptual de drenaje (Conceptual

Drainage Report, 2024). En este se señala con lujo de detalles las restricciones y o recomendaciones que deben seguirse en las construcciones de la zona. Como parte importante está el concepto de la retención del agua de lluvia en el sitio. Para ello se dan parámetros de infiltración del tipo de suelo, nivel freático en época de lluvias, áreas de formación de lagunas, canales de drenaje cercano, etc. Incluye, además, un cierto criterio sobre la calidad del agua que debe drenarse a los canales. De hecho, este informe o reporte ha obligado a cambiar algunos diseños que estaban en proceso actualmente. Entre otros esta que el 100% de la escorrentía inicial de una pulgada debe retenerse en el sitio. Ese volumen se calcula mediante la formula

$$V = 60\ C\ i\ A\ T_t.$$

Donde:

- **C** Es el coeficiente de escurrimiento
- **i** Es la intensidad de la lluvia en pulgadas por hora
- **A** Área tributaria total en Acres
- $\mathbf{T_t}$ Duración de la tormenta, definido por la suma del tiempo en que se forma una lámina de una pulgada, más el tiempo de concentración (en minutos).

En el manual aparecen además otras características y recomendaciones como es el caso del uso de dren francés en algunas áreas donde la percolación es buena.

Estos ejemplos de distintas regulaciones en países muy disimiles en su pluviosidad y características muestran la preocupación por el uso de los sistemas de drenaje sustentable y sus regulaciones con la finalidad de ayudar a paliar la creciente demanda de agua o, como en el caso de Miami, evitar efectos dañinos a personas y cosas.

6. Las distintas aplicaciones y usos de los SUDS

La aplicabilidad de los sistemas de drenaje sustentable varía dependiendo de muchos factores, por lo que puede considerarse que cada caso es único o casi único, lo cual estimula a la inventiva y creación de sistemas cuya única limitación es cumplir con los mínimos requerimientos legales como se especificó en el capítulo anterior.

A continuación, se presentan los distintos tipos de SUDS más usuales y característicos.

6.1. Lagunas de Retención (Fig. 1)

Las lagunas de retención se utilizan para amortiguar picos de crecientes, protegiendo zonas que previamente eran inundadas con cierta frecuencia. El concepto es el de almacenar el exceso de agua en estas lagunas y retenerlas por un tiempo determinado; una vez llenas, descargar sus aguas a través de tuberías ubicadas en el fondo o mediante vertederos en la parte ubicada hacia una quebrada o depresión existente. Esto permite amortiguar el caudal excesivo y proteger a personas y bienes aguas abajo. Son ideales en donde exista área de superficie disponible que permitan su construcción.

Un ejemplo interesante es la ciudad de Pickering, Inglaterra (BBC, 2025) La ciudad sufría de frecuentes inundaciones. Las autoridades buscaban soluciones, cada una más costosas que las otra. Hasta que alguien descubrió que en el pasado unos monjes en la Abadía cercana de Bayland habían hecho diques de palos y rocas con lo cual, permitían cierto paso de agua, pero retenían una parte. Eso dio la idea de construir lagunas de retención espaciadas a lo largo del cauce del río logrando disminuir la magnitud de la creciente entre un 15 y 20 % (www.independent.co.uk, 2025)

La solución, mucho más económica, aproximadamente en un 90 %, resolvió el problema y consistió en la construcción de 167 pequeñas represas (lagunas) de palos y ramas,187 menores de bultos de forraje, y la siembra de 29 hectáreas de bosques. Asimismo, una laguna de retención de 120.000 metros cúbicos de capacidad con descarga a través de una alcantarilla para controlar el caudal de salida.

El autor tuvo la oportunidad de trabajar en 1977 en el diseño de una laguna de retención en Loveland, Colorado, Estados Unidos (Wright, McLaughlin, 1977) donde un urbanismo aguas arriba de un canal de riego estaba alterando el caudal y causando desbordes aguas abajo inundando fincas. La solución fue igualmente una laguna de retención para garantizar que el caudal que salía de ella fuese igual al producido por el área bajo sus condiciones iniciales naturales y no bajo las nuevas condiciones de impermeabilidad.

6.2 Lagunas de Detención (Fig. 2)

Si bien las anteriores “detienen” por un tiempo el flujo del agua, las lagunas de detención tienen como objetivo el almacenaje de las aguas permanentemente. Solo en el caso de exceder su capacidad poseen un vertedero para aliviar ese exceso. En realidad, son muy usadas en sitios donde existe

Figura 1. Laguna de retención, con salida de alcantarilla (parte superior de la foto)-Gales, Inglaterra (https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.suds wales.com%2Ftypes%2Fpassive-treatment%2Fdetention-basins%2F&psig=AOvVaw0a4F_SdciChYsePsq3kI8G&ust=1727829369383000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhxqFwoTCNCygpP464gDFQAAAAAdAAAAABAE.

cierta escasez de agua (zonas áridas y semiáridas). En aquellas ciudades cuya extensión lo permite ayudan al paisaje recreacional (parte de los objetivos de los SUDS) con la creación de parques a su alrededor. Su diseño debe ser cuidadosamente realizado ya que al ser perennes debe evitarse la proliferación de algas y criaderos de plagas. En algunas ciudades poseen aireadoras para cumplir esta función de saneamiento.

Existen lagunas de detención que por las condiciones del suelo cumplen también una función de recarga del subsuelo, son las llamadas de humedales, ya que permiten el crecimiento de plantas conformando una especie de humedal artificial.

El calculo del volumen de estas lagunas depende de varias variables. Un método relativamente sencillo es el usado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo del gobierno de Chile (Andrade 2016).

El método se calcula así:

$$Valm = Vafl - Vinf$$

Dónde:

Valm - Volumen de almacenamiento (m^3)

Vafl(t) – Volumen afluente acumulado de agua de lluvia para una duración t (m^3)

Vinf – Volumen acumulado infiltrado (m^3).

Para el cálculo del volumen afluente utilizan:

$$Vafl(t) = 0{,}00125 * C * I * At * t$$

Dónde:

C - Coeficiente de escurrimiento superficial (adimensional)

I - Intensidad de la lluvia para una cierta duración y período de retorno seleccionado (en mm/hora).

At - Área aportante, se estima como la suma de las superficies impermeables que drenan hacia la fosa o laguna, más el área de la laguna en si (m^2).

t - Tiempo en horas.

Para el cálculo del volumen infiltrado se utiliza:

$$Vinf = 0{,}001 * f * Cs * Ae * t$$

Dónde:

f - Tasa de infiltración (mm/hora). (Variable con el tipo de suelo, condiciones antecedentes y el tiempo o duración del evento, ya que a medida que se satura el suelo, éste pierde capacidad de infiltración)

Cs - Coeficiente de seguridad

Ae - Área de la laguna o depresión

t - Tiempo en horas.

Por último, la altura de la depresión será:

$$h = V_{alm}/A_e$$

"*El método, aparentemente sencillo posee dos variables de extrema importancia, la intensidad de la lluvia (I), sin la cual podría sub-*

diseñarse la laguna con las consecuencias lógicas de desborde; y la rata de infiltración del suelo (f), que debe ser determinada en cada sitio" (Ochoa, 2017)

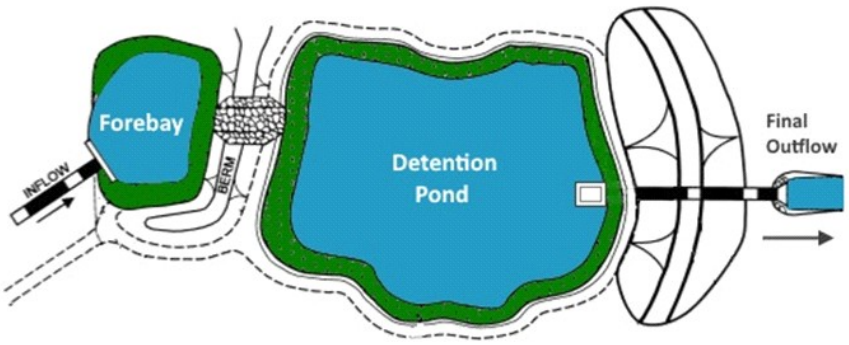


Figura 2. Esquema de Laguna de detención (tomado de https://learn. hydrology studio.com/hydrology-studio/knowledge-base/bioretention-ponds/) (cortesía de Hydrology Studio)

6.3 Zanjas de infiltración (Figs. 3 y 4)

Las zanjas de infiltración en realidad son lagunas como las anteriores, pero de dimensiones menores y con condiciones de suelo que permiten la percolación hacia el subsuelo elevando el nivel freático y posibilitando una futura extracción mediante pozos.

En la zona de Miami-Dade se exigen en la normativa como parte del jardín de las viviendas, tal como se señalará previamente. En algunas vías, y en zonas con espacio suficiente, se permite entre los canales una zona verde con la finalidad de que en ella se capte parte del escurrimiento de la vía y permita cierta percolación al subsuelo. En las figuras a continuación pueden verse dos casos de tipos de zanjas.

Las zanjas de infiltración representan una oportunidad, como se ve en los gráficos anteriores, de mejorar la estética urbana y de contribuir al nivel freático local.

6.4. Pozos de infiltración (Fig. 5)

El caso de los pozos de infiltración es diferente a lo visto. Son excavados hasta cierta profundidad y su objetivo es que faciliten la entrada de agua al

Figura 3. Estacionamiento en USA con zanja de infiltración y descarga vial a la zanja (tomado de Ochoa, 2017).

Figura 4. Uso de zanja de infiltración con fines estéticos paisajísticos (recuperado de www.sustainablestormwater.org Tomado de Ochoa, 2017).

subsuelo mejorando el almacenaje en el acuífero o capas inmediatas a la superficie. Se recomiendan en parques donde permiten que las plantas soporten más la época de sequía dada la humedad adicional aportada por el pozo. El único condicionante es si el suelo es de carácter arcilloso, poco permeable ya que el agua se quedaría en la excavación solamente. Una variación de estos pozos es cuando se siembran plantas en suelos poco permeables se realiza la excavación y se rellena con material mejorado y se procede a la siembra permitiendo una fuente de agua para el desarrollo de la planta. El grafico muestra como infiltrando a través del pozo puede luego recuperar agua en una toma (tubo morado).

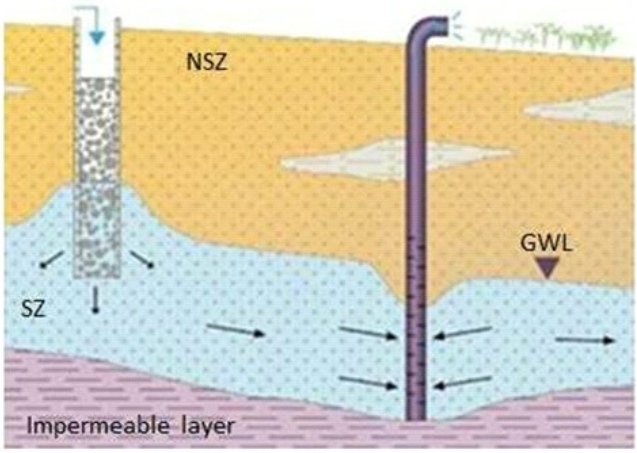


Figura 5. Esquema de Pozo de infiltración tomado de: https://www.researchgate.net/publication/310604830_MAR_design_and_construction_criteria/figures?lo=1.

6.5. Pavimentos permeables (Figs. 6 y 7)

En algunos lugares se ha venido implementando la practica del uso de pavimentos de concreto con poco contenido de arenas y, por tanto, con un porcentaje alto de vacíos en su estructura (hasta un 25%). Esto permite el paso del agua hacia el subsuelo y disminuye el escurrimiento superficial ayudando a mejorar el tráfico. Sin embargo, son más frecuentes en estacionamientos ya que no cambian las características del suelo como si lo hiciesen en un tramo largo de vía (autopistas, por ejemplo).

Tennis et al. (2014) en su trabajo señalan entre varias características lo siguiente:

i. Entre 15 y 25 % de vacíos se consigue en el concreto
ii. El flujo de agua a través de este concreto es de unos 200 litros/m2/min.
iii. Cuando son colocados de manera apropiada desarrollan resistencias de hasta 200 Kg/cm$^{2)}$.
iv. El subsuelo de la subrasante debe tener una rata de infiltración de unos 12 mm/hora.
v. Son mejores en superficies planas, aunque se han probado en pendientes de hasta 16%.

vi. No son recomendables para pavimentos que soportan de vehículos de carga pesada ya que en general se deforman.

vii. Debe garantizarse que no le lleguen aguas con cargas significativas de sedimentos arrastrados, ya que tapan muy rápidamente los vacíos entre los agregados.

viii. El tipo de suelo en la subrasante debe ser permeable.

Pérez y Salas (2016) realizaron una prueba en un estacionamiento de la Universidad Metropolitana de Caracas encontrando, para el material del subsuelo y el concreto usado en la prueba, una efectividad de porosidad del 30 % ,superando el señalado de 25 % de la investigación de Tennis et al. (2014).

Figura 6. Vista del material (obsérvese lo poco uniforme) https://constrofacilitator.com/wp-content/uploads/2021/12/Pervious-concrete.jpg

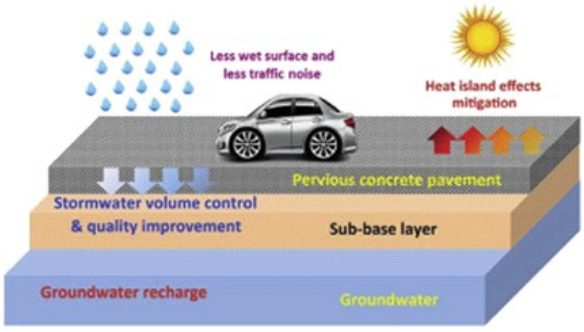


Figura 7. Gráfico ilustrativo del comportamiento del pavimento permeable. Tomado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618335376

6.6 Techos verdes (Figs. 8 y 9)

Una práctica que está tomando fuerza a nivel mundial es el uso de los llamados techos verdes. En principio, y sobre todo en zonas de baja precipitación, se utilizaba el agua de lluvia que precipita sobre los techos para recogerlas en algún recipiente para su posterior uso, tal como se menciona en la introducción del capitulo sobre las viviendas romanas. Sin embargo, surgen como una necesidad de los habitantes de algunos países de Europa y del Norte de América, donde se alcanzan temperaturas muy bajas, pues les ayudaba a conservar una confortable temperatura ambiente. El proceso de construcción constaba de 2 o 3 capas de turba, apoyadas sobre ramas cubiertas por gruesos panes de césped, asegurándose el techo contaran con la inclinación necesaria para cumplir la función de un impermeabilizante.

Figura 8. Techos verdes en Noruega. tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Techo_verde#/media/Archivo:Nor%C3%B0rag%C3%B8ta,_Faroe_Islands_(2).JPG)

Hace aproximadamente 100 años, de manera muy similar, USA y Canadá implementaron este tipo de tecnologías (Ramos Gómez, s.f.).

Hoy se ha ido perfeccionando la idea, incorporando la siembra de distintas especies de plantas en el techo. Entre sus beneficios (Ochoa, 2017) se cuentan:

i. Disminución de la contaminación del aire.

ii. Adición de valor estético.

iii. Reducción del calor de las zonas urbanas, especialmente en los es pacios debajo del techo, ahorrando energía al no necesitar refrigeración, o disminuir el uso de equipos de aire acondicionado.

iv. Absorción de partículas de polvo y gases contaminantes presentes en el aire.

v. Posibilidad de cultivar vegetales.

vi. Mejoramiento de la calidad de vida.

Los techos verdes, además, por su propia naturaleza, son capaces de retener algo de agua pluvial. En un estudio señalan que pueden retener entre un 28,3 y 45,2 % de la lluvia (Vanwalleghem et al., 2015). Esa lluvia, debidamente filtrada puede almacenarse en tanques, ya sea a nivel de suelo o subterráneo para usos posteriores. Existen opiniones en cuanto a que se debe ser cauto con esto ya que hay sitios donde puede haber heces de pájaros, insectos muertos, etc. que pudiesen impedir el uso, excepto para riego de jardines en época de sequía.

Una advertencia adicional con estos techos es su capacidad portante estructural que debe ser analizada para ver si es capaz de soportar la capa de tierra adicional totalmente saturada. De hecho, suelen clasificarse los techos como extensivos cuando el sustrato es menor a 15 cms. y las plantas son de crecimiento bajo. Por otro lado los llamados techos intensivos tienen sustratos de mas de 15 cms y vegetación de alturas mayores a 50 cms (Arriaga, 2017).

Figura 9. Techo verde de Chicago City Hall Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Techo_verde

Desde el punto de vista de los SUDS los techos verdes contribuyen en un pequeño porcentaje a la disminución de la escorrentía en calles y avenidas. García, Jesús(2012) señalaba que con lluvia promedio anual de 1000 mm podía captarse unos 50,000 litros anuales en un techo de 50 m.

7. Conclusión

Un buen sistema sustentable de drenaje urbano permitirá (Woods-Ballard, Kellagher, Martin, Jefferies, Bray, Shaffer, 2007) (citado en Ochoa,2017)

i. Aproximar el comportamiento de las aguas pluviales sobre la superficie urbana al comportamiento histórico previo a la urbanización.

ii. Recargar los acuíferos bajo las ciudades, con la consecuente mejora para las plantas y para la posible extracción de dicha agua para distintas demandas de la población.

iii. Disminuir el riesgo de inundación y consecuentemente los daños a la actividad normal de la ciudad, a personas y cosas.

iv. Abaratar costos en las infraestructuras usuales de drenaje (colectores) al retardar la llegada de aguas a estos (disminución del pico y tiempo de concentración de los hidrogramas).

v. Disminuir la concentración de poluentes en las aguas superficiales.

vi. Mejorar el paisaje urbano para disfrute visual de la población.

vii. Ayudar a crear conciencia de la problemática ambiental y de que puede haber soluciones en otros aspectos urbanos, como recolección separada de la basura y su disposición adecuada (para evitar taponamiento de colectores), contaminación del aire, etc.

viii. Crear espacios para el disfrute de la ciudadanía (parques, caminerías, etc.).

ix. En algunos casos, crear espacios para la fauna (especialmente santuarios para aves migratorias o corredores vegetales).

Los sistemas urbanos de drenaje sustentable aun cuando no son una solución a la crisis de stress hídrico que enfrentan, o enfrentaran, las ciudades en el futuro si contribuyen a la resiliencia en caso de desastres por su disponibilidad in situ, y en su recarga anual por lluvias periódicas. Su normativa, aun deficiente, es una labor por realizar en un futuro próximo, para colaborar con la construcción de la ciudad sustentable programada en el ODS 11.

Literatura Citada

ARRIAGA, C.

2017. Diseño y aplicación de un techo verde en la Universidad Metropolitana. Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Metroplitana. Caracas

BETTINI, V.

1998. *Elementos de Ecología Urbana.* Edit. Trotta 400p.

BISWAS, A.

1967. Hydrologic Engineering prior to 600 B.C. *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE. 93(5):115-136. ASCE https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001672.

FDOT (FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION)

2024. Conceptual Drainage Report. Florida Department of Transportation Golden Glades Interchange.mMiami-Dade County, Florida. file:///C:/Users/anton/Downloads/GGI%20_Conceptual%20Drainage%20Report_Reduced_1-31-2022%20(2).pdf

GARCIA, J.

2012. Sistema de captación y Aprovechamiento Pluvial para un ecobarrio de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Universidad Autónoma de México. UNAM 115p.

GOBIERNO DE ESPAÑA

2019. Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas urbanos de drenaje sostenible (www.miteco.gob.es/agua/temas) Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado. España. https://es.scribd.com/document/477606367/Guia-adaptacion-riesgo-inundacion-Suds

KUZMA, S. L. SACCOCCIA AND M. CHERTOCK

2023. 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress**.** World Resources Institute. https://www.wri.org /insights/highest-water-stressed-countries

ONU (ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS)

2015. Objetivos del milenio. Objetivo 11. www.un.org.milleniumgoals.

ONU (ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS)

2015. objetivo11. www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/

OCHOA ITURBE, J.

2017. El Drenaje y su importancia para una ciudad sustentable. Trabajo de Incorporación. Academia de la Ingeniería y el Hábitat. acading.org.ve.72p.

PEREZ, J. Y E. SALAS

2016. Análisis mediante un modelo de la utilidad de pavimentos permeables para la recolección de aguas pluviales en estacionamientos. Caso: UNIMET. Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Metroplitana. Caracas

RAMOS, K.
(sf). Antecedentes de techos verdes. https://www.unicach.mx/_/ambiental/descargar/Gaceta8/Art4.pdf.

RAMOS, P.
2014. *La infraestructura Básica Hidrosanitaria y el proyecto urbano sustentable* Tesis de Maestría en Diseño Urbano. Programa de Postgrado. Unimet

TENNIS, P. D., M. L. LEMING AND D. J. AKERS
2004. *Pervious Concrete Pavements* EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004, 36 p.

UNESCO (UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION)
2018. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261605_spa

UNITED KINGDOM
2011. Flood Water and management Act 2010 Kingdom. www.legislation.gov.uk/ukpga/2010/29/contents. United Kingdom, Department for environment, food and rural affairs,2011 www.defra.gov.uk

VANWALLEGHEM,T., A. HAYAS, A. PEÑA, D. JIMÉNEZ-QUIÑONES, D. SÁNCHEZ Y J.V. GIRÁLDEZ
2015. Análisis de la escorrentía, la percolación y la evaporación en techos verdes usando áridos reciclados como sustrato. IV jornadas de Ingeniería del Agua, la precipitación y los procesos erosivos. Córdoba, España www.uco.es/jia2015/ponencias/m/019.pdf. 10p.

WOLMAN, A.
1965. The metabolism of Cities. *Scientific American,* 213(3):178. doi:10.1038/scientificamerican0965-178.

WOODS-BALLARD, B., R. KELLAGHER, P. MARTIN, C. JEFFERIES, R.BRAY AND P. SHAFFER
2007. *The SUDS manual* CIRIA C697. www.ciria.org.

WRIGHT-MCLAUGHLIN ENGINEERS
1977. Thompson Valley Estates Drainage Plan. https://archives.colostate.edu/repositories/2/archival_objects/40195.

NOTAS

[1] - Estres hídrico-cuando la demanda de agua supera la disponibilidad. Incluye la calidad del agua.

[2] - Subrayado en el original.

[3] - DANA es el acrónimo de Depresión Aislada en Niveles Altos, un sistema de bajas presiones que se ha separado por completo de la circulación general de la atmósfera. Se trata de un fenómeno atmosférico habitual y que puede producirse en cualquier momento del año, pero es especialmente peligroso en los meses de verano y otoño, cuando la temperatura superficial del mar es alta y hay más evaporación (es decir, las nubes que se forman por causa de la DANA con tienen más agua).

José Ochoa Iturbe

Ingeniero Civil (UCAB1976). Master in Business Administration, major environment (FAU2001). Estudios de doctorado completados (faltó tesis) (UCAB, 2005). Profesor jubilado (1980-2015) UCAB, donde fue Decano de la Facultad de Ingeniería, Director de la Escuela de Ingeniería Civil y Director del Postgrado de Ingeniería ambiental. Ex presidente de la SVIH (1999-2003) y de la Red Interamericana de Recursos Hídricos (1994-1996). Coautor de varios libros sobre temas de educación para la gestión del agua. Actualmente Profesor Asociado Universidad Metropolitana de Caracas y Vicepresidente de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (sillón XXVII).

CAPÍTULO VI

EL REÚSO SEGURO DE LAS AGUAS

El planeta tierra está sufriendo modificaciones importantes en su estructura, motivado en buena parte a prácticas no sostenibles que han hecho que se modifiquen en el ámbito climatológico. Evidencias de esas modificaciones se tienen principalmente en el cambio climático global, reflejadas en hipoxia en las costas o bajos niveles de oxígeno disuelto en las aguas que traen como consecuencia reducción de poblaciones y disminución de la pesca, lluvias copiosas en sitios donde antes la precipitación era poca o prácticamente nula, sequias prolongadas en áreas de mucha intensidad de lluvia con consecuencias verdaderamente desastrosas[1].

A eso le sumamos otros factores que inducen o incrementan estos riesgos para la seguridad hídrica como son la creciente demanda de alimentos, tanto por crecimiento demográfico como por cambios en la dieta, la demanda de agua para producción de alimentos y energía, los efectos del cambio climático y la deficiente gestión del agua (UN, 2024).

Todo ello ha obligado a realizar un análisis detallado de lo que se conoce como seguridad hídrica y su relación con el cambio climático global, así como la mejor manera para encararla y que no sea un arma terrible para la humanidad. La gestión deficiente del agua juega un papel fundamental en la salud y el bienestar del ser humano, en la lucha contra la pobreza y en el desarrollo económico; así, ninguna nación puede hoy minimizar la importancia de lograr una buena gestión del agua.

2. El reúso seguro de las aguas en el marco del desarrollo sostenible:

El ámbito del desarrollo sostenible puede dividirse conceptualmente en tres partes: social, económica y ambiental. Se considera el aspecto social por la relación entre el bienestar social con el medio ambiente y la bonanza económica.

Para que se den soluciones sostenibles, deben estar fundamentadas en el punto de encuentro entre los tres círculos que garantizan el desarrollo sostenible (Fig. 1).

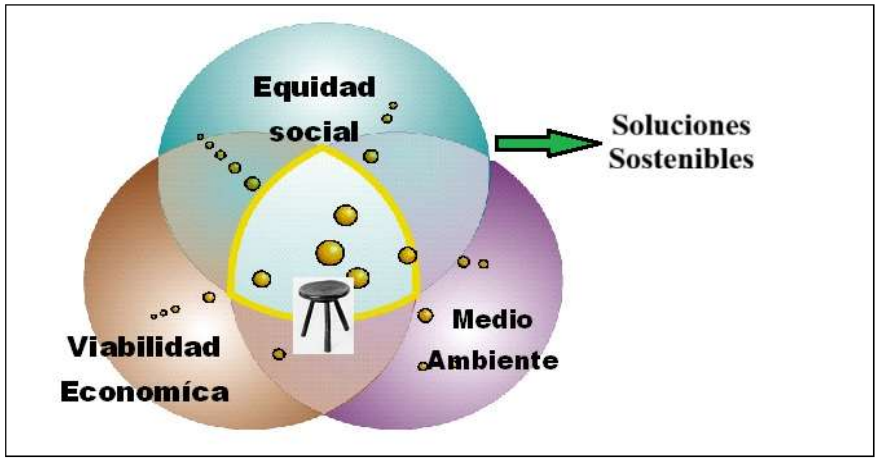


Figura 1. Triple Fondo de la Sostenibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Como se señala en la figura anterior, los tres aspectos fundamentales en el manejo integral del agua y que corresponden al triple fondo común son:

(i) Tener viabilidad económica o sea una excelente relación entre inversión inicial, costo operacional y de mantenimiento y el mejor beneficio ambiental.

(ii) Tener un importante nivel de justicia social, gubernamental y empresarial, expresado fundamentalmente por las escalas tarifarias para tener un servicio de óptima calidad y que incluyan una política de subsidios para las clases más necesitadas.

(iii) Que las soluciones contemplen desde todo punto de vista el medio ambiente, su preservación y conservación, garantizando los cuerpos de aguas, bosques, páramos, biodiversidad, entre otros.

Basándose en una de las definiciones del desarrollo sostenible con más fortaleza según Brundtland y que apareceen el documento de la ONU A/42/427 "Nuestro futuro común" (ONU, 1987) y que reza lo siguiente:

"*Es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades*",

Las soluciones a los problemas ambientales que no se consideren como sostenibles representan una sobrecarga al planeta. Se tienen claras evidencias de prácticas no sostenibles que han traído como consecuencia el cambio climático global, la disminución de la capa de ozono, hipoxia en las costas trayendo como consecuencia la disminución de la pesca, salinización de los suelos, procesos de desertificación, contaminantes emergentes en las aguas provenientes del uso de fertilizantes, biocidas, industrias, fármacos y drogas, entre otros.

Se debe mencionar que lo sostenible no es la tecnología sino como se integran los componentes del sistema total, por ejemplo:

(i) Controlar la fuente de generación de contaminantes en vez de tratarlos o sea, buenas prácticas de reducción y segregación.

(ii) Realizar prácticas de recuperación en vez de tener pérdidas.

(iii) Efectuar planes de reúso seguro en vez de tener que tratar.

La sostenibilidad tiene necesidades y da oportunidades y se refleja en la conciencia que hay que tener en aceptar los desafíos relacionados con ella en vez de su negación. El desarrollo sostenible debe permitir el acceso a las tecnologías de comunicación de última generación que permitan compartir información entre los países de una manera dinámica y sin restricciones, garantizando la globalización de actividades económicas las cuales hacen de cada nación una socia en un futuro compartido.

En resumen, se puede interpretar el desarrollo sostenible como un proceso dirigido a la satisfacción de necesidades, presentes y futuras que implica la conservación de la vida y la salud del hombre con educación de avanzada, con diversidad cultural y protección del ambiente, crecimiento económico, modernidad y avances tecnológicos en su beneficio.

El manejo sostenible del agua requiere de soluciones que se encuentren enmarcadas y adaptadas en la trilogía de sociedad justa, viabilidad económica y seguridad hacia el medio ambiente y que se esté dispuesto a aceptarlas, consolidando soluciones no convencionales.

Es importante señalar que en la actualidad el desarrollo sostenible tiene como pilar fundamental el agua, es decir que en cualquier punto del planeta se utiliza este vital líquido para todas las actividades cotidianas del ser humano, desde garantizar la seguridad alimentaria, el desarrollo industrial y comercial, las actividades recreativas y consumo de agua potable; sin em-

bargo, ese requerimiento no necesariamente tiene que ser de agua potable, excepto para consumo humano, sino de agua con excelente calidad que no tenga efectos adversos a la salud y el ambiente.

Ese espacio viene a ser llenado con el reúso seguro y la reutilización del agua. Razones como estas motivan a cada país a decidir hacer del agua un recurso renovable mediante la implementación de nuevas tecnologías en el tratamiento de sus aguas residuales y la incorporación cada día más arraigadas de buenas prácticas de reúso, que puedan ayudar a resolver la problemática del abastecimiento de agua para el consumo humano, industrial, comercial y agrícola, aprovechando su saneamiento estricto como una potencial fuente de recurso hídrico a través del reúso seguro.

3. **Algunos antecedentes históricos en el manejo del agua y saneamiento.**

En el transcurrir de la historia, los seres humanos han manejado el agua de acuerdo con sus necesidades. Así, la han almacenado y distribuido durante siglos. Las grandes civilizaciones por lo general se asentaban cerca de lagos y ríos; estas empezaban a desarrollarse y si no existían suficientes recursos disponibles de agua, la buscaban y trasladaban a los centros de consumo.

Según Tuset (2025), hace unos 7.000 años en Jericó, Israel, el agua de lluvia era almacenada en pozos que se utilizaban como fuentes de recursos de agua. Como debía ser trasladada de los pozos a otros puntos donde era necesario su uso, se empezaron a desarrollar los sistemas para su transporte y distribución. Este proceso se realizaba mediante canales sencillos, excavados en la arena o las rocas. Yadin (1977) menciona que en la época del rey Herodes hace unos 2000 años, en la montaña sagrada de Masada, ya existían canales alrededor de la misma, a fin de poder captar el agua que precipitaba en sus laderas, en la época de lluvia y de esa manera enviarla a unos tanques cisternas estratégicamente colocados en la montaña, de manera que se garantizara el recurso en la época más necesitada (Fig. 2). Sin embargo, a pesar de ello el agua seguía siendo escasa y ello obligó a que se comenzaran con prácticas de reúso, previo tratamiento en una especie de fosas sépticas, a fin de poder irrigar los jardines del palacio que había construido para su uso personal. Las fotografías siguientes muestran los canales y las cisternas en la ladera de la montaña

De igual manera, en la zona que actualmente es Israel, los romanos construyeron acueductos que transportaban el agua de lugares geográficamente más elevados, donde había mayor precipitación, a zonas más bajas o

zonas costeras del mar Mediterráneo, como es el caso del acueducto que va desde Jerusalén a Cesarea en donde el rey Herodes tenía un palacio que incluía el primer hipódromo para carreras de caballo de la historia antigua (Archeto, 2020). La Figura 3 muestra el acueducto, así como las fosas de almacenamiento y tratamiento de las aguas servidas, supuestamente empleadas para el reúso.

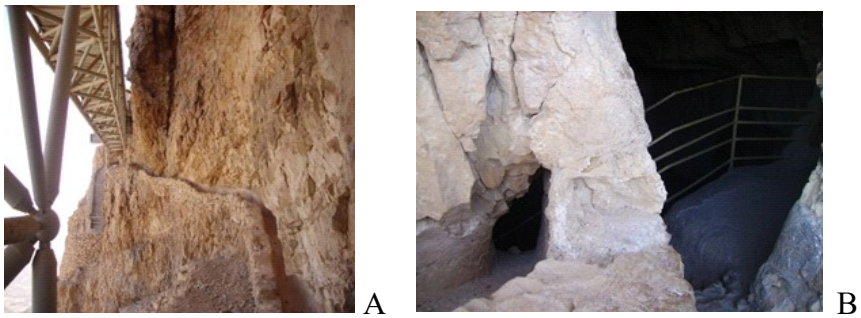


Figura 2. Canales de aducción a la cisterna (**A**) y Cisterna (**B**) construidos para la conducción y almacenamiento de aguas en Masada. Fuente: Fotos R. Dautant.

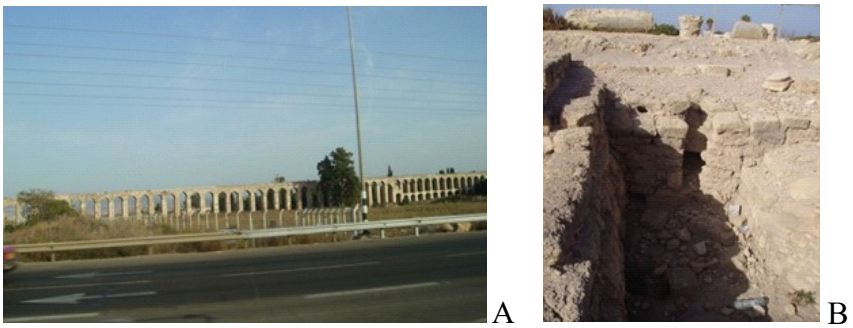


Figura 3. Acueducto romano (**A**) y fosa de agua residual Cesarea (**B**) en Jerusalén. Fuente: Fotos tomadas por R. Dautant.

En la época del emperador Constantino, en el siglo IV DC en Estambul se construyó una red de acueductos comparable con los ejecutados en Roma. Esos acueductos tenían las técnicas constructivas romanas y ratificaban su identidad como los grandes precursores de las obras de infraestructura sanitaria más importantes en la historia. Las redes más importantes llegaban a la antigua ciudad de Constantinopla (hoy Estambul) a la llamada Catedral del Agua o la Gran Cisterna, lugar donde se almacenaba para su posterior uso. Durante el imperio Otomano, prácticas de reúso eran efectuadas em-

pleando fosas de tratamiento como primer paso antes del reúso. La Figura 4 muestran parte de los acueductos y la Catedral de Agua.

Figura 4. Acueducto de Valente (A) y Catedral del Agua o la Gran Cesarea (B) en Estambul Turquía. Fuente: Fotos tomadas por R. Dautant.

Durante el imperio Otomano, prácticas de reúso eran efectuadas empleando fosas de tratamiento como primer paso antes del reúso. La Figura 4 muestran parte de los acueductos y la Catedral de Agua.

En la antigua Roma se realizaron grandes obras de infraestructura para el manejo integral del agua, entre las que se pueden destacar grandes acueductos que circundaban la ciudad como el Aqua Appia de 312 A C, el Aqua Vetus de 272 A C, entre otros y grandes sistemas de distribución de aguas residuales como la Cloaca Máxima (Lofrano y Brown, 2010) construida en el siglo IV antes de Cristo y que se dice fue la obra que elevó a Roma al estatus de ciudad, porque logró manejar los líquidos residuales que se producían en la ciudad (Angelakis et al., 2018). La Figura 5 muestra estas estructuras.

Figura 5. Acueducto romano (A) y la Cloaca Máxima (B) en Roma. Fuente: Fotos tomadas por R. Dautant.

En el siglo II antes de Cristo fue construida en México la ciudad sagrada de Teotihuacán, famosa por su arquitectura, grandes calzadas, pirámides e infraestructura sanitaria básica como el equivalente a un inodoro (figura 6 B), cita la Comisión Nacional del Agua de México (Conagua) (2,009), que en el año 1381 se construye el acueducto de Chapultepec por los Tenochcas (Fig. 6 A). En la ciudad de Querétaro entre los años 1726 y 1738, se construyó el acueducto de Querétaro financiado por el Márquez de la Villa del Villar del Águila (Fig. 7). En las fotografías que a continuación se muestran pueden verse estas maravillas historicas.

Figura 6. Extraordinarias estructuras precolombinas de construcción indígena (Tenochcas 1381) **A**: Acueducto (Pineda, 2020); **B**. Sanitario en el área de lo que hoy es Ciudad de México y Teotihuacan. Fuente: Fotos tomadas por R.Dautant.

Figura 7. Vistas del Acueducto de Querétaro en México construido entre 1726-1738 (A y B). Fuente: Fotos tomadas por R. Dautant.

4. El reúso seguro de las aguas en la nueva cultura del agua

Para los seres que poblamos el planeta Tierra, no es un secreto que estamos utilizando mal el recurso agua y que, de seguir así, en un futuro cercano, el agua será un recurso escaso, con un costo elevado y difícil de obtener. En consecuencia, solo un grupo privilegiado de personas podría tener acceso a ella.

Esto puede evitarse de muchas maneras, entre ellas; concientizando a la gente a su uso moderado, diseñando normas e implantando leyes para proteger su uso indiscriminado y maximizando el servicio prestado por este recurso vital.

En la concepción de la nueva cultura que debemos tener hacia el agua, esta se considera como un derecho fundamental e insustituible para la vida, ello contempla que el agua hoy es una necesidad y no una mercancía y como tal, debe tratarse como casos de estudio en cualquier país y en los foros internacionales. El derecho al acceso al agua potable y al saneamiento deben verse como un verdadero esquema simbiótico dado que uno depende del otro, cada vez que consumimos agua potable, parte ella se convierte casi de inmediato en aguas residuales; es por ello por lo que el acceso al agua potable trae como consecuencia realizar el saneamiento para que los cuerpos de agua no se comprometan. La Figura 8 esquematiza este concepto.

Figura 8. Esquema simbiótico del acceso al agua, uso y su saneamiento. Fuente: Elaboración propia.

Si ocurre que el derecho se da solo al acceso al vital líquido sin el posterior saneamiento, se traduciría en un derecho a contaminar, cuestión que sería funesto para los cuerpos de agua y altamente riesgoso para la salud.

El criterio que el derecho humano al agua tiene que venir acompañado de mecanismos para su aplicación y verdadero desempeño pues es sabido que al tener más agua potable implica mayores problemas de saneamiento (Triana Soto, 2017).

El manejo sostenible del vital líquido tiene como norte enmarcarse en las ocho "C" del agua, que a continuación se mencionan:

(i) Cuenca
(ii) Cantidad
(iii) Continuidad
(iv) Cobertura
(v) Calidad
(vi) Credibilidad
(vii) Contaminación
(viii) Cultura

Todas ellas, desde el momento en que se genera el agua en las cuencas como productores del líquido; pasando por la cantidad que se envía a cada sitio de la población; la continuidad con que es repartida si es de manera continua o discontinua y hasta qué punto de las poligonales urbanas se le da cobertura; la calidad asociada a la seguridad para consumirla; el alto, mediano o pobre nivel de credibilidad entre los usuarios; la contaminación asociada al agua que se encuentra en la red de distribución y los cuerpos de agua y la que se encuentra en los receptores finales y finalmente la cultura que se debe tener en relación a este valiosísimo recurso natural.

Las ocho "C" del manejo del agua deben estar en sintonía con las cuatro "E" de la sostenibilidad y que son señaladas como sigue:

(i) Economía
(ii) Energía
(iii) Ética
(iv) Ecología

La economía sencillamente se refiere a la viabilidad de poder efectuar las inversiones necesarias para lograr el objetivo final con excelentes condiciones económico financieras, Es muy importante en todos estos procesos de ejecución que se tenga en cuenta el consumo energético estrictamente requerido sin menoscabar la calidad de las soluciones, en un ambiente de total transparencia que refleje el nivel ético de los profesionales involucrados y comprometidos en las diferentes soluciones debidamente estructuradas y por ultimo teniendo siempre presente la seguridad ambiental para que se garantice la preservación ecológica del planeta.

Dentro de los grandes desafíos que tiene el sector agua potable y saneamiento uno de ellos es el de asegurar el acceso del recurso a los estratos sociales más necesitados que se encuentran en condiciones de frontera, así como el saneamiento en un marco de políticas claras de subsidio, ya sea directo o cruzado, pero que ello no represente por un lado que se incurra en el uso irracional del agua, así como pérdidas para las empresas o instituciones operadoras de los servicios de agua y saneamiento. Otro gran desafío es el de asegurar el agua para la producción de alimentos como un requisito indispensable en la seguridad alimentaria de los pueblos (CSA-HLPE, 2015).

El implementar estrategias de desarrollo económico de actividades humanas que requieran menos agua y produzcan menos desechos, se ha convertido en otro reto importante. Su aplicación logrará reducir el consumo de agua, el consumo energético, y la generación de aguas servidas. De esta manera garantizaremos la estabilidad sanitaria de los cuerpos de agua y alcanzaremos el mantenimiento de una tarifa justa que permita tener servicios públicos de primer nivel (WRI, 2021).

La Figura 9 esquematiza las posibilidades de plantas de tratamiento de aguas dentro de una población con desarrollo industrial, comercial y/o agrícola. En ella se puede observar que hay cinco tipos de plantas, las de potabilización (PTAP), las de aguas para uso industrial o comercial (PTAI), las que depuran las aguas servidas de las poblaciones (PTAS), las que tratan los efluentes industriales, comerciales o agrícolas (PTEI) y las que sirven como plantas de tratamiento para obtener agua de reúso seguro (PTARS).

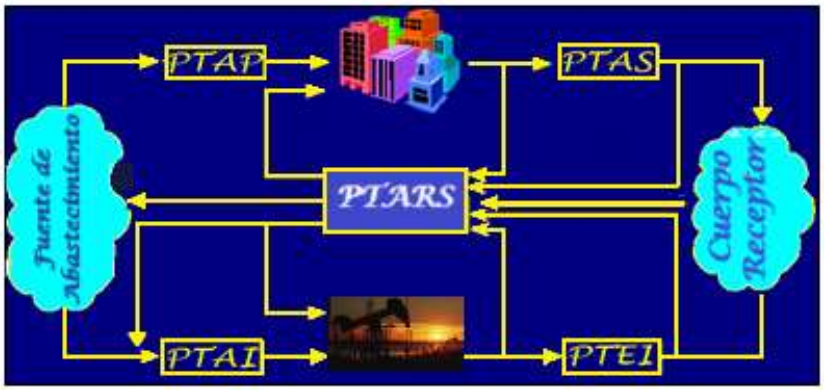


Figura 9. Esquemas de ciclos en diferentes plantas de tratamiento de aguas utilizadas por diferentes actividades. Fuente: Elaboración propia.

Cuando se habla de servicios públicos de agua y saneamiento, se refiere al agua potable que va desde las fuentes de captación como embalses, ríos, lagos, aguas de pozo profundo e inclusive el agua de mar. Su red de suministro va desde la fuente a los tanques de almacenamiento, a las plantas potabilizadoras y a la red de distribución, mejor conocida como acueductos.

Para este servicio público deberemos considerar también la captación de las aguas de lluvias a fin de ser conducidas a los cuerpos receptores y con esta nueva cultura del agua, debe considerarse su aprovechamiento para algunas necesidades sobre todo en épocas de verano o de sequía.

La recolección a través del alcantarillado sanitario o sistemas de redes cloacales, el tratamiento y la disposición final de las aguas servidas es otra de las actividades que deben estar contempladas. En los últimos tiempos existe una tendencia, en este cambio cultural, a diseñar lo que se conoce como aguas grises o sea las provenientes de los lavamanos y duchas, dado que ellas tienen una posibilidad mayor de reusarse a un costo bajo y lo que se conoce como acueducto gris que es aquel que transporta agua de reúso seguro para las actividades que después serán indicadas. La Figura 10 muestra una planta de tratamiento para la potabilización del agua y la otra para el tratamiento de efluentes industriales.

Otra actividad íntimamente relacionada con la potabilización y el saneamiento lo representan los lodos generados en ambos tipos de plantas los cuales deben ser recolectados, tratados, recuperados y dispuestos.

Figura 10. Plantas de tratamiento. A) Planta de potabilización; B) Planta de aguas residuales. Fuentes: cortesía de C A Hidrocentro y Avícola La Guasima.

5. Filosofía del reúso seguro de las aguas

Por definición, el reúso del agua es el uso del agua residual tratada en actividades municipales, industriales, comerciales y agrícolas de manera técnicamente confiable y ambientalmente segura. Por lo general representa un

servicio público con una escala tarifaria más económica que el servicio de agua potable y que con el incremento del consumo, la tarifa puede inclusive ser menor, lo que lo hace atractivo desde el punto de vista de costos para el municipio, comercio o la industria.

El reúso del agua se considera que es una manera de darle un uso inteligente al consumo de agua porque incorpora nuevamente agua al sistema sin tener que buscar nuevas fuentes de abastecimiento que en muchos casos se encuentran a distancias considerables.

Ensink y Caimcross, (2012), reflejan la situación a nivel mundial del acceso al agua potable mejorada y al saneamiento básico, entendiéndose por agua potable el agua que se usa para propósitos domésticos, beber, cocinar y para el aseo personal., mientras que el saneamiento básico es la tecnología de menor costo que asegure la disposición higiénica de los desechos. En la figura 11 se indica la cobertura mundial del agua potable y en la figura 12 la cobertura mundial del saneamiento básico. es importante mencionar que el acceso esta definido como una fuente a menos de 1 kilometro de distancia de su lugar de uso, capaz de proporcionar de manera confiable al menos 20 litros per cápita al día. El reúso seguro de las aguas puede ayudar sensiblemente a los países con problemas de escasez a complementar las necesidades de agua.

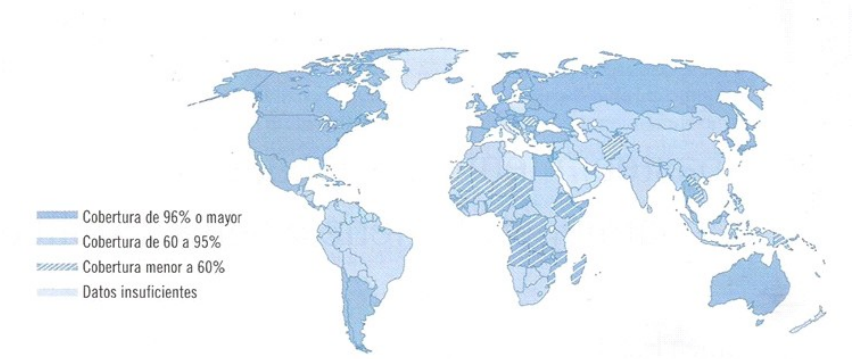


Figura 11. Mapa mundial que indica la cobertura por país de agua potable. Fuente: OMS, UNICEF, 2025.

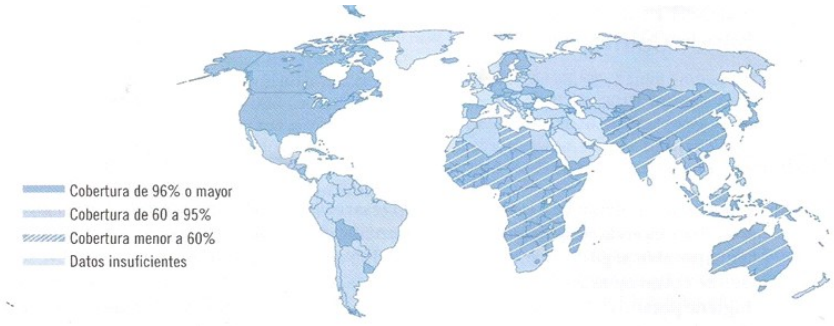


Figura 12: Mapa mundial que indica la cobertura por país en saneamiento básico. Fuente: OMS, UNICEF, 2025.

El reúso del agua está plenamente justificado por diversas razones entre las que se pueden nombrar la escasez del agua ya sea porque no se tiene disponibilidad o por periodos prolongados de sequía; tener acceso al servicio de agua en casos de emergencia, ayuda a contrarrestar los costos del servicio de agua potable; da un gran apoyo a la seguridad alimentaria; y permite el desarrollo de asentamientos humanos, de polos industriales y comerciales.

Para lograr el éxito en la aplicación de prácticas de reúso en el sector municipal se debe mantener al sector público en sintonía con las demandas de la comunidad sobre todo con las no satisfechas por falta del recurso y mostrándoles que el agua de reúso puede cubrir esas necesidades, De igual manera, que la comunidad comprenda la dimensión de los problemas del agua y saneamiento, de cuáles son sus causas y los posibles efectos a corto, mediano y a largo plazo. Es vital lograr que la comunidad participe en la construcción de una política para el sector que incluya el reúso como practica de alta prioridad y que se mantenga una real percepción de la dimensión de los problemas del agua y saneamiento.

Según la Water Environment Federation (WEF, 2.021), el reúso seguro del agua se inserta perfectamente bien en las tres R (3 R) (Reduce, Reúsa y Recicla). Esta es una propuesta dirigida a los hábitos de consumo, que pretende desarrollar el consumo sostenible. Este concepto hace referencia a estrategias para el manejo del agua que buscan ser cónsonos con el medio ambiente y específicamente dar prioridad a la reducción en el volumen de agua generados.

La Reducción está enfocada a como explotar al planeta lo menos posible, con un enfoque justo, ético y utilizar sus recursos de manera sostenible. El Reúso del agua permite consumir menor cantidad de agua dulce lo que redunda en un uso racional del recurso y es justamente lo que permite dar más de un uso al agua. El Reciclar implica utilizar el agua residual como materia prima para obtener agua de buena calidad.

En la denominada escalera del agua y saneamiento se considera que como mínimo deben considerarse los dispositivos para la disposición de excretas y los lavamanos, continuando con el saneamiento digno que señala suministro de agua en forma continua y con privacidad, en la búsqueda del nivel más elevado del saneamiento que considera manejo distinto de flujos, eliminación de patógenos, reúso de agua y nutrientes, todo ello incorporado en la nueva cultura del agua.

Cuando se detectan limitaciones con el suministro del agua, deben ejecutarse acciones como lo son el racionamiento en su cantidad, cobertura y continuidad, pero tal vez las más importantes son las relacionadas con el uso racional e inteligente del vital líquido, en donde el uso seguro del agua para el reúso tiene un papel protagónico a fin de poder satisfacer necesidades durante esos periodos. Ajustes tarifarios a veces son requeridos a fin de evitar el despilfarro en el uso de agua tendiendo a alcanzar la tarifa justa. El uso del concepto de agua virtual es otra de las herramientas que hoy día se tiene para contrarrestar la escasez o falta de agua. Por definición es el agua utilizada para producir bienes y servicios ya sean agrícolas o industriales y representa un instrumento esencial para calcular el uso real del agua de un país.

El modelo tradicional de manejar el agua ya no es sostenible, o sea partiendo de una fuente de abastecimiento para alimentar una planta potabilizadora a fin de convertirla en agua apta para el consumo y utilizarla en la población, colectar las aguas servidas y tratarlas para ser descargadas en un cuerpo receptor, todo esto sin tomar en cuenta los lodos generados tanto en la potabilizadora como en la depuradora, que no son opciones que representan el buen uso del recurso. El modelo tradicional en América Latina y el Caribe en muchos casos obedece a favores políticos, empleos no justificados (sobrempleo), contrataciones sin licitación, servicios de baja calidad y tarifas bajas. La Figura 13 presenta un esquema de la manera tradicional de manejar el agua.

El modelo modernizado se considera sostenible porque se encuentra soportado por un marco legal, tiene políticas de calidad claramente definidas,

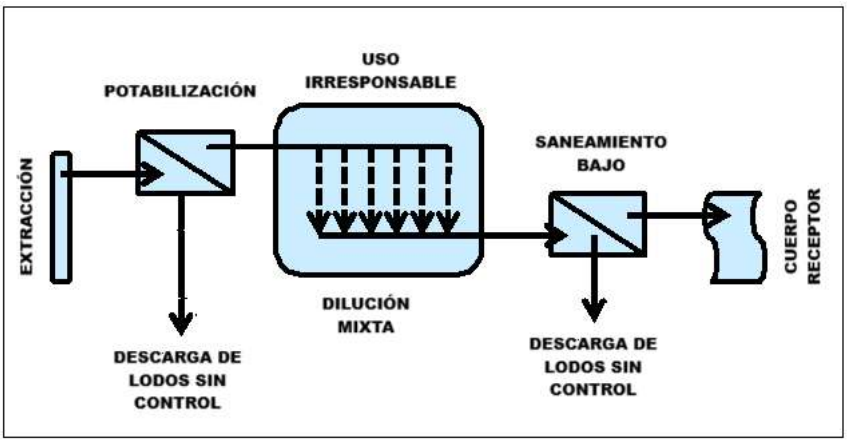


Figura 13. Esquema tradicional de manejo del agua. Fuente: Cadena Cepeda 2016.

políticas de subsidios, se realizan licitaciones competitivas, presta un servicio eficiente y de calidad, las tarifas son justas y que reflejan los costos. También el modelo modernizado considera la incorporación de las aguas grises colectadas de los lavamanos y duchas dentro de la población, así como el acueducto gris que transporta aguas de reúso provenientes de las plantas de tratamiento para tal fin.

Adicional a ello los lodos generados en las plantas potabilizadoras son manejados eficientemente con la posibilidad de recuperar algunos elemen-

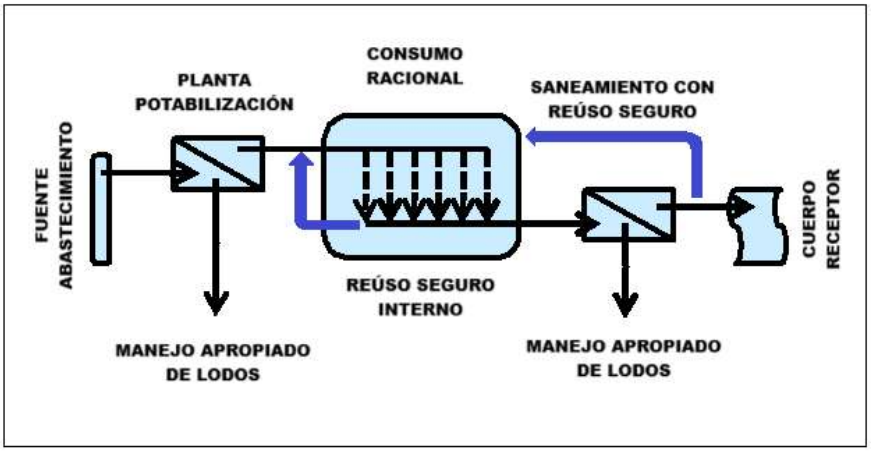


Figura 14. Esquema modernizado de manejo de agua. Fuente: Cadena Cepeda 2016.

cia con la posibilidad de generar energía o la de obtener compost como acondicionador de suelos. La Figura 14 muestra el esquema modernizado de manejar el agua.

6. El reúso seguro de las aguas y la seguridad hídrica

En términos generales, la seguridad hídrica se ha definido como:

> "*la provisión confiable de agua cuantitativa y cualitativamente aceptable para la salud, la producción de bienes y servicios y los medios de subsistencia, junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua*". (Grey y Sadoff, 2007a,b).

A partir de esta descripción, se puede definir como la capacidad de las sociedades para alcanzar una conducción exitosa e integral de sus recursos y servicios hídricos para cubrir las necesidades de cada una de las comunidades presentes en la sociedad antes mencionada, la seguridad hídrica debe ir con el crecimiento de las ciudades, y de la población en general. Sin seguridad hídrica la calidad de vida de las poblaciones que allí habitan se verá afectada en el crecimiento y bienestar, entre otras cosas que influyen en este ámbito.

La Water Environment Federation (WEF) (2.021), sostiene que la alta demanda del agua para consumo en áreas urbanas así como las exigencias en la calidad del agua una vez tratadas, ha hecho que se nuestre interés en el reúso seguro de las aguas. Si se sigue con la alta tasa de crecimiento poblacional, el agua disponible para satisfacer la demanda, solo representa apenas el 2% del agua sobre la tierra.

De la Peña *et al.*, (2022), plantean que el crecimiento acelerado de la población, así como los efectos del cambio climático, contribuyen a la profundización de las desigualdades en el acceso al agua potable y su saneamiento en América Latina y el Caribe, ello obliga a generar políticas públicas que permitan lograr el saneamiento seguro y de esa manera reducir el impacto al medio. Es por ello que el tratamiento y posterior reúso de las aguas residuales de manera segura, representan una oportunidad a los efectos de reducir la escasez, alcanzar la seguridad hídrica y el saneamiento ambiental.

5.1 Fundamentos de la seguridad hídrica

Al saber cómo se define, debemos saber en qué se fundamenta. Tener seguridad hídrica envuelve la capacidad de proveer agua en suficiente cantidad y calidad para satisfacer las necesidades industriales, agrícolas, domésticas y energéticas. Por esa razón, para garantizarla, además de pensar en sistemas de tratamiento de aguas, líneas de aducción, drenaje sanitario,

pluvial, y demás obras de infraestructura que permiten llevar el agua hasta las ciudades, así como su saneamiento, es fundamental preservar la integridad de los sistemas ambientales que son la fuente natural del agua. La seguridad hídrica permite hacer uso ambiental del agua o sea restablecer la salud de los ecosistemas acuíferos y ríos a escala regional, nacional y global; hacer uso doméstico para satisfacer las necesidades sanitarias y de agua para el consumo en los hogares de todas las comunidades urbanas y rurales; y hacer uso económico para utilizar el agua con el propósito de fomentar el crecimiento económico a partir de la producción de alimentos, productos industriales y energía; hacer uso en las ciudades a fin de desarrollar metrópolis y ciudades saludables, dinámicas y habitables con una sólida cultura del agua.

Motivado a que el cambio climático ha hecho modificaciones en nuestra calidad de vida como generar escasez en áreas pobladas, el reúso de las aguas de manera segura permite tener una nueva fuente de suministro de agua para diversos usos empleando el criterio de reutilización/reúso.

5.2 Clasificación del reúso del agua

La clasificación se basa en cómo es suministrada el agua, proveniente del reúso, a los diferentes potenciales usuarios, así como la fuente de generación del agua a ser reusada. Se llamará de uso indirecto cuando se toma de un cuerpo receptor y de uso directo cuando el agua residual tratada se convierte en la fuente de agua.

Figura 15. Modelo tradicional de manejo y uso de agua. Elaboración propia.

A los efectos de entender mejor esta clasificación, se denominará cuerpo de agua a aquel que recibe descargas de aguas residuales tratadas, parcialmente tratadas o sin ningún tratamiento, lo que la convierte en una fuente de agua insegura. Antes de hacer la clasificación de las aguas de reúso seguro, se muestra la Figura 15 con un esquema típico de manejo de agua.

Como se puede observar, este es el diagrama ideal y que muchos países tienen que emplear para que se asegure que la población reciba una calidad de agua apropiada y así se garantiza el saneamiento de las aguas residuales.

A continuación, se presenta la clasificación de los diferentes tipos de reúso del agua:

(i) Reúso seguro potable indirecto planificado.

(ii) Reúso seguro industrial indirecto planificado.

(iii) Reúso seguro potable directo planificado.

(iv) Reúso seguro industrial directo planificado.

(v) Opciones de reúso seguro del agua en cuerpos de agua ambientalmente comprometidos.

(vi) Reúso inseguro potable indirecto no planificado.

Las siguientes figuras ilustran esta clasificación.

(i) Reúso seguro potable indirecto planificado (ver Figura 16): Esto ocurre cuando el agua es captada de una fuente de abastecimiento que a su

Figura 16. Esquema cíclico del procedimiento de tratamiento y reúso seguro potable indirecto planificado del agua. Elaboración propia.

vez es cuerpo receptor en donde son vertidas aguas residuales tratadas de acuerdo con las normativas ambientales vigentes en los países, o aguas servidas con poco tratamiento o sin tratamiento. Este ipo de reúso seguro incluyen etapas en el proceso de tratamiento con miras a ser reusada. Ello implica un monitoreo permanente y estricto de la calidad de las aguas tanto de la fuente de abastecimiento como del agua una vez potabilizada.

Figura 17. Esquema cíclico del procedimiento de tratamiento y reúso industrial seguro indirecto planificado del agua. Fuente: Elaboración propia.

(ii) Reúso seguro industrial indirecto planificado (ver Figura 17): Esto ocurre cuando el agua del cuerpo receptor (fuente de agua) es captada para ser enviada a una zona industrial. Las aguas residuales vertidas deberán ser tratadas de acuerdo con las normativas ambientales vigentes en los países. En este caso la industria debe tener estricto control sobre la calidad de las aguas que recibirá y cumplir con etapas de tratamiento adicionales si así lo requiere en función del uso que le darán al agua.

(iii) Reúso seguro potable directo planificado (ver Figura 18). Representa el nivel de máxima exigencia entre la clasificación de aguas de reúso seguro. Esto ocurre cuando el agua residual tratada es captada como fuente de agua para consumo humano. Aquí se incluyen etapas de tratamiento avanzado con tecnologías debidamente comprobadas, con estudios muy estrictos en las áreas de ingeniería, bioensayos y área social, para garantizar su aceptación. Ello implica un monitoreo permanente y estricto de la calidad de las aguas ya potabilizadas. Por lo general son diluidas con agua

Figura 18. Esquema cíclico del procedimiento de tratamiento y reúso seguro potable directo planificado del agua.Fuente: Elaboración propia.

dulce y su uso se lleva a cabo en países con escasez extrema de agua o que por su tamaño y desarrollo industrial así lo requieran. Experiencias en países como Namibia, Israel y Singapur son dignas de conocer pues representan un nuevo servicio para el suministro del agua potable y aseguran la independencia en el sector. El caso de Namibia es de especial atención pues es la

Figura 19. Esquema cíclico del procedimiento de tratamiento y reúso seguro Industrial directo planificado del agua.Fuente: Elaboración propia.

primera planta de reúso directo potable planificado instalada en su capital Windhoek (Wickhan, 2023).

(iv) Reúso seguro industrial directo planificado (ver Figura 19)**.** Ocurre cuando es captada el agua residual tratada como fuente de agua para consumo industrial en áreas de producción, mantenimiento, lavado de maquinaria, lavado de camiones, paisajismo, riego de áreas verdes entre otros**.** Estas incluyen etapas de tratamiento avanzado.

Por lo general se asume una buena calidad a la entrega y la industria deberá adaptarla**,** si así lo considera en sus requerimientos industriales o en sus procesos de fabricación. Ello implica un monitoreo permanente y estricto de la calidad de las aguas que le sean entregadas. El reúso del agua para la industria representa una alternativa de servicio público a un costo menor que si utilizara agua de la red de agua potable; muchas ciudades en el mundo tienen acueducto gris o sea que contiene agua de reúso seguro a un costo menor por unidad de volumen.

(v) Opciones de reúso seguro del agua en cuerpos de agua ambientalmente comprometidos (Figura 20)**.** Es muy común ver en algunos países**,** situaciones diversas en donde las aguas residuales tanto de origen sanitario como efluentes industriales son vertidas a los cuerpos de agua sin tratamiento, con tratamiento incompleto o plantas de tratamiento de aguas residuales que operan de manera deficiente o sencillamente no operan. Esto trae como consecuencia que los cuerpos receptores poco a poco vayan perdiendo su calidad originaria y se convierten en cuerpos receptores ambientalmente comprometidos que les impide ser potenciales fuentes de abastecimiento para agua potable.

Figura 20. Esquema cíclico del procedimiento de tratamiento y reúso seguro en cuerpos de agua comprometidos.Fuente: Elaboración propia.

Esos cuerpos de agua van adquiriendo calidad físico química y microbiológica fuera de los estándares tradicionales de calidad como fuente para potabilizar, comienzan a eutrofizarse, trayendo como consecuencia crecimiento excesivo de plantas acuáticas y algas, acelerando el desecamiento de la fuente de agua; es por ello que cuando un cuerpo de agua se encuentra con elevado compromiso ambiental, el reúso seguro del agua es una herramienta empleada en recuperar ese cuerpo de agua, acompañado de programas integrales de saneamiento para identificar, estudiar y tratar las aguas que originan el compromiso ambiental. En la figura 19, se puede observar que los cuerpos de agua comprometidos ambientalmente podrían representar materia prima para reúso potable, reúso industrial y reúso agrícola.

(vi) Reúso inseguro potable indirecto no planificado (ver Figura 21**).** Es común ver en algunos países que el agua que es utilizada como fuente de abastecimiento está comprometida ambientalmente y a pesar de ello, es procesada en plantas de tratamiento de potabilización con las consecuencias de riesgo a la salud, estrés en los organismos encargados de hacer la vigilancia y control, asi como en los organismos operadores, de salud pública, en la sociedad organizada, colegios profesionales y universidades, porque se piensa que no se está consumiendo agua de buena calidad; en pocas palabras, no hay confianza en el agua potable porque su origen se encuentra en cuerpos de agua ambientalmente comprometidos**.** Cuando los cuerpos de agua presentan estas características, se limita a la planta potabilizadora para que pueda operar a su capacidad nominal, disminuyendo sustancialmente el agua que es enviada a la red pública, sin poder satisfacer la demanda. Todo ello se solventaría con un programa de saneamiento inte-

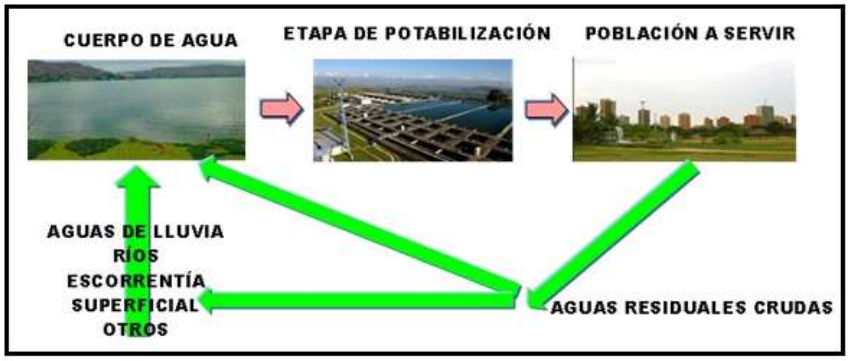


Figura 21. Esquema cíclico del procedimiento de tratamiento y reúso inseguro potable indirecto en cuerpos de agua comprometidos. Fuente: Elaboración propia.

gral de las aguas residuales que son vertidas de manera directa o indirecta a los cuerpos de agua.

7. Aplicaciones del reúso seguro del agua

En el uso sostenible del agua reusada según Jiménez y Rámos (1999), así como experiencias en industria y comunidades, existen muchas opciones a la hora de utilizar agua residual tratada. Las aplicaciones más comunes son:

(i) El lavado de camiones, maquinaria pesada, trenes, aviones;

(ii) Irrigación de cultivos, campos de golf, paisajismo, zonas verdes residenciales y de cementerios;

(iii) Mantenimiento de lagos artificiales, lagunas ornamentales;

(iv) La recarga de acuíferos;

(v) Control del polvo en vías de comunicación rurales;

(vi) Mejora de ecosistemas;

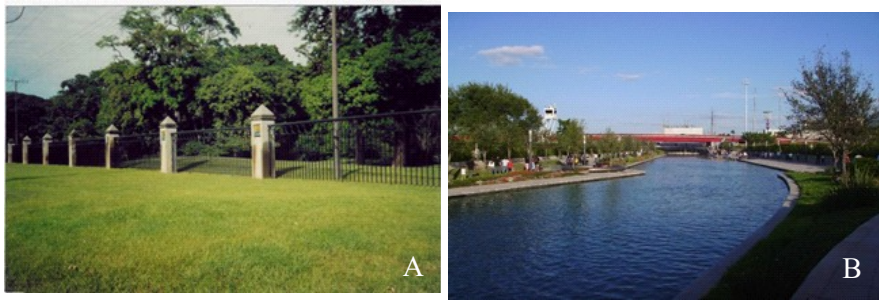


Figura 22. Reúso del agua para irrigación de áreas verdes (A) Paisajismo en ciudades (B). Fuente: Fotos tomadas por Rafael Dautant.

(vii) Uso sanitario de inodoros y urinarios;

(viii) Aguas de enfriamiento y aguas para calderas en plantas industriales;

(ix) Mantenimiento de los niveles de agua en los sistemas contra incendio;

(x) Consumo de agua potable de manera directa o indirecta, entre muchos otros.

En la figura 21, se muestran algunas de las aplicaciones anteriormente mencionadas.

Existen algunas limitaciones que se deben tomar en cuenta al momento de plantear soluciones empleando el reúso del agua sobre todo si la gestión no es adecuada. Entre estas limitaciones se pueden mencionar:

(i) La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas;
(ii) Problemas de salud pública relacionados con la presencia de patógenos;
(iii) Efecto de la calidad del agua sobre el suelo y las cosechas;
(iv) Presencia de contaminantes tales como los compuestos químicos orgánicos de trazas y sus efectos tóxicos.

La clave para hacer reúso seguro del agua es contar con una gama completa de tecnologías disponibles para eliminar de manera eficiente los contaminantes contenidos en las aguas residuales. No existe desarrollo tecnológico alguno que pueda eliminar eficientemente todos los tipos de contaminantes, sin embargo, existen procesos de avanzada que pueden reducir la concentración de cualquier contaminante a niveles aceptables para cualquier uso del agua.

8. Conclusiones

El reúso seguro del agua como un servicio público y/o privado, es un complemento que acompaña el suministro de agua a países con crecimiento y desarrollo industrial acelerado, sobre todo aquellos en vías de desarrollo.

En los países donde se emplea este servicio como parte del suministro de agua, representa un ahorro en los costos de los servicios de agua y saneamiento dado que su tarifa es menor que la del agua potable pues considera que los costos aplicados al reúso comienzan una vez cumplidos los niveles de calidad de las aguas residuales exigidos en las reglamentaciones ambientales de los países; por otra parte, al tratar las aguas residuales que tienen como objetivo al reúso seguro, se contribuye a minimizar el aporte de cargas contaminantes a los cuerpos de agua.

Un aspecto importante cuando se hace reúso seguro de las aguas tratadas es que las empresas operadoras de agua y saneamiento hacen uso inteligente del agua, o sea dotan del vital líquido a un sector de la población sin tener que traer agua de sitios remotos, empleando el agua generada a través de las aguas residuales, dándoles el tratamiento apropiado.

El reúso seguro permite balancear la distribución desigual del agua, integrando los sistemas de tratamiento al uso del agua residual una vez tratadas, combatiendo de manera sostenible, entre otros, los embates del cambio climático aportando soluciones que se alineen con la seguridad hídrica.

El servicio público de reúso seguro ofrece economía en el suministro de agua potable sobre todo para la actividad industrial, comercial y agrícola, logrando enfrentar situaciones de escasez de agua en periodos de sequía y apoyando sensiblemente en la dotación de agua para garantizar la seguridad alimentaria.

Literatura Citada

ANGELAKIS, A., T. ASANO, A. BAHRI, B. JÍMENEZ AND G. TCHOBANOGLOUS
2018. Water reuse: From Ancient to Modern Times and the Future, *Environ. Sci.* vol 6, 2018. http://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026

ARCHETO, M. B.
2020. Playa de Israel que posee un acueducto del Imperio Romano. https://www.traveler.es/naturaleza/articulos/cesarea-playa-de-israel-con-un-acueducto-del-imperio-romano/18445.

CSA-HLPE (COMITÉ DE SEGURIDAD ALIMENTARIA MUNDIAL)
2015. Contribución del agua a la seguridad alimentaria y la nutrición. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición, CS-HLPE, Informe 9. Roma 2015.

DE LA PEÑA, M, C. LARREA, K. SASAKI Y D. SMITH
2022. El reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe: 10 casos de estudio. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). División de agua y saneamiento. Nota Técnica.

ENSINK, J.H. AND S. CAIRNCROSS
2013. Abastecimiento de agua, saneamiento, hygiene y salud pública. https://www.researchgate.net/publication/291837532

GREY, D. AND C. SADOFF
2007a. Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy* 9:545-571.

GREY, D. AND C SADOFF.
2007b. TEC N°14 - GWP 2010 - www.gwp.org/es/GWP-Sud-America.

JIMÉNEZ C., B. E. Y J. RAMOS H.
2017. Reuso posible del agua residual en México. Series del Instituto de Ingeniería 617. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). http://datosabiertos.unam.mx/IINGEN:RUSI:617

LOFRANO, G. AND J. BROWN
2010. Wastewater management trough the ages: A history of mankind. *Science of the Total Environment*, Vol. 408, Nº 22,15.

OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD)
2025. Galería de Mapas. https://www.who.int/data/gho/map-gallery-search-results?&maptopics=0b24388a-5ace-4e7f-883f-51f00f21064f.

ONU (ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS)

1987. Asamblea General. Doc. A/42/427. Informe de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo. Informe "Nuestro Futuro Común" https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N87/184/70/PDF / N8718470.pdf?OpenElement

PINEDA MENDOZA, R.

2000. *Origen, vida y muerte del acueducto de Santa Fe*. México: UNAM. pp. 21 a 33. 968-36-6926-3.

TRIANA SOTO, J.

2017. Del derecho al agua al derecho a la paz. Seminario. https://colombia.encuentromundi.org/triana-soto-jorge/

TUSET, S.

2025. Historia sobre el tratamiento del agua potable. https://condorchem.com/es/blog/ 2025.

UN (UNITED NATIONS)

2024. Water for prosperity and peace**.** UN World Water Development Report 2024. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948

WEF (WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION)

2021. Industrial Water Reclamation and Reuse to Minimize Liquid Discharge. Published by the Water Environmental Federation. https://prod.wef.org/publications/publications/books/industrial-water-reclamation--reuse/

WICKHAM, B.

2023. Windhoek's Pioneering Water Reuse System: Turning Wastewater into Drinking Water.Namibia Daily News, sept.1, 2023. https://namibiadailynews.info/windhoeks-pioneering-water-reuse-system-turning-wastewater-into-drinking-water/

WRI (WORLD RESOURCES INSTITUTE)

2021. Aqueduct Water Risk Atlas 2021. https://www.wri.org/data/aqueduct-water-risk-atlas

YADIN, Y.

1977: Los Pioneros. (p.252-253) En: *La fortaleza de Herodes y el último bastión de los zelotes.* Ediciones Destino. Barcelona. https://www.bibliothecasefarad.com/listado-de-libros/masada-la-fortaleza-de-herodes-y-el-ultimo-bastion-de-los-zelotes-2/

Rafael Daudant

Ingeniero civil y maestría en ingeniería ambiental en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Asistente a congresos de ingeniería sanitaria y ambienta en Norte, Centro y Suramérica. así como seminarios especializados en Hungría, Alemania, Francia, China, Israel, Austria, Dinamarca, Estados Unidos y Japón. Director técnico de Diseños Ambientales, Venezuela. Diseñador de más de 300 proyectos de tratamiento de efluentes industriales y sanitarios. Profesor Titular activo de la Universidad de Carabobo con 47 años en pregrado y maestría. Presidente de la Asociación Venezolana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AVISA). Vicepresidente internacional de los países bolivarianos de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Presidente de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Autor de cuatro libros en el área de tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos. Autor de más de 160 trabajos técnicos presentados en simposios, congresos y seminarios.

CAPÍTULO VII

EL SUELO: COMPONENTE ESENCIAL DE LOS ECOSISTEMAS

1. Introducción

El suelo es el manto que cubre la superficie de la corteza terrestre. Constituye la capa de transición entre el substrato geológico, por una parte, y la cobertura vegetal y la atmósfera, por la otra. Por analogía, algunos le llaman la epidermis de la tierra, porque es una capa muy delgada en comparación con el grosor total de la corteza terrestre. Sin embargo, su importancia va mucho más allá de su tamaño, ya que esta capa es muy dinámica y juega un papel crucial como sostén de los ecosistemas terrestres.

Por diversos motivos, el destino de los suelos es motivo de interés de toda la sociedad. En primer lugar, el 95 % de los alimentos que consumimos proviene de plantas cultivadas en el suelo. Además, el suelo juega un papel fundamental en la producción forestal y sirve de soporte a las obras de infraestructura. Asimismo, aporta servicios ambientales esenciales como el almacenamiento y purificación del agua, la regulación del clima y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, el suelo es un elemento natural muy frágil, cuya formación y regeneración es mucho más lenta que los procesos que contribuyen a su degradación y destrucción.

2. Evolución del Concepto de Suelo

Nuestro modelo mental del suelo ha variado a través del tiempo, a medida que ha aumentado el conocimiento sobre este cuerpo natural y su entorno (Cline, 1961). La relación de los seres humanos con el suelo se remonta a la prehistoria. Se presume que cuando el hombre era nómada aprendió a reconocer los sitios donde el suelo tenía condiciones favorables para transitar o pernoctar. De esta forma, el concepto del suelo como material de soporte fue quizás el primero que se formó en la mente del hombre (Simonson, 1968). Este concepto ha evolucionado a través del tiempo y aún permanece

vigente, asociado a las disciplinas de ingeniería civil y mecánica de suelos. Más tarde, cuando el hombre comenzó a cultivar la tierra, desarrolló el concepto del suelo como medio para el crecimiento de las plantas. Concepto que hoy prevalece en centros de enseñanza e investigación agrícola.

El desarrollo científico en el siglo XIX despertó el interés de investigadores en geología, química y biología, por el estudio del suelo. Este se consideraba como un sustrato inerte, producto de las transformaciones fisicoquímicas de las rocas, del que las plantas extraían elementos minerales nutritivos. A finales de ese siglo, el trabajo de Dokuchaev en Rusia, introdujo el concepto del suelo como un cuerpo natural, en el cual se desarrollan procesos complejos por la acción conjunta del agua, el aire, materia orgánica y diversos tipos de organismos vivos. La naturaleza y propiedades de este cuerpo varía por la influencia de factores ambientales, particularmente geológicos (material parental), climáticos, topográficos y el tiempo durante el cual estos factores han actuado. Este concepto ha constituido la base para reconocer y clasificar los distintos tipos de suelo, estudiar su naturaleza, propiedades, funciones, génesis y distribución espacial.

Desde el último cuarto del siglo XX ha crecido la preocupación mundial sobre el deterioro ambiental y su amenaza para el futuro de nuestro planeta. Se señalan como causas de este deterioro la industrialización y los sistemas agrícolas de altos insumos, en los países desarrollados, así como la degradación y el agotamiento de los recursos naturales en los países en desarrollo. Esta preocupación ha dado origen a dos nuevos conceptos: el suelo como un manto transmisor de agua y el suelo como un componente del ecosistema (Dumansky, 1994). Estos conceptos destacan el papel crucial del suelo en el mantenimiento del equilibrio ambiental y subrayan la necesidad de prácticas de gestión sostenible para proteger este recurso vital.

La noción del suelo como un manto transmisor de agua sirve de fundamento a los estudios de prevención de contaminación de aguas subterráneas por productos tóxicos de origen agrícola, industrial o municipal. Una vez que un contaminante entra en el agua subterránea, la contaminación es prácticamente irreversible o puede ser remediada sólo a un costo muy alto. Por esta razón, los problemas de contaminación de aguas subterráneas deben ser tratados o prevenidos mediante un manejo apropiado de la zona no saturada. Los procesos de transporte de agua en la zona no saturada tradicionalmente han sido tema de estudio del suelo como medio para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la investigación sobre problemas de contaminación ha tenido las siguientes consecuencias. En primer lugar, la

investigación no debe restringirse a la profundidad hasta donde penetran ls raices de las plantas, ahora son de interés los procesos de flujo y transporte desde la superficie del suelo hasta el nivel freático (la zona vadosa). Segundo, el estudio del suelo debe prestar atención al transporte de otros fluidos distintos al agua como los hidrocarburos, por ejemplo, ya que la contaminación con líquidos no acuosos se ha convertido en un problema cada vez más crítico en muchos países.

Por otra parte, el estudio del suelo como un componente esencial del ecosistema, que recibe, transmite y responde a los aportes de los otros components, es el modelo conceptual más reciente de este recurso natural. Este paradigma enfatiza la necesidad de estudiar aspectos tales como regímenes y gradientes ambientales regionales, trayectoria de compuestos químicos a través del espacio y el tiempo, tasas de cambio en los procesos del ecosistema, ciclos de nutrientes, flujos de energía, niveles tróficos y procesos de transporte. Los procesos biológicos y bioquímicos, así como la acumulación y descomposición de materiales orgánicos en el suelo son áreas esenciales de estudio. Este concepto de suelo es más holístico y permite integrar a los otros modelos descritos previamente. La complejidad del suelo y sus interacciones con los otros componentes del ecosistema impone la necesidad de prestar mayor atención a la dinámica de los procesos y al desarrollo de modelos más integrales.

Hoy, particularmente, existe un gran interés con relación al potencial del suelo como sumidero de carbono, y su capacidad para reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. En adición a esto, las tecnologías para la gestión sostenible de los suelos son fundamentales para la adaptación de la agricultura al impacto del cambio climático.

3. Composición del Suelo

Los atributos y la composición del suelo varían de un lugar a otro. Por lo cual, se pueden reconocer diferentes tipos de suelo; pero todos están compuestos por los mismos constituyentes principales (materia mineral, materia orgánica, organismos vivos, agua y aire), organizados en un sistema de tres fases (sólida, líquida y gaseosa). Asimismo, todos los suelos tienen perfiles con horizontes o capas y ocupan un espacio particular (Simonson, 1959).

La materia mineral del suelo es producto de la meteorización de rocas formadas, originalmente, bajo condiciones de alta presión y temperatura y ausencia de oxígeno y actividad biológica en el interior de la corteza terrestre. Estas rocas ascendieron a la superficie terrestre por erosión de los

materiales suprayacentes. Allí quedaron expuestas a un entorno significativamente diferente, caracterizado por presión y temperatura menores, y niveles de humedad, oxígeno y actividad biológica mayores que las prevalecientes en su ambiente de formación. Como resultado, las rocas en la superficie terrestre o cerca de ella, son sometidas a procesos de meteorización que ocasionan su desintegración y la transformación de sus minerales constituyentes, a formas más estables en su nuevo entorno, como se ilustra en la Figura 1.

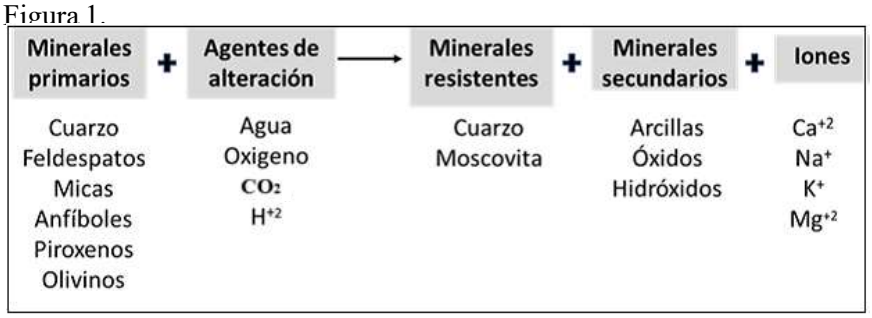


Figura 1. Ecuación general de la meteorización química de minerales.Fuente: Elizalde (2006).

El suelo no se forma directamente sobre roca fresca. Previamente a la formación del suelo, la meteorización altera la roca sólida y la convierte en regolito. Este es un material no consolidado compuesto por fragmentos de roca y granos minerales alterados, que descansa sobre la roca inalterada de la cual se deriva. El regolito es el material parental en suelos formados *in situ,* denominados también suelos residuales. Alternativamente, el regolito y el suelo formado sobre él pueden ser transportados por erosión y depositados como sedimentos en otro lugar, donde se convertirán en material parental de un nuevo suelo.

Por su tamaño, las partículas minerales del suelo se clasifican en esqueleto grueso, si son mayores de 2 mm (grava, guijarros, piedras) y tierra fina (arena, limo y arcilla). La proporción de partículas de arena, limo (<0,5 mm o 50 μ y arcilla (< 0,002 mm o 2 μ) determina la textura del suelo. Esta es más gruesa, si predominan las partículas de arena, y más fina, si predominan las de arcilla. Las partículas de tamaño arcilla corresponden, mayormente, a minerales secundarios que son producto de la meteorización de otros minerales previamente existentes. En cambio, las partículas del suelo más gruesas están constituidas, predominantemente por minerales que han resistido a la meteorización. Por esto, las partículas minerales del suelo difieren entre sí no solo por su tamaño sino también por su composición y sus propiedades.

Así, las partículas más gruesas constituyen el armazón del suelo, pero no son reactivas. En cambio, las partículas de arcilla poseen propiedades coloidales, porque tienen una gran superficie externa por unidad de masa y están cargadas negativa o positivamente, de acuerdo con su composición mineral y grado de meteorización. Por esto, estas partículas participan en muchas de las reacciones químicas y fisicoquímicas que ocurren en el suelo.

Por otra parte, la materia orgánica del suelo es el resultado de la descomposición de residuos vegetales y animales por acción de los organismos que habitan en el suelo y está formada por moléculas cargadas negativamente. Gracias a estas cargas negativas y a su gran superficie específica, las partículas orgánicas también tienen propiedades coloidales. La materia orgánica del suelo incluye un conjunto de diversas formas moleculares, unas más estables que otras. En ella se pueden distinguir, en general, tres fracciones diferentes en función de su estabilidad física y química. Primero, una fracción lábil o activa, formada por residuos vegetales recientemente incorporados que pueden ser descompuestos por la biota del suelo en 1 o 2 años. Segundo, una fracción intermedia que incluye el carbono orgánico del suelo parcialmente estabilizado en superficies minerales o protegido dentro de agregados, con persistencia de 10 a 100 años. Por último, una fracción resistente o estable que corresponde al carbono orgánico unido a moléculas minerales con persistencia de 100 a más de 1000 años.

Las cargas de las partículas de arcilla y de materia orgánica influyen de manera determinante sobre las propiedades químicas y físicas del suelo. En particular, las cargas negativas de estas partículas coloidales se unen con las cargas positivas de iones como el calcio (Ca++), el magnesio (Mg++), el sodio (Na+), el potasio (K+) y el amonio (NH4+). Esta interacción impide la lixiviación de estos iones a medida que el agua se desplaza por el suelo, garantizando su retención y disponibilidad para la nutrición de las plantas. Además, las cargas negativas de las partículas coloidales interactúan con los iones de metales pesados con carga positiva, inmovilizando estos cationes dentro de la matriz del suelo. Al retener los metales pesados, los coloides del suelo mitigan el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y reducen la probabilidad de que estas sustancias tóxicas entren en las cadenas alimenticias a través de la absorción vegetal. Esta doble función subraya la importancia de los coloides del suelo para mantener la fertilidad del suelo y proteger la salud ambiental.

Los cationes retenidos por las cargas negativas de las partículas coloidales del suelo pueden actuar como puentes de unión entre coloides adyacentes

que forman flóculos. Estos, junto con la acción de los organismos del suelo, contribuyen a agrupar las partículas minerales y orgánicas del suelo en unidades estructurales llamadas agregados o peds. La formación y durabilidad de estos agregados ha sido objeto de estudio por mucho tiempo, por su influencia sobre permeabilidad del suelo y la circulación de agua y aire a través del espacio poroso remanente entre los agregados. Hoy en día, el interés sobre este tema es aún mayor porque la agregación entre partículas minerales y moléculas orgánicas es el mecanismo fundamental de captura de carbono en el suelo, lo cual permite reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Existe un equilibrio y un intercambio dinámico entre los cationes retenidos por las partículas coloidales del suelo y los que se encuentran disueltos en el agua o solución del suelo. Entre estos cationes, el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el potasio (K) y el sodio (Na) son esenciales para el crecimiento de las plantas. Se les conoce como cationes básicos, o simplemente bases, porque aumentan el pH de la solución del suelo. La capacidad del suelo para retener cationes básicos y liberarlos lentamente es una de las contribuciones más importantes del suelo a la nutrición de las plantas y de los organismos que habitan en el suelo. Esta capacidad se mide en laboratorios especializados, por medio de dos parámetros diferentes: la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la saturación de bases. La CIC indica la cantidad total de iones con carga positiva que las partículas coloidales del suelo pueden retener en su superficie. La saturación de bases revela qué porcentaje de la CIC es ocupada por cationes básicos.

4. Biodiversidad del Suelo

La biodiversidad del suelo es la expresión utilizada para referirse a la variedad de la vida subterránea, desde genes y especies hasta las comunidades que éstas forman, así como los complejos ecológicos a los que pertenecen. El suelo es un sistema heterogéneo, compuesto por agregados organominerales de diferentes dimensiones y componentes orgánicos, y con poros de volumen diverso, llenos de aire o agua. Esto permite que en él habite un gran número de especies de diferentes tamaños y ecología, distribuidos espacialmente a través de múltiples escalas espaciales, desde microhábitats hasta regiones (Andre *et al*., 2002).

Los suelos son uno de los hábitats biológicamente más diversos de la Tierra. Se calcula que un gramo de suelo contiene hasta mil millones de células bacterianas, hasta 200 metros de hifas fúngicas y una gran variedad

de otros organismos, como nematodos, lombrices y artrópodos (FAO *et al.*, 2020). Según Decaëns *et al.* (2006) más del 40% de los organismos vivos de los ecosistemas terrestres están asociados durante su ciclo vital directamente con el suelo.

Las comunidades biológicas del suelo son sistemas jerárquicos en los que varios tipos de organismos pueblan volúmenes del suelo diferentes. Esto incluye:

(i) la película de agua de micrómetros de espesor alrededor de las partí culas del suelo que alberga organismos acuáticos como bacterias, protistas, nematodos y tardígrados (es decir, la microfauna);

(ii) el espacio poroso lleno de aire para los animales del suelo de entre 100 μm y 2 mm de ancho (es decir, la mesofauna); y

(iii) los sitios de concentración de nutrientes y otros recursos alrededor de las raíces de las plantas para los microorganismos, la macrofauna y la megafauna (Pokarzhevskii *et al.*, 2003).

Las causas principales de la gran biodiversidad del suelo son este fraccionamiento del tamaño corporal, y la variedad de nichos ecológicos en el suelo (tanto en términos de tamaño como de gama de recursos proporcionados), que conduce a una importante diferenciación funcional de los organismos del suelo.

El conocimiento sobre la biodiversidad del suelo ha avanzado significativamente en los últimos años, gracias a innovaciones introducidas en los métodos para el estudio biológico y bioquímico del suelo. Hoy en día se comprende mejor la participación de los organismos del suelo en procesos determinantes de las transformaciones de la materia orgánica, los ciclos de nutrientes, la formación de agregados, y el control de plagas y enfermedades. Asimismo, se sabe que estos organismos actúan como una poderosa herramienta en la biorremediación de suelos contaminados, y en la retención de carbono en el suelo y el control de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En fin, se reconoce cada vez más la importancia de la biodiversidad del suelo para la salud humana, ya que puede suprimir los organismos patógenos del suelo y proporcionar aire, agua y alimentos limpios. Sin embargo, las malas prácticas de gestión del suelo y los cambios ambientales limitan estos beneficios, porque afectan a las comunidades subterráneas y reducen la biodiversidad del suelo. Por otra parte, investigaciones recientes han de-

mostrado que la biodiversidad del suelo puede mantenerse y restaurarse mediante una gestión sostenible del suelo (Wall, et al., 2015).

5. El Perfil de Suelo

Convencionalmente, la unidad de caracterización del suelo en su conjunto es un perfil que se extiende desde la superficie hasta el substrato de roca no alterada, si este es poco profundo, o hasta una profundidad determinada por los objetivos del estudio del suelo (frecuentemente 1,5 a 2 metros). El perfil expone la secuencia de los diferentes horizontes o capas del suelo. Cada horizonte es un estrato, aproximadamente paralelo a la superficie del terreno, que se distingue de los estratos adyacentes por un conjunto distintivo de propiedades, producidas por los procesos de formación del suelo (Soil Science Division Staff, 2017).

El perfil es un corte vertical, bidimensional del suelo. En la década de 1960 se introdujo el término pedión ("*pedon*" en inglés) referido a la unidad mínima de descripción y muestreo del suelo. El pedión es tridimensional, es el volumen más pequeño en el cual se pueden reconocer las características de un suelo individual. Su área horizontal varía de 1 a 10 m^2 y sus dimensiones laterales son lo suficientemente grandes como para incluir variaciones representativas en la forma y relación de los horizontes y en la composición del suelo (Johnson, 1963).

El concepto de pedión destaca el carácter tridimensional del suelo, pero su implementación práctica es difícil porque implica excavar una trinchera alrededor de una columna de suelo. Por eso, es más práctico cavar un hoyo o calicata. Sin embargo, se debe tener el cuidado de estudiar las variaciones de los horizontes del suelo en todas las caras de la calicata para aplicar la definición de pedión.

6. Formación de Suelos

Los suelos son sistemas naturales muy complejos y difíciles de estudiar. Para comprender su formación se utilizan modelos de génesis de suelos que consideran al suelo como un sistema abierto que intercambia materia y energía con el medio que le rodea. Este intercambio determina la evolución de las propiedades del suelo bajo la influencia de factores geológicos, biológicos e hidrológicos. Esta evolución se manifiesta en una variabilidad espacial del suelo, como resultado de una distribución desigual de las condiciones ambientales. A continuación, se describen brevemente tres modelos, que han tenido una fuerte influencia a lo largo del desarrollo de la ciencia del suelo.

6.1. El modelo de los factores formadores de suelo

FitzPatrick (1983) señala que la idea de que la naturaleza y propiedades del suelo son influenciadas por factores ambientales, particularmente geológicos, climáticos, topográficos y tiempo de evolución fue planteada, inicialmente, por Dokuchaev (1883) a finales del siglo XIX en Rusia. Esta idea fue difundida por un alumno de Dokuchaev, en el primer Congreso Internacional de Ciencia del Suelo, celebrado en Bélgica en 1920 y, desde entonces, sentó las bases para el estudio científico de la génesis y la geografía de suelos. Posteriormente, Jenny (1941) replanteó esta idea bajo la forma de la "ecuación fundamental de los factores formadores de suelo", representada como:

$$\mathbf{S = f\ (c,\ o,\ r,\ p,\ t,\ \ldots)}$$

De acuerdo con esta ecuación, una propiedad dada del suelo (**S**) es función del clima (**c**), los organismos o biota (**o**), el relieve (**r**), el material parental (**p**) y el tiempo de evolución (**t**). Los puntos suspensivos indican otros factores no especificados que pueden ser importantes localmente pero no universalmente.

Este modelo expresa que el suelo es el resultado de la acción del clima y la biota (vegetación y organismos del suelo) sobre el material parental, y esta acción es regulada por la posición en el relieve, a través del tiempo. A pesar del nombre de la ecuación, Jenny (1941) enfatizó que estos factores no son fuerzas, causas o energías que crean suelo. Son más bien las variables que definen o describen el sistema. Buol et al. (2011) agregan que estos factores proporcionan los reactivos y la energía para impulsar los procesos de formación de suelos.

Hasta ahora, la ecuación de los factores formadores de suelo no ha tenido una solución matemática satisfactoria por dos razones. Primero, porque los factores no son independientes entre sí. Por ejemplo, la vegetación puede ser afectada por el clima, el relieve y el material parental. Segundo, porque la relación entre las propiedades del suelo y los factores de formación no se ajusta a un modelo lineal. Sin embargo, la ecuación de Jenny (1941) ha contribuido de manera sustancial a dirigir nuestras ideas acerca de los suelos y su distribución en el tiempo y el espacio (Arnold, 2015).

6.2. El modelo de los procesos formadores de suelo

Simonson (1959) planteó que la diferenciación de horizontes del suelo es producto de cuatro clases básicas de procesos que actúan promoviendo o retardando su formación. Estos son: adiciones (entradas al sistema), remo-

ciones (salidas del sistema), y transferencias y transformaciones dentro del sistema. Estos procesos actúan al mismo tiempo sobre el mismo perfil y pueden estar en conflicto entre sí. La importancia relativa de cada proceso no es la misma para todos los suelos y puede cambiar con el tiempo en un mismo suelo.

La variedad de cambios que proceden durante la diferenciación de horizontes en el perfil depende de procesos más simples (por ejemplo, hidratación, oxidación, solución, lixiviación, precipitación, mezclado). El balance entre estos procesos específicos, en una combinación dada, es la clave de la naturaleza del suelo. Este balance es controlado, a su vez, por los factores formadores de suelo.

6.3. El modelo de génesis progresiva y regresiva del suelo

Johnson y Watson-Stegner (1987) propusieron un modelo que denominaron edafogénesis progresiva y regresiva. Este modelo considera que la formación del suelo no tiene un desarrollo unidireccional desde «no suelo» hacia un estado estable teórico, como punto final. Es más bien un proceso con idas y venidas, avances y retrocesos.

El término génesis de suelos frecuentemente se utiliza como sinónimo de formación de suelo. Esta última implica una organización del suelo cada vez mayor, por el desarrollo de horizontes. Se tiende a considerar al suelo como un sistema que evoluciona a lo largo de una trayectoria ininterrumpida de desarrollo, bajo la influencia de factores ambientales, desde un estado inicial (tiempo cero) hacia un estado estable. Sin embargo, existen numerosas evidencias que revelan que en la génesis de suelos también pueden ocurrir retrocesos por efecto de mezclado de horizontes (edafoturbación), erosión o cubrimiento por nuevos sedimentos. La Figura 2 ilustra un caso de interrupción en el proceso de edafogénesis de un suelo debido a su cobertura por sedimentos más recientes. Estos sedimentos se han convertido en el material parental que da origen a la formación de un nuevo suelo, marcando el inicio de un nuevo ciclo de edafogénesis.

La edafogénesis progresiva implica procesos, factores y condiciones que promueven la diferenciación del perfil y conducen a su estabilidad fisicoquímica. Esto incluye formación de horizontes, lixiviación, mejoramiento del desarrollo y profundización del suelo. La edafogénesis regresiva comprende procesos, factores y condiciones que promueven la simplificación del perfil, lo que lleva a su inestabilidad fisicoquímica. Esto incluye procesos como haploidización, rejuvenecimiento, depósito de nuevos materiales sobre la superficie (sedimentación) y remoción de la superficie (erosión).

Figura 2. Ejemplo de un perfil de suelo ubicado en la Colonia Tovar, Estado Aragua, Venezuela. El cambio de color de las capas del suelo a partir de, aproximadamente, 90 cm de profundidad (horizontes 2Ab y 2Bb) evidencia la presencia de un suelo antiguo (paleosuelo) que fue cubierto por nuevos sedimentos. Foto de Jesús A. Viloria. R.

Cada suelo puede evolucionar hacia una mayor organización, caracterizada por la formación de horizontes o, alternativamente, puede sufrir una evolución regresiva hacia formas más simples, por destrucción de los horizontes (haploidización). Si un suelo se desarrolla progresivamente o retrocede depende de cuál tendencia es más fuerte en el momento. Como los suelos son sistemas abiertos, frecuentemente evolucionan alternadamente en forma progresiva o regresiva, y rara vez alcanzan un equilibrio con el ambiente circundante (Johnson et al., 1990).

7. Clasificación de Suelos

El suelo se comenzó a estudiar de manera científica desde las últimas décadas del siglo XIX. También se comenzaron a caracterizar los atributos de suelos y a producir mapas de suelos en diversos países. El gran volumen de datos generado por estos estudios hizo necesario sistematizar la información producida, para poder comprenderla. Esto dio origen a la clasificación

como método para organizar los nuevos conocimientos obtenidos sobre suelos. Al comienzo, las clases de suelos agrupaban perfiles que compartían muchos atributos en común, pero ningún atributo específico era esencial o suficiente para determinar la pertenencia de un individuo a una clase particular. No obstante, a medida que aumentó el número de clases y de perfiles descritos se hizo cada vez más difícil asignar cada nuevo perfil de suelo a su clase respectiva. Consecuentemente, se crearon claves con límites precisos de los atributos escogidos para identificar cada clase. En estas claves, cada clase de suelo es definida en función de la presencia o ausencia de determinados valores de uno o más atributos específicos, usados como criterios de diagnóstico. La sistematización de las diversas claves locales de clasificacion dio origen a sistemas nacionales de clasificación de suelos. Sin embargo, aún persistía la dificultad de organizar el conocimiento sobre la variación de suelos en el ámbito mundial, para facilitar la comunicación entre científicos de suelo de diferentes países. Hoy en día existen dos sistemas de clasificación que permiten agrupar los suelos a nivel mundial. El primero es la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB, por World Reference Base). Este sistema es el estándar internacional para la clasificación de suelos avalado por la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS, por International Union of Soil Sciences). El segundo sistema útil para la clasificación mundial de suelos es la Taxonomía de Suelos del Departamento de Agricultura de los EUA (USDA Soil Taxonomy).

La ciencia del suelo, como cualquier otra ciencia, es dinámica y se enriquece continuamente con nuevos conocimientos, a medida que avanza la investigación. Por esta razón, los sistemas de clasificación mencionados son actualizados con cierta periodicidad, de acuerdo con el progreso del conocimiento sobre el suelo. Así, la cuarta edición de la WRB (IUSS Working Group WRB, 2022) y la 13ª edición de las claves de la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2022) se publicaron en 2022. Ambas ediciones fueron publicadas en inglés, pero existen versiones en español de la tercera edición de la WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) y de la 12ª edición de las claves de la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014).

8. Geografía de Suelos

La necesidad de comprender la variabilidad espacial de las propiedades edáficas hace absolutamente necesario aplicar un enfoque geográfico al estudio del suelo. Este enfoque se centra en la descripción de la variación espacial de los atributos del suelo y sus interrelaciones con el medio ambiente, a diferentes escalas: desde muy generales hasta detalladas. Sin embar-

go, no es posible explicar el patrón de distribución espacial del manto de suelo sin conocer tanto la génesis de los suelos que componen ese patrón, como la evolución de las formas de terreno y materiales que se exponen o acumulan en la corteza terrestre (Schaetzl y Anderson, 2005).

La dificultad para percibir a simple vista las propiedades edáficas es un reto para el estudio del suelo, que se suma a la variabilidad espacial de estas propiedades y a la imposibilidad de observar directamente los procesos que le han dado origen. Los suelos se encuentran bajo la superficie del terreno, y para observarlos es necesario hacer excavaciones en sitios de muestreo. Por razones prácticas y económicas, el número de puntos de muestreo es limitado; pero los usuarios generalmente necesitan conocer cómo es el suelo, no solo en los sitios de muestreo sino también en cualquier lugar del área de su interés. Consecuentemente, es necesario predecir los valores de las propiedades del suelo en los sitios no observados, a partir de la información obtenida en los puntos de muestreo.

La predicción de las propiedades del suelo en sitios no muestreados se basa en modelos de variación espacial de estas propiedades. Avances tecnológicos generados en disciplinas relacionadas con la geomática y el análisis numérico de datos dieron origen a la cartografía digital del suelo, como una nueva aproximación al modelado de la variación espacial de las propiedades edáficas. Este enfoque nació a partir de estudios experimentales realizados desde la década de 1990. Su propósito es predecir cuantitativamente la distribución espacial de propiedades edáficas, a partir de datos obtenidos de puntos de muestreo, modelos digitales de terreno e imágenes satelitales. Hoy en día su uso es cada vez más común. La construcción de mapas de suelo, tanto digitales como convencionales, se basa en la relación que existe entre el suelo y los factores ambientales representados en la ecuación de Jenny (1941), descrita arriba. Sin embargo, el levantamiento convencional de suelos se apoya en modelos cualitativos de relaciones suelo-paisaje, cuyo grado de certeza es usualmente desconocido (Scull *et al.*, 2003). En cambio, la cartografía digital del suelo utiliza datos y métodos numéricos, para generar predicciones cuantitativas que son sometidas a procesos de validación estadística (Scull *et al.*, 2003; Dobos *et al.*, 2006).

Referencias Bibliográficas

ANDRE, H. M., X. DUCARME AND P. LEBRUN
2002. Soil biodiversity: myth, reality or conning? *Oikos,* 96(1): 3–24.

ARNOLD, R. W.
2015. My dilemmas with soil-landscape relationships. In: Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., Del Valle, H.F., (ed.). *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Springer.

BUOL, S. W., R. J. SOUTHARD, R. C. GRAHAM AND P. A. MCDANIEL
2011. S*oil genesis and classification*. 6th edition. Wiley-Blackwell.

CLINE, M. G.
1961. The changing model of soil. Soil Science Society of America Journal, 25: 442-446.

DECAËNS, T., J. J. JIMÉNEZ, C. GIOIA, G. J. MEASEY AND P. LAVELLE
2006. The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology, 4*2: S23–S38. https:// doi:10.1016/j.ejsobi.2006.07.001.

DOBOS, E., F. CARRÉ, T. HENGL, H. REUTER AND G. TÓTH
2006. Digital soil mapping as a support to production of functional maps. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemborg (EUR 22123).

DOKUCHAEV, V. V.
1883. Chernozem ruso. Israel Program for Scientific Translations Ltd. (para USDA-NSF), S. Monson, Jerusalén, 1967. Traducido del ruso al inglés por N. Kaner.

DUMANSKY, J.
1994. Strategies and opportunities for soil survey information and research. In: Soil Survey: Perspectives and strategies for the century. Edited by Zinck, A. ITC Publication No. 21, Enschede, The Netherlands, pp. 36-41.

ELIZALDE, G.
2006. Módulo de fundamentos teóricos de mineralogía de suelos. Postgrado en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 113 p.

FAO, ITPS, GSBI, CBD AND EC
2020. State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. https://doi.org/10.4060/cb1928en.

FITZPATRICK, E. A.
1983. S*oils: its formation, classification and distribution*. Logman Inc., New York.

IUSS WORKING GROUP WRB
2015. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Sistema internacional de clasificación para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. FAO, Roma.

IUSS WORKING GROUP WRB
2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

JENNY, H.
1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York.

JOHNSON, W. M.
1963. The pedon and the polypedon. *Soil Science Society of America Procedings*, 27: 212-215.

JOHNSON, D. L. AND D. WATSON-STEGNER
1987. Evolution model of pedogenesis. *Soil Science*, 143: 349-366.

JOHNSON, D. L., E. A. KELLER AND T. K. ROCKWELL
1990. Dynamic pedogenesis: new views on some key soil concepts, and a model for interpreting Quaternary soils. *Quaternary Research,* 33: 306-319.

POKARZHEVSKII, A. D., N. M. VAN STRAALEN, D. P. ZABOEV, AND A. S. ZAITSEV
2003. Microbial links and element flows in nested detrital food-webs. *Pedobiologia*, 47: 213–224.

SCHAETZL, R. J. AND S. ANDERSON
2005. *Soils: Genesis and geomorphology.* Cambridge University Press.

SCULL, P., J. FRANKLIN, O. CHADWICK AND D. MCARTHUR
2003. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography,* 27: 171-197.

SIMONSON, R.
1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America Proceedings*, 23:152-156.

SIMONSON, R. W.
1968. Concept of soil. Advances in agronomy, 20, 1-47.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF
2017. Examination and Description of Soil Profiles. In: Ditzler, C., Scheffe, K., Monger, H.C., (ed.). *Soil Survey Manua*l. USDA Handbook 18. Washington, DC.

SOIL SURVEY STAFF
2014. *Claves para la Taxonomía de Suelos.* 12a ed. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Washington, DC.

SOIL SURVEY STAFF
2022. *Keys to Soil Taxonomy,* 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

WALL, D., U. NIELSEN AND J. SIX
2015.Soil biodiversity and human health. *Nature* 528: 69–76. https://doi.org/ 10.1038/nature15744.

Jesus Viloria Rondón

Ingeniero Agrónomo (UCV-1975. Magíster Scientiarum en Ciencia del Suelo (UCV-1985). Doctor of Philosophy (Ph.D, University of Oxford, Inglaterra, 1989). Profesor Titular UCV. Docencia en Pregrado y Postgrado en UCV en el área de Ciencia del Suelo. Investigador en: Génesis, Clasificación y Cartografía de Suelos; Análisis de aptitud de tierras para uso agropecuario sostenible. Coordinador de la asignatura de postgrado Génesis y Clasificación de Suelos-UCV. Autor o coautor de: 1 libro, 3 capítulos de libros, 39 publicaciones en revistas arbitradas y 61 ponencias. Miembro correspondiente por el Estado Aragua de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat.

CAPÍTULO VIII

LA GEOMORFOLOGÍA Y LA GESTIÓN AMBIENTAL

1. Introducción

La geomorfología es la ciencia que estudia de forma sistemática las formas de la Tierra, su génesis y evolución en el tiempo. Sin embargo, la superficie terrestre es amplia, diversa, con grandes contrastes, con expresiones de relieve de edades y orígenes diferentes y desigualmente conocidas, debido a la gran multiplicidad y complejidad de los factores y procesos que han modelado los paisajes que hoy observamos-paisajes contemporáneos- y a las distintas superficies geomórficas que los integran muchas de las cuales son objeto de uso y alteración por las actividades antrópicas. Conocer las causas es explicar las geoformas, y en este sentido la geomorfología tiene que dar cuenta de la génesis del relieve y de tipificar sus geoformas. La geología es un factor determinante del origen de las geoformas pues explica la naturaleza y disposición de los materiales o geosubstrato.

La evolución de la superficie terrestre puede ser tan lenta, prolongada e imperceptible para el hombre, pero en otras ocasiones puede ser tan rápida y súbita que causa catástrofes impredecibles, con grandes pérdidas en recursos físicos y vidas humanas. Como puede inferirse, la geomorfología es una disciplina compleja e integradora, que necesita del aporte de otras ciencias para poder delinear, entender y explicar el origen y evolución de las geoformas y asi poder generar información para orientar las decisiones de ocupación del territorio y de uso de los recursos existentes dentro de sus límites espaciales.

De acuerdo con García-Ruiz (2015), la geomorfología es una ciencia muy compleja desarrollada entre la Geografía y la Geología, con el objetivo de estudiar y explicar las formas de relieve a diferentes escalas espaciales y temporales. El estudio de las formas de la tierra o de expresiones del relieve, es el objeto central de la geomorfología. Cada forma de relieve es consecuencia de una interacción compleja entre un sustrato rocoso, su disposición estructural, el clima, la actividad biológica, los procesos geomórficos

y el tiempo. En tal sentido, el papel de los geomorfólogos es descubrir esa complejidad a partir del relieve que actualmente observamos. La interpretación del relieve y su dinámica necesita análisis detallados y el empleo creciente de técnicas ligadas a técnicas computacionales, teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el uso de diversos modelos (ej., modelos digitales de elevación, hidrológicos), bajo una perspectiva global para interpretar el relieve y su dinámica. La colaboración de geólogos, ecólogos, edafólogos, hidrólogos y geógrafos ha contribuido a ampliar la función de los geomorfólogos en los estudios ambientales.

La geomorfología ha dejado de ser una disciplina meramente académica, solo descriptora de la génesis y evolución de la superficie terrestre y su conglomerado de geoformas, para convertirse en una ciencia aplicada al ambiente, determinante para estudiar y evaluar y generar información en tópicos relacionados con las actividades humanas tales como:

(i) Riesgos naturales

(ii) Estimación de la potencialidad del agua subterránea

(iii) Caracterización del sustrato para la obtención de materiales y para la construcción de obras de infraestructura y desarrollo urbano-industrial

(iv) Mapeo de suelos y zonificación de las tierras

(v) Evaluaciones de impacto ambiental y

(vi) Antropología

entre tantos estudios, que sirvan como apoyo a la toma de decisiones relacionadas con la planificación del territorio y el mejoramiento de la calidad de vida del hombre, sin el deterioro del medio ambiente.

El presente capítulo tiene como propósito central mostrar la importancia de la geomorfología como una disciplina científica que deriva en una variedad de aplicaciones prácticas generadora de información útil para la gestión ambiental y territorial. Una fuente de información integral para orientar acertadas y razonables tomas de decisión en pro de un aprovechamiento sustentable de los territorios de una región o país.

2. ¿Que es la Geomorfología? Conceptos

Etimológicamente, la palabra geomorfología viene de tres raíces griegas: *geos* (tierra), *morphe* (forma) y *logos* (tratado). Existen muchas definiciones y acepciones con relación al significado de la geomorfología. Para Muñoz

(2000), el término Geomorfología, difundido en los últimos años del siglo pasado por el geógrafo y geólogo norteamericano William Morris Davis, significa etimológicamente "*conocimiento racional de las formas de la Tierra*" y, en la actualidad, la designa como:

"*una disciplina científica que tiene como objeto el reconocimiento, la clasificación y la explicación de las diferentes configuraciones que presenta la superficie externa de la litosfera, de cuya combinación resulta el relieve terrestre*".

Para Gutiérrez (2004), la geomorfología es:

"*la especialidad científica que se ocupa del estudio de las formas del relieve*".

Varios autores citados por Villota (2005), dan definiciones sobre esta materia. Así, según Viers (1974):

"*la geomorfología es una ciencia de síntesis que tiene por objeto clasificar y explicar las formas del relieve*".

Derrau (1966) la define como:

"*el estudio de las formas del relieve terrestre*".

Para Strahler (1974), es:

"*el estudio del origen y desarrollo sistemático de todas las formas del relieve de la tierra*"

Aunque puede llamarse "*el estudio del relieve*". Para Holmes (1971), la geomorfología es "*el estudio del relieve de la superficie actual*" estudio que comparte con la geografía física. Según Thornbury (1996), la geomorfología es "*la ciencia de las formas terrestres*" (incluidas las formas submarinas). Soeters (1976), define a la geomorfología como "*la ciencia que trata de la superficie terrestre y sus orígenes*", mientras que Van Zuidam (1973), relaciona la geomorfología con el análisis del terreno, el que define como:

"*un estudio que describe las formas del terreno y los procesos que condujeron a su formación, y que, además, investiga las interrelaciones de esas formas y procesos en su distribución o arreglo espacial*".

Por su parte García-Ruiz (2015), en su estudio también cita varios autores que conceptualizan lo que es la geomorfología, entre ellos cita a Panizza (1996), quien definió la geomorfología como:

"*una ciencia que tiene por objeto estudiar e interpretar las formas del relieve y especialmente las causas que las crean y modifican*"

A Bauer (2004), quien en la "*Encyclopedia of Geomorphology*", definió la geomorfología como:

"*el área de estudio que conduce a la comprensión y apreciación de las formas del relieve y los paisajes, incluyendo los de los continentes y las islas, los que se encuentran bajo los océanos, lagos, ríos, glaciares y otros cuerpos de agua, así como los de los planetas terrestres y las lunas de nuestro Sistema Solar*".

Para Gutiérrez (2005);

"*la geomorfología es la ciencia de la forma de la superficie terrestre*".

Forma del terreno y relieve son palabras clave en la mayoría de las definiciones. Como puede observarse en las distintas acepciones, la geomorfología es la ciencia que estudia la evolución y organización espacial de las formas del relieve a diferentes escalas temporales y espaciales y se sitúa en la confluencia de la geografía y la geología, con influencias crecientes de la ecología, la física y la química, sin embargo, el objetivo final es situar ese análisis en un contexto temporal y espacial más amplio: la explicación de los paisajes y las formas del relieve (García-Ruiz, 2015).

3. La Geomorfología, una disciplina multifuncional

El interés por el relieve terrestre y por la explicación de su génesis o modelado comienza en el Renacimiento y es en las obras de ingenieros y naturalistas, junto con las descripciones de cronistas y geógrafos, en las que de forma aislada aparecen las primeras observaciones con finalidad explicativa y los primeros intentos de interpretación acerca de estos temas. Los ingenieros, para dar respuesta a necesidades prácticas, realizan las primeras aportaciones en relación con los agentes y los procesos de erosión y modelado (Muñoz, 2000).

De acuerdo con Zinck (2012, 2013, 2014), la Geomorfología es principalmente "*una ciencia de observación*," apuntando a la identificación y delineación de paisajes a partir de mapas topográficos, modelos digitales de elevación o del terreno, y documentos de teledetección que permiten la visión estereoscópica, pero principalmente mediante la lectura de las características fisiográficas en el campo. Las geoformas pueden ser percibidas por

la visión humana o por sensores artificiales, ya que tienen un aspecto fisonómico en la superficie terrestre. Por su expresión escénica, las geoformas son los elementos más directamente estructurantes del terreno, más que cualquier otro objeto o característica natural.

Al Igual que Zinck (2012, 2013, 2014), García-Ruiz, (2015) también considera que la geomorfología es una ciencia global que se basa (principalmente) en observaciones de campo, y que cada vez más implica el uso de técnicas de laboratorio e informáticas. Para Kenneth y Lewin (2014); las formas del relieve también se desarrollan en patrones espaciales complejos que pueden ser difíciles de reconocer a primera vista. En los últimos años, muchas ciencias se han beneficiado de una mayor disponibilidad de tecnologías de observación y análisis. En el caso de la geomorfología, esto permite aspectos como la datación de materiales terrestres, la evaluación rápida de la química de los sedimentos, el estudio de los caudales fluviales, la modelización informática de formas emergentes y la teledetección de la superficie terrestre.

En opinión de Canchola *et al.* (2016), el entendimiento del paisaje no ha sido una tarea sencilla. La geomorfología aporta diversos métodos para clasificar los paisajes con base a la diferenciación morfológica, donde se presentan diversos procesos como la denudación del relieve, la configuración del drenaje y, en sí mismo, la modelación de las distintas geoformas donde se reconoce el papel de otros agentes modeladores como el clima y las actividades antrópicas. Se considera a la geomorfología como una disciplina integradora.

Hooke (2019), plantea argumentos relevantes con relación a la geomorfología y su contribución en la gestión del ambiente. Según este autor, la geomorfología aplicada ha sido reconocida como tema y componente dentro de la geomorfología a lo largo de los últimos 50 años. El mayor crecimiento en la contribución directa con la política y la práctica ambiental se produjo en las décadas de 1980 y 1990, pero ha sido seguido con significativa expansión desde entonces. Las principales motivaciones de este aumento de la aplicación comprendían el evidente fracaso y los efectos perjudiciales de los enfoques anteriores basados en la ingeniería dura, los cambios en la conciencia ambiental, las actitudes de la población, la creciente amenaza del cambio climático y la incidencia de grandes tormentas y catástrofes naturales. Todo ello condujo al desarrollo de enfoques que "*trabajan con la naturaleza*", a la puesta en marcha de proyectos de demostración de restauración fluvial, gestión del retroceso costero y, ahora, gestión natural

de las inundaciones, y a la necesidad explícita de evaluar geomorfológicamente las masas de agua. Otra motivación ha sido la creciente preocupación por el impacto de las actividades humanas. En general, todo apunta a una rápida expansión de la aplicación de la geomorfología a los problemas del mundo real y a una creciente apreciación del valor de las contribuciones y enfoques geomorfológicos. El futuro es promisorio y los geomorfólogos pueden contribuir a gestionar el ambiente de forma más sostenible e incluso a mejorarlo.

Gran parte de la investigación geomorfológica tiene potencial para ser aplicada, pero la aplicación real de la geomorfología para la gestión ambiental comenzó a aumentar en las décadas de 1970 y 1980, principalmente a través de la Ingeniería Geomorfológica. Posteriormente, en las décadas de 1980 y 1990, se transformó con la participación en el desarrollo de estrategias de gestión costera y en enfoques más holísticos de la gestión fluvial, para contribuir con las acciones para tratar estos ámbitos tan dinámicos y activos. La mayor contribución de la geomorfología aplicada ha sido ayudar a transformar el pensamiento de controlar la naturaleza mediante infraestructuras duras a uno de "*trabajar con la naturaleza*", y que requiere la comprensión de los procesos geomorfológicos, la morfología y la dinámica para proporcionar soluciones sostenibles a los problemas del impacto humano y la interacción humana con el ambiente (Hooke, 2019).

4. Algunos conceptos, principios y procesos básicos asociados a la Geomorfología.

Entender el alcance, la utilidad de esta disciplina y su objeto de estudio pasa por conocer algunos aspectos teóricos fundamentales.

W.D. Thornbury (1954) enumera en su libro "*Principles of Geomorphology*" algunos conceptos geomorfológicos fundamentales que se utilizan en la interpretación de los paisajes. Estos conceptos ayudan a interpretar los paisajes que observamos en la actualidad:

(i). Los mismos procesos y leyes físicas que operan en la actualidad operaron a lo largo del tiempo geológico, aunque no necesariamente con la misma intensidad que ahora. Este es el gran principio subyacente de la geología moderna y se conoce como el **Principio de Uniformitarismo**, enunciado por primera vez por Hutton en 1785 (Thornbury,1954).

(ii). La estructura geológica es un factor de control dominante en la evolución de las formas del relieve y se refleja en ellas.

(iii) En gran medida, la superficie terrestre posee relieve porque los procesos geomórficos operan a ritmos diferentes. Diferentes agentes geomorfológicos como ríos, vientos, glaciares, mares y océanos y otros tienen procesos geomórficos distintivos que dan lugar a la formación de sus respectivos accidentes geográficos característicos.

(iv) Los procesos geomórficos dejan su huella distintiva en las formas del terreno, y cada proceso geomórfico desarrolla su propio conjunto característico de formas del terreno. Este concepto acentúa el papel de la erosión en el desarrollo de los paisajes a lo largo del tiempo.

(v) La complejidad de la evolución geomórfica es más común que la simplicidad. Durante el curso de la evolución geomórfica, varios procesos pueden ser desencadenados o controlados por factores como el clima, la tectónica y/o los cambios en el nivel del mar. Esto introduce complejidad en la evolución geomórfica, ya que interactúan más de un factor y uno de ellos puede dominar sobre los demás.

(vi) Una pequeña parte de la topografía terrestre es más antigua que el Terciario y la mayor parte no supera el Pleistoceno. Esto se debe a que diversos agentes geomórficos han ido modificando continuamente el paisaje a lo largo del tiempo geológico.

(vii) La interpretación adecuada del paisaje actual es imposible sin una apreciación completa de las múltiples influencias de los cambios geológicos y climáticos durante el Pleistoceno.

(viii) Para comprender adecuadamente la importancia variable de los dis tintos procesos geomórficos es necesario conocer el clima mundial. La Tierra actual muestra cinturones climáticos orientados latitudinal- mente desde el ecuador hasta los polos en ambos hemisferios. Cada una de las zonas climáticas se caracteriza por formas terrestres y paisajes claramente distintos de los demás.

(ix) La geomorfología, aunque se ocupa principalmente del paisaje actual, alcanza su máxima utilidad mediante la extensión histórica (Thornbury,1954).

El Uniformitarismo significa que los procesos que formaron la topografía del pasado son los mismos que han dado forma a la topografía contemporánea y continúan funcionando de la misma manera y, salvo un cataclismo imprevisto, serán responsables de la topografía del futuro. Los procesos en cuestión no son temporales y, salvo contadas excepciones, no son

bruscos. En su mayoría son permanentes y de acción lenta. El desarrollo de las formas del relieve es un acontecimiento prácticamente interminable, en el que la topografía en un momento dado representa simplemente un equilibrio temporal en un continuo de cambio (Ciclos de destrucción-construcción, según Hutton).

De acuerdo con Anderson (2008), al igual que la geología, la geomorfología es un enlace entre la física, química, biología e historia. También es geometría, ya que la geomorfología se desarrolla en un entorno geográfico y topográfico complejo en el que tanto los procesos tectónicos como los climáticos responsables de impulsar la evolución de la topografía cambian de estilo e intensidad. La geomorfología suele subdividirse en función de los elementos geográficos del sistema geomórfico: laderas o vertiente, ríos, dunas eólicas, ambientes aluviales, Kársticos, erosiónales, glaciares, costeros, etc.; estos son los temas comúnmente descritos en los capítulos de la mayoría de los libros de texto sobre geomorfología.

Entre las características comunes a muchos dominios geomórficos se contempla que:

(i) Los materiales de la superficie suelen moverse en una dirección: cuesta abajo, corriente abajo, corriente abajo o viento abajo.

(ii) Los materiales se transforman a medida que se desplazan por el sistema. Algunas de estas transformaciones son unidireccionales, lo que significa que son irreversibles, es decir, los granos grandes pueden romperse en granos pequeños, pero no a la inversa; las reacciones químicas son en su mayoría permanentes, dando lugar a pérdidas de solución y cambios en la mineralogía hacia fases hidrosolubles de baja temperatura.

(iii) El movimiento es concentrativo; el material se agrupa en corrientes más eficientes que dan lugar a redes espacialmente ramificadas.

(iv) Si se le da tiempo suficiente, el sistema evoluciona hacia un estado en el que el flujo de material se ajusta al transporte que se le suministra (Anderson, 2008)

En opinión de Zinck (2012, 2013, 2014, 2023), los accidentes geográficos son el resultado de la actividad de procesos geomórficos sobre estructuras geológicas a lo largo de escalas temporales variables. Cada relieve es consecuencia de complejas interacciones entre el lecho rocoso, el clima, la actividad biológica, los procesos geomórficos, los cambios inducidos por el

hombre y el tiempo. El papel de los geomorfólogos consiste en desentrañar esta complejidad del relieve contemporáneo, donde los restos de depósitos y formas del relieve del pasado constituyen un palimpsesto del que ha desaparecido la mayor parte de la información.

Según Gutiérrez (2004), los fenómenos que modelan el relieve son principalmente:

(i) la Denudación, compuesta por tres fases meteorización, transporte y erosión

(ii) la Meteorización, producida por la acción de agentes mecánicos y físico-químicos

(iii) el Transporte, ejercido a través del agua, el hielo de los glaciares o el viento favoreciendo las acumulaciones de sedimentos de diversas clases

(iv) la Erosión que consiste en el transporte de los materiales y su acumulación en otro lugar

(v) la Sedimentación o acumulación de los materiales que han dejado el agua, el viento y los demás agentes ilusionantes.

Estructura geológica: se refiere a la naturaleza, disposición y orientación de los materiales que componen el relieve estudiado. La estructura es esencialmente el soporte geológico del relieve. Es un factor de control dominante en la evolución de los accidentes geográficos. La estructura incluye fallas, pliegues, masividad de las rocas, arnés de las rocas, minerales constituyentes, permeabilidad o impermeabilidad y similares.

Proceso geomórfico: refleja las acciones que se han combinado para producir la forma del relieve. Una variedad de fuerzas (generalmente geológicas, hidrológicas, atmosféricas y bióticas) están siempre en acción dando forma a la característica de la superficie litosférica, y su interacción es crítica para la formación de las características del relieve.

Geoforma: cuerpo tridimensional, pues tiene forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que generan un relieve.

Relieve: es el carácter de la superficie terrestre de la tierra. Comprende una gran variedad de formas del terreno, que pueden agruparse en diferentes tipos de relieve. El relieve representa las características físicas de los elementos naturales de una zona, es decir, sus formas terrestres, su vegetación y sus suelos.

Las distintas geoformas de la superficie terrestre se entienden, en términos generales, como el resultado de la interacción de los procesos endógenos (internos), formadores de los rasgos principales del relieve y los procesos exógenos (externos) asociados con el desgaste del relieve primario a través del tiempo geológico por los distintos modelados morfodinámicos (Gutiérrez, 2004; Zinck, 2012, 2013, 2014).

5. La escala en la prospección geomorfológica

Los estudios geomorfológicos se llevan a cabo en una amplia gama de escalas espaciales y temporales. Las escalas espaciales (es decir, la extensión espacial o el área cubierta) de las investigaciones van desde la microescala (por ejemplo, las características específicas de un canal fluvial) hasta mega escalas, por ejemplo, continentes, países, grandes cuencas, grandes planicies, etc. La escala temporal (es decir, el tiempo/duración) se refiere al intervalo de tiempo geológico que se investiga en un estudio geomorfológico. También varía en función de los fenómenos de formación de relieve a corto plazo, como la deposición de llanuras aluviales, la formación de dunas de arena, los aportes de sedimentos debido a procesos gravitacionales (movimientos en masa), la formación de abanicos aluviales por eventos torrenciales (ej., deslaves), tales como los ocurridos en la vertiente norte de la Cordillera de la Costa (litoral central) en 1999, o los formados al pie de las cordilleras andinas, entre otros.

Los estudios geomorfológicos pueden realizarse a varios niveles de expresión territorial, desde estudios muy detallados a escalas grandes (1:5000 o mayor) cuando el objetivo es caracterizar y evaluar un determinado tipo de geoforma o relieve con fines genéticos, morfodinámicos para fines de utilización (terraza, ladera, colina, etc.); a nivel de paisajes tales como planicies, valles, altiplanicies, etc., (a escala 1:50.000-1:100.000) y a nivel regional, donde el estudio comprende la caracterización y evaluación de un ensamblaje de tipos de paisaje (escala 1:250.000-1:1.000.000 o menores) o a nivel de un ambiente geo estructural en particular, como por ejemplo los ambientes montañosos, cuencas sedimentarias (grandes planicies aluviales) o el escudo Guayanés. (Fig. 1).

6. La Geomorfología y su aporte a la Gestión Ambiental

Es de suma importancia el papel que la corteza terrestre y su relieve ejercen en el asentamiento y actividad humana, por su carácter de obstáculo o soporte a las actividades económicas. La geomorfología funciona como un conector entre lo teórico, conceptual y territorial, para comprender una

Figura 1. Paisaje de Montaña **(A)** y paisaje de valle y llanura aluvial **(B).** Fotos: P. García M.

evolución dinámica-cíclica constante en el espacio terrestre con una fundamentación aplicada denominada geomorfología del paisaje visto como un binomio complementario e indisoluble (Canchola *et al.* 2016). Las potenciales y demostrativas aplicaciones de la geomorfología a la gestión ambiental pueden traducirse en enormes oportunidades, especialmente si los geomorfólogos demuestran a los gestores ambientales el valor de los enfoques regionales y a largo plazo, planteados en términos de incertidumbre, riesgo y probabilidad de resultados. Para este fin, es necesario que los geomorfólogos o usuarios de esta disciplina reformulen la "*geomorfología aplicada*", donde el objetivo de la gestión ambiental no sea el control o la manipulación del entorno natural, sino la maximización de los servicios ecosistémicos. Este enfoque también implica que la inversión para la gestión ambiental esté mucho menos orientada a la construcción y, por tanto, sea mucho más modificable con enfoques geomorfológicos basados en la gestión adaptativa (Canchola *et al*. 2016).

La geomorfología estudia las interacciones del ser humano con los paisajes y sus expresiones de relieves. Los geomorfólogos de procesos, por ejemplo, con el uso de modelos, han contribuido a la investigación de problemas inquietantes asociados a los impactos humanos en los paisajes, han estudiado la erosión costera y la gestión de las playas, la erosión del suelo, la meteorización de los edificios, la protección contra los deslizamientos de tierras, la gestión de los ríos y la restauración de sus cauces, y la planificación y el diseño de los vertederos.

La Geomorfología ayuda a reconstruir la topografía del subsuelo, así como la topografía del pasado reciente y, por tanto, a predecir la evolución

del terreno en el futuro, además de permitir efectuar una aproximación más racional y científica a la producción cartográfica, dando resultado al mapa geomorfológico. El geomorfólogo representa en el mapa geomorfológico las líneas de fracturas que articulan el terreno, distingue los patrones geométricos que presentan las diferentes litologías y muestra las variaciones morfométricas que experimenta el relieve, en función de los procesos geológicos que actúan en el territorio. Las geoformas son susceptibles a la pérdida del equilibrio dinámico por eventos naturales, pero también por la acción antrópica. Los efectos más visibles y evidentes se relacionan con la generación o aceleración de movimientos en masa superficiales, para propósitos de construcción de vías o urbanizaciones, activación de procesos erosivos por la deforestación o por actividades agrícolas. Las vertientes montañosas, por ejemplo, a pesar de su frágil equilibrio, están adaptadas a las condiciones pluviométricas y tectónicas extremas del medio ecosistémico, como las lluvias y sismos de gran intensidad. Sin embargo, la acción antrópica ha logrado acelerar los ritmos de degradación, por lo que los desastres asociados a amenazas naturales se hacen más viables en los escenarios urbanos.

En opinión de García-Ruiz (2015), una cualidad particular de la geomorfología es que reconoce desde hace tiempo que nuestro mundo es cambiante, en consecuencia, la geomorfología aplicada ha ideado los medios para interpretar conjuntos de fenómenos en función de cómo se han desarrollado en el pasado y pueden desarrollarse en el futuro, más allá de las escalas temporales de la experiencia humana individual.

El hombre como agente transformador del sistema geomorfológico ha generado nuevos y diferentes paisajes, los que evidentemente deben funcionar de manera diferente a su posterior ocupación y uso para satisfacer sus necesidades. El hombre a través de sus obras ingenieriles ha provocado en numerosos espacios importantes cambios en el funcionamiento del sistema geomorfológico e incluso su intervención ha determinado importantes problemas en el ambiente sobre el cual ejerció su acción y la consecuente modificación, al no haber interpretado integralmente el contexto geomórfico cuando fue introduciendo nuevas variables y cambios al mismo; así por ejemplo, las actividades agropecuarias, mineras, la localización y el desarrollo de las áreas urbanas e industriales y otras obras de infraestructura, que generalmente en muchos casos van asociadas, y que constituyen otra problemática que generan efectos no deseados que impactan al ambiente y al hombre.

Para Lóczy (2010), los objetivos de la investigación geomorfológica antropogénica en la gestión ambiental incluyen:

(i) la predicción del curso de la evolución geomórfica tras la intervención humana en diversas escalas temporales

(ii) la promoción de la restauración de paisajes degradados

(iii) la identificación de formas del relieve donde valga la pena conservar, debido a los servicios que provee la conservación del paisaje y la vulnerabilidad de las formas del relieve.

A escala mundial, la extensión y el ritmo de los procesos geomórficos inducidos por el hombre han llegado a ser comparables a los naturales y, en las zonas densamente pobladas de la Tierra, superan incluso la intensidad de los procesos físicos naturales, tradicionalmente estudiados por los geomorfólogos. Por ello, las actividades humanas con impacto geomórfico pasan a formar parte integrante de la gestión del ambiente. La aplicación de los conocimientos geomorfológicos acumulados a lo largo de más de un siglo de investigación científica permite la coexistencia óptima de la humanidad con los procesos geomorfológicos y los accidentes geográficos y el ajuste óptimo a los mismos (Lóczy, 2010).

La rehabilitación del paisaje es especialmente importante en las regiones industriales y mineras, como por ejemplo en la región Guayana, donde la explotación legal e ilegal de recursos minerales ha dejado una gran degradación de los paisajes naturales y de las geoformas que los conforman, en muchos casos de naturaleza irreversible (Fig. 2). Las medidas de restauración de cauces fluviales y llanuras aluviales también están en primera línea de interés y sirven a fines ecológicos paisajísticos. Cumpliendo estos requisitos, en el siglo XXI la geomorfología adquirirá un papel aún más importante en la gestión ambiental.

Figura 2. Degradación del paisaje por actividad minera. Bajo Caroní. Foto: P. García

En la primera década del siglo XXI, un concepto más sobrio de geomorfología aplicada incorpora las siguientes tareas:

(i) Promover la exploración de los recursos naturales, mediante la cartografía de su distribución espacial

(ii) Ayudar a evitar desastres naturales, mediante la identificación de riesgos naturales, el estudio de su origen, el seguimiento de su evolución y la estimación de su extensión y frecuencia

(iii) Predecir el curso de la evolución geomórfica tras la intervención humana en diversas escalas temporales, proveyendo directamente datos geomorfológicos para la gestión ambiental

(iv) Identificar formas del relieve que ameriten sus conservación o pro tección

(v) Proporcionar información de base para la restauración de paisajes degradados (mediante la reconstrucción de las condiciones topográficas anteriores a la intervención humana) (Lóczy, 2010).

Huggett (2011), señala algunas publicaciones aplicadas sobre geomorfología aplicada. Por ejemplo, Cooke y Doornkamp (1990), en su libro "*Geomorphology in Environmental Management*", observaron el papel desempeñado por la geomorfología en los aspectos de gestión del medio ambiente. En otra cita, McGregor y Thompson (1995), en su libro "*Geomorphology and Land Management in a Changing Environment*" (Geomorfología y gestión del suelo en un entorno cambiante), se centraron en los problemas de la gestión del suelo en un contexto de cambio medioambiental. La conservación de formas del relieve antiguas y modernas es un aspecto en expansión de la geomorfología aplicada. Por su parte Zinck (2014, 2023), destaca el uso de la Geopedología como basamento técnico-científico para el inventario de suelos y sus interpretaciones utilitarias.

De acuerdo con (Huggett, 2011), el amenazador cambio ambiental asociado al calentamiento global ha puesto de relieve tres aspectos de la geomorfología aplicada que ilustran el valor de los conocimientos geomorfológicos. En primer lugar, los geomorfólogos aplicados están en una posición ideal para trabajar en la mitigación de los riesgos naturales de origen geomórfico, cuya magnitud y frecuencia podrían aumentar durante el siglo XXI y más allá. Los desprendimientos de tierras y los flujos de escombros, así como otros movimientos gravitacionales pueden reaparecer con más frecuencia, la erosión del suelo puede agravarse y aumentar la carga de sedimentos de

algunos ríos, algunas playas y acantilados pueden erosionarse más rápidamente, las tierras bajas costeras pueden quedar sumergidas y el suelo helado de los entornos de la tundra puede descongelarse.

En segundo lugar, un aspecto perturbador del calentamiento global es su efecto sobre los recursos naturales -agua, vegetación, cultivos- etc. Los geomorfólogos equipados con técnicas como la cartografía del terreno, la teledetección y los sistemas de información geográfica, pueden contribuir a los programas de gestión ambiental.

En tercer lugar, los geomorfólogos son capaces de traducir las predicciones sobre el aumento de la temperatura global y regional en predicciones sobre cambios críticos en los límites, como el desplazamiento hacia el polo de la línea de permafrost y la línea de árboles, que pueden orientar las decisiones sobre la adaptación de la actividad económica para minimizar los efectos del cambio medioambiental global.

Muchas formas del relieve tienen una larga historia, y sus signos actuales no siempre guardan relación con los procesos actuales que actúan sobre ellas. La naturaleza y el ritmo de los procesos geomórficos cambian con el tiempo, y algunos relieves o geoformas se originaron en condiciones ambientales diferentes, sobreviviendo en la actualidad como elementos relictos. La geomorfología, por tanto, tiene una importante dimensión histórica, que es el dominio de los geomorfólogos históricos.

7. Aplicaciones de la Geomorfología en la Gestión Ambiental y planificación del uso de la tierra

En opinión de Kenneth y Lewin (2014), los conceptos de geomorfología ambiental e ingeniería geomórfica se introdujeron para identificar geoformas en las que la investigación geomorfológica puede ser directamente relevante para la gestión y planificación ambiental. Proporcionan un enfoque para la investigación aplicada que abarca la auditoría ambiental, los impactos, la evaluación y la predicción, con muchas aplicaciones exitosas ahora demostradas y habilidades básicas reconocidas. Un mayor potencial para la ingeniería geomórfica podría reforzar un enfoque holístico que sitúe problemas específicos en sus contextos espaciales y temporales.

El ingeniero geomorfológico está interesado en mantener la máxima integridad y equilibrio del ecosistema total tierra-agua en su relación con las formas del terreno, los materiales de la superficie y los procesos. La geomorfología aplicada a la ingeniería complementa a la geología aplicada a la ingeniería al proporcionar un contexto espacial para explicar la naturaleza

y la distribución de problemas y recursos concretos relacionados con el suelo que tienen que ver con la evaluación de los cambios del relieve para la sociedad y el ambiente. Coates (1973), citado por Kenneth y Lewin (2014), definió la geomorfología ambiental como:

> "*el uso práctico de la geomorfología para la solución de problemas en los que el hombre desea transformar formas del terreno o utilizar y cambiar procesos superficiales*".

Las soluciones estructurales aplicadas a la gestión del medio ambiente en una zona concreta han pasado a denominarse "*ingeniería dura*", y las investigaciones realizadas desde la década de 1970 demostraron cómo esto podía tener efectos significativos en otros lugares tales como, aumento de las inundaciones aguas abajo de las obras de canalización, cambio de los patrones de erosión costera adyacentes a las medidas de protección de la costa, sedimentación y cambios en los cauces aguas abajo de las presas (Kenneth y Lewin, 2014).

La llegada de la tecnología de teledetección ha allanado el camino para recopilar información sobre los recursos de la Tierra con mayor precisión. Se dispone de una amplia variedad de datos de satélite para la elaboración de mapas geomorfológicos y de recursos terrestres a diferentes escalas. En los últimos años, el uso de datos obtenidos por teledetección y de aplicaciones del Sistema de Información Geográfica (SIG) ha ido en aumento en una amplia gama de actividades de inventario de recursos, cartografía, análisis, seguimiento y gestión ambiental. Los datos de teledetección ofrecen la oportunidad de observar mejor y analizar sistemáticamente las condiciones del terreno gracias a la cobertura sinóptica y multiespectral.

Oby *et al.* (2002) estudiaron los procesos de degradación del terreno basándose en el gradiente de pendiente, la morfometría, la profundidad del suelo, la cubierta vegetal y las respuestas espectrales de las imágenes Compuestas Falso Color (FCC) estándar de los datos del Satélite de la India (IRS)-1D LISS-III (*Linear Imaging Self-Scanning Sensor-III*). Ellos delinearon cuatro categorías de tierras erosionadas, a saber, muy grave, grave, moderada y nula a leve, que fueron cartografiadas. Estos autores concluyeron en su estudio que el análisis detallado de los aspectos geomorfológicos en la evaluación de la degradación del suelo y la planificación geoambiental de cualquier terreno depende de la evaluación de las formas del terreno, sus procesos y propiedades. El análisis integrado basado en SIG de la pendiente, la morfometría, la geomorfología, la profundidad del suelo y las tierras degradadas proporcionó más características intrínsecas para delinear el al-

cance y la magnitud de los diversos tipos de tierras degradadas en cada subunidad geomórfica. La información generada en las unidades geomórficas puede ser útil para priorizar áreas para la conservación inmediata del suelo y el agua, la gestión de cuencas fluviales, la mitigación de riesgos, la planificación medioambiental y para restaurar el frágil equilibrio geoecológico.

7.1. La Geomorfología y el desarrollo de obras de Ingeniería.

El papel que juega la geomorfología en la ingeniería es relevante. La capacidad de diferenciar las formas del relieve y de analizarlas genéticamente supone un aporte en las competencias que debe adquirir un ingeniero geodésico, un geólogo, un geógrafo, un ingeniero civil e hidráulico. Las actividades humanas se han convertido en el principal agente geomorfológico que actualmente modifica la superficie terrestre, y desestabiliza sus paisajes y geoformas. El movimiento de tierras asociado a la construcción de infraestructuras lineales (carreteras, ductos, líneas de transmisión, etc.), los emplazamientos urbano-industriales, represas, entre otros, constituye uno de los procesos geomorfológicos más activos y efectivos tanto a escala local, como regional y global. Como consecuencia, la transformación de la superficie terrestre debida a esta actividad constructiva debe ser un objetivo prioritario de los trabajos geológicos y geomorfológicos actuales.

Cualquier superficie terrestre funciona como un sistema que tiende a mantener un "*equilibrio dinámico*" entre las formas del terreno que observamos y los procesos geomorfológicos e hidrológicos que actúan sobre ellas. Por ejemplo, la mayor parte de las cuencas hidrográficas que conforman un determinado territorio están próximas a una situación de equilibrio, por lo general, dinámico, y los procesos de erosión, transporte y sedimentación están adaptados a las condiciones ambientales existentes. Sin embargo, como ocurre en nuestras cuencas andinas, el uso agrícola intensivo y continuo sin la aplicación de prácticas de conservación de suelos está provocando serios procesos erosivos que provocan desequilibrios en las vertientes montañosas deforestadas y bajo uso agrícola (vegetal, pecuario), sin medidas de conservación de suelos y aguas.

La construcción de infraestructuras lineales supone una perturbación antrópica de significativa magnitud. El movimiento de tierras asociado a la construcción de infraestructuras lineales y de otra naturaleza constituye uno de los procesos geomorfológicos más activos y efectivos a escala global. La construcción de obras civiles, lineales o areales altera las condiciones del equilibrio dinámico de las geoformas o del relieve. Normalmente se produce

una aceleración e intensificación de los procesos geomorfológicos activos. En todo caso, siempre sucede una modificación de los flujos de agua y materiales en todo su contexto.

Según Cooke y Doornkamp (1974), la ingeniería geomorfológica puede aportar contribuciones aún más directas al desarrollo urbano, la construcción de edificios, instalaciones de transporte, servicios públicos, estructuras de control de inundaciones e instalaciones recreativas. Los beneficios concretos de los conocimientos geomorfológicos en estas tareas sólo pueden ilustrarse mediante estudios de casos.

En opinión de Arroyo (2022), las razones por las que los seres humanos seleccionan territorios para asentarse obedecen a múltiples circunstancias. A lo largo de la historia, tales motivaciones han estado marcadas por motivos defensivos, económicos y culturales, entre otros. El proceso de crecimiento de ciudades en América Latina no ha estado regido por pautas de orden urbano y, muy por el contrario, estas áreas son el reflejo de una combinación de factores socioeconómicos que, además de mostrar efectos sensibles en el contexto humano, tienen también impactos muy importantes en el medio físico-natural, por cuanto lo urgente de necesidades de vivienda y otros servicios (vialidad rural de acceso a las comunidades o a los predios agrícolas, por ejemplo) ha hecho que estas se establezcan y extiendan por los sitios más insólitos y, lógicamente, sin ninguna consideración arquitectónica, y menos de diseño y de conservación del entorno. En tal sentido, es de esperarse que estos conglomerados urbano-rurales, esparcidos por los sitios más disímiles y de mayor fragilidad ambiental por restricciones topográficas, de suelos se hayan convertido con el tiempo, en territorios muy sensibles en la actividad de procesos erosivos, deslizamientos e inundaciones. Las inundaciones y deslizamientos se convierten en los ejemplos más usuales de amenazas naturales que tienen origen ahí, por lo que la delimitación de unidades geomorfológicas con esta susceptibilidad debe examinarse. Tales procesos en sí no son los únicos que introducen limitantes de uso en la ocupación de territorios ya que, en el contexto general de algunos países, las amenazas con origen antrópico responden, a su vez, a una crisis ambiental generalizada en sectores selectos.

Es evidente que las modificaciones espaciales que ha introducido la extensión de territorios así construidos acrecientan y multiplican la presencia de amenazas, en cierta forma nuevas, por cuanto a las dinámicas con origen físico conocido y en gran manera pronosticables, se insertan factores de riesgo en el plano social, con múltiples conexiones en el contexto urbano. En

tal sentido, el objetivo del levantamiento geomorfológico es proveer una precisa y sistemática imagen de formas del relieve de un área en la que se indica un amplio rango de influencias pasadas y actuales y de fenómenos relacionados. Los mapas originados no solo son documentos científicos en su correcta acepción, sino también valiosas herramientas para la evaluación de recursos, por las relaciones existentes entre las características geomorfológicas del terreno y otros factores ambientales. En el análisis de un territorio dado, el mapa geomorfológico es apenas uno de los insumos que deben compilarse, con miras a contribuir a obtener una descripción amplia de un sector en estudio (Arroyo, 2022).

Según Kenneth y Lewin (2014), el uso inteligente de las características de la superficie terrestre ha ayudado a los seres humanos a sobrevivir, evolucionar y adaptarse a diversas condiciones desde la prehistoria. Sin embargo, la geomorfología aplicada moderna ha comenzado en los últimos 40-50 años. Los datos geomorfológicos proporcionan importantes conjuntos de datos para su uso en diversas aplicaciones. Algunas de las ventajas de utilizar datos geomorfológicos son:

- Proporcionan datos espaciales precisos, como la ubicación exacta, el `área de influencia, las variaciones del relieve, etc.
- Permiten visualizar y detectar las características espaciales de las unidades de relieve y su correlación.
- Ayudan a apreciar mejor la naturaleza y la escala (regional y local) del problema.
- Ofrecen la oportunidad de incorporar la dimensión temporal para evaluar el problema.
- Proporciona pruebas documentales en forma de mapas temáticos específicos, planos, fotografías, datos de satélite, MDE y otros.
- Ayudan a evaluar el papel relativo de las causas naturales y antropogénicas.
- Proporcionan información científica crítica sobre los procesos y sus factores de control.

7.2. La Geomorfología y el inventario de suelos

Por largo tiempo la geomorfología fue considerada como una materia de exclusivo interés académico, en lo concerniente al conocimiento del origen y evolución de las diferentes formas del terreno, pero paulatinamente ha ido

emergiendo como una ciencia de gran interés y aplicación práctica para diversas actividades humanas. Hoy en día no solo ha recibido atención creciente de geomorfólogos, geógrafos y geólogos, sino también de edafólogos, forestales, ingenieros, planificadores rurales y urbanos, cada uno de los cuales busca darle un enfoque de acuerdo con sus propios intereses y necesidades de información.

De acuerdo con Zinck (2012, 2013, 2014, 2023), durante la segunda mitad del siglo XX, los avances en la cartografía sistemática de suelos, especialmente en los países en desarrollo, y los progresos en la cartografía de suelos para apoyar proyectos de desarrollo agrícola en diversos países han dado lugar a diversas formas de integración, con equipos mixtos de geomorfólogos y edafólogos. La geomorfología se consideró una herramienta para mejorar y acelerar el estudio de los suelos, especialmente mediante la fotointerpretación geomórfica. La geomorfología ha contribuido en la comprensión de la formación y distribución del suelo mediante modelos relacionales (por ejemplo, cronosecuencias y toposecuencias) y a apoyar la cartografía de este recurso vital. La aplicación de la geomorfología al inventario y cartografía de suelos requiere una taxonomía jerárquica de geoformas adecuada para ser utilizada en varios niveles categóricos correlacionad con el grado de detalle del inventario de suelos y de la cartografía tal como es indicado en la Tabla 1. De acuerdo con este sistema, el nivel de detalle requerido, la cantidad de atributos y la escala para inventariar, describir y cartografiar las categorías, respectivamente, se incrementa desde el nivel 6 hasta el nivel 1. Cada nivel propuesto o geotaxa está asociado a una escala de prospección y de análisis, desde escalas muy pequeñas en los dos primeros niveles o categorías (1:1000.000-1:2.000.0000), hasta escalas medias a grandes en los cuatro niveles siguientes (1:500.000-1:25.000 o mayores).

Tabla 1. Síntesis del sistema de clasificación de las geoformas**.** Fuente: Zinck,1988.

Nivel	Categoría	Concepto genérico
6	Orden	Geoestructura
5	Suborden	Ambiente morfogenético
4	Grupo	Paisaje
3	Subgrupo	Relieve/Modelado
2	Familia	Litología/Facies
1	Subfamilia	Forma de terreno

7.2.1. La contribución de la geomorfología al estudio del suelo

Tal y como se entiende, la geomorfología es el estudio del paisaje y de la influencia de los procesos paisajísticos en la formación del suelo. Para Zinck (2012, 2013, 2014, 2023), la geomorfología proporciona un entorno natural en el que tienen lugar la formación y la evolución del suelo. El entorno geomórfico, al integrar los factores de material parental, relieve, tiempo y procesos superficiales, constituye una parte esencial del marco espacial y temporal en el que se originan, desarrollan y evolucionan los suelos. Existe una integración de las dos disciplinas, pero la geomorfología desempeña el papel decisivo El contexto geomórfico es un marco adecuado para cartografiar los suelos y comprender su formación. La geomorfología proporciona los contornos de las unidades cartográficas (es decir, el contenedor), mientras que la edafología aporta los componentes taxonómicos de las unidades cartográficas (es decir, el contenido).

La contribución directa de la geomorfología en el levantamiento de suelos se revela a dos grandes niveles:

Nivel 1: la geomorfología contribuye a las tareas de fotointerpretación, selección de zonas de muestreo, identificación de lugares representativos y delimitación de las unidades geopedológicas.

Nivel 2: la síntesis geomórfica es uno de los temas más prolíficos del sistema por el número de aplicaciones, interpretaciones y de temas alcanzados. Así pues, la incorporación de la geomorfología permite agilizar, acelerar y mejorar el estudio del suelo.

7.2.2. Geomorfología y geopedología

Bajo el enfoque de la geopedología de Zinck (2012, 2013, 2014, 2023) será descrita la importancia de la geomorfología en el levantamiento de suelos y evaluación de tierras, tal como fueron conceptualizados en el país a mediados de la década de los 60.

De acuerdo con Zinck (2014, 2023), el uso de la geomorfología, integrada con la edafología, ha demostrado agilizar y mejorar el inventario de suelos. Las características geomórficas externas del terreno (es decir, los atributos morfométricos y morfográficos) ayudan a delimitar las unidades de distribución natural del suelo, mientras que las características internas del material geomórfico (es decir, los atributos morfogenéticos y morfocronológicos) contribuyen a comprender la formación del suelo. La geomorfología y la edafología están conceptual y prácticamente relacionadas. En términos

de cartografía de suelos, las unidades geomórficas (es decir, las geoformas) proporcionan marcos cartográficos para las delineaciones de suelos, mientras que las descripciones edafológicas suministran la información de los suelos, de sus delineaciones (por ejemplo, propiedades del suelo, uso, clasificación). La geomorfología por sí sola proporciona información sobre tres de los cinco factores de formación del suelo, en particular, relieve/topografía, material parental y edad.

De acuerdo con Zinck (2012, 2013; 2014, 2023), la geopedología tiene un objetivo más práctico y podría definirse como:

> *la disciplina de estudio del suelo, que incluye la caracterización, clasificación, distribución y cartografía de los suelos, haciendo hincapié en la contribución de la geomorfología a la edafología*.

La geopedología es un enfoque para el levantamiento de suelos, que combina criterios geomorfológicos y pedológicos para determinar las unidades del mapa de suelos. La geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo, mientras que la pedología provee los componentes de suelo de las unidades de mapeo.

En el enfoque geopedológico, geomorfología y pedología se benefician mutuamente de diversas maneras tales como las siguientes, entre otras:

(i) La geomorfología provee un marco genético que contribuye a entender la formación de suelos

(ii) La geomorfología provee un marco cartográfico para el mapeo de suelos, que ayuda a entender los patrones de distribución y la geografía de suelos

(iii) El uso de criterios geomorfológicos contribuye a la racionalidad del levantamiento de suelos, disminuyendo el sesgo personal del levantador

(iv) La geomorfología contribuye a la construcción de la leyenda de suelos como factor guía

(v) La cobertura de suelos mediante sus propiedades (mecánicas, físi cas, químicas, mineralógicas, biológicas) suministra datos que contribuyen a evaluar la vulnerabilidad del paisaje geopedológico y a estimar el balance morfogenético actual (erosión-sedimentación).

La geopedología se centra en la contribución de la geomorfología a la edafología, para la cartografía de los suelos y la comprensión de su formación. Esta contribución se basa en lo siguiente:

(i) Las geoformas y otros rasgos geomórficos, incluidos los procesos de formación, agradación y degradación, pueden reconocerse me diante la observación directa sobre el terreno y la interpretación de documentos obtenidos por teledetección (fotografías aéreas e imá genes de satélite) y productos derivados de ellos (DEM)

(ii) Por lo general, las geoformas se distribuyen en sistemas paisajísticos controlados por un agente formador dominante (por ejemplo, el agua, el hielo o el viento). Esto permite interpolar/extrapolar información en zonas cartográficas y predecir la aparición de unidades geopedológicas en lugares no visitados

(iii) Las geoformas son relativamente homogéneas a un nivel categórico determinado y con respecto a las propiedades que son diagnósticas a este nivel. Las variaciones no aleatorias y sistemáticas de la cu bierta geopedológica suelen ser de naturaleza geomórfica

(iv) El contexto geomórfico es un marco importante de la génesis y evo lución de los suelos

(v) El análisis geomórfico permite segmentar el continuo del paisaje fisiográfico en unidades espaciales que sirven de marco: a) para interpretar la formación del suelo junto con los factores de la biota, el clima y la actividad humana; b) para componer las unidades cartográficas del suelo; y c) para analizar las variaciones espaciales de las propiedades del suelo.

La estructura del paisaje geomórfico sirvió de soporte a la cartografía de suelos, mientras que la dinámica del entorno geomórfico ayudó a explicar la génesis y evolución del suelo, con retroalimentación de la información edafológica al conocimiento geomorfológico (Zinck, 2012, 2013, 2014, 2023). El enfoque geopedológico permite transformar la información de suelos y geomorfología en aspectos interpretativos y utilitarios de múltiple propósito, para la planificación y uso de la tierra (Tabla 2).

A manera de antecedente, el enfoque geopedológico, se desarrolló en Venezuela con la aplicación sistemática de la geomorfología en los programas de inventario de suelos, que el país realizó en la segunda mitad del siglo XX a varias escalas desde detallada hasta generalizada. En un proyecto determinado, la aplicación práctica de la geomorfología se iniciaba con el establecimiento de un mapa preliminar de fotointerpretación previo al trabajo de campo.

Tabla 2. Algunas aplicaciones utilitarias de la geopedología en la planificación del uso de la tierra. Fuentes: Zinck (2012, 2013, 2014).

Propósito	Aplicaciones con fines de uso
Ambiental	Caracterización integral del medio natural, para: Cartografía y evaluación de riesgos naturales [a] Ordenación del territorio[a] Planificación y gestión de cuencas hidrográficas Cartografía de áreas naturales que ameritan protección Identificación y evaluación de áreas con potencial turístico Cartografía y evaluación de áreas de patrimonio geo-histórico Cartografía y evaluación de geoformas para estudios de impacto ambiental (EIA)
Agrícola	Aptitud de los suelos para la agricultura de secano. Aptitud de los suelos para la agricultura de regadío. Limitaciones del terreno para la mecanización agrícola, para la construcción de lagunas. Caracterización del drenaje natural y drenabilidad del terreno. Morfodinámica actual (erosión, sedimentación). Disponibilidad de agua.
Ingenieril	Fuentes de materiales de construcción (de arena y grava), fuentes de material para el relleno de carreteras. Limitaciones para el diseño de la red de carreteras, cortes de carreteras, colocación de cables y tuberías, para la cimentación de edificios bajos y casas, cimentación de terraplenes, para zonas residenciales, para calles y aparcamientos, para la excavación de canales, para la construcción de diques, para zonas de filtración séptica, para lagunas de oxidación, para sitios de vertido de residuos, para zonas de recreo (picnic, terrenos de juego), para céspedes, campos de golf, paisajismo, para sitios de acampar.

En Venezuela, el inventario de suelos se inició en los años 1950-1960 como proyectos locales y regionales de apoyo a la planificación de los sistemas de riego en los Llanos (MOP, MARNR) y, posteriormente, como inventario sistemático de suelos a escala nacional (COPLANARH). Estos levantamientos implementaron un enfoque integrado basado en el paradig-

ma del paisaje geopedológico el cual está estrechamente relacionado con el paisaje edáfico, como entidad para describir, muestrear, clasificar y mapear suelos (Zinck, 1976). La integración entre geomorfología y edafología en Venezuela ocurrió a lo largo de todo el proceso de levantamiento, desde la fotointerpretación inicial hasta la elaboración del mapa final. Uno de los principales requisitos para que la aplicación de la geomorfología sea más eficaz en este tipo de estudio integrado es aplicar una taxonomía de geoformas, tal como se muestra en la Tabla 1. El enfoque geomorfológico de la taxonomía de Zinck (1988, 2012, 2013, 2014, 2023) ha sido el más aplicado en el país para el levantamiento de suelos, desde mediados de la década de los 60.

Una de las aplicaciones más generalizadas de la geomorfología en Venezuela ha sido en los inventarios de suelos. Los inventarios de suelos en Venezuela a partir de 1966 fueron diseñados y ejecutados considerando la aplicación de la geomorfología para su caracterización y cartografía, según lineamientos propuestos por Alfred Zinck. Para el año 1970, Zinck había desarrollado una metodología para el inventario de suelos en ambientes aluviales (Zinck, 1970, 1976), la cual fue aplicada por los agrólogos adscritos al Ministerio de Obras Públicas (MOP) y al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) y por otras instituciones nacionales. Con la aplicación de la geomorfología fueron realizados estudios de suelos en varias regiones del país y a varias escalas, en el sector Santo Domingo-Paguey (1966), en el Valle del río Tiznados (1967), en áreas montañosas de los Andes (1968), en el Valle del río Tocuyo (1969), en el Valle del río Quediche (1969), en la Depresión de Quibor (1970), en los llanos altos occidentales (1971), Valle del río Guarapiche (1971), en el sector Bruzual-Mantecal (1972), cuenca del río Neverí (1973). Como otros ejemplos del uso de la taxonomía geomorfológica se mencionan los estudios de suelos ejecutados por el MOP en los llanos orientales (Zinck y Urriola, 1970, 1971) y posteriormente por el MARNR (1986) a escala 1:100.000-1:250.000 en los llanos occidentales; el levantamiento de suelos de la Depresión del Lago de Valencia (escala 1:25.000) y el estudio de suelos incluido en el Programa de Inventario de Recursos Naturales de la Región Guayana (PIRNRG) (escala 1:250.000) realizado por CVG y CVG-Tecmin entre 1984 y 1992, estudio que refleja en su Manual Metodológico la aplicación de la geomorfología como disciplina transversal para la prospección de los recursos naturales de la región Guayana (García, 1987). Una característica de estos estudios fue el uso de la geomorfología para la delineación, descripción e interpretación utilitaria de las unidades cartográficas de suelos y de otros recursos naturales.

Además de la propuesta de taxonomía geomorfológica creada por Zinck, Elizalde (2012) también desarrolló una propuesta de clasificación taxonómica geomorfológica. En 1983, el autor propuso la primera aproximación de un ensayo de clasificación de paisajes en 8 categorías cada una de las cuales corresponde a ciertos niveles de complejidad y de escala de representación cartográfica. Se propone una definición del término paisaje vinculado con los conceptos de ecosistema y sistema pedogeomorfológico. La jerarquización de las categorías considera en forma secuencial variables de menor a mayor variabilidad espacio-temporal. En ese sentido, se privilegia la información geológica para la caracterización de las categorías más generales, debido a la mayor estabilidad espacio-temporal del entorno geológico, respecto a los otros componentes de los paisajes. En forma opuesta, se utiliza la distribución espacial del componente edáfico como uno de los criterios importantes para la identificación y delimitación del paisaje. El autor concluye que los mapas obtenidos a partir de este sistema de clasificación tienen muchos campos de aplicación, tales como:

(i) Marco para nuevos mapas geomorfológicos más detallados

(ii) Marco de referencia para la correlación regional o internacional de paisajes

(iii) Marco para la elaboración de mapas de unidades ecológicas, de suelos, de vegetación, de unidades agroecológicas o similares

(iv) Base para identificar y conocer la distribución espacial de los indicadores de riesgo ambiental de diferentes tipos de usos de la tierra

(v) Adecuados para la identificación, integración y desglose de las presiones ejercidas sobre la biodiversidad que sufren los ecosistemas

(vi) Útiles para la selección de áreas de referencia de paisajes adecuados para identificar y medir los indicadores orientados a políticas agroambientales.

7.3. Geomorfología y la planificación ambiental

La creciente vulnerabilidad de los países en desarrollo, debida a una gestión territorial ineficaz, expansión urbana y agrícola sin control y en sitios de alta fragilidad ambiental, conduce al desencadenamiento frecuente de catástrofes, variables en extensión e intensidad, con grandes costos en términos de vidas humana y bienes (Fig. 4).

El crecimiento no planificado suele dar lugar a asentamientos humanos y urbanizaciones de baja densidad o de uso único, dispersas y de escasa accesibilidad a espacios abiertos. Los urbanistas suelen tener en cuenta únicamente parámetros económicos y sociales para planificar las ciudades. Los análisis geomorfológicos multicriterio han demostrado su eficacia en diferentes entornos urbanos reduciendo los desastres, como ha sido considerado previamente por Bathrellos *et al.* (2012). El crecimiento urbano desorganizado asociado a la evaluación del riesgo de desastres y sus posibles soluciones han sido ampliamente estudiados en ciudades densamente pobladas de países en desarrollo. Es importante desvincular la dependencia del gobierno nacional de la toma de decisiones locales en materia de gestión de riesgos (García-Soriano *et al.* 2020).

Figura 4. Expansión agrícola en vertientes escarpadas, estado Mérida. Foto P. García.

7.3.1. La geomorfología en la caracterización y planificación de espacios naturales protegidos.

Para Serrano *et al.* (2009), García (2014), el relieve constituye la base de la organización espacial de los Espacios Naturales Protegidos (ENP), Áreas Bajo régimen de Administración Especial (ABRAE) como Parques Nacionales, Monumentos Naturales, en el caso venezolano, y otros territorios, y es en el relieve donde se sustenta gran parte de su atractivo, e incluso, los argumentos que justificaron su protección y manejo. Las formas de relieve son una parte primordial de los ENP y ABRAE, por lo que se hace

necesaria su consideración no sólo como elementos a conservar, sino en su ordenación y gestión. Los Planes de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) y los Planes Rectores de Uso y Gestión (PRUG) y los Planes de Ordenación del Territorio incluyen a la geomorfología como un elemento fundamental desde tres puntos de vista, como componente del medio natural, como patrimonio y como recurso. Por ello se hace necesario conocer y valorar los elementos geomorfológicos de los ENP y ABRAE en su calidad de componente clave del sistema natural, tanto heredado como parte funcional de los hábitats, pero también sus valores en relación con el patrimonio cultural, su potencial de uso, fragilidad, estado de conservación en el marco geográfico del ENP o ABRAE en el cual se circunscriben (Serrano *et al.* 2009; García, 2014).

Lugares de Interés Geomorfológico (LIG), por ejemplo, son formas y asociaciones de formas de relieve de especial interés (monumental, escénico, ecológico, pedagógico o científico), esenciales en la configuración morfológica y en la dinámica y evolución de los espacios naturales. Estos poseen especial relevancia para la comprensión del medio natural, la historia de la tierra, del clima o de la vida, e incluyen valores científicos, culturales, estéticos o socioeconómicos. La valoración de los contenidos culturales de los elementos geomorfológicos (históricos, etnográficos, artísticos, literarios, territoriales, paisajísticos) facilita la comprensión del territorio y una gestión más adecuada para su utilización como recurso, acorde con su conservación (Serrano *et al.* 2009).

Los LIG han sido definidos en función de sus características geomorfológicas, su potencial paisajístico, cultural y de uso, así como su fragilidad. Por lo general, en los planes de ordenamiento de recursos naturales la metodología aplicada se basa un criterio excesivamente geológico y por ello poco integrador de los aspectos paisajísticos y culturales que forman parte de la razón que justifica la protección y conservación de los Lugares de Interés Geomorfológico.

La metodología o nuevo enfoque propuesto para su definición y caracterización integra esos aspectos antes descuidados, otorgando a la componente geomorfológica un valor añadido indisociable; adicionalmente, considera el valor de uso y gestión, en el que se integran aspectos como la fragilidad, visibilidad, estado de conservación o límites de cambio antes no contemplados y que son fundamentales a la hora de plantear una propuesta de zonificación que refleje el grado de protección necesario y la capacidad de uso del LIG. El exhaustivo análisis territorial y geomorfológico permite defi-

nir propuestas concretas para la ordenación de los ENP, tanto en lo que se refiere al establecimiento de sus categorías de ordenación, como al grado de protección requerido, desde la conservación estricta hasta el establecimiento de distintos condicionantes superpuestos a la ordenación de su uso **(**Serrano *et al.*2009).

Castaldini e*t al.* (2005), consideraron la contribución de los documentos geomorfológicos y los criterios y metodología utilizados para la realización de mapas turístico-ambientales en dos áreas protegidas situadas en zonas de colinas y montañas de los Apeninos de Módena (norte de Italia). Se elaboraron mapas geomorfológicos y se hizo uso de modelos digitales del terreno (MDT). Los mapas geoturísticos se derivaron de los mapas geomorfológicos y combinan las características geomorfológicas más evidentes con información turística fundamental. El objetivo era producir mapas que pudieran ser fácilmente interpretados por los turistas para ayudarles a comprender el paisaje. Los mapas geoturísticos y el MDT son los documentos cartográficos que caracterizan los mapas turístico-ambientales, los cuales contienen una descripción sinóptica de los aspectos geológicos, geomorfológicos, botánicos y zoológicos de los sitios, acompañada de fotografías e información sobre los senderos de excursión, los centros de visitantes, las normas de comportamiento, los puntos de abastecimiento (víveres), los lugares de pernoctación y, por último, las atracciones culturales y turísticas de las zonas protegidas y sus alrededores. Los mapas turístico-ambientales forman parte de las iniciativas adoptadas por los Consejos Públicos para mejorar el conocimiento, la utilización y la valoración del entorno de las zonas protegidas y revelan cómo las investigaciones geomorfológicas pueden contribuir eficazmente a la elaboración de mapas que pueden utilizarse en el ámbito del turismo ambiental.

En Venezuela, la geomorfología ha sido soporte de información en materia de planificación ambiental. Uno de los primeros estudios de aplicación específica de la geomorfología en esta materia lo representa el "*Estudio geomorfológico del río Apure y sus zonas adyacentes*" realizado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP, 1974). En esta prospección geomorfológica para una superficie de 270.000 el objetivo central fue generar información para analizar la dinámica fluvial del río Apure; los sistemas morfogenéticos (fluvio-deltaico y eólico) fueron la base conceptual para analizar la problemática y permitir la generación de los mapas geomorfológicos, para proponer recomendaciones orientadas a la recuperación de tierras y el control de las aguas como consecuencia de las inundaciones estacionales provocadas por el río Apure.

7.3.2. La información geomorfológica en la caracterización de cuencas

En las ciencias de la tierra ha sido reconocida la dependencia de la geomorfología en la interacción de la geología, el clima y el movimiento del agua sobre la superficie terrestre. Las características físicas de una cuenca forman un conjunto que influye profundamente en el comportamiento hidrológico. Así pues, la geomorfología permite el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas, o sus rasgos morfométricos, para fines de su caracterización hidrológica y su aprovechamiento y conservación; estos parámetros morfométricos para la evaluación de cuencas son datos derivados de su caracterización geomorfológica. Adicionalmente, la evaluación geomorfológica permite evaluar la estabilidad de la cuenca mediante el análisis del balance morfodinámico, el cual nos indica que factores y procesos están afectando la estabilidad de los relieves o geoformas de una cuenca. Un mapa geomorfológico permite visualizar estos factores y procesos y otros atributos de las cuencas (tipo de red de drenaje, disección, evidencias de actividad morfodinámica pasada o actual, inestabilidad de vertientes, entre otros).

Venezuela, ha utilizado la geomorfología como disciplina fundamental para la caracterización de las cuencas hidrográficas en los paisajes de montaña. Tal como lo señala el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (MARNR, 1985), se formuló un programa regional de investigación denominado "*Inventario de tierras de las cuencas altas de los estados Aragua y Carabobo*" a escalas 1:250.000 y 1:100.000. Se realizó un análisis geomorfológico como instrumento básico orientador de las investigaciones y como fuente de información básica para otros proyectos. En este estudio se plantearon como objetivos centrales:

(i) La experimentación en áreas muestras a escala 1:25.000 con el pro pósito de servir de base para extrapolar comportamientos al uso y manejo de áreas similares en dinámica o para predecir el comportamiento hidrológico

(ii) Para el análisis geográfico y morfodinámico de las cuencas del estado Aragua

(iii) Para el establecimiento de unidades cartográficas estables generadas por las unidades geomorfológicas, para la recolección de información.

Para Mejía y Vera (2001), el modelo suelo-paisaje constituyó una importante herramienta para el estudio de los suelos en la microcuenca del río Zarzales, estado Mérida (Venezuela), al permitir definir y analizar las relaciones empíricas entre las propiedades del suelo y el sistema paisaje del cual forma parte. Las unidades suelo-paisaje constituyen unidades espaciales homogéneas, cuyo mapeo puede ser utilizado como base para los procesos de gestión y manejo de cuencas hidrográficas, aportando a los planificadores una base sobre la cual desarrollar estrategias de manejo más eficientes de los recursos naturales, principalmente el suelo y el agua. Fue importante considerar el efecto que pueden ejercer los factores geomorfología, clima, orientación y la intervención antrópica, en la diferenciación y diversificación actual del sistema Suelo-Paisaje.

Las aplicaciones potenciales del modelo incluyen, entre otras, la determinación de áreas sujetas a riesgo de erosión, de ocurrencia de deslizamientos, de exceso de humedad para cultivos y de compactación del suelo por efecto de la ganadería. De igual manera puede facilitar la planificación del uso de la tierra, determinando las unidades más aptas para la agricultura, la ganadería o la protección hidrológica, entre otras en función de las condiciones generales del suelo, lo cual apunta hacia una utilización sostenible del mismo.

Pareta y Pareta (2012) consideran que, en las últimas décadas se ha hecho gran hincapié en la geomorfología en el desarrollo de métodos fisiográficos cuantitativos para describir la evolución y el comportamiento de las redes naturales de drenaje superficial. Las características morfométricas a escala de cuenca hidrográfica pueden contener información importante sobre su formación y desarrollo, ya que todos los procesos hidrológicos y geomórficos ocurren dentro de la cuenca.

El análisis morfométrico, resultante de la identificación de aspectos geomórficos de una cuenca. proporciona una descripción cuantitativa del sistema de drenaje, que es un aspecto importante de la caracterización y gestión de cuencas. El uso de la tecnología de teledetección y los SIG para los estudios geomorfológicos ha aumentado definitivamente su importancia debido al establecimiento de su relación directa con disciplinas aliadas, como la geología, suelos, vegetación y uso del suelo y la hidrología. Estos autores aplicaron el análisis geomorfológico cuantitativo de una cuenca hidrográfica de la India, y el resultado reveló que, los datos obtenidos por el uso de técnicas de teledetección y el enfoque basado en sistemas de información geográfica (SIG) para la evaluación de los parámetros morfométricos del

drenaje y su influencia en las formas del terreno, los suelos y las características de las tierras erosionadas a nivel de cuenca hidrográfica son más apropiados que los métodos convencionales. Los análisis morfométricos se llevaron a cabo mediante la medición de aspectos lineales, areales y de relieve de la cuenca con más de 53 parámetros morfométricos (Pareta y Pareta, 2012).

En Venezuela, se han realizado estudios del territorio con la aplicación de la geomorfología, fundamentados en las relaciones geoforma-suelo, a diferentes escalas y en una variedad de ambientes utilizando fotografías aéreas, radares e imágenes satelitales (García, 2014), tal como ha sido el caso de la cuenca del río Caroní al sur de Venezuela, espacio importante por aportar la mayor parte de la energía eléctrica consumida en el país. Para garantizar la sostenibilidad de la producción hidroeléctrica, se realizó un plan de manejo ambiental de los recursos naturales de la cuenca, el cual tuvo como paso inicial la realización de una zonificación territorial con base en información geomorfológica y edáfica para proponer usos del suelo compatibles con la preservación del potencial hidroeléctrico.

Las unidades geomórficas y sus componentes edáficos, junto con elementos auxiliares como la cubierta vegetal, se cartografiaron a dos escalas utilizando un sistema de clasificación de geoformas multicategórico. A partir de esta información se derivaron dos propuestas de zonificación, una basada en las unidades geomórficas del paisaje a escala 1: 250.000 y la otra basada en las unidades de tipo relieve o geoformas a escala 1: 100.000. Las unidades de zonificación se utilizaron para la evaluación del territorio y para establecer las normas de uso del suelo necesarias para el plan de gestión de la cuenca hidrográfica. El estudio describe un buen ejemplo de zonificación territorial a resoluciones geográficas relativamente bajas (escalas 1: 250.000 y 1: 100.000) en una cuenca fluvial bastante extensa del sur de Venezuela, importante en la provisión de hidroelectricidad a nivel nacional, de moderado potencial agrícola, de alto potencial minero y turístico y con presencia de áreas protegidas, entre otros atributos relevantes.

El estudio estuvo orientado a resolver problemas de ordenamiento territorial en la cuenca con la premisa de la sostenibilidad a largo plazo de la producción de energía. El estudio demostró la utilidad de la Geopedología para el apoyo de estos esfuerzos de zonificación, lo cual se emprendió como paso inicial para proponer usos del suelo compatibles con la preservación del potencial hidroeléctrico y para establecer las regulaciones de uso del suelo requeridas para el plan de manejo de la cuenca (García, 2014).

7.3.3. Riesgos naturales: los riesgos geomórficos

Las actividades humanas, especialmente en los dos últimos siglos, han tenido un enorme impacto en el ambiente y el paisaje. El hombre es capaz de controlar e inducir cambios en el paisaje, pero está sujeto a procesos y peligros naturales (retornos ambientales) debido a fenómenos graves y extremos (terremotos, deslizamiento de tierras e inundaciones) y a los riesgos conexos. Los riesgos y la vulnerabilidad no son sólo una expresión del entorno natural, sino que también están relacionados con la interacción humana con la naturaleza. El elevado nivel de conocimientos sobre los peligros naturales y los riesgos asociados se deriva de la historia geológica y geomorfológica y de los registros históricos de los procesos naturales y crece con estudios e investigaciones multiescala, multitemporales y multidisciplinares, que incluyen cuestiones de gestión del territorio, económicas y sociales.

Para Alcántara-Ayala (2002), los peligros naturales son eventos amenazantes, capaces de producir daños en el espacio físico y social en el que tienen lugar no sólo en el momento de su ocurrencia, sino a largo plazo, debido a sus consecuencias. Cuando estas consecuencias repercuten en la sociedad y/o en las infraestructuras, se convierten en catástrofes naturales (Figuras 5 y 6). Éstas pueden considerarse acontecimientos naturales repentinos pero esperados, que impactan en los sistemas humanos y naturales. Es pertinente destacar la importancia de la incorporación no sólo de la investigación geomorfológica, sino también de los geomorfólogos en los programas de evaluación y gestión de riesgos en los países más pobres.

La investigación geomorfológica puede aportar enfoques teóricos y aplicados a la prevención de catástrofes naturales en cuanto al origen y dinamismo de los procesos físicos; los geomorfólogos también podrían ofrecer importantes contribuciones basadas en la comprensión de la interacción entre los peligros naturales (vulnerabilidad natural) y las sociedades (vulnerabilidad humana). Al contribuir a la comprensión de los procesos endogenéticos y exogenéticos, se pueden desarrollar y aplicar metodologías para predecir patrones de ocurrencia de eventos peligrosos. Los aportes de la geomorfología serían aún más significativos si las aplicaciones de la investigación se orientaran hacia la comprensión y el acoplamiento de las vulnerabilidades humanas y naturales; los geomorfólogos jueguen un papel clave para la prevención de desastres naturales, lo cual debe aplicarse con prioridad en los países en desarrollo (Alcántara-Ayala, 2002).

Para Benito y Diez (2004), las principales contribuciones de la geomorfología a la prevención y mitigación de desastres naturales provie-

Figura 5. Deslave en el estado Vargas. (1999). https://cdn.bitlysdowssl-aws.com/wp-content/uploads/2018/12/tragedia-vargas-desastre-que-estremecio-venezuela-hace-anos_263477.jpg

Figura 6. Deslave en Las Tejerías, estado Aragua (2022). https://www. noticias barquisimeto.com/wp-content/uploads/2022/10/Las-Tejerias-ONU.jpg

nen de la identificación y la valoración de los fenómenos catastróficos, del estudio de sus mecanismos y de la evaluación espacial y temporal de la ocurrencia del peligro natural. La geomorfología identifica y caracteriza mecanismos y procesos a partir del estudio de las formas y los depósitos, lo que contribuye a la reconstrucción del evento causante de la catástrofe, incluso décadas o siglos después de que se haya producido. Esta peculiari-

dad de la geomorfología proporciona nuevas perspectivas en el campo de la prevención y la cartografía de riesgos. La incorporación en los estudios geomorfológicos de nuevos métodos de monitoreo y medida de los procesos actuales, así como los nuevos avances informáticos han permitido el despegue de la geomorfología como disciplina a considerar en los estudios de prevención, planificación y mitigación de desastres naturales y antrópicos. La geomorfología se consolida como herramienta de análisis y prevención de estos fenómenos extremos (Benito y Diez, 2004).

Aristizábal y Yokota (2006) en su estudio en el valle del río Aburrá, en Colombia, describen el término deslizamiento, citando la definición de Cruden (1991), como:

> "*el movimiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera*".

Los procesos de inestabilidad son el producto de la geomorfología local, hidrología y condiciones geológicas. La modificación de estas condiciones por procesos geodinámicos, vegetación, usos del suelo y actividades humanas activan movimientos lentos, generalmente imperceptibles debido a que las propiedades mecánicas del material decrecen gradualmente. Posteriormente, factores como precipitación y sismicidad detonan dichos movimientos lentos en rápidos movimientos en masa. Numerosas contribuciones dentro del campo de la geomorfología han sido enfocadas especialmente al análisis y evaluación de la susceptibilidad. La susceptibilidad está fuertemente relacionada a la geomorfología, debido a que sus diversos componentes son considerados parámetros esenciales en la dinámica de la superficie terrestre. Como consecuencia, la geomorfología se ha ocupado de analizar, evaluar, y prever fenómenos catastróficos como movimientos de masa, sismos, inundaciones y vulcanismos, entre otros. El nuevo énfasis de la geomorfología está en la predicción de las condiciones del terreno usando información del origen y evolución de las geoformas y materiales, al igual que determinar la actividad y frecuencia de los procesos y naturaleza de las amenazas. Las condiciones del ambiente están en continuo cambio, no sólo por la influencia humana, sino también por procesos y fenómenos naturales (Aristizábal y Yokota, 2006; Aristizábal *et al.* 2010).

Miccadei y Piacentini (2013) consideran que es necesario hacer un gran esfuerzo para mejorar la evaluación de riesgos y la aplicación de las leyes existentes y, si es necesario, de nuevas leyes, realmente derivadas de desastres recientes. Ello contribuirá a lograr una gestión del territorio mejor y

más eficaz, basada en un enfoque interdisciplinario en el que intervendrán geólogos expertos y gestores del territorio y otras áreas de conocimiento, debido a la importancia de los procesos naturales en la inducción de riesgos. Garantizar un entorno humano más seguro solo puede lograrse mediante estudios completos multidisciplinarios, multiescala y multitemporales basados en la investigación y la cartografía geológica y geomorfológica, pero también integrando cuestiones de ingeniería, arquitectura, economía y sociedad. En esta perspectiva, deben superarse eficazmente las fronteras entre las disciplinas profesionales y académicas, ya que obstaculizan el proceso de conocimiento e integración, o incluso impiden la búsqueda de causas, efectos, impactos, vulnerabilidad y otras cuestiones relacionadas con las catástrofes naturales. La investigación de los peligros y riesgos naturales es una actividad diversa y compleja y puede incluir evaluaciones geotécnicas y de ingeniería, análisis geomorfológicos y geográficos, perspectivas políticas y de gestión, así como consideraciones económicas y sociales.

El desarrollo sostenible de un país altamente expuesto a catástrofes de origen natural dependerá en gran medida, de la manera en que se ordene el territorio, considerando su base geográfica. En este contexto, la geomorfología debe ir más allá del academicismo y aportar al ordenamiento territorial (Ferrando, 2004).

Cuando intentamos darles un rol preventivo a los estudios geomorfológicos respecto de evitar, reducir o mitigar, las catástrofes asociadas a la ocurrencia de procesos naturales de gran magnitud y violencia, sea en escenarios potenciales o reales, evidentemente estamos orientando hacia el terreno de lo aplicado el quehacer de esta ciencia. Dicho conocimiento básico plasmado en mapas geomorfológicos regionales, es absolutamente necesario para comprender no sólo las características geomorfológicas y morfogenéticas, sino también y fundamentalmente para adentrarse en los mecanismos genéticos, en los agentes orogénicos y en los procesos morfodinámicos que han comandado y siguen rigiendo la evolución y el modelado de nuestro contexto geográfico físico. Los fenómenos sísmicos y los volcánicos suelen ser agentes detonantes de otras manifestaciones naturales como las pertenecientes a la familia de los movimientos de masas glaciales, nivales (avalanchas), rocosas (desprendimientos o derrumbes) y detríticas (aluviones, deslizamientos, etc.) (Fig. 7). Estos mecanismos, junto con las manifestaciones climáticas extremas, cada vez más extremas y frecuentes según la estadística y las tendencias del cambio climático global, interactúan con contextos geomorfológicos que, labrados sobre las morfoestructuras preexistentes, los heredamos de los efectos de las oscilaciones climáticas

cuaternarias. En este sentido, los conocimientos de geomorfología estructural y los de geomorfología climática, siguen siendo la llave de la adecuada interpretación y comprensión de las características, dinámica y reacción de los paisajes y sus formas. La geomorfología debe ir mucho más allá del academicismo puro y proyectarse definitivamente como una ciencia aplicada para, aportar datos e información en la línea del ordenamiento territorial y de la prevención de desastres (Ferrando, 2004).

De acuerdo con Kenneth y Lewin (2014), las amenazas han suscitado un interés creciente en las últimas décadas y el concepto de amenazas geomórficas engloba todas aquellas amenazas naturales y tecnológicas que inciden en la superficie terrestre, induciendo a menudo cambios morfológicos Las investigaciones se han centrado en peligros individuales, pero también es posible visualizar la forma en que una combinación de peligros puede contribuir a la inseguridad de un lugar. Las contribuciones geomórficas han

Figura 7. Movimientos en masa en la cuenca del río Boconó. Foto P. García.

cartografiado y modelizado las amenazas, analizado la vulnerabilidad, el peligro y el riesgo, y sugerido opciones de gestión, incluidas las destinadas a la prevención de desastres naturales.

Como afirman Bathrellos *et al*. (2012), durante la planificación de un entorno urbano, normalmente solo se tienen en cuenta los parámetros económicos y sociales. Como resultado, las áreas urbanas son susceptibles a los desastres naturales, que causan grandes daños en ellas, porque las ciudades o pueblos han sido repetidamente ubicados en zonas vulnerables. Para la protección del ambiente humano, se propuso un enfoque único de planifi-

cación urbana y desarrollo sostenible para la prefectura de Trikala, en Grecia Central. Este consistió en una evaluación integrada de las zonas adecuadas para el crecimiento urbano y el desarrollo de la industria ligera utilizando principalmente los riesgos naturales, así como las características geológicas, geomorfológicas y geográficas de la zona de estudio. Los parámetros utilizados se correlacionaron mediante el método del proceso jerárquico analítico (AHP) y se incorporaron a un sistema de información geográfica (SIG) para elaborar los correspondientes mapas de aptitud.

El área de estudio se clasificó en cinco categorías de aptitud muy alta, alta, moderada, baja y muy baja para el crecimiento urbano y el desarrollo industrial. Además, se estudiaron los cambios espacio-temporales de los límites urbanos desde 1885 para las tres principales ciudades (Trikala, Kalambaka y Pyli) de la zona de estudio. Estos cambios esbozaron la tendencia del crecimiento urbano. La comparación entre la tendencia de crecimiento urbano y la aptitud potencial para el crecimiento urbano y el desarrollo industrial de estas ciudades arrojó discordancias, imputables principalmente al hecho de que en la mayoría de los casos sólo se utilizaron factores geográficos, sociales y económicos para el desarrollo urbano. El estudio demostró que, mediante la incorporación de factores adicionales como los geológicos, geomorfológicos y geográficos, los planificadores, ingenieros y responsables políticos pueden mejorar los resultados en el desarrollo de estudios de evaluación de la aptitud, con el fin de llegar a la utilización más beneficiosa de la tierra, junto con la conservación de los recursos naturales y la protección de las vidas humanas y el ambiente.

Un estudio de Piacentini *et al.* (2020) en Italia, se basó en una investigación geomorfológica a escala de cuenca de drenaje combinada con la modelización de inundaciones. La investigación se centralizó en la evaluación de las áreas críticas de inundación para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) urbano, basado en la geomorfología en el área urbana de Lanciano y la cuenca del arroyo Feltrino (Abruzzo, Italia central). La evaluación de las zonas críticas sujetas a inundación se fundamentó en datos geológicos, geomorfológicos y de peligrosidad preexistentes, así como en nuevos estudios de campo detallados y en la cartografía de las características geomorfológicas e hidrográficas combinada con la modelización hidrológica.

En este marco, la cartografía geomorfológica detallada y el análisis exhaustivo de la red de afluentes (naturales y urbanos) de las zonas urbanas fueron herramientas fundamentales para la evaluación de peligros geohi-

drológicos, la mitigación de riesgos y la planificación territorial. Los efectos de estas catástrofes naturales también han aumentado debido a diversos factores como la degradación del ambiente, el cambio climático, el rápido crecimiento de la población y el uso intensificado e inadecuado del suelo. Las fuertes precipitaciones, combinadas con el aumento de la urbanización y los cambios relacionados en el uso del suelo, el paisaje y las corrientes de agua, hacen que las zonas urbanas sean propensas a sufrir inundaciones repentinas. Los SAT, si están fuertemente basados en la geomorfología, son reconocidos en todo el mundo como una de las mejores herramientas destinadas a la prevención de riesgos, la mitigación, la preparación y las estrategias de respuesta.

García-Soriano *et al.* (2020) consideran que los países en desarrollo enfrentan más impactos por amenazas naturales debido a la rápida urbanización, la sobreexplotación de los recursos naturales y la falta de ordenamiento territorial. Al respecto, la Ciudad de México es una de las zonas metropolitanas más pobladas del mundo y, además, debido a su dinámica geofísica y creciente vulnerabilidad, es frecuentemente impactada por desastres naturales. Estos autores utilizaron diversos análisis geomorfológicos para desarrollar una metodología factible para reducir el riesgo de desastres en la delegación Iztapalapa. Definieron tres regiones geomorfológicas: la planicie lacustre, el piedemonte volcánico y la zona montañosa. Posteriormente, desarrollaron una cartografía geomorfológica basada en Detección y Medición de Distancias por Imágenes Láser (*Laser Imaging Detection and Ranging-LiDAR-*) y fotografías aéreas para obtener treinta formas del relieve divididas en endógenas y exógenas, tanto erosiónales como deposicionales, a escala 1: 20.000. Con base en estos mapas, se describieron cuatro zonificaciones de riesgo geomorfológico para inundaciones, hundimientos, fracturas de suelo y desprendimientos de rocas en la delegación Iztapalapa.

Este estudio proporcionó insumos importantes para los actores locales y regionales en materia de gestión territorial y de riesgos. Se generaron una serie de mapas geomorfológicos para comprender la génesis, morfología, dinámica, cronología y evolución del paisaje de la delegación Iztapalapa. El análisis geomorfológico permitió correlacionar las amenazas asociadas con eventos de hundimientos, inundaciones, agrietamientos del suelo, así como desprendimientos de rocas. Se elaboró un mapa que muestra el área de cada uno de estos eventos diferenciados según su grado de intensidad (García-Soriano, *et al.* 2020).

7.3.4. La información geomorfológica y la ordenación del territorio

Según Rodriguez-Vidal (1987), el carácter integrador de la geomorfología le confiere a esta disciplina su mayor aplicabilidad. La interferencia de los procesos y de los agentes de la dinámica externa con las actividades y actuaciones humanas, y sus consecuencias, en algunas ocasiones catastróficas, ponen de relieve el interés de los estudios geomorfológicos. La importancia creciente que los procesos de la dinámica externa ejercen sobre la actividad humana, sobre todo los de tipo catastrófico, y su estrecha vinculación climática, obliga al geomorfólogo a realizar un estudio morfoclimático de la región, donde se contemple una distribución cartográfica de aquellos procesos que actúan dominantemente en cada zona y sus consecuencias en la transformación del relieve y evolución del paisaje.

El establecimiento de las complejas relaciones entre la morfoclimatología teórica con la morfogénesis real, va a ser la base adecuada que permitirá comprender mejor la dinámica de los procesos externos, el porqué de su existencia en ese lugar y momento y los cambios morfológicos presentes y futuros del relieve; cambios, en algunas ocasiones, débiles e imperceptibles o rápidos y catastróficos en otras. Los estudios geomorfológicos de una región son elementos indispensables de cualquier planificación ambiental o territorial, puesto que develan la inestabilidad del medio físico, los agentes que la provocan y el origen de los mismos. La aparente estabilidad del relieve, por medirse su dinámica en tiempos geológicos, se vuelve en repentina inestabilidad si concurren las circunstancias adecuadas para ello; es decir, si se supera un determinado umbral morfogenético.

La aplicación de estos estudios en beneficio de las actividades humana en un territorio se hace evidente, incidiendo directamente en los emplazamientos urbanos e industriales, en la ordenación rural, en el trazado de vías de comunicación, en instalaciones y obras hidráulicas, en los recursos mineros, en la ordenación del litoral o en la conservación de parques naturales (Rodriguez-Vidal, 1987).

Molina (2007), bajo un enfoque geomorfológico considera que, el Geosistemas, el subsuelo y el medio físico son quienes tienen mayor relevancia en los procesos de ordenamiento territorial y son quienes geográficamente tienen alta incidencia en los procesos demográficos, culturales, comerciales. Los indicadores de geopotencial permiten abordar una serie de aspectos inherentes al proceso de planificación ambiental del territorio, ya que con ellos es posible tener valoraciones medianamente objetivas y comparables, que permiten mejorar la comunicación entre científicos y la

sociedad; en también vislumbrar las posibilidades del territorio. Los indicadores de geopotencial permiten la vinculación entre científicos de la tierra y planificadores y pueden ser utilizados por los geocientíficos para integrarse de una mejor manera en los procesos de planificación ambiental del territorio; además, los planificadores pueden obtener la información del territorio transformada según un lenguaje más próximo de sus necesidades. Un aspecto clave de los indicadores es que están asociados a una unidad territorial, que tiene características homogéneas, las cuales son pieza clave como herramienta para el ordenamiento del uso y aprovechamiento del territorio bajo estudio. La construcción de índices de este tipo está orientada a comparar la intervención humana en un sitio determinado, en función de los valores ambientales del mismo. El conocimiento del geopotencial es una herramienta que también se puede utilizar como soporte para lograr que la normatividad ambiental sea más ajustada a la realidad. El Geosistema tiene quizás el papel más preponderante para la planificación ambiental (Molina, 2007).

En Venezuela, Colombia, México y en otros países de Latinoamérica la geomorfología es parte de la línea base para los planes de ordenación territorial, incluidos en estos los planes de manejo de cuencas hidrográficas y los planes ordenación urbana. Las unidades de ordenación del territorio o unidades integradas del territorio son delineadas a partir de las unidades geomorfológicas, atendiendo a la escala de los planes de ordenación (1:100.000 y 1: 250.000, 1:25.000, mayormente). Un claro ejemplo, de los muchos que existen en Venezuela, del uso de las unidades geomorfológicas en los planes de ordenación del territorio lo constituye el estudio Plan Maestro de la Cuenca del río Caroní, territorio que tiene una propuesta de ordenación a dos escalas, 1:250.000 y 1:100.000. Las unidades geomorfológicas, como expresión de la diversidad de relieves o geoformas, son el marco de referencia espacial (cartográfico) para el conjunto de caracterizaciones e interpretaciones utilitarias de los recursos naturales y para las diversas propuestas de uso (agricultura, minería, usos ingenieriles, turismo, conservación y protección, entre otros) planteadas para dicha cuenca (EDELCA, 2004; García, 2014).

7.3.5. Geomorfología y su aporte a los estudios de impacto ambiental (EIA)

Mientras que la geomorfología no prestó suficiente atención al impacto humano hasta la segunda mitad del siglo XX, ahora se sabe que los estudios

posteriores sobre el impacto de la acción humana en la superficie terrestre y sus procesos son sustanciales. El grado de impacto humano ha alentado la propuesta de definir el Antropoceno como una nueva era en la escala temporal geológica. El Antropoceno, sugerido en el año 2000 por Paul Crutzen, puede considerarse una nueva era geológica, y se pone de manifiesto al verse afectada gran parte de la superficie terrestre por las actividades humanas. La Tierra ya no funciona como antes, y ahora está fuera de las normas del Holoceno. Hasta 1960 aproximadamente, la geomorfología ignoraba el impacto humano y se concentraba en los accidentes geográficos o relieves y procesos de las zonas no muy afectadas por la acción humana. Ahora todo eso ha cambiado y aceptamos que tenemos que investigar esas zonas, las que plantean mayores problemas y aquellas en las que podemos ofrecer posibles soluciones (Kenneth y Lewin, 2014).

En muchos casos la intervención tiende a acentuar los procesos actuales, tal como la escorrentía en las zonas urbanas debido a la cobertura por edificaciones, pavimentación (sellado del suelo), alteración de la red de drenajes naturales, entre otros, pero en algunos casos las modificaciones del terreno llegan a constituir geoformas totalmente nuevas, ambiente denominado como Antrópico (antropoformas). Ejemplo de las modificaciones antropogénicas son los rellenos sanitarios y de escombros, o las canteras asociadas con la minería, el terraceo de áreas montañosas, el desvío de los cursos de agua, los trasvases, las represas, para solo mencionar algunos casos sobresalientes.

En opinión de Cendrero y Panizza (1997), el impacto cada vez más intensivo de las actividades humanas ha modificado muchos de los procesos geomórficos, acelerando los fenómenos erosivos en las vertientes montañosas mediante la modificación de la cobertura vegetal o interviniendo en los sistemas fluviales a través de las obras de represas, diques y canales, entre otros. La poca presencia de la geomorfología en los estudios de impacto ambiental (EIA) se debe probablemente a tres causas principales:

(i) La geomorfología no suele ser percibida como "importante" o "sensible" a la influencia humana por la comunidad no geomorfológica o ajena a las ciencias de la tierra; la sensibilidad y la preocupación con respecto a las características geomorfológicas tienden a ser consideradas por los no especialistas como rasgos permanentes del paisaje.

(ii) La comunidad geomorfológica, y la de las ciencias de la tierra en general, no han mostrado tradicionalmente un gran interés por las

cuestiones ambientales; la participación de los geomorfólogos en el debate ambiental general ha aparecido más tarde y, desde luego, no son tan intensos y generalizados como los esfuerzos equivalentes procedentes de las comunidades de las ciencias de la vida, del agua o de la atmósfera.

(iii) El escaso desarrollo de herramientas específicamente diseñadas para facilitar la evaluación de los efectos de las actividades humanas so bre los rasgos geomorfológicos, dentro del marco general de un EIA. Esto también se debe en parte a que los EIA se conciben normalmente como un instrumento para analizar los efectos de acciones concretas, mientras que los rasgos geomorfológicos son más adecuados para su consideración en relación con cambios en el uso del suelo que afectan a zonas más amplias que en el caso de proyectos aislados. En el caso de los bienes geomorfológicos se trata de rasgos geomorfológicos que son esencialmente "estáticos" y desempeñan un papel pasivo; pero la situación es muy diferente con respecto a los procesos geomorfológicos, que son "dinámicos" y desempeñan papeles t anto pasivos como activos y suelen reaccionar en respuesta a los cambios introducidos por las acciones humanas. Es obvio que la clave para mejorar los EIA sobre procesos geomorfológicos es la mejora de nuestra comprensión básica de tales procesos. Las evaluaciones de impacto geomorfológico serían más útiles para la evaluación de planes, pero a menudo no se exige la EIA para ellos. Según estos autores, la producción de la literatura geomorfológica es evidentemente menor que en el caso de las ciencias biológicas.

Sin embargo, desde hace varias décadas y de tiempos más recientes se dispone de ejemplos muy valiosos de libros de texto dedicados a la geomorfología y los problemas ambientales por autores como Tricart (1969); Cooke y Doornkamp (1974); Verstappen (1983); Fookes y Vaughan (1986); Easterbrook (1999), Panizza (1996); Owens y Slaymaker (2004); Slaymaker, Spencer y Embleton-Hamann (2009); Slaymaker (2010): Ritter, Kochel y Miller (2011); Anderson R y Anderson (2010); Hooke (2019); y Zinck *et al.* (2013, 2014, 2023); por mencionar algunos.

Según López-Blanco y Villers-Ruiz (1995), el ordenamiento ecológico de un territorio es un proceso dirigido a evaluar y definir el uso del suelo y la utilización de los recursos naturales, así como la protección y preservación de la naturaleza. La zonificación ecológica es el primer paso para determinar el ordenamiento ecológico de cualquier porción del territorio y consiste

en delimitar unidades con una homogeneidad razonable respecto a parámetros relacionados con el medio físico y biológico.

El objetivo de la zonificación, en fases posteriores, es caracterizar y agrupar las propiedades ambientales de las unidades para establecer y proponer la mejor adecuación del uso del suelo, en relación con el uso actual del suelo y las características sociales y económicas de la población local. El enfoque geomorfológico se ha aplicado en diversos campos de la prospección de recursos y la investigación ambiental, especialmente durante las últimas décadas. En este contexto, es posible distinguir la geomorfología ambiental como un factor importante de la aplicabilidad de este enfoque. Las unidades de terreno son el principal marco espacial para buscar la adecuación del uso del suelo a conjuntos de paisajes. Estos autores aplicaron el enfoque geomorfológico (principalmente morfoestructural para los sistemas ecogeográficos y morfogenéticos de los paisajes) en la definición de las unidades ambientales en estudios de ordenación ecológica o ambiental del territorio para Baja California, México.

El uso de SIG para recopilar, almacenar, recuperar, procesar y transformar la base de datos espacial fue útil para delimitar y definir las unidades ambientales-geomorfológicas. En su estudio, delimitaron treinta y dos unidades de paisaje que se clasificaron en cuatro políticas (estrategias) de gestión: conservación, uso, restauración y protección. Seleccionaron cincuenta y siete variables físicas, biológicas y socioeconómicas y las analizaron mediante técnicas multivariables (clasificación cuantitativa y componentes principales). Propusieron varios conjuntos de unidades ambientales (paisajes) con diferentes aptitudes para el uso del suelo:

(i) Unidades donde las actividades turísticas son la principal aptitud.

(ii) Unidades para el uso agrícola y ganadero como principal aptitud y secundariamente para la industria y el desarrollo urbano.

(iii) Unidades con aptitud para la mezcla entre las actividades turísticas costeras y la conservación (uso limitado de los recursos; baja intensidad y baja "demanda" o impacto sobre el medio terrestre (López-Blanco y Villers-Ruiz, 1995).

7.3.6. Geomorfología y cambio climático

Según Keiler *et al*. (2010), los cambios climáticos y ambientales asociados al calentamiento global antropogénico se están identificando cada vez más en los Alpes europeos, como demuestran los cambios a largo plazo en

la temperatura de las altas cumbres, las precipitaciones, la cubierta glaciar y el permafrost. Tales cambios repercuten en la estabilidad de la superficie terrestre y provocan un aumento de la frecuencia y la magnitud de los peligros naturales de montaña, como desprendimientos de rocas, flujos de detritos, deslizamientos de tierras, avalanchas e inundaciones.

Basándose en estas pruebas, estos autores esbozan las futuras implicaciones del cambio climático en los entornos montañosos y su repercusión en los peligros y la gestión de estos en los sistemas montañosos paraglaciales , es decir, en aquellas áreas paleoclimáticas en las cuales se conservan geoformas periglaciales pero que en la actualidad no están dominados por esa acción morfogenética. Si bien los efectos directos del cambio climático sobre estos sistemas criosféricos se vienen observando desde hace varias décadas en los Alpes europeos, los efectos indirectos sobre los procesos geomorfológicos y los sistemas sedimentarios son menos conocidos. Según los registros de fenómenos pasados, los riesgos geomorfológicos alpinos, como los corrimientos de tierras, los flujos de detritos, los flujos de lodo y otras manifestaciones de inestabilidad de las laderas, pueden deberse a aspectos de la actividad humana y de la variabilidad climática, solos o combinados. Es necesario investigar en el futuro los procesos geomórficos y vigilar los sistemas de la superficie terrestre para determinar la sensibilidad de estos sistemas al forzamiento climático, y este conocimiento permitirá mejorar la gestión de los peligros y riesgos en los Alpes europeos (Keiler *et al*. 2010).

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2013), las predicciones sobre el cambio ambiental global para el siglo XXI dibujan un panorama bastante sombrío para los entornos sudamericanos y sus habitantes. El continente experimentará un creciente deterioro ambiental (por ejemplo, cambios en la biodiversidad, deforestación, pérdidas de tierras de cultivo y recursos hídricos más variables) debido tanto al cambio climático como a los cambios en el uso del suelo. Estos cambios agravarán los problemas socioeconómicos y sanitarios existentes, y pueden ahondar el potencial de conflicto social y político. A pesar de este panorama desolador, también hay razones para el optimismo. La formulación de escenarios futuros para el medio ambiente y los recursos sudamericanos mediante la aplicación de diversos modelos muestra sistemáticamente que los motores socioeconómicos del cambio tendrán impactos más graves que los climáticos. Desde los recursos hídricos hasta la biodiversidad, los ejercicios de modelización muestran que las prácticas de uso del suelo, la demanda de recursos y otros factores socioeconómicos seguirán dominando a escala continental. A pesar del impacto potencialmente significativo del cambio

climático, la preponderancia de los factores socioeconómicos aumenta claramente la necesidad de flexibilidad social para mitigar y adaptarse a los futuros cambios medioambientales. Los efectos de las tendencias a corto y medio plazo en las causas socioeconómicas del cambio medioambiental global se conocen relativamente bien. Así pues, el mito de la incertidumbre sobre la causalidad del cambio climático no puede servir de excusa para la falta de planificación y mitigación de los cambios ambientales que ya están en marcha y que probablemente se acelerarán.

En opinión de (Kenneth y Lewin, 2014), el potencial de futuro incluye la mejora de nuestra comprensión de los peligros geomórficos mediante la investigación de las características de los fenómenos peligrosos y la predicción de su ocurrencia, especialmente si se verán afectados por el cambio climático global. Identificar las zonas vulnerables a los peligros y centrarse en el riesgo asociado son formas en las que seguirá siendo necesaria la investigación, con oportunidades para que los geomorfólogos mejoren la comprensión de los peligros geomórficos mediante la investigación de las características de los eventos y la predicción de su ocurrencia, junto con una mayor evaluación del impacto de las actividades humanas en los sistemas naturales. Para estos autores, el calentamiento global podría ser una de las principales razones del cambio futuro. La incidencia de los peligros y las catástrofes naturales merece un examen minucioso.

Los estudios de modelización y la proyección de las tendencias actuales apuntan a un futuro aumento del riesgo en relación con un espectro de peligros geológicos y geomorfológicos en un mundo calentado por el cambio climático antropogénico, con observaciones que ya sugieren que el aumento en curso de las temperaturas medias globales puede estar produciendo una respuesta peligrosa de la geosfera. el cambio climático puede modificar el funcionamiento de diversos peligros geomorfológicos en América Latina. Los cambios climáticos y ambientales asociados con el calentamiento global antropogénico sugirieron que el geomorfólogo:

> "*debe involucrarse en las herramientas de ingeniería porque si la construcción causa daños irreparables a los ecosistemas tierra-agua, debido a la falta de aporte geomórfico el científico de la Tierra no puede ser absuelto de culpa*" (Kenneth y Lewin, 2014).

Ramos-Reyes et al. (2016) plantean que el incremento del nivel del mar puede afectar el 50 % de la población mundial que habita las costas, incluyendo superficies amplias de los estados de Tabasco y Campeche, México.

Estos investigadores realizaron un estudio con el propósito de identificar la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar, con base en indicadores geomorfológicos. Con un enfoque geopedológico se zonificaron los paisajes geomorfológicos y relieves, y se utilizaron como indicadores de vulnerabilidad en una franja costera con anchura media de 20 km. Los indicadores se clasificaron de muy baja a muy extrema vulnerabilidad. Las variables medidas fueron forma del relieve, altura, tipo de roca, proceso geomorfológico y distancia al mar. Se encontraron ocho paisajes geomorfológicos en una superficie de 22.322,3 km^2. El tipo de relieve fue uno de los indicadores geomorfológicos que contribuyó a estructurar el nivel de vulnerabilidad y es de utilidad como antecedente para la elaboración de instrumentos de regulación del territorio.

En este estudio, se zonificaron las geoformas aplicando el enfoque geopedológico (Zinck, 2012), y se analizaron variables geomorfológicas como indicadoras para conocer la vulnerabilidad de la zona costera de Tabasco y Campeche ante el cambio climático. La cartografía de los paisajes geomorfológicos a nivel de reconocimiento (escala 1:250.000) y de los relieves a nivel semidetallado (escala 1:50.000), permitió generar indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático. La cartografía de los paisajes geomorfológicos y de los relieves, basada en el enfoque geopedológico, permitió generar información espacial con suficiente detalle de las geoformas indicadoras para evaluar la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático (Ramos-Reyes *et al*. 2016).

Los problemas geomorfológicos de estabilidad en las laderas están relacionados con lluvia, de cuya intensidad y duración dependerá la magnitud del cambio en el relieve (García y García, 2018). Los eventos de lluvias torrenciales están asociados al clima conocido, pero su frecuencia y magnitud pueden estar aumentando con el ascenso de la temperatura, con balances hídricos actuales de poca o sin excedentes de recarga de acuíferos. Un ejemplo reciente en América del Sur, Venezuela, lo constituyó el llamado Deslave de Vargas (1999), donde localmente el evento ocultó parte del área poblada, modificando las cotas del terreno y avanzando la línea de costa más de 300 metros hacia el mar. El evento ocurre en el llamado periodo Calentamiento Global, donde la temperatura del planeta se encuentra en ascenso, con eventos similares en Asia por los llamados Monzones y recientemente lluvias torrentosas en Europa, Paris y Alemania en enero del 2016.

En la actualidad el ascenso del calentamiento global está relacionado con mayores efectos de lluvias torrenciales, lo que debe traer como efectos una baja en la temperatura, pudiendo estar relacionadas en las zonas subtropicales por frio intensos y en la zona tropical por lluvias. Hacia el 2030 el deshielo tenderá a estabilizarse sin avances importantes, pero las lluvias se intensificarán en el planeta haciendo que el recurso agua pueda ir formando un balance hídrico húmedo donde la estabilidad de las cuencas y aportes de sedimentos serán un problema para las áreas habitadas ladera abajo. Los resultados del pasado cercano, con conformación topográfica suave aguas abajo, debido a problemas de estabilidad por saturación de las laderas de las cuencas, constituyen *proxies* de condiciones climáticas en el futuro cercano que deben tenerse en cuenta en ciudades que aprovecharon a partir del siglo XVI, dicha conformación para su desarrollo urbanístico (García y García, 2018).

Entre las razones para el desarrollo de la geomorfología aplicada, entre ellos, los problemas de las soluciones duras de ingeniería, de los enfoques específicos de los problemas, el aumento de la conciencia ambiental, la influencia de las catástrofes y los sucesos, y las continuas presiones del desarrollo y la urbanización, han seguido siendo las principales motivaciones para la geomorfología aplicada. El cambio climático provocado por el calentamiento global se ha convertido en una motivación importante y las actitudes ambientales han cambiado hacia el trabajo con la naturaleza (Hooke, 2019).

Mejorar la resiliencia y la capacidad de inclusión de las ciudades son factores clave para hacer frente a catástrofes más intensas debidas a los potenciales efectos del cambio climático. Estos peligros geomorfológicos se ven exacerbados por una urbanización intensa y no planificada con efectos de riesgo de catástrofe para una población muy vulnerable. (García-Soriano *et al.,* 2020).

Establecer una relación entre el cambio climático reciente y sus posibles efectos climáticos en la aparición de inundaciones o deslizamientos de tierras inducidos por la lluvia en una zona determinada sigue siendo una cuestión pendiente. Por esta razón, aunque los modelos y las previsiones pueden simular variables climáticas (por ejemplo, la temperatura o las precipitaciones), aún queda por comprender la forma y el grado en que los cambios climáticos previstos pueden modificar la respuesta de laderas o cuencas individuales, la frecuencia y la magnitud de las inundaciones y las variaciones conexas de los peligros. La expansión de las zonas urbanas y agrícolas y de las infraestructuras en los últimos 50 años, ha provocado un notable aumento del riesgo de inundaciones (Piacentini *et al.* 2020).

8. Progresos y nuevas tendencias en la aplicación de los estudios Geomorfológicos

A medida que crece la preocupación por la conservación del ambiente y los patrimonios naturales (geo-históricos, arqueológicos, turísticos), de los ecosistemas y sus recursos naturales, han surgido nuevas líneas de investigación en el amplio campo de la geomorfología. El uso de la geomorfología se ha venido expandiendo paulatinamente y abarcando otros temas de utilidad para la sociedad, más allá de la sola caracterización genética y morfodinámica de las geoformas.

8.1. Predicción y Diseño

Según Kenneth y Lewin (2014), la culminación lógica de la geomorfología es hacia la predicción y el diseño, y tanto por razones prácticas como científicas la capacidad de predicción es el punto de referencia esencial de la calidad científica. Por diversas razones, la previsión o predicción en geomorfología es difícil y solo parcialmente posible en circunstancias limitadas. El diseño se ha visto renovado por la filosofía del "*diseño con la naturaleza*", adoptada por la arquitectura paisajista y la ingeniería ecológica y, más recientemente, por la geomorfología. La predicción científica, el trabajo con la naturaleza y los planteamientos de restauración llevan a considerar cómo debe aplicarse el principio de incertidumbre a la modelización pragmática en general. En un mundo antropogénicamente transformado, la lluvia sigue cayendo y los ríos fluyendo, de modo que los procesos geomorfológicos prosiguen de forma modificada junto a las estructuras humanas. Prever que los procesos geomorfológicos están ahora "*genéticamente modificados*" resulta útil para dirigir la atención y, en particular, refuerza la necesidad de estudiar lo que ocurre en los fenómenos extremos.

La protección y las infraestructuras de ingeniería pueden fallar cuando se enfrentan a condiciones que superan las expectativas de diseño, mientras que en los espacios naturales o artificiales entre dichas estructuras siguen operando los procesos ambientales. La geomorfología sigue en acción. Se pueden adquirir conocimientos comparando los entornos modificados con los no modificados, en estudios de "antes y después", y examinando específicamente los procesos en los que intervienen estructuras humanas, como en las rupturas de diques de contención de inundaciones o en las tasas de sedimentación entre riberas, y en los lugares en los que la erosión del suelo es activa. Dado que la geomorfología se concentra en la superficie terrestre y sus formas del relieve, incluido el diseño heredado "natural" pero

aprobando las formas en que ya se ha sustentado el impacto humano, la disciplina debería estar abierta al diseño de la superficie terrestre para escenarios futuros (Kenneth y Lewin, 2014).

8.2. El Patrimonio Geomorfológico: las Geoformas, una herencia natural y el valor turístico.

Dentro de los diversos campos de aplicación de la geomorfología son cada vez más frecuentes los estudios e investigaciones en aspectos de interés ambiental, ecológico, hidrológico, turístico y cultural. Por ejemplo, un yacimiento geológico puede soportar distintos tipos de uso sostenible con beneficios para la sociedad, como el uso científico, económico y educativo; a la par los "*geomorfositios*" permiten al gestor ambiental conocer los puntos más destacados dentro de un parque natural o un área protegida desde un punto de vista geomorfológico. Los objetivos de la investigación geomorfológica antropogénica en la gestión ambiental incluyen la predicción del curso de la evolución geomórfica tras la intervención humana en diversas escalas temporales (proporcionando directamente datos geomorfológicos para la gestión medioambiental); el fomento de la restauración de paisajes degradados; la identificación de formas del relieve que merezca la pena conservar (sirviendo a la conservación del paisaje mediante la estimación del valor de conservación y la vulnerabilidad de las formas del relieve). La rehabilitación del paisaje es especialmente importante en las regiones industriales y mineras, debido a los grandes impactos generados por estas actividades humanas. Las medidas de restauración de canales fluviales y llanuras aluviales también están en primera línea de interés y sirven a fines ecológicos paisajísticos.

El estudio de la geodiversidad, definida esta como:

"*la variabilidad de la naturaleza abiótica, incluyendo elementos litológicos, tectónicos, geomorfológicos, edáficos, hidrológicos, topográficos y procesos físicos en la superficie terrestre y en los mares y océanos, junto con los sistemas generados por procesos naturales, endógenos y exógenos y humanos, que abarcan la diversidad de partículas, elementos y sitios*" (Carcavilla et al. 2028).

Será un tema cada vez más de interés en la aplicación de la geomorfología para la gestión ambiental.

No se puede dudar que en el siglo XXI la geomorfología adquirirá un papel aún más importante en la gestión ambiental, en un planeta con territorios altamente degradados por el hombre. A escala mundial, la extensión y el ritmo de los procesos geomórficos inducidos por el hombre han llegado a ser

comparables a los naturales y, en las zonas densamente pobladas de la Tierra, superan incluso la intensidad de los procesos físicos naturales, tradicionalmente estudiados por los geomorfólogos.

La evolución de la superficie se ve influida por la sociedad humana tanto de forma indirecta (por ejemplo, transformando el balance térmico o las condiciones de escorrentía de las superficies mediante la tala de bosques), como directa (creando formas terrestres acumulativas como vertederos, así como sitios de excavación minera a cielo abierto, cortes de carreteras y vías férreas y muchas otras). Por lo tanto, las actividades humanas con impacto geomórfico se convierten en una parte integrada de la gestión ambiental, es decir, la larga serie de tareas que abarcan todas las etapas de la utilización de los recursos ambientales, por un lado, y la protección simultánea de los valores ambientales, por otro. Implica la identificación del objetivo de la intervención del ambiente (por ejemplo, la extracción de minerales, la mejora del suelo o cualquier tipo de construcción), la formulación de políticas, la planificación de proyectos, la aplicación y la evaluación de políticas/proyectos (Cooke y Doornkamp 1990). Por tanto, la gestión ambiental no es un concepto puramente económico. La aplicación de los conocimientos geomorfológicos acumulados a lo largo de más de un siglo de investigación científica permite la coexistencia óptima de la humanidad con los procesos geomorfológicos y los accidentes geográficos y la adaptación óptima a ellos.

En la primera década del siglo XXI, un concepto más sobrio de geomorfología aplicada incorpora las siguientes tareas:

(i) Promover la exploración de los recursos naturales, mediante la carto grafía de su distribución espacial

(ii) Contribuir a evitar catástrofes naturales

(iii) Predecir el curso de la evolución geomórfica tras la intervención hu mana en diversas escalas temporales

(iv) Identificar formas del relieve que merezca la pena conservar

(v) Proporcionar información de base para la restauración de paisajes degradados. (Cooke y Doornkamp, 1990).

Sanz-Pérez y Menéndez-Pidal (2016), reportan la realización de estudios por varios autores quienes han estudiado los efectos hidrológicos y geomorfológicos de las grandes presas, entre ellos destacan Leopold, Colman y Millar (1964), Petts (1984), Morisawa (1985), Williams y Wolman

(1984), y Kondolf (1997). En esos estudios se comprueba que dichos cambios suelen ocurrir en los primeros 20 años después de la construcción de las presas. El uso de los mapas geomorfológicos y de otros documentos, son un soporte básico para la interpretación de los procesos fluviales en los ambientes aluviales. Estos autores, con la información proporcionada por el mapa geomorfológico, analizaron los procesos de dinámica fluvial y del comportamiento reciente de los ríos Duero y Tera, en España. Adicionalmente, analizaron el impacto antropogénico en la llanura de inundación, derivados de los efectos que ha producido el embalse de la Cuerda del Pozo en la dinámica fluvial de estos ríos.

Pellitero *et al*. (2010), evaluaron la geodiversidad y los geomorfositios en un espacio natural protegido de España, con el propósito de presentar una serie de herramientas para que el gestor ambiental pueda aplicar para integrar los aspectos abióticos en la evaluación y protección de áreas con una diversidad natural sobresaliente y un patrimonio natural considerable y sustentar la planificación y creación de zonas territoriales que se gestionen en función de su capacidad de uso, de forma que se pueda asignar una protección específica a cada unidad espacial donde se concentra la diversidad. La información geomorfológica fue la base fundamental para esta zonificación.

En opinión de Erhartiè y Zorn (2012), el concepto de geodiversidad pone de relieve la sensibilidad de los elementos y las dinámicas abióticas y el valor de los factores naturales, geológicos, geomorfológicos, edáficos, climáticos e hidrológicos en la conservación de la naturaleza y en la ordenación y gestión del territorio; implica centrarse en un conjunto de elementos que se encuentran en un tramo del continuo terrestre o en una región en su conjunto. La geodiversidad es un medio para incluir la diversidad natural en la conservación, la planificación y la educación a través de diferentes formas (por ejemplo, geotopos, geomorfositios, geoparques y paisajes protegidos).

Los objetivos y métodos de la geo-conservación varían en función del elemento de la geodiversidad que se considere. Las formas terrestres son uno de los elementos naturales no vivos más extendidos, inmediatamente reconocibles y atractivos del paisaje, que siempre han despertado el interés de la gente por su aspecto escénico, excepcional o inusual. Al seleccionar formas interesantes y memorables, las personas las dotan inconscientemente de algún significado o valor. Estas formas se convierten así en patrimonio, o en un valor. Sus atributos son los que le dan valor y permiten declarar la forma del terreno como valor natural geomorfológico. Así pues, el patrimonio geomorfológico comprende fenómenos y procesos a los que se puede

atribuir un valor: científico, estético, histórico, tangible e intangible, cultural, social o económico, en función de la percepción de las personas o de las necesidades de un estudio determinado.

El problema de evaluar la naturaleza y los valores naturales es que, independientemente del método de evaluación utilizado, es prácticamente imposible excluir el componente subjetivo. Estos autores realizaron la primera evaluación cuantitativa del patrimonio geomorfológico en Eslovenia, llevada a cabo en el valle de los lagos de Triglav, con el propósito de darle importancia a la geodiversidad de dicho país, o su diversidad natural abiótica, al momento hora de considerar la normativa sobre conservación de la naturaleza. Para estos investigadores las formas del relieve son uno de los elementos naturales no vivos más extendidos, inmediatamente reconocibles y atractivos del paisaje, que siempre han despertado el interés de la gente por su aspecto bello, excepcional o inusual. En Eslovenia, los "geoparques" son un tema ambiental relativamente reciente que data de 2010. La creación de geoparques es sin duda un paso en la dirección correcta, ya que son una representación uniforme de los materiales dentro de la naturaleza no viva.

Para Coratza y De Waele (2012), los geomorfositios y los paisajes geológicos figuran entre los atractivos turísticos más importantes de las zonas rurales y de montaña. En las últimas décadas, especialmente gracias a varios proyectos de investigación y culturales sobre el patrimonio geológico, muchas autoridades regionales y locales han comenzado a inventariar y dar a conocer sus paisajes y lugares de interés geológico y geomorfológico publicando folletos, mapas geoturísticos y equipando sus territorios con paneles explicativos. Las marcas geomorfológicas en el paisaje que recuerdan, pasadas catástrofes naturales y/o provocadas por el hombre son puntos ideales para la educación geoambiental y, por tanto, deberían ser objeto de una evaluación técnico-científica. A menudo, las señales dejadas en el paisaje por estos acontecimientos geológicos, a veces catastróficos, también pueden ser señales premonitorias que, si se interpretan adecuadamente, pueden servir para prevenir la creación de situaciones de riesgo. En el territorio italiano, las actividades en el campo del ecoturismo y la valorización del rico patrimonio geológico nacional se han extendido recientemente y se basan en mapas geoturísticos, itinerarios geológicos, materiales ilustrativos portátiles e *in situ*, proyectos basados en la web.

En un estudio conducido por Monserrat y Codignotto (2013), se realizó una aproximación a la geodiversidad y el estado de conservación de la costa pampeana de Buenos Aires, Argentina (Región Costera Oriental y la Re-

gión Costera Austral) mediante el desarrollo de un estimador indirecto cualitativo, basado en variables geomorfológicas. Para tal fin, se analizaron imágenes de satélite y se efectuó un reconocimiento en campo para la definición de paisajes según el patrón geomorfológico. Las variables de delimitación y caracterización utilizadas incluyeron entre otras cantidad, disposición espacial y tipos de geoformas según el agente modelador y la dinámica y evidencias del estado dinámico del borde costero. Se encontró que la casi totalidad de la región costera oriental presentó modificaciones antropogénicas, mientras que la región costera austral conservaba la mayor parte de la geodiversidad, aunque se encuentra desprotegida legalmente en su gran mayoría.

Este estudio motivó la necesidad de definir regiones, paisajes y ecosistemas locales que respondan a las funciones del paisaje, es decir a los procesos ecológicos y la dinámica evolutiva de la costa. El estudio fue una contribución para la elaboración de una línea de base para el conocimiento de la costa pampeana, ya que la aproximación geomorfológica a la delimitación de los paisajes sirvió de base para el estudio de los sistemas ecológicos de las dunas costeras bonaerenses.

Buzjak *et al.* (2014) llevaron a cabo un estudio en el Parque Rupestre de Grabovaca (Croacia central) donde se realizó un inventario, evaluación, análisis y visualización los fenómenos geológicos, geomorfológicos y espeleológicos, con la participación de la Sociedad Geomorfológica Croata, el Departamento de Geografía, la Sociedad Espeleológica Karlovac y el Club de Espeleología Samobor. El inventario se realizó utilizando cartografía de trabajo de campo y fotografías geoetiquetadas, cartografía de cuevas y análisis de los modelos digitales de elevación (MDE). El resultado fue una base de datos geográficos orientada al uso de un SIG que contenía las formas geomorfológicas, los procesos y el inventario de cuevas. A partir de esos datos se elaboraron mapas geomorfológicos 1:25.000, mapas morfométricos (hipsométricos, de pendiente, de relieve relativo) y mapas espeleológicos. El modelo cartográfico del mapa geomorfológico estuvo definido por 5 grupos: estructura geológica, datos morfogenéticos, morfográficos, morfométricos y morfo-cronológicos. El mapa geomorfológico general, con simbología profesional comprensible sólo para profesionales, se transformó didácticamente en un soporte para que sea visual y contextualmente aceptable para un público no profesional más amplio para fines geoturísticos. La información generada se previó utilizarla para la presentación y educación sobre la geodiversidad kárstica y paisajística (Buzjak *et al.* 2014).

Kubalíková y Kirchner (2015), estiman que el geopatrimonio de la República Checa constituye una base para las actividades de geoconservación y geoturismo, que tienen una larga tradición en la región donde los lugares de interés geológico y geomorfológico son apreciados desde hace mucho tiempo y, desde el siglo XIX, algunos han sido declarados protegidos. En los Parques Nacionales, las Zonas Paisajísticas Protegidas o los geoparques, la promoción de los "geositios" y "geomorfositios" está bien desarrollada. Para investigar qué lugares son adecuados para el desarrollo del geoturismo, se propuso un método sencillo y se evaluaron los lugares seleccionados de las tierras altas de Vizovická vrchovina (República Checa). Para ambos autores, la tradición relativamente larga y las condiciones actualmente satisfactorias de la protección del patrimonio geológico y geomorfológico en la República Checa pueden considerarse adecuadas para las futuras actividades de geoconservación y geoturismo. Los "*geositios*" y "*geomorfositios*" de zonas menos conocidas pueden servir de recurso para actividades geoturísticos que apoyen un desarrollo económico que ayude a las comunidades locales.

De acuerdo con Reynard *et al.* (2016), los "*geomorfositios*" son formas del relieve de especial interés para la sociedad. Su reconocimiento como tales por parte de sectores cada vez más amplios -incluidos el político, el educativo, el turístico y el de conservación de la naturaleza- es el resultado de un proceso de "*patrimonialización*" en el que intervienen diferentes colectivos (científicos de la Tierra, conservacionistas, proveedores turísticos, etc.). Actualmente, la investigación sobre geomorfositios se desarrolla con un enfoque en contextos geomorfológicos específicos, como los entornos montañosos y los contextos urbanos, el uso centrado de la geomorfología y la participación de otros equipos que trabajan en otros campos de los estudios del geopatrimonio, en particular la investigación sobre geodiversidad y geoturismo, y con otros campos especializados de la investigación geomorfológica, como la Geoarqueología, los riesgos geológicos y la geomorfología de procesos.

En opinión de Smrekar *et al*. (2016), las zonas con características excepcionales o raras, o las zonas con una gran diversidad de características, también son relevantes para el patrimonio. Ambas cualidades son también criterios para determinar la importancia de los valores naturales geomorfológicos superficiales. La correcta evaluación del patrimonio geomorfológico incluye la selección de los valores más importantes, lo que constituye la base de su gestión. Una parte importante de la gestión conlleva actividades como la educación, la sensibilización y la interpretación. Los impactos y

presiones de la actividad humana, especialmente los que afectan a la geodiversidad y al patrimonio geomorfológico, son cada vez mayores, por tanto, surge la necesidad de ampliar los conocimientos sobre la conservación de la naturaleza no viva, tanto a nivel académico como de gestión. Para estos autores, la misión de las áreas protegidas no es sólo proteger, sino también permitir que la gente experimente la naturaleza, el patrimonio cultural y los valores intangibles de una zona concreta.

En opinión de Soms (2017), la política de la gestión ambiental y de protección de la naturaleza en Letonia se ha centrado principalmente en la biodiversidad y las especies protegidas, pero no ocurre lo mismo con la geodiversidad en lo relativo a la gestión de conservación de la naturaleza. El concepto de geodiversidad, así como la evaluación cuantitativa de los valores abióticos de la naturaleza, se ha utilizado con éxito en la última década, sin embargo, aún no se ha aplicado en Letonia con fines de gestión ambiental. Soms (2017), reportó la geodiversidad de dos espacios naturales protegidos del sureste de Letonia, en la reserva natural "*Pilskalnes Siguldiòa*" y en el monumento natural geológico "*Adamovas krauja*". Los cálculos del índice de geodiversidad (IG), se realizaron a partir de componentes como datos geológicos, unidades de relieve, procesos morfogenéticos, características hidrológicas y rugosidad del terreno. Los resultados presentados en este estudio permitieron concluir que, los elementos abióticos más importantes y con mayor impacto en la cuantificación de la geodiversidad son los factores topográficos, las formas del relieve ampliamente distribuidas y los procesos morfogenéticos.

Según Pescatore *et al.* (2019), en las últimas décadas se ha registrado un renovado interés por los sitios de interés geológico, tanto en el sector de la conservación de la naturaleza como en el turístico, así como por las actividades educativas basadas en temas de Ciencias de la Tierra. El patrimonio geológico representa un tema relevante dentro de un argumento más amplio del patrimonio natural; incluye lugares con relevancia geológica y, por tanto, dignos de conservación en beneficio de las generaciones presentes y futuras. La importancia de la conservación geomorfológica en el contexto del patrimonio, así como los estudios realizados por varios autores durante las últimas décadas son los fundamentos del significado cultural actual del geopatrimonio, la geodiversidad y la geoconservación. Pescatore y colaboradores presentan en este estudio una propuesta de gestión multicultural y multinivel de los geomorfositios para la cuenca intermontana del Vallo di Diano (Campania, Italia), la cuenca intermontana del Val d'Agri y la ciudad fantasma de Campomaggiore Vecchio (Basilicata, Italia). La

propuesta prevé la creación de una base de datos incremental y actualizable, referida principalmente a objetivos educativos, pero puede exportarse a objetivos turísticos y/o de gestión territorial.

La gran diversidad litológica y morfológica de la República de Chechenia es la base de las actividades de geoconservación en opinión de Gakaev et al. (2022). La conservación del patrimonio geomorfológico suele incluirse en la conservación general de la naturaleza. Las condiciones climáticas del país montañoso vienen determinadas por su estructura geomorfológica, que conlleva una importante variedad de rasgos climáticos de la República de Chechenia, atravesada por seis cordilleras principales, cada una de las cuales desempeña un determinado papel formador del clima.

En estas zonas montañosas, los geomorfólogos participan cada vez más en la práctica de la ordenación del territorio. La tendencia en la exploración geomorfológica ha pasado de la cartografía de campo descriptiva tradicional a la extracción automática de datos cuantitativos a partir de modelos digitales de elevación e imágenes de satélite. Además de la aplicación de técnicas de teledetección y SIG, los geomorfólogos apoyan la administración del territorio proponiendo modelos que describen diversos procesos paisajísticos. La información geomorfológica específica, como la estabilidad de las laderas, la distribución de materiales o la aparición de peligros, que más contribuya a las actividades generales de subsistencia en las montañas, se integrará en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y de gestión. estrategia y en los sistemas SIG.

Las evaluaciones sismognéticas tienen en la geomorfología una fuente fundamental de información de cómo se refleja la actividad sísmica en un determinado territorio.

De acuerdo con Costa *et al.* (2010), muchas zonas de América Latina y el Caribe han sufrido o pueden sufrir graves daños por terremotos, debido a su entorno tectónico. Considerando los severos efectos sociales y económicos que estas catástrofes naturales pueden producir, la identificación y caracterización de potenciales fuentes sísmicas con y sin registros sísmicos previos son obligatorias para la planificación del uso del suelo y la toma de decisiones. Basándose en el concepto de que las estructuras geológicas activas durante el Cuaternario podrían ser la fuente y el epicentro de la actividad sísmica futura, muchos esfuerzos durante las últimas décadas se han centrado en la identificación y el estudio de estas características. El análisis del terreno o de las geoformas mediante imágenes de sensores re-

motos ha demostrado ser un enfoque necesario para reconocer estructuras potencialmente peligrosas. Esto resulta especialmente útil en zonas que carecen de un bagaje adecuado de conocimientos geológicos y sismológicos, así como en el caso de estructuras sin registros de sismicidad

8.3. Geomorfología y Geoarqueología

La Geoarqueología es un tema objeto de atención por parte de la geomorfología aplicada. Según Fouache (2010), la Geoarqueología son:

"*las geociencias y los métodos y técnicas geográficas aplicados a la prehistoria, la arqueología y la historia*".

Su objetivo es promover la Geoarqueología de forma abierta y desde un punto de vista interdisciplinar. La Geoarqueología no es una disciplina, sino un enfoque interdisciplinario que tiene grandes potencialidades si tiene en cuenta los métodos y técnicas geomorfológicos. La geomorfología es uno de los principales componentes del enfoque geoarqueológico, y en la actualidad este enfoque goza de gran aceptación en los programas arqueológicos. En general, se reconoce que es necesario tener en cuenta el paisaje y la dinámica medioambiental para reconstituir una historia completa de las sociedades y estudiar la interacción entre los seres humanos y su entorno. La geomorfología desempeña un papel importante en el enfoque geoarqueológico, y se ha beneficiado enormemente de su colaboración con la arqueología en las últimas décadas (Fouache, 2010)

Caria (2012), presentó un análisis del manejo prehispánico del espacio en el valle de Trancas (provincia de Tucumán-Argentina). Dicho análisis se basó en la realización de un mapa geomorfológico en el que se destacaron las diferentes unidades de paisaje que componen el valle (glacís y terrazas, principalmente). Asimismo, se caracterizaron los diferentes sitios arqueológicos localizados teniendo en cuenta su asignación cultural dentro del rango temporal correspondiente al período Formativo- Desarrollos Regionales. Se determinaron las relaciones espaciales existentes entre las unidades geomorfológicas y los sitios arqueológicos asociados a ellas. La aplicación de los principios de la geomorfología en arqueología posibilitó generar un marco de explicación a las relaciones espaciales que se dieron en el pasado prehistórico. Especialmente, contribuye esta relación a generar modelos de paisajes sociales que pueden ser contrastados con la información recuperada de los sitios arqueológicos, así como poder visualizar desde el mapeo de las unidades de paisaje el entorno sobre el cual interactuaron los grupos prehispánicos. La geomorfología aplicada a la arqueología constituye, en

definitiva, una herramienta complementaria en la búsqueda de respuestas a la relación hombre-naturaleza.

En opinión de Benito-Calvo *et al.* (2014), el análisis geomorfológico de un territorio aporta a la arqueopaleontología conocimientos fundamentales para una mejor interpretación de la génesis y el contexto temporal de las concentraciones arqueológicas y paleontológicas, a través de la compresión de las formas del paisaje donde se localizan y de los procesos que actúan en el presente y actuaron en el pasado. De igual modo, el relieve y los procesos geomorfológicos constituyen elementos clave para analizar la conservación y perduración de los yacimientos o concentraciones arqueopaleontológicas.

8.4. El Análisis Ecogeomorfológico

Uno de los problemas del desarrollo de la sociedad moderna es el deterioro significativo del estado ecológico de los asentamientos urbanos y los territorios urbanizados. El crecimiento incontrolado de las grandes ciudades y sus áreas suburbanas, los altos índices de contaminación de los ecosistemas urbanos, la expansión agrícola, el aprovechamiento de los recursos hídricos (fluviales, lacustres) y el impacto de procesos exógenos peligrosos conduce a un aumento de la tensión ambiental, a la degradación del potencial de recursos naturales de los territorios adyacentes, que afectan a la seguridad de la vida de la población local y también causa pérdidas económicas. Ante esta realidad toma relevancia el enfoque de la ecogeomorfología como herramienta de la evaluación ambiental de un determinado espacio geográfico.

El enfoque ecogeomorfológico se ha venido aplicando en muchos países de Europa, Asia, América Latina y Oceanía y su aplicación sigue en franca expansión para la evaluación ambiental de los ambientes fluviales, áreas urbanas, áreas protegidas, uso de la tierra, entre otros aspectos.

Thoms y Parsons (2002), consideran que, con el aumento de las presiones sobre el medio ambiente, existe una fuerte tendencia a gestionar los ríos como ecosistemas. Este tipo de gestión requiere un enfoque holístico e interdisciplinario que considere simultáneamente los componentes físicos, químicos y biológicos de los ecosistemas fluviales, así como la conectividad longitudinal (aguas arriba-aguas abajo), lateral (cauce-llanura de inundación) y vertical (cauce-hiporreos), y la escala espacial y temporal. La ecogeomorfología es un enfoque interdisciplinario del estudio de los sistemas fluviales que integra la hidrología, la geomorfología fluvial y la ecología. Estos autores utilizaron el ejemplo de los "*caudales ambientales*" para demostrar la utilidad de un enfoque ecogeomorfológico para la identifica-

ción de escalas características de influencia hidrológica, geomorfológica y ecológica en el río Condamine-Balonne (Queensland, Australia). El estudio concluye que, en la actualidad, muchas estrategias de gestión no examinan adecuadamente qué parte o partes del sistema fluvial pueden o deben gestionarse y a menudo no aportan conocimientos científicos a la escala adecuada. Además, la interfaz entre la ciencia, en este caso la hidrología, la geomorfología y la ecología del agua dulce, y la gestión política. es turbulenta pero potencialmente apasionante.

Benidhar *et al.* (2005), condujeron un estudio orientado al establecimiento de una metodología para la zonificación geomorfológica y ecológica del arrecife de Bangaram, en las islas Lakshadweep (India), utilizando datos obtenidos por teledetección y apoyados adecuadamente por datos de campo, con el propósito de estudiar los arrecifes de coral, amenazados por diversas actividades naturales y antropogénicas. En su estudio se analizaron las imágenes del satélite de teledetección indio (IRS*) Linear Imaging Self-Scanning Sensor-3* (LISS III) que representaron tres condiciones de marea diferentes del periodo 1998-2000. Este tipo de estudio representó una valiosa contribución para evaluar la salud de los arrecifes y su diversidad. La imagen IRS LISS III, junto con un amplio estudio sobre el terreno, ayudó a zonificar las zonas geomorfológicas (plataforma coralina, frente de arrecife, escombros de arrecife, llanura de arrecife, laguna arenosa poco profunda, laguna de profundidad intermedia y laguna profunda, montículos de coral en la laguna profunda) y las zonas ecológicas del arrecife (corales vivos en la laguna de profundidad intermedia y corales vivos en los montículos de coral). La zonificación contribuyó a obtener información sobre la presencia de corales vivos en el arrecife de Bangaram y en la laguna.

De acuerdo con Meitzen *et al.* (2013), el cambio dinámico, y no la estabilidad, es inherente desde hace mucho tiempo a los ambientes físicos y paisajes de América del Sur. En todo el continente hay un registro de cambios a largo plazo relacionados con procesos naturales como la actividad tectónica y volcánica, el cambio climático y las fluctuaciones del nivel del mar. La tradición de campo en geomorfología va más allá del estudio de las formas del terreno, ya que también proporciona un escenario para comprender cómo los elementos geomórficos influyen en la ecología de la biota. La intersección entre la geomorfología y la ecología fluvial representa una confluencia ideal para examinar la contribución de la tradición de campo geomórfica a los caudales ambientales, y mostrar este ámbito de la gestión fluvial como una frontera de investigación para la geomorfología aplicada. La comprensión geomorfológica es fundamental para los caudales ambien-

tales porque es la interacción entre el caudal, la forma y el sustrato lo que influye en el tipo de hábitat, su estado, disponibilidad y uso biótico a través del espacio y el tiempo. Esta relación varía longitudinalmente, lateralmente, verticalmente, a lo largo del tiempo y a través de morfologías de macro a meso escala dentro del medio fluvial. La base geomórfica es, por tanto, tan integral como el caudal. Aunque comúnmente se hace referencia al caudal como la variable maestra en los caudales ambientales, la geomorfología media los efectos del régimen de caudales en los procesos ecológicos. Iniciativas recientes en EE. UU. están proporcionando mejores estrategias para incorporar la geomorfología a las evaluaciones de los caudales ambientales.

Lobera (2017), utilizando el enfoque ecogeomorfológico analizó el efecto de las presas sobre el régimen de caudales, el transporte de sedimentos, la morfología y la movilidad del cauce, y la comunidad de macroinvertebrados en ríos Mediterráneos de la Península Ibérica a diferentes escalas espaciotemporales. Se llevó a cabo un estudio a gran escala en varias cuencas (Llobregat, Ebro, Júcar y Guadalquivir), para evaluar el efecto a largo plazo de la regulación en la geomorfología fluvial. Los resultados mostraron una reducción generalizada de la magnitud y la frecuencia de las crecidas, lo cual, junto con la reducción del suministro de sedimentos, produjo una pérdida de barras activas y una intrusión de la vegetación, estabilizando el cauce fluvial, la cual limita el dinamismo del lecho del río y puede contribuir a la degradación del ecosistema fluvial. Se analizó el flujo de agua y sedimentos, la dinámica del cauce y la respuesta de los macroinvertebrados en dos ríos regulados con diferente grado de Mediterraneidad de la cuenca del Ebro (Ésera y Suriana). Más del 90% del transporte de sedimentos en suspensión en el Suriana sucede durante crecidas, mientras que se reduce al 70% en el Ésera debido al papel del caudal de base en la carga sólida del río.

Este fenómeno está relacionado con la alta disponibilidad de sedimentos en la cuenca y la alta productividad de las áreas fuentes (badlands); en cambio, el Siurana, es un río con poca actividad geomorfológica y poca disponibilidad de sedimentos. Los resultados de esta investigación permitieron concluir que, las presas alteraron el comportamiento hidrosedimentológico de los ríos estudiados reduciendo sus cargas de sedimentos y cambiando su carácter de un tipo climático de río al contrario (por ejemplo, de un río húmedo-montañoso a uno semiárido). La estabilidad del lecho debida a la regulación provocó, un cambio significativo en la composición taxonómica de las comunidades de invertebrados bentónicos y aumentó su densidad y biomasa, al tiempo que disminuye la diversidad. Esta investigación describe y cuantifica cambios en la estructura bio-física y el funcionamiento del

ecosistema fluvial en ríos Mediterráneos regulados y proporciona información inédita en el campo de la Eco-Geomorfología (Lobera, 2017).

Rodríguez-Olarte *et al.* (2017), condujeron una investigación bajo el enfoque ecogeomorfológico en la cuenca del río Turbio, en el estado Lara, Venezuela, con el propósito de evaluar las diferentes perturbaciones antrópicas de origen urbano que ocurren todos los cauces. Para reconocer las dimensiones y los cambios espaciales e históricos en cuencas, zonas de ribera y cauces, así como en las coberturas y los usos de la tierra, se siguió como metodología la delimitación y caracterización de transeptos, se identificaron polígonos en imágenes satelitales (Google Earth Pro, 2015) y se utilizó un sistema de información geográfica. Como resultado de este estudio se identificaron los siguientes hallazgos:

(i) la pérdida de bosques ribereños y la erosión de zonas de ribera

(ii) la alteración hidrogeomorfológica de los cauces

(iii) la colmatación por sedimentos y la intermitencia inducida de la corriente

(iv) la contaminación extrema de las aguas en la cuenca media y baja

(v) la fragmentación de los hábitats

(vi) la pérdida de la riqueza insectos acuáticos y peces.

Ellos consideran que las necesidades de tales evaluaciones se basan en reconocer las características de los atributos del clima, geología y diversidad biológica locales que los hacen susceptibles o resistentes frente a la depauperación. Concluyen que, es necesario caracterizar espacial y temporalmente el síndrome urbano y su relación con ecosistemas de referencia regionales para reconocer gradientes (estados de conservación o integridad), reconocer y cuantificar las variables que son susceptibles y resistentes a determinados impactos, incluso la respuesta en conjunto (resiliencia) para valorar y clasificar su estado, pero también sus opciones de restauración y monitoreo. Estos autores estiman que, por encima de tales evaluaciones es muy relevante conocer y valorar la participación ciudadana en cuanto a la incorporación de contenido ambiental específico para la conservación de los ríos de manera transversal en los programas educativos formales.

Ghosh *et al*. (2022) plantean que, las intervenciones antropogénicas en forma de presas y diques suelen alterar la funcionalidad fluvial y el compor-

tamiento ecogeomorfológico (geomorfología, hidrología y ecología) de los sistemas fluviales. En su estudio en el río Damodar (India) examinaron su flujo ambiental, la metamorfosis del cauce y la funcionalidad fluvial en el contexto de las presas y el desarrollo de *Damodar Valley Corporation* (DVC). Consideran que, las intervenciones estructurales (presas, diques, vertederos, etc.) y no estructurales (eliminación de efluentes urbanos, industriales y agrícolas, extracción de arena, etc.) dificultan la funcionalidad ecológica del río. Los principales resultados de este estudio confirmaron una reducción del caudal máximo medio anual de 8.378 a 3.522 m^3 /s, un aumento de la descarga mínima del caudal medio mensual en el periodo de estiaje de 1 a 8 m^3 /s, y una pérdida de variabilidad del caudal debido a una reducción de la frecuencia de los caudales altos, un aumento de la frecuencia de los caudales bajos, y una reducción del flujo medio anual 1.001,33 a 700,04 m^3/s en el periodo posterior a la presa. Este cambio radical en los regímenes de caudal ha modificado la morfología del canal. Se observó que la profundidad máxima del canal, el gradiente medio del canal, la anchura propensa a inundaciones y la relación ancho/profundidad han disminuido en las secciones aguas arriba, mientras que están aumentando en la sección aguas abajo de la presa de Durgapur debido a la sedimentación en el canal aguas arriba y en el embalse. Los autores concluyen que, funcionalidad ecológica del río Damodar no es favorable para la sostenibilidad del medio fluvial (Ghosh *et al*. 2022).

La rehabilitación fluvial y la ingeniería ecológica se están convirtiendo en cuestiones críticas para mejorar el estado de los ríos cuando los hábitats ecológicos y la conectividad se han visto alterados por la presión humana (Piégay *et al*. 2023). Estos investigadores se plantearon como objetivo de su estudio ilustrar cómo la experiencia geomorfológica y el pensamiento basado en procesos contribuyen al éxito de la rehabilitación fluvial. La comprensión geomórfica es necesaria a nivel local para lograr un diagnóstico adecuado del funcionamiento del río, estimar los impactos humanos y la capacidad de respuesta potencial del río y para evaluar las ganancias y los riesgos de la rehabilitación, así como para valorar el éxito o el fracaso a través de varias estrategias de evaluación antes y después del proyecto. Para estos autores, los estudios geomorfológicos apoyan la planificación estratégica y la priorización de las obras de rehabilitación en función de los contextos específicos y de la capacidad de respuesta de los ríos. También estiman que, la geomorfología forma parte de la emergente ingeniería ambiental que se aplica a la conservación, mitigación y rehabilitación de los ríos y que es necesaria para fomentar la gestión sostenible de los ríos y las soluciones basadas en la naturaleza (Piégay *et al.* 2023).

Akiyanova *et al*. (2018) en su estudio se plantearon como objetivo la evaluación ecológica-geomorfológica del impacto de los procesos exógenos modernos en la organización del territorio de la zona suburbana de Astana (Kazajstán), que se encuentra en activo desarrollo. Los autores concluyeron que, los procesos de erosión lineal, laminar y de deflación son los mayores procesos de desarrollo en el territorio de la zona suburbana de Astana de acuerdo con las características ecológicas y geomorfológicas del terreno. Además, se identificaron procesos geomorfológicos modernos de génesis natural y antrópica. El análisis del desarrollo espacial de estos procesos en relación con las zonas de contaminación ambiental, las instalaciones residenciales e industriales, las redes de ingeniería y transporte y la agricultura permitió determinar el grado de peligro para la vida de la población. Los resultados de la investigación constituirán la base de la elaboración de recomendaciones destinadas a reducir el impacto de los procesos exógenos peligrosos en el territorio de la zona suburbana de Astana.

De acuerdo con Bumtsend *et al*. (2020), el análisis ecogeomorfológico incluye la evaluación del impacto del relieve en diversas condiciones ecosistémicas, ya que el relieve desempeña diversas funciones ecológicas, tanto directas como indirectas. La evaluación de la aptitud del hábitat humano y del terreno ha ido cambiando gradualmente y los enfoques metodológicos de la investigación moderna sobre la evaluación ecogeomorfológica del paisaje han tenido como objetivo desarrollar indicadores de las condiciones adecuadas del relieve y regular la relación entre las superficies, la población y la economía. Para estos autores los paisajes montañosos tienen un impacto específico en el bienestar humano y también un potencial considerable para promover el turismo. Ellos evaluaron y determinaron para Mongolia la naturaleza de la correlación y la interdependencia entre la superficie terrestre y la población, la superficie terrestre y la ganadería, la superficie terrestre y la agricultura, que son significativas en el estudio de la interrelación entre el medio ambiente y la sociedad humana, y se extrajo la conclusión pertinente. Los resultados de su estudio indicaron que, en Mongolia, las zonas de estepa y bosque-estepa son zonas de alto potencial ecogeomorfológico, mientras que los paisajes de bajo y muy bajo potencial ecogeomorfológico son comunes en los cinturones de alta montaña, y las zonas desérticas. Los paisajes con un potencial ecogeomorfológico muy alto y alto cubren más del 85% del territorio total de las provincias. El producto final de este estudio fue la generación de un mapa del potencial ecogeomorfológico de Mongolia, el cual puede aplicarse como base para la planificación urbana y la agricultura, especialmente para la planificación de zonas ganaderas y agrícolas.

De acuerdo con Wang *et al*. (2022), el enfoque ecológico-geomorfológico es un concepto interdisciplinario emergente, que está estrechamente relacionado con el entorno natural y los factores humanos que afectan a la clasificación de los tipos de suelo. La geomorfología y la ecología de los ecosistemas están estrechamente relacionadas con el ser humano. La geomorfología desempeña un papel fundamental en el control de muchos ecosistemas, y los ecosistemas pueden tener un impacto de gran alcance en muchas geoformas y procesos geomórficos. Consideran que los tipos de suelo desempeñan un importante papel orientador en la supervivencia y la producción humanas, y descifrar la división de los tipos de suelo es la base para garantizar el desarrollo sostenible y coordinado de los ecosistemas complejos socioeconómico-naturales. Estos autores propusieron el enfoque de Cognición Ecogeomorfológica (Eco-geoC) para la clasificación de los tipos de suelo. El enfoque se divide en tres niveles:

(i) Percepción de características espaciales ecología-geomorfología
(ii) Conocimiento de objetos espaciales ecología-geomorfología
(iii) Conocimiento de patrones espaciales ecología-geomorfología.

El estudio consistió en la subdivisión de unidades terrestres utilizando imágenes de teledetección, información geográfica, vegetación, suelo, Modelos Digitales de Elevación (MDE) y conocimientos geocientíficos. El enfoque Eco-geoC se puso a prueba en la región de Altay (China) y dio como resultado la desagregación del área de estudio en 2 tipos cinturones naturales, 27 sistemas de tierras y 78 unidades de tierras, y un mapa de tipos de tierras a escala 1: 500.000, que ilustra una buena relación de ensamblaje entre la fisonomía, la vegetación y el suelo en la región de Altay y confirma que el uso del enfoque Eco-geoC para la clasificación de los tipos de suelo es significativo y tiene potencial para la evaluación y planificación del suelo. Este enfoque puede proporcionar una base científica para la restauración de la ecología regional y la gestión integral y el ajuste de los recursos de la tierra y el medio ambiente (Wang *et al.* 2022).

Kirillova *et al*. (2022), condujeron un estudio en el territorio de Udmurtia (parte europea de Rusia), para evaluar sus condiciones ecogeomorfológicas, ya que se trata de una región bien desarrollada (metalurgia ferrosa y no ferrosa, construcción de maquinaria y producción de petróleo) con una densidad de población bastante alta. Se utilizó un enfoque combinado, basado en métodos geomorfológicos estándar (trabajo de campo, teledetección y tecnologías SIG) y en el análisis de la distribución espacio-temporal de la población. El estudio determinó que, la región se encuentra en unas condi-

ciones ecogeomorfológicas relativamente confortables, donde las zonas con condiciones confortables y relativamente confortables constituyen el 63% de la región de estudio, mientras que las zonas con condiciones poco confortables e incómodas, en las que el relieve empeora las condiciones ecológicas, representan el 37%. Los problemas ecogeomorfológicos y ecológicos más agudos son característicos del sureste de Udmurtia, donde el relieve contribuye a una mala situación ecológica. El 57% de los asentamientos rurales están situados en zonas con condiciones ecogeomorfológicas cómodas y relativamente cómodas, mientras que 43% de los asentamientos están situados en zonas con condiciones menos confortables. A pesar de la prevalencia de condiciones de vida confortables y relativamente confortables, la mayoría de los habitantes de Udmurtia viven en condiciones incómodas.

Como otro ejemplo de los estudios ecogeomorfológicos, Istanbulluoglu *et al*. (2008), investigaron la influencia del aspecto de la ladera en la morfología del paisaje en el centro de Nuevo México, donde se observan diferencias en suelos, vegetación y formas del relieve entre laderas mésicas orientadas al norte y laderas xéricas orientadas al sur. Las relaciones pendiente-área y curvatura-área, derivadas de un Modelo Digital de Elevación (MDE), se utilizaron para caracterizar las morfologías opuestas de las laderas. Ellos reportaron que, en todas las geologías y rangos de elevación estudiados, los datos topográficos revelan pendientes significativamente más pronunciadas en las vertientes orientadas al norte y pendientes menos pronunciadas en las vertientes orientadas al sur. Los autores sugieren que, para un área de drenaje dada, las pendientes más pronunciadas orientadas al norte implican una menor erosionabilidad del suelo y que las tasas de erosión de las zonas semiáridas, derivan de la influencia del aspecto de las laderas en la topografía y sus comunidades vegetales asociadas. El estudio reportó como conclusión que, la asimetría observada en los valles indica un legado de influencia del aspecto en las interacciones biótico-abióticas de los procesos de ladera que han estado activos en climas anteriores (Istanbulluoglu *et al.* 2008).

Para Sillero-Medina *et al*. (2020), los cambios en el uso del suelo, incluidos el abandono de tierras y la sustitución de cultivos, la urbanización y otros muchos tipos de degradación, tienen efectos diversos en los procesos ecogeomorfológicos. En su trabajo realizado en el sur de España, con un significativo gradiente pluviométrico longitudinal anual a lo largo de una distancia aproximada de 260 km que oscila entre 1668 mm y^{-1} y sólo 150 mm y^{-1}, pudieron observar a lo largo de este gradiente durante los últimos 70 años tendencias de aumento de las precipitaciones en el oeste y de aumento de la aridez en el este.

Para este estudio seleccionaron dos cuencas experimentales (una seca y otra subhúmeda) con diferentes variables geomorfodiná-micas, para el análisis de los cambios en el uso de la tierra y la caracterización de variables fisiográficas, de cobertura del suelo, físicas, químicas e hidrológicas. Los resultados cuantitativos y cartográficos del estudio identificaron los factores particulares (áreas con vegetación, recursos hídricos y degradación del suelo) que más controlan los procesos geomorfológicos y explican la dinámica del paisaje en esta región durante las últimas décadas. Las cuencas difirieron en sus evoluciones ecogeomorfológicas entre 1996 y 2018. La cuenca más seca sufrió una reducción de la cubierta vegetal y un empobrecimiento de las propiedades del suelo durante un periodo de 20 años. Por su parte la cuenca subhúmeda mostró un marcado aumento de la superficie forestal y de los suelos cubiertos de abundante hojarasca y plantas anuales, siendo incluso frecuente la presencia de musgo durante la estación húmeda; a pesar de ello, algunas laderas mostraron una disminución de la masa forestal, con el consiguiente deterioro de los suelos. El estudio mostró que los periodos xéricos disminuyeron en la cuenca subhúmeda, pero aumentaron en la cuenca seca.

Calvo-Cases *et al*. (2021) opinan que el diagnóstico de la degradación del suelo requiere una comprensión profunda del funcionamiento y la evolución de los ecosistemas. En su trabajo exploraron los efectos de la erosión sobre la configuración de la vegetación a través de dos casos de estudio a diferentes escalas espacio-temporales. Se enfocaron en el vínculo estructura-función, concretamente en cómo se relacionan los rasgos morfológicos con las diferentes etapas de la secuencia erosiva, tanto en el ámbito abiótico, como en el biótico. Los resultados del estudio indican que la dinámica de la vegetación se ve afectada por las condiciones estructurales del entorno, por el revestimiento de la superficie con fragmentos de roca a escala de parche, y por el grado de acoplamiento ladera-canal a escala de ladera; estos autores consideran que, los parches desnudos actúan como proveedores de recursos. La adaptación de las laderas a las corrientes acopladas puede observarse en la disminución del tamaño y de la cubierta vegetal, lo que indica un empobrecimiento de los recursos edáficos.

Espinosa-Muñoz *et al.* (2023) opinan que, los entornos naturales protegidos tienen un papel fundamental para preservar y proteger los servicios ecosistémicos, por lo que la mitigación de los efectos del cambio climático sobre los mismos es un reto crucial. En su estudio en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (Geoparque Mundial de la UNESCO), con características territoriales relacionadas con condiciones climáticas áridas y semiáridas y donde las consecuencias del actual patrón pluviométrico están acentuan-

do las vulnerabilidades de estas zonas. Esta investigación analizó la dinámica eco-geomorfológica en las últimas décadas desde una perspectiva climática y de la cubierta vegetal y contrastó esta evolución con la situación de la calidad del suelo, con énfasis en las propiedades orgánicas del suelo como determinantes de los principales procesos de degradación en el área mediterránea. Los resultados de esta investigación muestran grandes diferencias entre las distintas unidades de paisaje; se identificaron zonas donde los factores abióticos controlan la dinámica ecogeomorfológica actual y donde la agresividad de las precipitaciones está provocando importantes procesos de degradación, una reducción del contenido orgánico de los suelos y, en general, una dinámica asociada a la rexistasia; y otras zonas donde los factores bióticos están mejorando la conservación del medio y la prevalencia de procesos de biostasia.

En sitios tan degradados como las explotaciones mineras, la ecogeomorfología ha sido un instrumento básico para su evaluación ambiental. Según Bexeitova *et al.* (2021), la degradación ecológica del entorno geomorfológico de Kazajstán Central, causada por actividades tecnogénicas, ha adquirido un peligroso carácter regional. Particularmente peligroso para el medio geomorfológico ha sido el desarrollo de procesos geodinámicos que potencian la desertificación natural y tecnológica y la degradación del suelo. Una evaluación de los principales procesos naturales y antropogénicos de la zona estudiada evidenció que existen ciertas diferencias en su manifestación en función de la base geológica y estructural, la morfogenética del relieve y la naturaleza, la escala y el tiempo de desarrollo de los minerales. Las secciones morfogenéticas del relieve ofrecen una estimación comparativa de la relación entre los principales procesos negativos de origen natural y antropogénico y se reflejan en modelos cartográficos, cuyo contenido básico es la información más reciente sobre la distribución espacial de los principales tipos y subtipos de relieve y los procesos exodinámicos predominantes en las zonas de minería activa.

9. El mapa Geomorfológico

En opinión de Peña *et al.* (1997), los mapas geomorfológicos son de vital importancia para la planificación territorial ya que contienen la información esencial para la elaboración de cartografías aplicadas, además de su combinación o integración con otras variables cartográficas del medio físico o de la actividad humana sobre un espacio. En Geomorfología, como en otras ciencias de la Tierra, la Cartografía es imprescindible para dejar clara y concreta la distribución y configuración espacial que presentan sobre el te-

rreno los elementos más significativos que definen el relieve. Ese vehículo de expresión gráfica es el Mapa geomorfológico. Aunque el mapa geomorfológico contiene ya una información directamente aplicable a numerosos aspectos de la actividad humana sobre el medio físico, a nivel práctico este mapa constituye un documento básico. Entre los campos en los que estos mapas pueden aportar datos imprescindibles están: la planificación territorial, la agricultura y el sector forestal, las obras de ingeniería civil (instalaciones industriales y asentamientos urbanos) y de infraestructura de transportes y comunicaciones (ferrocarril, carreteras, puertos, aeropuertos), las obras hidráulicas (presas, canales), los trabajos de prospección y explotación minera, la conservación del suelo y, en general, cualquier investigación en la que esté implicado el medio ambiente.

El mapa debe incluir la representación de las formas del relieve, de modo individual o formando unidades territoriales, la génesis de los procesos, la evolución de las formas y el grado de equilibrio dinámico (Peña *et al.* 1997). A pesar de la gran diversidad de escuelas y métodos de cartografía geomorfológica parece claro que hay una serie de elementos que deben ser representados en los mapas básicos y que pueden resumirse en los siguientes:

(i) Información topográfica.

(ii) Información hidrológica.

(iii) Datos geológicos: litología, tectónica, formaciones superficiales, marco morfoestructural. Información basada normalmente en mapas geológicos ya existentes.

(iv) Morfometría: valores de pendientes, alturas, desarrollo de formas, ángulos y elementos lineales, energía de relieve, etc.

(v) Morfografía: geométrica y real de las formas.

(vi) Morfogénesis: procesos genéticos, sistema morfogenético, agentes del modelado, etc.

(vii) Morfocronología: sucesión temporal de los grupos de formas. Sedimentos correlativos. Cronología absoluta o relativa.

(viii) Morfodinámica: funcionalidad de los procesos, formas heredadas de dinámicas no funcionales.

De acuerdo con Gutierrez (2004), el mapa geomorfológico es la expresión gráfica, precisa y analítica de los procesos morfogenéticos y sus formas resultantes. En este sentido su levantamiento es una labor fundamen-

talmente de campo, de observación directa de los fenómenos, de análisis de los mismos e, incluso, de representación directa de ellos. El trabajo de campo ha de ser, entonces, lo primordial y nunca supeditado a otros procedimientos que, sin embargo, sirven de ayuda invalorable; nos referimos a los mapas topográficos, geológicos y, especialmente, a las fotografías aéreas. El mapa geomorfológico tiene múltiples aplicaciones, destacándose su uso con fines de:

(i) Evaluación de riesgos naturales.

(ii) Obras de ingeniería.

(iii) Edafología.

(iv) Agricultura.

(v) Ordenación territorial.

Según Huggett (2007, 2011), la única forma de apreciar plenamente los accidentes geográficos es ir al terreno y verlos. La cartografía de los accidentes geográficos o del relieve es un arte. El relieve varía considerablemente en forma y tamaño. Los mapas morfológicos captan las propiedades areales e intentan identificar las unidades básicas de los accidentes geográficos sobre el terreno, en fotografías aéreas o en mapas. Consideran la superficie del suelo como un conjunto de elementos del relieve.

Según Dramis *et al.* (2011), los mapas geomorfológicos se encuentran entre las mejores herramientas para comprender el contexto físico de la superficie terrestre. Proporcionan una descripción objetiva completa de las formas del relieve (Morfografía) identificadas con nombres específicos y representadas con su forma correcta o, cuando la escala del mapa no lo permite, mediante símbolos apropiados. Actualmente, la cartografía geomorfológica está presente como método de investigación preliminar en prácticamente todos los proyectos de ordenación del territorio y de evaluación y zonificación de riesgos geológicos. Además, los datos geomorfológicos de referencia son cada vez más requeridos por otros sectores de la investigación medioambiental, como la ecología del suelo, la silvicultura y la edafología.

Los mapas morfodinámicos consideran los fenómenos relacionados con la geodinámica actual de la superficie, incluidos los efectos de las actividades humanas. A partir del análisis de los mapas morfodinámicos es posible esbozar el marco general de la morfogénesis reciente/presente del área investigada, así como formular predicciones razonables del comportamiento futuro de los fenómenos superficiales reconocidos, evaluando también es-

cenarios de eventos geomorfológicos de primera generación en áreas previamente no afectadas. Por lo tanto, independientemente de su importante valor científico, los mapas morfodinámicos pueden asumir un papel primordial en los proyectos de gestión del territorio (urbanización, construcción de carreteras, oleoductos, parques, etc.) y en los proyectos destinados a mitigar los riesgos geológicos (Dramis *et al.* 2011).

Los mapas geomorfológicos derivados se obtienen a través de la selección, generalización y reutilización de datos reportados en mapas básicos con el propósito de zonificar la distribución espacial/temporal de procesos geomorfológicos significativos como deslizamientos, inundaciones, deformaciones superficiales co-sísmicas, erupciones volcánicas y tsunamis. Los mapas derivados son más fáciles de leer que los mapas básicos originales y también pueden ser utilizados por personas no especializadas, como ingenieros, planificadores del territorio y responsables de la toma de decisiones. Los mapas de peligros geomorfológicos son mapas derivados que describen la "*naturaleza de los fenómenos superficiales causantes de riesgo*", así como su magnitud y frecuencia de aparición. En las últimas décadas, los métodos tradicionales de cartografía geomorfológica orientada a símbolos se han utilizado ampliamente para la gestión del territorio, especialmente en el campo de la evaluación de geoamenazas y la mitigación de riesgos. Sin embargo, estos métodos no son capaces de satisfacer los actuales requisitos científicos y técnicos de la gestión del territorio. De hecho, a pesar de las importantes mejoras introducidas por las nuevas herramientas de investigación y los procedimientos basados en los SIG, las leyendas orientadas a los símbolos son incapaces de proporcionar una representación adecuada de la complejidad del paisaje para un enfoque polivalente, multidisciplinar y multiescalar de la gestión del territorio (Dramis *et al.* 2011).

9.1. Categorías de mapas según la escala

Se consideran tres categorías de mapa según la escala:

(i) de pequeña escala entre 1:500.000 y 1:2.000.000, que permiten efectuar un inventario geomorfológico mundial o regional en base a un reconocimiento general, en ellos aparecen los grandes tipos de formas, o sean las grandes unidades geomorfológicas

(ii) de mediana escala, entre 1:100.000 y 1:200.000, e incluso pueden ser a 1:50.000 en condiciones muy particulares con respecto a la complejidad y extensión de los fenómenos; estos mapas responden amplia

mente a las exigencias de la planificación y organización regional, así como el establecimiento de anteproyectos, puesto que ello permite, en comparación a los mapas a pequeña escala, que el reconocimiento y el estudio de una región considerada se haga más en detalle

(iii) de gran escala, 1:50.000, 1:25.000, 1:20.000, 1:10.000 y 1:5.000, el mapa resulta verdaderamente detallado y proporciona una gama considerable de información, tal como, los detalles del modelado de disección, las diferencias litológicas, los procesos morfogenéticos y sus geoformas (terrazas, conos de deyección, coladas de barro, solifluxión, escurrimiento de vertientes en sus diversas variantes, etc.).

Según González de Vallejo (1977), un mapa geomorfológico es el resultado de la expresión gráfica del relieve, su litología, y de los procesos geodinámicos que han actuado en el pasado y actúan en el presente. Por consiguiente, un mapa geomorfológico debe prestar información acerca de la morfología, morfometría, morfogénesis y morfocronología. Este autor distingue tres tipos de mapas geomorfológicos:

(i) Mapas morfológicos.

(ii) Mapas morfogenéticos.

(iii) Mapas morfocronológicos.

Si se analiza el contenido de estos tres mapas, se observará que los aspectos morfológicos proporcionan una unión directa con los mapas geológico-ingenieriles. Los aspectos litológicos y morfogenéticos están relacionados con la hidrología, mecánica del suelo y mecánica de rocas, aportando así una importante ayuda en las investigaciones geotécnicas. Los aspectos morfocronológicos hacen posible separar a las formas activas de las inactivas, y predecir los efectos de cualquier modificación antropológica en el relieve.

La elección de la escala del mapa debería estar determinada por la naturaleza de la topografía y por el uso al cual va a ser destinado el mapa. En áreas de gran complicación topográfica, la escala recomendada es la 1: 10.000. Donde el relieve es moderado, las escalas indicadas pueden estar comprendidas entre 1: 10.000- 1: 50.000.

Para mapas aplicados a la planificación o ingeniería, las escalas van ligadas a las fases del proyecto y grado de definición de los trabajos requeridos. Atendiendo a estos factores, se puede establecer la siguiente división:

(i) Mapas de pequeña escala: adecuados para el reconocimiento de gran des áreas a escalas comprendidas entre 1: 20.000-1: 60.000. La información morfológica es la fundamental junto con la litológica. Las aplicaciones más usuales son: planificación y evaluación territorial, estudios de viabilidad y selección de emplazamientos o rutas. Su realización puede efectuarse rápidamente Y a bajo coste, siempre que se disponga de adecuada información topográfica Y de fotos aéreas. Su principal valor puede encontrarse en las etapas de estudios previos y donde la información geológica sea escasa.

(ii) Mapas de gran escala: adecuados para estudios específicos para la ingeniería civil. Sus escalas oscilan entre la 1: 10.000-1: 500. Con base a su aplicación estos mapas pueden dividirse en: mapas de reconocimiento, de investigaciones *in situ* y de construcción (González de Vallejo, 1977).

9.2. Aplicaciones de los mapas geomorfológicos

Por la naturaleza de su información, los mapas geomorfológicos pueden ser de gran utilidad para la planificación territorial, ingeniería civil, agricultura y prospección y explotación de los recursos naturales. Asimismo, pueden contribuir al diseño de las investigaciones geotécnicas y en la predicción de los efectos de cualquier modificación antropogénica en el relieve. Los mapas geomorfológicos aportan criterios de importancia decisiva en la planificación urbana que, en muchos casos, constituyen factores excluyentes y selectivos **(**González de Vallejo, 1977).

Debido a la numerosa información contenida en un mapa geomorfológico y a la naturaleza de esta, los mapas geomorfológicos pueden ser aplicados a múltiples usos. Entre estos se incluyen:

(i) Usos del territorio: planificación territorial y regional; conservación del medio ambiente

(ii) Agricultura: utilización y conservación del suelo; control de la erosión, riego y drenaje

(iii) Ingeniería Civil y Urbanismo: planificación y ordenación urbana; co municaciones, canales, presas y embalses; puertos y protección de costas; prospección y explotación de recursos naturales (suelos, ma teriales de construcción, etc.)

(iv) Prospección geológica: explotación minera, recuperación de áreas afectadas por explotaciones mineras.

Referencias Bibliográficas

AKIYANOVA, F. ZH., N. B. ZINABDIN, A. ZH. KENZHEBAYEVA, F. G. ADILBEKOVA, A. T. ILYASSOVA AND E. M. KARAKULOV

2018. Ecological-geomorphological assessment of the suburban area of Astana. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science,* 107 012047 doi :10.1088/ 1755-1315/107/1/012047. Recuperado de: https://iopscience.iop.org/article/ 10.1088/1755-1315/107/1/012047/pdf

ALCÁNTARA-AYALA, I.

2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47:107-124.

ANDERSON, R. S.

2008. *The little book of geomorphology.* https://instaar.colorado.edu/uploads/ people/182/The_little_book_010708_print.pdf

ANDERSON, R. S. AND S. P. ANDERSON

2010. *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes.* Cambridge University Press. https://assets.cambridge.org/97805215/19786/frontmatter/ 9780521519786_frontmatter.pdf

ARISTIZÁBAL, E. Y S. YOKOTA

2006. Geoorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Dyna*, Año 73(149): 5-16.

ARISTIZÁBAL E., H., H. MARTÍNEZ Y J. I. VÉLEZ

2010. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34 (131): 209-227, 2010. ISSN 0370-3908.

ARROYO, G. L. N.

2022. ¿Son importantes las formas del relieve en el planeamiento espacial? Revista de Ciencias Ambientales (*Trop J Environ Sci*). Vol 56(2): 256-265. DOI: https://doi.org/10.15359/rca.56-2.1 http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200001

BATHRELLOS, G. D., K. GAKI-PAPANASTASSIOU, H. D. SKILODIMOU, D. PAPANASTASSIOU AND G. C. KONSTANTINOS

2012. Potential suitability for urban planning and industry development using natural hazard maps and geological–geomorphological parameters. *Environ Earth Sci.,*66:537-548. https://www.academia.edu/85998998/Potential_suitability _for_urban_planning_and_in dustry_development_using _natural_hazard_ maps_and_geological_geomorphological_parameters

BAUER, B. O.

2004. Geomorphology (428-435). In: *Encyclopedia of Geomorphology*. Goudie, A.S., Eds. London, Routledge.

BENIDHAR, D. L., A. BAHUGUNA, S. NAYAK, V. K. DHARGALKAR AND T. G. JAGTAP

2005. Eco-geomorphological zonation of the Bangaram reef. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 33(1): 99-106.

BENITO, G., Y H. A. DÍEZ, H. A. EDITORES

2004. *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología*. En Libro de Actas de los Simposios desarrollados durante la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, celebrada en Toledo, 22-25 de septiembre de 2004. pp 15-24. http:// www.andresdiezherrero.es/publicaciones/libros/benito_y_ diez_herrero_ 2004_riesgos_indice.pdfEG y CSIC, Madrid, 543 p.

BENITO-CALVO, A., C. I. LOZANO, Y K. THEODOROS

2014. Conceptos básicos y métodos en Geoarqueología: Geomorfología, Estratigrafía y Sedimentología. *Treballs d'Arqueologia*, 20: 41-54. DOI: 10.5565/rev/tda.45.https://www.raco.cat/index.php/TreballsArqueologia/ article/download/293137/381643

BEXEITOVA, R., O. TAUKEBAYEV, A. KOSHIM, L. VESELOVA AND A. ASSYLBEKOVA

2021. Geomorphological risks and assessment of ecological-geomorphological situations of mining regions of arid zone of Kazakhstan. *Geodesy and Cartography* 47(3): 139-146 https://doi.org/10.3846/gac.2021.12492.

BUMTSEND, B., P. MUNKHTUR, AND A. ERDENEDALAI

2020. Assessment of Eco-geomorphological potential of Mongolia. *Proceedings of the Mongolian Academy of Science*, 60(3) (235) DOI: https://doi.org/10.5564/ pmas.v60i3.1418 1

BUZJAK, N., N. BOCIC AND M. PAHERNIK

2014. Geomorphological map as a tool for visualization of geodiversity - example from Cave Park Grabovaca (Croatia). *Geophysical Research Abstracts* Vol. 16, EGU2014-8803. https://www.academia.edu/49854006/Geomorphologi cal_map_as_a_tool_for_visualization_of_geodiversity_example_from_ Cave_ Park_Grabovaca_Croatia_

CALVO-CASES, A., E. ARNAU-ROSALÉN, C. BOIX-FAYOS, J. ESTRANY, M. J. ROXO, AND A. E. SYMEONAKIS

2021. Eco-geomorphological connectivity and coupling interactions at hillslope scale in drylands: Concepts and critical examples. *Journal of Arid Environments*. Volume 186. https://www.semanticscholar.org/paper/Eco-geomorphological-connectivity-and-coupling-at-Calvo-Cases-Arnau-Rosal%C3%A9n/ dab5323de1b9bc2c6515a34ac20b7cb48050f234

CANCHOLA, Y., L. ESPINOSA, J. HERNÁNDEZ Y M. BALDERAS

2016. La geomorfología en el estudio del paisaje: nociones teóricas-conceptuales de un binomio complementario. *Rev. Geo. Sur* 7 (10): 29-41. http://www. revgeosur.udec.cl/?p=398

CARCAVILLA, L., J. J. DURÁN, Y J. LÓPEZ-MARTÍNEZ

2018. Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico (Geodiversity: concept and relationships with geological heritage). https:// www.researchgate.net/publication/285776680_Geodiversidad_ Concepto_y _relacion_con_el_patrimonio_geologico

CARIA, M. A.

2012. *Geomorfología y Arqueología: Una relación conveniente*. Editorial Académica Española; 56p.

CASTALDINI, D., J. VADATI AND D. C. ILIES

2005. The contribution of geomorphological mapping to environmental tourism in protected areas: examples from the Apennines of Modena (Northern Italy). *Revista de Geomorfologie,* 7: 91-106. https://www.semanticscholar.org/paper/The-contribution-of-geomorphological-mapping-to-in-Castaldini-Valdati/8de9f0184db3561a5453c30777084447fed5f953

CENDRERO, A. AND M. PANIZZA

1999. Geomorphology and environmental impact assessment: an introduction. Fourth. International Conference on Geomorphology, Italy 1997. Symposium: Geomorphology and Environmental Impact Assessment Qual. (III) T.3: 167-172. https://www.semanticscholar.org/paper/Geomorphology-and-Environmental-Impact-Assessement%3A-Cendrero/ef9e7d5433a 09cdaed447631912c 7e7556d3a1d2

COATES, D. R.

1973. Environmental geomorphology and landscape conservation. Binghamton Geomorphology Symposium. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Benchmark Papers in Geology, Volume 8. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781000046472_A38997165/preview-9781000046472_A38997165.pdf

COOKE, R. U. AND J. C. DOORNKAMP

1974. *Geomorphology in environmental management. An Introduction*. Oxford University Press. London, 413p.

COOKE, R.U. AND J. C. DOORNKAMP

1990. *Geomorphology in Environmental Management*. 2nd Edition, Oxford University Press, Oxford. 410 p.

CORATZA, P. AND J. DE WAELE

2012. Geomorphosites and Natural Hazards: Teaching the Importance of Geomorphology in Society. Geoheritage DOI 10.1007/s12371-012-0058-0. https://www.academia.edu/en/3748865/Geomorphosites_and_Natural_Hazards_teaching_the_importance_of_geomorphology_in_the_society

COSTA, C., F. AUDEMARD, L. AUDIN, AND C. BENAVENTE

2010. Geomorphology as a Tool for Analysis of Seismogenic Sources in Latin America and the Caribbean (29-47). In: E. Latrubesse Ed. *Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America*. Special Volumes of Geomorphology. Developments in Earth Surface Processes,13, Elsevier, 535p., Amsterdam.

CRUDEN, D. M.

1991. A simple definition of a landslide. *Bull Inter. Assoc. Engng. Geol.,* 43: 27-29. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02590167.

DERRAU, M.

1966. *Geomorfología*. Primera edición en castellano. Ediciones Ariel. Barcelona, España, 442 p.

DRAMIS, F., D. GUIDA AND A. CESTARI

2011. Nature and Aims of Geomorphological Mapping (39-64). In: *Developments in Earth Surface Processes*, Volume 15. Chapter Three. DOI: 10.1016/B978-0-444-53446-0.00003-3

EASTERBROOK, D. J.

1999. *Surface Processes and Landforms*. 2nd Edition. Prentice Hall. 546 p.

EDELCA

2004. *Estudio Plan Maestro de la Cuenca del río Caroní.* Vol. 1. Diagnóstico ambiental y caracterización integral de la cuenca. Tomo 2 Caracterización de los elementos Geosféricos. Capítulo 3. Descripción de la geomorfología. Gerencia de Gestión Ambiental, Caracas, 281 p.

ELIZALDE, G.

2012. Clasificación sistemática de paisajes. Propuesta de un marco conceptual (Systematic classification of landscapes. A proposed framework). *Venesuelos,* 19:23-43.

ERHARTIÈ, B. AND M. ZORN, M.

2012. Geodiversity and geomorphosite research in Slovenia. *Geografski vestnik* 84(1): 51–63. https://www.researchgate.net/publication/285664588_Geodiversity_and_geomorphosite_research_in_Slovenia

ESPINOSA-MUÑOZ, J., J. A.SILLERO-MEDINA AND J. D. RUIZ-SINOGA

2023. Eco-geomorphological repercussions of recent climate dynamics on soil quality from Cabo de Gata-Níjar Natural Park (Almeria, Spain). EGU23-5030. https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU23/EGU23-5030.html.

FERRANDO, A. F. J.

2004. Geomorfología aplicada y desastres: Rol preventivo y Ordenamiento Territorial. En: *Revista de Urbanismo*, N°13, Santiago de Chile. Publicación electrónica editada por el Departamento de Urbanismo, F.A.U. de la Universidad de Chile. https://web.uchile.cl/vignette/revistaurbanismo/CDA/urb_completa/0,1313,ISID%253D569%2526IDG%253D2%2526ACT%253D0%2526PRT%253D15859,00.html.

FOOKES, P. G. AND P. R. VAUGHAN

1986. *A Handbook of engineering geomorphology.* Edited by Surrey University Press; New York: Chapman and Hall, 343 p.

FOUACHE, É., K. PAVLOPOULOS AND P. FANNING

2010. Geomorphology and Geoarchaeology: cross-contribution. *Geodinámica Acta* 23(5-6): 207-208. doi:10.3166/ga.23.207-208. https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/09853111.2010.9736394?needAccess=true.

GAKAEV, R., T. BACHAEVA AND M. DUDAEVA

2022. Ecological and Geomorphological Analysis of Ecosystems in The Mountainous Part of the Chechen Republic. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Sustainable development of environment after Covid-19" (SDEC 2021). Advances in Social Science, Education and Humanities Research, volume 632. https://www.atlantis-press.com/proceedings/sdec-21/125968900.

GARCÍA, M. P.

1987. Manual Metodológico del Proyecto Inventario de Recursos Naturales de la Región Guayana (PIRNRG). Versión preliminar. CVG Técnica Minera. Gerencia de Proyectos Especiales. Ciudad, Bolívar, 330p.

GARCÍA, M. P.

2014. Territorial Zoning Based on Geopedologic Information: Case Study in the Caroni River Basin, Venezuela (505-521). In: Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies. Eds. Joseph Alfred Zinck, Graciela Metternicht, Gerardo Bocco and Héctor Francisco Del Valle. Chapter 31. Springer

GARCÍA, R. R., Y R. E. GARCIA

2018. El clima hacia 2030. La geomorfología como proxy en el cambio climático. *Rev. Tekhné,* 21(3): 080-095.

GARCÍA-RUIZ, J. M.

2015. Why geomorphology is a global science? *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 41(1): 87-105. https://www.researchgate.net/publication/279236305_Why_geomorphology_is_a_global_science

GARCÍA-SORIAN O, D., A. QUESADA-ROMÁN Y J. J. ZAMORANO-OROZCO

2020. Geomorphological hazards susceptibility in high-density urban areas: A case study of Mexico City. *Journal of South American Earth Sciences* 102 10266. https://www.academia.edu/43252155/Geomorphological_hazards_susceptibility_in_high_density_urban_areas_A_case_study_of_Mexico_City

GHOSH, S., M. M. HOQUEB,U. D. SAHA AND A. ISLAM

2022. Assessment of dam-induced changes in ecogeomorphological behaviour and fluvial functionality in the Damodar River, West Bengal, India. *AQUA. Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 71(6): 722.doi: 10.2166/aqua. 2022. 003. Downloaded from http://iwaponline.com/aqua/article-pdf/71/6/722/1065407/jws0710722.pd

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.

1977) Aplicaciones de los mapas geomorfológicos a la planificación urbana con un ejemplo de Tenerife. *Boletín Geológico y Minero*. T. LXXXVIII-I: 45-50. https://eprints.ucm.es/15438/

GUTIÉRREZ, J. A.

2004. *Guía teórica de geomorfología*. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida. 105 p. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jgutie/materias/Geomorfologia/Geomor folog% EDaGu%EDa.pdf.

HOLMES. A.

1971. *Geología física*. 6ª edición. Ediciones Omega. Barcelona, España.

HOOKE, J. M.

2019. Changing landscapes: five decades of applied geomorphology. Department of Geography and Planning, School of Environmental Sciences, University of Liverpool, Roxby Building, Liverpool L69 7ZT, UK. 42 p. https://livrepository.liverpool.ac.uk/3055638/1/Applied%20Geomorph%20%20Hooke%20_final.pdf.

HUGGETT, R. J.
2007. *Fundamentals of Geomorphology*. Second edition. https://www.academia.edu/10102820/FUundamentals_of_geomorphology.

HUGGETT, R. J.
2011. *Fundamentals of Geomorphology*. Third Edition. Routledge Fundamentals of Physical Geography Series. Series Editor John Gerrard. https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/fundamentalsofgeomorphology_routledgefundamentalsofphysicalgeography.pdf

ISTANBULLUOGLU, E., O. YETEMEN, E. R. VIVONI, H. GUTIERREZ-JURADO AND R. L. BRAS
2008. Eco-geomorphic implications of hillslope aspect: Inferences from analysis of landscape morphology in central New Mexico, *Geophys. Res. Lett*., 35, L14403, doi:10.1029/ 2008GL034477

KEILER, M., J. KNIGHT AND S. HARRISON
2010. Phil Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Trans. R. Soc*. A 368: 2461–2479. doi:10.1098/rsta.2010.0047

KENNETH, J. G. AND J. LEWIN
2014. *The Basics of Geomorphology. Key concepts.* SAGE Publications Ltd. https://handoutset.com/wp-content/uploads/2022/06/The-Basics-of-Geomorphology-Key-Concepts-Kenneth-J.-Gregory-John-Lewin-z-lib.org_.pdf

KIRILLOVA, A., E. LIKHACHEVA AND O. KOKIN
2022. Assessment of The Eco-Geomorphological Conditions of Udmurtia. Earth Sciences, Vol. 81, issue 7, id. 196. DOI: 10.1007/s12665-022-10323-x

KONDOLF, G. M.
1997. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4): 533-551. https://link.springer.com/article/10.1007/s002679900048

MCGREGOR, D. F. M. AND TD. A. HOMPSON
1995. Geomorphology and Land Management in a Changing Environment. Volumen 11 de British Geomorphological Research Group Symposia Series. Wiley Eds.

MORISAWA, M. AND K. CLAYTON
1985. *Rivers: Form and Process.* London; Longman. 222 p.

KUBALÍKOVÁ, L. AND K. KIRCHNER
2015. Geosite and Geomorphosite Assessment as a Tool for Geoconservation and Geotourism Purposes: A Case Study from Vizovická vrchovina Highland (Eastern Part of the Czech Republic). *Geoheritage* DOI 10.1007/s12371-015-0143-2. https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1007-S12371-015-0143-2

LEOPOLD, L. B., M. G. COLMAN AND J. P. MILLAR
1964. *Fluvial Processes in Geomorphology.* San Francisco: W. H. Freeman. USA.

LOBERA, G. G.

2017. Eco-geomorphological dynamics in contrasting Mediterranean rivers with different degrees of flow regulation. Doctoral thesis. University of Leida, Spain. 224p.

LÓCZY, D.

2010. Anthropogenic Geomorphology in Environmental Management (29-47). In: Szabó, J., Dávid, L., Lóczy, D. (eds) *Anthropogenic Geomorphology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3058-0_3

LÓPEZ-BLANCO, J. AND L. VILLERS-RUIZ

1995. Delineating Boundaries of Environmental Units for Land Management Using a Geomorphological Approach and GIS: A Study in Baja California, Mexico. *Remote Sens. Environ,*. 53:109-117.

MCGREGOR, D. F. M. AND D. A. THOMPSON

1995. Geomorphology and Land Management in a Changing Environment. Volumen 11 de British Geomorphological Research Group Symposia Series. Wiley Eds.

MEITZEN, K. M., M. W. DOYLE,M. C. THOMS AND C. E. BURNS

2013. Geomorphology within the interdisciplinary science of environmental flows. *Geomorphology journal homepage*. 200:143-154. https://www. semantic scholar.org/paper/Geomorphology-within-the-interdisciplinary-science-Meitzen-Doyle/b93b03e039b53af888f88a892c0ea5e6de81ae0c

MEJÍA, J. F. Y M. M. VERA

2001. Un modelo suelo-paisaje para la planificación ambiental de la microcuenca del río Zarzales, estado Mérida-Venezuela (A soil-landscape model for environmental planning of Zarzales river watershed, Mérida State-Venezuela) *Rev. Geog. Venez.,* Vol 42(1): 45-71.

MICCADEI, E. AND T. PIACENTINI

2013. The Role of Knowledge in the prevention of natural hazards and related risks. *IJPP Italian Journal of Planning Practice,* 3(1): 1-23. http://www.ijpp.it/ index.php/it/article/download/28/28

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES (MARNR)

1985. Estudio geomorfológico de la cuenca alta del río Aragua con fines de usos múltiples. Dirección de Información e Investigación del Ambiente. Programa Inventario Nacional de Tierras. Serie de Informes Científicos, Zona 2/IC/60, Maracay, 111 p.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES (MARNR)

1986. Geomorfología de los llanos occidentales. Enfoque metodológico e hipótesis de la evaluación de los llanos de Venezuela. Serie de Informes Científicos. Zona 2/IC/61. Caracas, 110 p.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP)

1974. Estudio Geomorfológico del río Apure y zonas adyacentes. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Dirección de Información Básica. División de Edafología. Cagua, 125 p.

MOLINA, E. J. M.

2007. Consideración del subsuelo en el ordenamiento territorial. Documento como requisito para optar el título de Doctor en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Cataluña-Manresa. Octubre, 2007. 266 p https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70194?show=full

MONSERRAT, A. L. AND J. O. CODIGNOTTO

2013. Geodiversity in Pampas: Geomorphology and conservation of coastal dunes landscapes. *Comunicações Geológicas*,100(1):21-32. https://www.researchgate.net/publication/286234815_Geodiversity_in_Pampas_Geomorphology_and_conservation_of_coastal_dunes_landscapes

MORISAWA, M. AND K. CLAYTON

1985. *Rivers: Form and Process*. London; Longman. 222 p.

MUÑOZ, J. J.

2000. *Geomorfología general*. Editorial sintesis, Madrid, 351p. https://onggem.files.wordpress.com/2011/01/muc3b1oz-1995-la-biblia.pdf

OBY, R., G. P., A. K. MAJI, C. V. SRINIVAS AND M. VELAYUTHAM

2002. Geomorphological Analysis for Inventory of Degraded Lands in a River Basin of Basaltic Terrain Using Remote Sensing and GIS. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 30, No. l&2

OWENS, P. AND O. SLAYMAKER

2004. *Mountain geomorphology*. 1st edition. Arnold Publication. 313 p.

PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC)

2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas Informe del Grupo de trabajo I del IPCC Resumen técnico. 222 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf

PANIZZA, M.

1996. *Environmental Geomorphology.*1st Edition. Elsevier, 267 p.

PARETA K. AND U. PARETA U.

2012. Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of Ravi River Basin, H.P. India. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, Vol., Issue 1: 41-56.https://www.semanticscholar.org/paper/Quantitative-Geomorphological-Analysis-of-a-of-Ravi-Pareta-Pareta/6cab7c899679b088433e5f789fa3222b7c376207

PELLITERO, R., M. J. GONZÁLEZ-AMUCHASTEGUI, P. RUIZ-FLAÑO AND E. SERRANO

2010. Geodiversity and Geomorphosite Assessment Applied to a Natural Protected Area: The Ebro and Rudrón Gorges Natural Park (Spain). Geoheritage DOI 10.1007/s12371-010-0022-9 https://abdn.pure.elsevier.com/en/publications/geodiversity-and-geomorphosite-assessment-applied-to-a-natural-pr

PEÑA, M. J. L., M. V. LOZANO, F. T. M. SÁNCHEZ, C. J. CHUECA, J. A. ASUNCIÓN, C. F. PELLICER, P. J. CALVET, J. J. MUÑOZ, M. M. HERRERO, A. M. T. ECHEVERRÍA, Y C. S. MARCÉN

1997. Cartografía geomorfológica básica y aplicada. Editado por: José Luis Peña Monné. Ediciones Logroño. Primera edición. https://www.researchgate.net/publication/235863747_Cartografia_geomorfologica_basica_y_aplicada

PESCATORE, E., M. BENTIVENGA, S. IVO GIANO AND V. SIERVO

2019. Geomorphosites: Versatile Tools in Geoheritage Cultural Dissemination. Geoheritage https://doi.org/10.1007/s12371-019-00378-x https://www.academia.edu/80401505/Geomorphosites_Versatile_Tools_in_ Geoheritage Cultural_Dissemination.

PETTS, G. E.

1984. *Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management*. John Wiley and Sons Chichester, UK, 326 p.

PIACENTINI, T., C. CARABELLA, F. BOCCABELLA, S. FERRANTE, C. GREGORI, V. MANCINELLI, A. PACIONE, T., PAGLIANI AND E. MICCADEI

2020. Geomorphology-Based Analysis of Flood Critical Areas in Small Hilly Catchments for Civil Protection Purposes and Early Warning Systems: The Case of the Feltrino Stream and the Lanciano Urban Area (Abruzzo, Central Italy). Water 2020, 12, 2228. Doi:10.3390/w12082228. https://www.mdpi.com/2073-4441/12/8/2228

PIÉGAY, H., F. ARNAUD, B. BELLETTI, M. CASSEL, B. MARTEAU, J. RIQUIER, C. ROUSSON AND D. VAZQUEZ-TARRIO

2023. Why Consider Geomorphology in River Rehabilitation? *Land* 12, 1491. https://doi.org/10.3390/ land12081491. https://www.mdpi.com/2073-445X/12/8/1491

RAMOS-REYES, R., J. ZAVALA-CRUZ, L. M. GAMA-CAMPILLO, D. PECH-POOL Y M. A. ORTIZ-PÉREZ

2016. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana,* 68(3): 581 598. https://www.semanticscholar.org/paper/Indicadores-geomorfol%C3%B3gicos-para-evaluar-la-por-el-Ramos-Reyes-Zavala-Cruz/408394c2edaa5eff386fd1f923b26ddc52895e52.

REYNARD, E., P. CORATZA AND F. HOBLÉA

2016. Current Research on Geomorphosites. *Geoheritage*, 8:1-3. DOI 10.1007/s12371-016-0174-https://www.academia.edu/93232289/Current_ Research_on_Geomorphosites.

RODRÍGUEZ-OLARTE, D., G. M. BARRIOS, C. J. MARRERO Y L. M. MARCÓ

2017. Río Turbio: un síndrome urbano en la vertiente andina del Orinoco. Capítulo 3 (pp: 59-74). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 1.* Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

RODRIGUEZ-VIDAL, J.

1987. Aportación de la geomorfología aplicada a la ordenación del territorio y el medio ambiente en el occidente andaluz. *Revista de Estudios Andaluces*, 9: 41-54. https://www.elsevier.es/en-revista-investigaciones-geograficas-boletin-del-instituto-118-articulo-la-contribucion-investigacion-geomorfologica-cuestion-S0118846111472802X

SANZ-PÉREZ, E. E I. MENÉNDEZ-PIDAL

2016. Utilidad de la geomorfología, arqueología e historia para conocer la dinámica fluvial de los ríos Duero y Tera en Numancia (Soria, España). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4): 5-23.

SERRANO, E., A. M. J. GONZÁLEZ Y F. P. RUÍZ

2009. Gestión ambiental y geomorfología. Valoración de los lugares de interés geomorfológico del Parque Natural de las Hoces del alto Ebro y Rudrón. *Rev. C&G*, 23 (3-4). https://www.academia.edu/53802014/Gesti%C3%B3n_ambiental_y_geomorfolog%C3%ADa_valoraci%C3%B3nd_los_lugares_de_inter %C3%A9s_geomorfol%C3 %B3gico_del_parque_natural_de_Las_Hoces_del_Alto_Ebro_y_Rudr%C3%B3n

SILLERO-MEDINA, J. A., M. E. PÉREZ-GONZÁLEZ, J. F. MARTÍNEZ-MURILLO AND J. D. RUIZ-SINOGA

2020. Factors affecting eco-geomorphological dynamics in two contrasting Mediterranean environments. *Geomorphology* 352 (2020) 106996. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X19304878

SLAYMAKER, O.

2010. Drivers of mountain landscape change during the twenty-first century. *J Soils Sediments* 10, 597-610. https://doi.org/10.1007/s11368-010-0194-6.

SLAYMAKER, O., T. SPENCER AND C. EMBLETON-HAMANN

2009. *Geomorphology and Global Environmental Change.* Cambridge University Press, New York, USA, 431 p.

SMREKAR, A., M. ZORN AND B. KOMAC

2016. Heritage protection through a geomorphologist's eyes: From recording to awareness raising. *Acta geographica Slovenica*, 56-1:123–127. https://www.researchgate.net/publication/287972123_Heritage_protection _tHrougH_a_geomorpHologist's_eyes_From_recording_to_awareness_ raising.

SOETERS, R.

1976. Apuntes sobre la clase de geomorfología. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Bogotá, Colombia. 84 p.

SOMS, J.

2017. Assessment of Geodiversity as Tool for Environmental Management of Protected Nature areas in South-Eastern Latvia. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Volume I: 271-277. Rezekne Academy of Technologies, Rezekne. https://scholar.google.com/citations?user=lCdGKc4AAAAJ&hl=lv

STRAHLER, A. N.
1974. *Geografía física.* Editorial Omega. Barcelona, España, 767 p.

THORNBURY, W. D.
1954. *Principles of Geomorphology*, 1st edn. John Wiley & Sons, New York p. 618

THORNBURY, W.
1966. *Principios de geomorfología*. Ed. Kapeluz. Buenos Aires, Argentina. 643p.

THOMS, M. C. AND M. PARSONS
2002. Eco-geomorphology: an interdisciplinary approach to river science. International Symposium held at Alice Springs, Australia, September. IAHS Publ. No. 276: 113-119. https://www.semanticscholar.org/paper/Ecogeomorphology%3A-an-interdisciplinary-approach-to-Thoms-Parsons/e283cff05dcf1775a7738d849e845ea52bd3a9dc.

TRICART, J.
1969. *La epidermis de la tierra*. Ed. Labor, Barcelona, España. 178 p.

VAN ZUIDAM, R. A
1973. *Guide to Geomorphological Photo-interpretation*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Netherlands.

VERSTAPPEN, H. T.
1983. *Applied geomorphology; geomorphological survey for environmental development*. Elsevier, Amsterdam, 442 p.

VIERS, G.
1974. *Geomorfología*. Primera edición en castellano. Oikos-tau ediciones. Barcelona España, 320 p.

VILLOTA, H.
2005. *Geomorfología aplicada al levantamiento de suelos y zonificación física de tierras*. Instituto. Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá,183 p. http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/1-00778.pdf

WANG, B., W. CHENG, K. SONG, S. WANG, Y. ZHANG, H. LI, J. DENG, AND R. WANG
2022. Application of Ecology-Geomorphology Cognition Approach in Land Type Classification: A Case Study in the Altay Region. *Sustainability*, 14, 4023. https://doi.org/10.3390/ su14074023

WILLIAMS, G. P. AND M. G. WOLMAN
1984. *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*. US Geological Survey. 83 p. https://pubs.usgs.gov/pp/1286/report.pdf.

ZINCK, J. A.
1970. Aplicación de la geomorfología al levantamiento de suelos en zonas aluviales. MOP, División de Edafología, Barcelona, 90 p.

ZINCK, J. A.
1973. Geomorfología y planificación física. Ejemplos venezolanos. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Dirección de Información Básica, División de Edafología, Oficina Edafológica del Centro. Cagua, 71 p.

ZINCK, J. A.

1976. La investigación Geomorfológica en Venezuela. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Dirección de Información Básica, División de Edafología, Oficina Edafológica del Centro. Cagua, 35 p.

ZINCK, J. A.

1988. Physiography and Soils. Soil Survey Courses. ITC. Enschede, The Netherlands, 156 p.

ZINCK, J. A.

2012. *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC Facultad de Ciencia de la Geo-Información y de Observación de la Tierra. Enschede, The Netherlands. 123p.

ZINCK J. A.

2013. *Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies*. ITC Special Lecture Notes. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, 127 p.

ZINCK, J. A.

2014. Chapters 1-8, (7-163). In: Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G. and Del Valle, H. F. Editors. *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies* 1st edition. Springer, 556 p.

ZINCK, J. A.

2023. Chapters 1-8, (3-133). In: Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G, Del Valle, H. F and M. Angelini. Editors. *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies* 2nd edition. Springer, 582 p.

ZINCK, J. A., Y P. L. URRIOLA

1970. Origen y evolución de la Formación Mesa. Un enfoque edafológico. Ministerio de Obras Públicas (MOP), Barcelona.

ZINCK, J. A., Y P. L. URRIOLA

1971. Estudio edafológico Valle Guarapiche, Estado Monagas. Ministerio de Obras Públicas (MOP), Barcelona.

Pedro García Montero

Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía. UCV (1975). Master of Science en Suelos. University of Florida. USA (1984). Docencia en Pregrado y Postgrado en la UCV, UNERG y UCAB. Experiencia en Levantamiento de Suelos y Evaluación de Tierras, Planificación Cuencas Hidrográficas, Ordenación del Territorio, Estudios de Línea Base Ambiental, Estudios de Impacto Ambiental y Seguimiento de Proyectos ambientales. Consultor Senior en temas ambientales. Ex Director de Suelos Vegetación y Fauna, de Conservación y Evaluación de Tierras y del Servicio Autónomo para el Desarrollo Ambiental del Estado de Amazonas (SADA-AMAZONAS), del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables (MARNR) (1989-1994). Ex Coordinador del Programa de Inventarios de Recursos Naturales de la Región Guayana, CVG (1985-1989). Co autor en 8 libros y Coeditor de 1 libro. 17 capítulos de libros (Autor y coautor). 30 publicaciones en revistas y documentos técnicos institucionales

CAPITULO IX

RADIACIONES IONIZANTES

1. Introducción

La Tierra comenzó su dinámica de formación hace aproximadamente 4,54 billones de años; este valor se ha determinado aprovechando técnicas nucleares con diversas metodologías de fechado radiométrico existentes. El método se basa en la concentración de material radiactivo y la ley de decaimiento radiactivo. Los isótopos radiactivos se desintegran a una tasa conocida así que su concentración en las rocas, minerales u otros compuestos, permite calcular la edad de un material por comparación entre la cantidad original y la cantidad restante después de un intervalo de tiempo (Dalrymple, 2001; Wikipedia 2025, Wikinucleos, 2025)

Las diversas metodologías aplicadas en datación radiométrica, se fundamentan en la desintegración de núcleos atómicos primordiales más los que se forman por reacciones nucleares, considerando que los parámetros característicos nucleares no se modifican con el tiempo.

Inicialmente el Universo, posiblemente en un estado de concentración de energía muy alta, se embarca en un proceso de expansión y de enfriamiento. Durante este proceso, la entropía crece y el sistema experimenta niveles de menor potencial de trabajo pasando por una secuela de estados termodinámicos. Cuando las condiciones permiten la condensación de la materia, entonces se inicia el mecanismo de fusión; se forman las 17 partículas elementales de modelo estándar. Esta primera etapa se completa con la formación de la materia nuclear por medio de la generación de los nucleones: protones (p) y neutrones (n).

El sistema, por su dinámica, continúa en expansión disminuyendo la densidad energética gradualmente; se forman aglomeraciones de nucleones,

generando ahora el núcleo atómico. Este sistema experimenta una energía de enlace entre los nucleones de 8 MeV por nucleón en promedio, una energía suficiente para mantenerlos en un estado ligado y en algunos casos, estable, no obstante que se encuentren en un medio inestable.

La etapa siguiente se relaciona con la formación de los átomos. Las condiciones termodinámicas existentes sobreviven con alta probabilidad, (ver: Energía de enlace nuclear: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/NucEne/nucbin.html) para iniciar la aglomeración de los átomos. En esta etapa surge la materia con la formación de moléculas según la teoría atómica de Dalton; un modelo en el cual se establece una unión molecular por la presencia de fuerzas electrostáticas de atracción de Coulomb, (enlaces químicos) (Orgel, 1994**;** Laos, 2014**)**.

En la etapa actual del Universo, observamos la presencia de planetas, de estrellas, sus aglomeraciones en galaxias y conjunto de galaxias; todos ellos se forman por la aglomeración de átomos unidos por potenciales interatómicos (campos de fuerza). La materia puede ser de varios tipos (ionizados por ejemplo) dependiendo de la densidad de energía del sistema; el Sol es un sistema de alta densidad de energía en la cual los núcleos estan en una interacción constante con producción de fotones y materia en oposición**,** la Tierra es un sistema dinámico más estable en fase de enfriamiento.

La estructura de la materia, sea amorfa o cristalina, es formada por átomos con núcleos estables, inestables o perturbados; los átomos inestables o perturbados recuperan la condición de estabilidad por medio de la emisión de energía. Es un proceso que ocurre utilizando diferentes mecanismos de desexcitación y, generalmente involucra una reorganización interna de los nucleones ubicados entre los diferentes niveles en el potencial nuclear. Este mecanismo da origen a la radiactividad y las radiaciones ionizantes, fenómenos característicos de la materia (Becquerel, 1896).

Los temas relacionados con los átomos inestables o perturbados y con los posibles efectos de la ionización en la materia, son tratados a continuación.

2. Radiactividad en Ingeniería Ambiental

La ingeniería ambiental y la radiactividad están relacionadas, en diferentes áreas:

(i) resaltamos la seguridad nuclear,

(ii) la gestión de residuos, y

(iii) la vigilancia ambiental.

El objetivo que los ingenieros ambientales persiguen se relaciona con la comprensión, la mitigación y la gestión del impacto de los materiales radiactivos en el medio ambiente, incluyendo acciones para reducir los posibles y previsibles daños al medio ambiente. Para lograr estas metas, se utilizan los principios de la ingeniería, donde la radiactividad del suelo, la radiobiología, la química nuclear y en general la ciencia nuclear, requieren de soluciones particulares.

En esta instancia nos referimos a la fenomenología de la radiactividad observable en el hábitat humano tanto natural como las derivadas de las actividades antrópicas, incluyendo las acciones orientadas en devolver un ambiente adecuado y seguro para el uso público. Así, las acciones de remediación ambiental comprenden también técnicas y métodos para la reducción de la exposición a la radiación ionizante, que se originan de las instalaciones e infraestructuras contaminadas; por lo tanto, son acciones en beneficio del ambiente, (IAEA, 2009).

Forman parte de estas actividades: (i) la recolección; (ii) la clasificación; y (iii) el acondicionamiento de las sustancias radiológicas, de la cuales algunas son tóxicas para el funcionamiento de biosistemas. Por simplicidad a veces nos referimos a la combinación de la radiación y la sustancia tóxica con la palabra compuesta radiotóxico. Por ejemplo, el polonio, su isótopo más común el 210, es un veneno letal radiotóxico, debido a su toxicidad como elemento químico y como radioisótopo, ha sido utilizado en el caso de envenenamiento de Alexander Litvivoinenko, (https://en.wikipedia.org*)*.

El ingeniero ambiental con interés en la radiactividad y áreas relacionadas, encuentra a su disposición, normas técnicas, métodos de monitoreo disponibles y recomendaciones para la toma de decisiones en textos de referencia; estos son disponibles en los centros de distribución. Acá por ejemplo mencionamos la organización internacional de energía atómica (IAEA) (IAEA, 2010). En el ámbito nuclear las publicaciones científicas y técnicas de esta organización son ampliamente reconocidas y respetadas en campo profesional. Estas incluyen normas internacionales de seguridad, guías técnicas, actas de congresos e informes científicos, orientadas en las aplicaciones de la técnicas nucleares y producción de la energía nucleoeléctrica, la radioterapia, la seguridad nuclear tecnológica y física, y el derecho nuclear, entre otros temas de interés para la profesión.

La ingeniería nuclear ambiental incluye actividades orientadas a la prevención de accidentes, a las prácticas que puedan resultar de la contaminación y sobre todo a los aspectos de rehabilitación ambiental. Es decir consis-

te en poner en práctica acciones más adecuadas para reducir la exposición a la radiación. Los especialistas, aplicando estas normas de seguridad, pueden lograr que se limíten los posibles efectos deletéreos como resultado de la interacción entre radiación y la materia, (Araujo, 2002).

3. Elementos químicos, isótopos estables y radiactivos

Los *elementos químicos* son átomos que se diferencian por el número Z de cargas eléctricas. Los elementos se combinan para formar moléculas, por ejemplo, en el caso más simple, dos átomos de hidrógeno forman una molécula H_2. Un conjunto de diferentes tipos de átomos se aglomera para formar moléculas más complejas, por ejemplo la molécula de H_2O (agua); el petróleo está compuesto principalmente de hidrocarburos, (H,C) que son compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno, por ejemplo, etano C_2H_6. Los minerales se componen de un conjunto de átomos; $(Na,Ca)_8$ $(AlSiO_4)_6(S,SO_4,Cl)_{1-2}$ es la fórmula del mineral de lapislázuli. Moléculas más complejas estructural y funcionalmente, son las proteínas, por ejemplo la titina con aproximadamente 34,500 aminoácidos, que engloba 270.466 átomos de hidrígeno y por curiosidad mencionamos el ADN, que lleva las instrucciones genéticas para todos los organismos vivos por medio de una aglomeración de 10^9 múltiples elementos químicos.

Se debe a Mendeléiev la clasificación de los elementos; en 1869 observó que las propiedades químicas, de los 63 elementos conocidos para la época, muestran una tendencia periódica. La genial clasificación puso en evidencia la posible existencia de otros elementos todavía por descubrir y permitió predecir posibles estructuras moleculares desconocidas, ampliando así el campo a las investigaciones químicas y físicas. Datos y características de los átomos e isótopos son reportados convenientemente en tablas de fácil acceso (Dayah, 2024).

Los elementos, en la mencionada tabla, indicada periódica, por la clasificación utilizada, siguen un orden creciente desde el átomo de hidrógeno (Z=1) pasando por el uranio (Z=92) hasta los transuránicos obtenidos artificialmente. En la clasificación se emplea la masa atómica relativa al Carbono-12; la unidad estándar de masa atómica (conocida como *uma*) es 1/12 de la masa de un átomo neutro y no enlazado de Carbono-12 en su estado fundamental; 1 *uma* equivale a $1{,}66\times10^{-27}$kg.

En la actualidad, la tabla periódica ó llamada Tabla de Mendeléiev, incluye 118 elementos químicos; algunos son producidos por decaimiento o por medio de reacciones nucleares, llamados sintéticos, como el tecnecio, francio, astato o los transuránicos con números atómicos entre (Z=93 y Z=118).

La determinación de los pesos atómicos de los elementos (es decir la masa química), se debe al químico italiano Estanislao Cannizzaro (1858) (Boleso, 2025). Sus resultados permitieron la clasificación de los átomos, reportados en grupos de ocho columnas verticales por disponer de algunas similitudes químicas y siete filas horizontales cada una conocida como "períodos". Para cada elemento se indica entre otros, el número de electrones, estados de oxidación y la visualización de los orbitales electrónicos en 3D.

Después de los experimentos de Becquerel, que llevaron al descubrimiento de la radiactividad natural, (Radvanyi, 2017), se realizaron otros similares y con los resultados obtenidos se concluyó que un mismo elemento químico existe con diferentes masas y algunos emiten espontáneamente energía detectable con placas fotográficas.

En 1913, se introdujeron en la tabla periódica, los isótopos estables e inestables (*radioisótopos)*. Una primera clasificación que fue objeto de una importante publicación de Guggenheimer (1934) contenía pocas decenas de radioisótopos; luego se amplió con datos recolectados por Fea (1935) y otros autores. Desde entonces la tabla de los radioisótopos se ha completado con más de 4000 unidades, en la cual se enumeran también, 264 isótopos estables. Se espera completar la tabla periódica en los próximos decenios, con 6000 radionúclidos adicionales previstos por vía teórica.

Cada uno de los 118 elementos químicos, se caracteriza por disponer de un número fijo de protones Z, pero sus isótopos disponen de número variable de neutrones N. Estas partículas neutras, con función de blindaje electrostático, son necesarias para la reducción del campo repulsivo que se genera entre cargas del mismo signo (protones) logrando mantener la estabilidad nuclear, para algunos.

La Figura 1, se refiere a la sección inicial de la tabla de los radioisótopos con los primeros siete elementos; estos son ordenados utilizando dos parámetros: la letra Z (número de protones) se refiere al elemento químico, por ejemplo, Z=4 identifica el berilio. Con el aumento de los protones los correspondientes núclidos estan ubicados en los recuadros horizontales. La letra N número de neutrones, indica los isótopos ordenados en columna del elemento seleccionado, para el ejemplo del litio se reportan cinco isótopos de las cuales dos son estables, ^{6}Li y ^{7}Li, con tres y cuatro neutrones respectivamente.

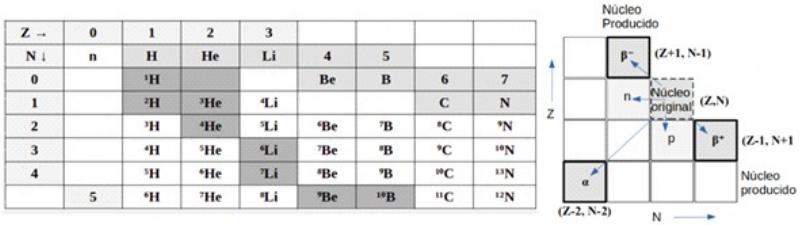
Otros ejemplos son:

(i) El boro, letra B en el diagrama bidimensional (Figura 1), se ubica inscrita en el cuadriculado de la columna Z=5; uno de sus isótopos, el

^{10}B se encuentra en un recuadro obscuro indicando que es un isótopo estable. Los otros isótopos inestables del boro, se ubican en recuadros blancos verticalmente.

(ii) El tritio (^{3}H) y el nitrógeno con un número de neutrones N_H=2 y N_N=5 son radioisótopos.

Los isótopos estables con Z>5 no son indicados por ser una tabla parcial.



Z →	0	1	2	3				
N ↓	n	H	He	Li	4	5		
0		^{1}H			Be	B	6	7
1		^{2}H	^{3}He	^{4}Li			C	N
2		^{3}H	^{4}He	^{5}Li	^{6}Be	^{7}B	^{8}C	^{9}N
3		^{4}H	^{5}He	^{6}Li	^{7}Be	^{8}B	^{9}C	^{10}N
4		^{5}H	^{6}He	^{7}Li	^{8}Be	^{9}B	^{10}C	^{11}N
	5	^{6}H	^{7}He	^{8}Li	^{9}Be	^{10}B	^{11}C	^{12}N

Figura 1. Diagrama bidimensional (Z, N) parcial de núclidos livianos clasificado en función del número de neutrones (símbolo N en la ordenada) y el número de protones (símbolo Z en la abscisa). En el recuadro se reporta el símbolo químico de los elementos y sus masas atómicas conocidas (Z+N). Para el hidrógeno H, se reportan seis isótopos, los primeros dos son estables indicado por el fondo más oscuro, los otros son inestables. Para determinar cuál es el núcleo producido por decaimiento (α, β, o pérdida de un nucleón, n ó p) se utiliza el cuadriculado a la derecha. Con las flechas se indica una posible transición del núcleo original. Las letras griegas (β^+, β^- y α) se refieren al decaimiento radiactivo natural o inducido mientras que las letras latinas, N, Z indican las variaciones del número de nucleones. Tomado de: Karlsruhe Nuclide Chart; https://joint-research-centre.ec.europa.eu.

Algunas ediciones de tablas tienen colores para indicar el tipo de radiación emitida, (por ejemplo, verde o rojo para beta emisor y amarillo para un gamma emisor). Los cuadriculados que se refieren a diferentes elementos pero con un mismo número de masa A, constituyen el grupo de los núclidos isobaros: ^{6}H; ^{6}He; ^{6}Li; ^{6}Be. En la posición horizontal (Figura 1) se ubican lo núclidos que se caracterizan por disponer de un mismo número de neutrones, y forman el grupo de los núclidos llamados isótonos.

En algunas de las tablas de radionúclidos se indica también el tiempo promedio (vida media) τ, y su valor inverso correspondiente a la constante de desintegración (λ); el periodo de semidesintegración es el $t_{½}$.

Las tablas radiactivas son útiles en diferentes aplicaciones. Por ejemplo, para determinar el núclido final al cual decae como consecuencia de una

reacción nuclear; a este propósito (para la predicción de posibles productos) es conveniente utilizar el diagrama cuadriculado de la Figura 2, en combinación por ejemplo, con la tabla isotópica (op.cit).

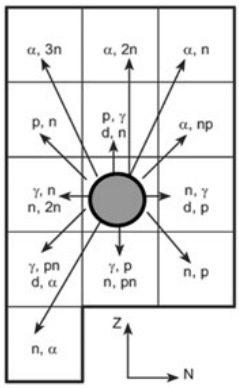


Figura 2. Diagrama bidimensional para identificar el núclido resultante y productos de una reacción nuclear. En el cuadrado con el circulo central se posiciona el isótopo blanco sobre la cual incide un haz (indicado por la primera letra de la reacción). Sea por ejemplo la reacción (n, c) del recuadro a la derecha del círculo central, el isótopo seleccionado; en este caso, el núclido excitado respecto al original, incorporó un neutrón y como consecuencia se produjo la emisión de un fotón gamma. Se pudo haber obtenido este mismo núclido con una reacción diferente utilizando un haz de deuterios con la consecuente emisión de un protón, (n, p). El diagrama es útil por ejemplo en aplicaciones de radioterapia o aplicaciones en analítica.

Los productos de las reacciones nucleares, inducen modificación en la materia por medio de la ionización. Por ejemplo, la alteración de la estructura y desplazamiento de los átomos. Este mecanismo a veces induce un efecto bio negativo en los procesos observables en el ambiente.

Con el objeto de evitar efectos negativos por la exposición a las radiaciones, es necesario resaltar la presencia de peligro con una señalización adecuada principalmente en los lugares donde se manipulan o se generan materiales radiactivos.

Algunos ejemplos de señales de advertencia de peligro se muestran en la Figura 3. La importancia de llamar la atención sobre la presencia de materiales radiactivos se debe a que la flora y la fauna, así también como el cuerpo humano, son propensos a incorporarlos. En la Tabla 1, reportamos algunos elementos radiactivos incorporados en los alimentos y durante la respiración; los valores indicados se refieren a la actividad del radioisótopo seleccionado y su ingesta diaria estimada.

Figura 3. Tipología de los símbolos de advertencia utilizados con frecuencia para llamar la atención de los trabajadores y al público en general, sobre la presencia de material radiactivo en la zona seleccionada o zona controlada. En una de las indicadas, como ejemplo, se reportan también las dimensiones de la señalización; el radio R es un número seleccionado por el usuario, por ejemplo, para una señal de cartelera el valor de R podría ser de 10 cm así que el tamaño del trébol tendría un marco circular visible a una distancia de algunos metros de la fuente. El marco puede ser de diferente tamaño y para indicar fuentes intensas como los generadores de rayos-X o color negro cuando las fuentes son relativamente de baja actividad por ejemplo las fuentes utilizadas en alarmas de humo o para la calibración de equipos. https://remm.hhs.gov/radsign.htm; COVENIN, 2003.

Tabla 1. Algunos elementos radiactivos incorporados en los alimentos: la primera columna indica el tipo de radioisótopo, le sigue, la cantidad medible en el cuerpo humano en micro gramos, la actividad en unidades de Becquerel, Bq y la ingestas diaria en micro gramos.

Radionucleido natural	Cantidad en el cuerpo humano mg	Actividad Bq	Ingesta diaria mg
U-nat	~90	1,10	1,9
Torio-232	~30	0,11	3,0
^{40}K	17×10^{3}	$4,4 \times 10^{3}$	$0,39 \times 10^{3}$
^{226}Ra	31×10^{-6}	1.10	$2,3 \times 10^{-6}$
Carbono - 14	22×10^{-3}	$3,7 \times 10^{3}$	$1,8 \times 10^{-3}$
Tricio (^{3}H)	$0,06 \times 10^{-6}$	23,0	$3,0 \times 10^{-9}$
Polonio-214 y 218	$0,2 \times 10^{-6}$	37,0	$\sim 0,6 \times 10^{-9}$

Nota: mencionamos que en el sistema internacional 1Bq se define como una desintegración por segundo. Fuente: UNSCEAR, 2000. http://hps.org/publicinformation/ate/faqs/faqradbods.html.

En la Tabla 2, indicamos los valores de las concentraciones especificas en unidades de $Bq \cdot kg^{-1}$ y $pCi \cdot kg^{-1}$ de los radioisótopos potasio-40 y radio-226, elementos que se consigue en algunos productos de la dieta alimenticia.

Tabla 2. Elementos radiactivos con sus valores de concentraciones especificas contenidos en productos alimenticios en $Bq \cdot kg^{-1}$ de los radioisótopos potasio-40 y radio-226.

Componentes de la dieta alimenticia	Radioisótopo del elemento del potasio ^{40}K		Radioisótopo del radio ^{226}Ra (grupo del calcio)	
	*$pCi \cdot kg^{-1}$	= $Bq \cdot kg^{-1}$	$pCi \cdot kg^{-1}$	= $Bq \cdot kg^{-1}$
Banana	3,520	130,2	1,0	0,037
Nueces de Brasil	5,600	207,2	1000 – 7000	37 – 259
Zanahoria	3,400	125,8	0,6 – 2,0	0,022 – 0,074
Papas blancas	3,400	125,8	1 – 2,5	0,037 – 0,093
Cerveza	390	14,4	- - -	- - -
Carne roja comestible	3000	111,0	0,5	0,0185
Frijol de lima crudo	4,640	171,7	2 – 5	0,074 – 0,185
Agua de fuentes naturales	- - -	- - -	0 – 0,17	0 – 6,29

* Se ha introducido las unidades en $pCi \cdot kg^{-1}$ y $Bq \cdot kg^{-1}$ por conveniencia.

4. Composición isotópica de la materia. Elementos y oligoelementos del cuerpo humano

En la tabla periódica, de todos los elementos, solamente una parte son de mayor importancia para la vida; forman este grupo también los oligoelementos, necesarios en algunos procesos bioquímicos. Es decir la mayoría de los elementos químicos conocidos parece tener poca participación en la generación de la vida.

Sin embargo, el ambiente humano cuenta con un número elevado de químicos que participan activamente en la dinámica del planeta. El número de compuestos que se pueden formar o producir por síntesis, es una combinación de los 118 clasificados. El *Chemical Abstracts Service* (EE.UU) publica una lista de 350 mil compuestos (moléculas) disponibles en el mercado.

La organización de protección del ambiente, la EPA (EE.UU) clasifica más de 85.000 moléculas en la sección: *Control de Sustancias Tóxicas* de venta libre en el comercio. Es importante resaltar que, hasta febrero de 2021, el número de sustancias (orgánicas e inorgánicas) disponible públicamente, fue de 177 millones, de las cuales una tercera parte son biopolímeros de secuencia definida.

Se estima que en el hogar y la industria utilizamos 98 mil productos; un número elevado de los cuales, son incorporados en los procesos bioquímicos, aunque no con funciones vitales.

Los elementos presentes en el cuerpo humano se pueden clasificar en tres grupos principales:

(i) los mayoritarios, relativos al oxígeno, carbono, nitrógeno, hidrógeno, fósforo y calcio; forman el 99% de los seres vivos,

(ii) los minoritarios, es el grupo que incluye: sodio, cloro, potasio, azufre y magnesio y los oligoelementos. Estos últimos están presentes en minerales indispensables para el funcionamiento celular; los más importantes son hierro, yodo, flúor, cobalto, cromo, selenio, zinc, cobre y manganeso. Algunos otros forman parte de la estructura celular, en cantidades mínimas, como el boro

(iii) los derivados de la contaminación ambiental: metales pesados (plomo, mercurio), contaminantes biológicos, (bacterias, virus), sustancias químicas, (ftalatos y bisfenol A) micro-plásticos. Por provenir de átomos de las cuales algunos isótopos son radiactivos, el cuerpo humano, al incorporarlos, se expone a los efectos de la radiotoxicidad mencionada.

Los elementos mayoritarios más los minoritarios forman un grupo restringido en biología, corresponden a 25% de los reportados en la tabla periódica, (Figura 4).

Las combinaciones posibles entre los átomos se fundamentan en las leyes de la química a saber: conservación de la masa (Lavoisier), la ley de proporciones definidas (Proust) y la ley de proporciones múltiples (Dalton). Las sustancias se dividen en dos grupos a saber: compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos. Las sustancias se mantienen en un estado estable por medio de una estructura química en la cual el enlace entre átomos se debe a un intercambio de electrones o pares de electrones. Ante la falta de las condiciones necesarias, evidentemente entra un mecanismo que modifica la materia, mencionamos las reacciones químicas y estados termodinámicos.

Considerando el número de isótopos (4000) se observa que cada elemento químico dispone en promedio, más de 30 isótopos/radioisótopos, de modo que el número de combinaciones posible para formar moléculas con los 118 elementos de la tabla periódica es grande (> de 177 millones).

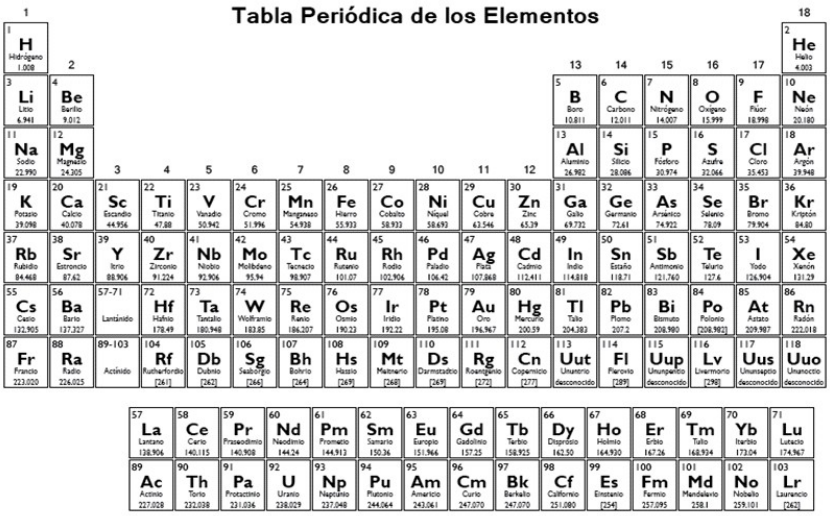


Figura 4. La tabla periódica. Contiene todos los elementos químicos hasta ahora clasificados por su número atómico; las moléculas se constituyen de la combinación de los reportados y sus isótopos estables o radiactivos. https://www.udt.cl/la-tabla-periodica-de-los-elementos-cumple-150-anos/; https://sciencenotes.org/imprimible-tabla-periodica-de-los-elementos-blanco-y-negro/

Si consideramos como ejemplo el cuerpo humano, con 25 elementos estables y con 30 radiactivos, en teoría alrededor de 750 núclidos podrían forman parte de la estructura biomolecular.

Sin embargo, por las características físicas de los radionúclidos (vida media), el número se reduce principalmente a los isótopos estables y algunos radionúclidos de las familias radiactivas naturales, cosmogénicos y los derivados de las actividades humanas, llamados tecnogénicos, con vida media relativamente larga.

Además de los reportados en la Tabla 1, se enumeran otros radioisótopos que el cuerpo humano es propenso a incorporar y mantener con una tasa de acumulación constante (por ejemplo el ^{14}C).

En la siguiente sección se presentan algunas características atómicas y nucleares de los elementos Mendelevianos.

Estructura del átomo y procesos de transformaciones nucleares

La visión atomística del Universo se debe a Rude Boscovich (teoría atómica), mientras que su posible estructura fue propuesta en 1903, por H.

Nagaoka; el modelo del átomo se basa en un núcleo central en la cual se concentra prácticamente toda la masa y es rodeado por un anillo de electrones. Pocos años después en 1909, E. Rutherford, utilizando los resultados de una serie de experimentos, en los cuales se irradiaba un blanco de oro con iones de helio (partículas alfa), aportó mejoras al modelo. Los resultados de estos y otros experimentos, lo condujeron a formular algunos detalles, esencialmente confirmando el modelo propuesto por Nagaoka y la teoría atomística de Boskovich.

El modelo más reciente del átomo indica que dispone de una estructura nuclear mas compleja basada en los cuarks. Estas son partículas elementales (u $\uparrow$ indicado con una flecha hacia arriba y d $\downarrow$). Una combinación de tres cuarks genera los nucleones que forman el núcleo atómico de Z protones y N neutrones. En la mayoría de los casos, es posible, una integración estable de nucleones, a la cual hicimos referencia antes, solamente con el establecimiento de un equilibrio entre el número Z y N. En caso contrario se libera la energía en exceso.

Entre la masa A y el número de carga eléctrica Z existe la siguiente relación: $Z = 1{,}98\,A + 0{,}0155\,A^{2/3}$ que proporciona con una buena aproximación la condición de estabilidad nuclear.

Una desviación de la expresión anteriormente mencionada, fundamenta la teoría de la existencia de los radioisótopos reforzando el concepto de decaimiento radiactivo de los núclidos inestables.

En física y química se utiliza como unidad de masa atómica unificada el Dalton (símbolos: Da; uma, u); la unidad de masa (no perteneciente al SI) es igual a 1/12 de la masa del átomo del isótopo 12 de carbono y es equivalente a 931,5 MeV/c^2 (1eV=1,6 x 10^{-19} Joule).

La masa de cualquier elemento o su isótopo es menor que la suma de las masas individuales de las partículas constituyentes. La diferencia, indicada como "*defecto de masa, Δm*" representa la energía de enlace entre los nucleones del núcleo y se determina por medio de la conocida ecuación, $E=\Delta\, mc^2$.

Los experimentos con átomos radiactivos indicaron que el núcleo pierde energía por emisión de tres tipos de radiación: alfa (α), beta (β) y gamma (γ), en raras ocasiones también neutrones (n). La producción de radiaciones nucleares o ionizantes es la consecuencia directa de una reorganización de nucleones, como mencionamos antes.

Las consecuencias de la emisión de radiaciones, junto con algunos detalles, se mencionan en la sección que sigue.

5. Ambiente y radiaciones

Los elementos livianos y sus isótopos se han formado por fusión de protones y neutrones; el mecanismo de fusión nuclear originó también los radioisótopos naturales.

El último elemento estable conocido es el plomo, de número atómico Z=82; todos los elementos químicos con valores de Z > 82 son radiactivos. Estos (junto con ^{40}K de menor Z), clasificados como *primordiales* (formados en el Universo durante la fase de la aglomeración de átomos) son los radionúclidos de la serie del torio, radio o uranio y serie del actinio. Estas series son conocidas como "familias radiactivas primordiales" y se encuentran con diferentes concentraciones en la corteza de nuestro planeta.

Se han identificado cuatro familias radiactivas representadas por las series de desintegración naturales, a saber:

- serie 4n: Torio-232. Es cuatro veces más abundante que el uranio
- serie 4n+1: Neptunio-237. Ha desaparecido totalmente por tener vida media, relativa a la tierra, de menor valor
- serie 4n+2: Uranio-238. Es el radioisótopo más abundante entre las familias radiactivas.
- serie 4n+3: Uranio-235. Con una abundancia isotópica del 0,7%.

El número de masa de cada isótopo de estas cadenas se representa con los índices 4n, 4n+1, …. en la cual el número de masa durante el decaimiento disminuye en 4 unidades con un resto que caracteriza la familia de decaimiento. Al dividir el valor de A de cualquier radioisótopo de una cadena por 4, se obtiene un resto (0, 1, 2 o 3) que caracteriza la serie.

Por ejemplo, el actinio-224, se caracteriza con la masa A = 224, el valor de n es obtenido por A/4 = 56, aplicando la relación 4n+i, la serie se determina por 4 x 56 + i = 224, este resultado tiene validez para i = 0. El radioisótopo es de la serie 4n (torio-232).

Otro ejemplo es el caso del ^{226}Ra, la masa es A=226, para saber a cuál serie pertenece aplicamos la ecuación 4n + i = 226 para n =56 el valor de **i** es dos; por lo tanto, el radio-226 pertenece a la serie 4n + 2 que corresponde al ^{238}U.

Otros radioisótopos que no pertenecen a las familias radiactivas naturales pero que contribuyen a las radiaciones de fondo, son listados (Tabla 3).

Tabla 3. Materiales radiactivos naturales no incluidos en las series radiactivas. Se indica el radioisótopo primordial en una columna seguido por el valor de semidesintegración $\tau_{1/2}$ en años.

Isótopo	$\tau_{1/2}$ [años]	Isótopo	$\tau_{1/2}$ [años]	Isótopo	$\tau_{1/2}$ [años]
^{40}K	$1{,}28\cdot10^{9}$	^{123}Te	$1{,}24\text{x}10^{13}$	^{152}Gd	$1{,}24\text{x}10^{13}$
^{50}V	$1{,}4\ \text{x}10^{17}$	^{138}La	$1{,}05\text{x}10^{11}$	^{174}Hf	$1{,}05\text{x}10^{11}$
^{87}Rb	$4{,}75\text{x}10^{10}$	^{142}Ce	$>5\cdot10^{16}$	^{176}Lu	$>5\cdot10^{16}$
^{113}Cd	$9\cdot10^{15}$	^{144}Nd	$2{,}29\text{x}10^{15}$	^{187}Re	$2{,}29\text{x}10^{15}$
^{115}In	$6\cdot10^{14}$	^{147}Sm	$1{,}06\text{x}10^{11}$	^{190}Pt	$1{,}06\text{xx}0^{11}$

Los elementos de las familias radiactivas y los indicados en la tabla anterior, estan presentes con diferentes cantidades en el ambiente animado e inanimado. Los valores de la concentración dependen de la composición geológica, actividades humanas y la dinámica que moldea y modifica la superficie terrestre incluyendo fenómenos que ocurren en el tiempo por la acción de procesos bien sea geológicos, químicos o biológicos. En consecuencia, se han identificados zonas con concentraciones con anomalías en el suelo; en algunos casos los niveles de radiación pueden ser ordenes de magnitud mayor del valor promedio terrestre de 40 $Bq\cdot kg^{-1}$.

Para la identificación de estas zonas particulares, se utilizan equipos que miden la radiación ionizante emitida espontáneamente por los radionúclidos, por ejemplo rayos gamma (ondas EM) con energía hasta algunos MeV. La unidad eV es histórica (no es parte del SI), se define como la energía cinética adquirida por un electrón libre que se mueve bajo un potencial eléctrico de un voltio.

Entre los primeros detectores enumeramos además de la placa fotográfica mencionada, la pantalla fluorescente ZnS(Ag), electroscopios con laminitas de oro, tubos de descarga (Geiger - Müller) y cámaras de ionización; algunos de estos equipos de medición junto con equipos de nueva generación, forman parte de los programas de radioprotección.

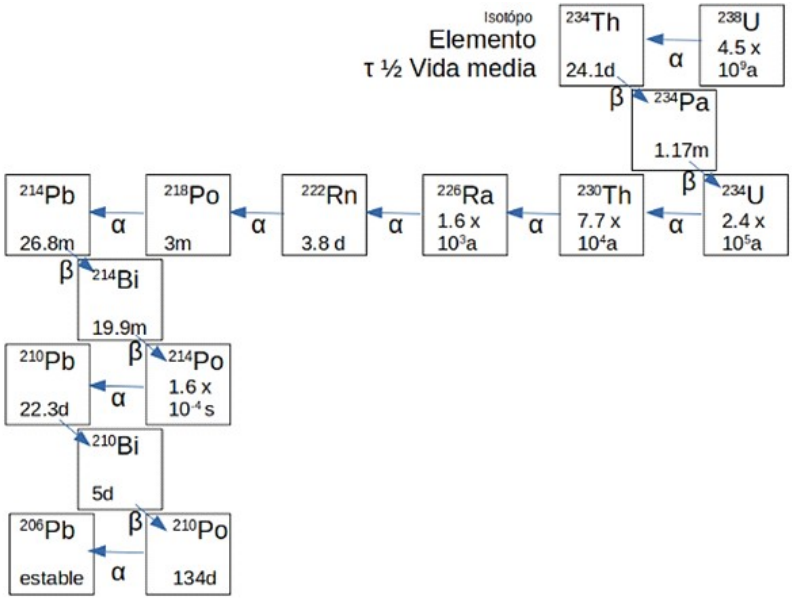


Figura 7. Esquema de la cadena de decaimiento de la serie 4n+2, inicia con el elemento uranio (isótopo 238) indicado en el recuadro que contiene el elemento, su símbolo químico y $\tau_{1/2}$ en segundos (s), minutos (m), días (d) y años (a); la serie de transiciones nucleares se concluye con el isótopo estable del plomo, (el último elemento estable de la tabla periódica). http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/radser.html.

En la serie, cada radionúclido permanece por un tiempo aleatorio en un estado excitado; el intervalo de tiempo necesario para que decaiga el 50% de los radionúclidos es indicado como el tiempo característico o tiempo de semi desintegración; en la cadena anterior los valores son indicados con la letra griega tau ($\tau_{1/2}$) en segundos (s), minutos (m), días (d) y años (a).

Cada familia primordial (Th, U_{nat}, Np) se caracteriza por una cadena de forma similar publicado con las tablas de los radioisótopos; recomendamos la excelente edición de la Karlsruhe Nuclide Chart (op., cit.).

El tiempo de semidesintegración ($\tau_{1/2}$) ó vida media de un radionucleido (τ) es un parámetro característico de la función de desintegración radiactiva; el inverso de (τ) expresa la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo se desintegre y es indicado con λ, "lambda".

Indicando con N_0 el número inicial de los radioisótopos, después de un tiempo t, los núclidos restantes son N y cumplen con la expresión siguiente:

$$N = N_0 \ e^{-\lambda t} \qquad 1$$

las siguientes relaciones aplican para τ:

$$\lambda \bullet \tau = 1 \qquad 2$$

y para $\tau_{1/2}$:

$$\lambda \bullet \tau_{½} = \ln 2 \qquad 3$$

Un ejemplo de la función de desintegración radiactiva se presenta gráficamente en la Figura 8, para el carbono-14, en la cual se evidencia el tiempo característico de semidesintegración.

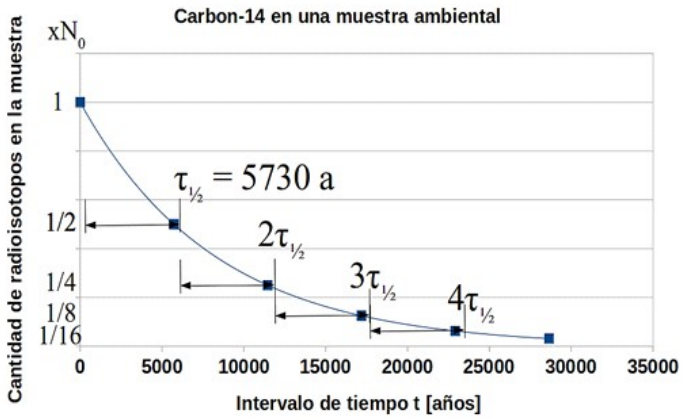


Figura 8. Curva de decaimiento temporal del radioisótopo beta emisor del ^{14}C. Se ilustran los lapsos de tiempo necesarios para que el número inicial de átomos se reduzca a la mitad periódicamente con intervalos de tiempo de semidesintegración física ($\Delta\tau_{½,f}$).

. Los organismos vivos, como la vegetación, contienen una concentración de ^{14}C, aproximadamente de una parte por billón; un valor relativamente constante en los tejidos de la flora y posiblemente en la fauna.

Asumiendo una determinada cantidad de carbono-14 inicialmente disponible en una muestra, se puede establecer por medio del grafico anterior, el intervalo de tiempo transcurrido es decir la edad aproximada por ejemplo de una muestra interés histórico-arqueológico de carbón vegetal, madera, semillas, huesos, entre otras.

En relación queremos mencionar anticipadamente una curiosidad: el petróleo natural esencialmente no contiene carbono-14. Algunos yacimientos de arenisca contienen petróleo pesado entre 150 y 1400 metros de profundi-

dad, tienen millones de años, y el radioisótopo mencionado se ha desintegrado en la práctica, completamente. En relación con este punto particular, mencionamos por curiosidad que algunos expertos se han referido a las reservas nacionales como el combustible fósil que contamina con menos radiactividad el ambiente.

Además del tiempo de semidesintegración física (f), $\tau_{½,f}$ se utiliza también el tiempo de semidesintegración biológica (b) $\tau_{½,b}$ en referencia al tiempo que tardan los elementos radiactivos que ingresan a un organismo (ingestión) en ser reducidos a la mitad.

Para las sustancias radiactivas dentro de un ecosistema, el tiempo requerido de reducirse a la mitad por cambios climáticos, sísmicos, deslaves, entre otros, se define con el tiempo de semidesintegración ecológica $\tau_{½,e}$.

Existe una relación que sintetiza los tiempos de semidesintegración en un parámetro llamado de semi desintegración efectiva $\tau_{½,\,efec}$. Para un sistema ambiental conocido se expresa por medio de la expresión:

$$\frac{1}{\tau_{½,efec}} = \frac{1}{\Sigma\ \tau_{½,i}} \qquad 4$$

Por ejemplo, el tiempo de semidesintegración del polonio-210 presente en el cuerpo humano es de $t_f = 138$ días y la biológica es $t_{½,\,b} = 40$ días, con $t_{½,\,e} = 0$ (sin considerar eventos climáticos) de acuerdo a la ecuación [4], es:

$$1 / \tau_{½,\,efec} = 1 / (\tau_{½,\,f} + \tau_{½,\,b}) \qquad 5$$

y sustituyendo los valores numéricos obtenemos:

$$\tau_{½,\,efec} = (\tau_{½,\,f} \cdot \tau_{½,\,b}) / (\tau_{½,\,f} + \tau_{½,\,b}) = 138 * 49/138+40 = 31 \text{ días} \qquad 6$$

Después de cinco tiempos característicos ($5 \cdot \tau_{½,\,efec} = 155$ días), en el cuerpo humano queda una concentración de 1/32 de la cantidad inicial; un valor considerado despreciable en términos de riesgo radiológico para el ambiente.

Los efectos que puedan derivar de estar expuestos por tiempos efectivos es objeto de las secciones sucesivas.

7. Acumulación de Materiales Radiactivos de Origen Natural y Antropogénico

Isótopos radiactivos naturales en la corteza terrestre experimentan migración, y se supone que ocurre lo mismo en el ambiente de nuestro entorno. El grupo de materiales radiactivos de origen natural (NORM por sus siglas en inglés), se refieren principalmente a las familias primordiales, luego están otros relacionados con las actividades humanas, los cosmogénicos y eventos naturales.

Las concentraciones de los radioelementos en nuestro entorno varían en mayor medida por las actividades antropogénicas y en menor grado como consecuencia de las modificaciones ambientales introducidas por fenómenos naturales. Las explotaciones y minerías han modificado más significativamente la superficie terrestre en comparación con los eventos derivados de la dinámica atmosférica (por ejemplo, el fenómeno *El Niño*) o geológicos (deslaves, erupciones volcánicas, entre otros).

Para referirnos a las variaciones de las concentraciones naturales NORM debido a las modificaciones ambientales relacionadas con desastres naturales o eventos imprevistos, se puede utilizar el acrónimo NOReM; la letra "e" indica eventos; es decir modificaciones singulares en el planeta, por ejemplo un Tsunami.

En el caso de una acumulación o modificación de las concentraciones NORM, relacionada con los procesos industriales, se utiliza el acrónimo TENORM (por sus siglas en inglés) para especificar que nos referimos a material radiactivo natural tecnológicamente acumulado.

En Venezuela, existe una cantidad considerable de residuos TENORM relacionadas con actividades diversas a saber, extracción y refinación del petróleo, la minería de fosfato, de coltan y de bauxita incluyendo la industria de fertilizantes. Otras actividades favorecen la contaminación, por ejemplo, la generación de energía utilizando combustible fósil y la explotación en relación con el proyecto en curso del Arco Minero del Orinoco, (Arco Minero, 2022).

La consecuencia de una acumulación de NORM (TENORM) es el aumento en los niveles de contaminación radiactiva. Se ha observado que, del depósito de residuos de procesos industriales, se liberan junto a productos químicos, material radiactivo, afectando y comprometiendo la calidad del suelo. El material tanto tóxico como radiactivo (radiotóxico) se integra en

los componentes bióticos, (las partes vivas) y por lo general en el ecosistema. Esto significa intensificar los procesos radioquímicos en sitios por ejemplo con movimiento de nutrientes esenciales.

Algunos ejemplos:

(i) Una de las mayores actividades industriales en Venezuela, se relaciona con el procesamiento de minerales industriales pesados; los residuos producidos contienen químicos tóxicos y como es de esperarse, también radiotóxicos. En el procesamiento de la bauxita por ejemplo, por el proceso Bayer, se genera alrededor de 1 a 2,5 veces más lodo rojo que de alúmina, (óxido de aluminio). El método de disposición del subproducto de la digestión de minerales de bauxita con soda cáustica, es el lagunaje; por ahora el único método empleado por la industria nacional del aluminio. Esta práctica se basa en la construcción de grandes estanques limitados por una barrera revestida de arcilla; en esta alberca, los residuos del fluido industrial después de la evaporación permanecen expuestos a las condiciones climáticas naturales sin más protección. Es una práctica de riesgo ambiental elevado en cuanto los residuos alcalinos pueden contaminar los cursos de agua locales, provocando un daño ecológico de gran magnitud. A pesar de los riesgos asociados con el método de almacenamiento, (lagunaje), las industrias de aluminio las aplican en todo el mundo. https://en.wikipedia.org/wiki/Ajka_alumina_plant_accident.

(ii) En el pasado, se han planteado preocupaciones ambientales similares en relación el procesamiento industrial de rocas de fosfato. Mencionamos el depósito de fosfatos fosfóricos de Riecito (Estado Falcón, Venezuela), considerado de importancia mundial desde su descubrimiento, (1931). Se explota un tajo abierto donde la flotación era el método de molienda predominante (desde 1956). La roca fosfórica (27% de P_2O_5) se extrae desde un lecho, de hasta 20 m de espesor, y viene transportado por carretera al complejo industrial de PEQUIVEN (distante 90 km) para producir ácido fosfórico.

(iii) Otro caso, se refiere a los fertilizantes. Este producto, con el objeto de mejorar la producción del cultivo, es empleado especialmente donde los suelos son pobres de nutrientes. Una vez manufacturado el fertilizante, se dispersa en la superficie del cultivo junto con otros 17 elementos químicos que se suman a la agrupación de los nutrientes naturales esenciales para las plantas. Con la consecuencia que, también se incorporan radioisótopos NORM en los productos agroindustriales. En Venezuela se consume cantidades importantes de productos lácteos, cereales, atún, frutas, vegetales, carnes,

entre muchos otros más. Como consecuencia los seres vivos ingieren y acumulan NORM con los alimentos. Los intervalos y promedios de los valores de las concentraciones de actividad de radionúclidos en fertilizantes y suelo cubren un rango extenso de valores en el mundo; para referencia reportamos los valores más importantes en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de valores de las concentraciones de NORM en fertilizantes y suelo. DL indica el limite de detección del equipo utilizado; UNSCEAR (2000).

Actividad especifica en fertilizantes [Bq·kg^{-1}]					Actividad especifica en suelo de cultivo [Bq·kg^{-1}]		
Radioisótopo	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U	^{235}U	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U
Intervalo	4-393	23-12324	26-1145	2-53	1-440	40-1800	DL-330
Promedio	87±8	4860±250	220±20	15±1	35	400	35

(iv) Las aplicaciones de las técnicas nucleares en la agricultura incluyen la utilización de radio-elementos como el fósforo-32, cobalto-60, cesio-137 entre otros, que a su vez induce una contaminación del ambiente; en caso de bajas actividades es considerado exigua.

(v) Existen aplicaciones industriales de gran beneficio. Por ejemplo, en las instalaciones del IVIC se ha instalado una planta industrial de esterilización, Pegamma, opera con rayos gamma de energía 1,17 – 1,33MeV (^{60}Co) para la reducción de la contaminación por microorganismos (proceso de radurización) de diferentes productos industriales y para mejorar la calidad de un producto por medio la polimerización inducida (IVIC, 2025).

En relación con los puntos anteriores, hay dos consideraciones que ponderar:

Primero, hay un beneficio tangible en el empleo de material radiactivo. El método basado en las radiaciones ionizantes se emplea para mejorar la producción, la calidad del producto, así como para garantizar la seguridad alimentaria con una gestión eficiente de los recursos naturales; y segundo, en algunos casos es una actividad que se realiza por un tiempo determinado, por ejemplo, en la modificación genética. Es conocida la aplicación de radioisótopos para:

(i) obtener sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) de mejor calidad y con mayor contenido de tanino, y

(ii) combatir plagas y enfermedades.

Ambos son aspectos inevitables por ser un desafío importante en la agri cultura.

(iii) prolongar el tiempo de conservación de los productos alimenticios.

A este propósito, cabe mencionar las actividades nucleares realizadas en el edificio del reactor (IVIC) en el marco de referencia que el beneficio obtenible (esperado) es considerablemente mayor que los riesgos para la salud humana.

Es oportuno mencionar el efecto isotópico en las reacciones químicas y bioquímicas; estas se basan en los electrones de intercambio disponible; en caso de que un mismo elemento químico tenga isótopos estables esto influye relativamente poco en los resultados finales. En oposición, si son radiactivos, es decir los mecanismos de sustitución de un elemento con un isótopo estable por uno de sus radioisótopos o por un radioelemento que se encuentra en el mismo grupo químico, puede tener un impacto significativamente negativo. Por su importancia presentamos el caso del radio, del cual conocemos que además de los radioisótopos indicados existen otros 33 isótopos, todos radiactivos. Este elemento, con comportamiento químico similar al Ca, se acumula en las plantas que absorben Ra y Ba, elementos pertenecientes al grupo II de la tabla periódica.

Es el típico caso de un producto alimentario que se cultiva en un suelo pobre en nutrientes; en caso de que falte, por ejemplo, el calcio, este elemento es reemplazado con el radio, que así se incorpora en el ciclo vital acumulando $^{226,\ 224,\ 228}$Ra ($\tau_{½}$ de 1600 a; 3,6 d y 5,8 a respectivamente). Es posible que estén mezclados con mineral de uranio.

Son todos radioisótopos de impacto radiológico (radiotóxico) con influencia negativa en cuanto alteran el balance neto del depósito *mineral* óseo por intercambiar el Ca por Ra, (ó fósforo por magnesio).

Otro caso de sustitución Ca ⇏ Ra, se observa en la nuez (una semilla) producida por el árbol *Bertholletia excelsa* del Brasil; este producto natural acumula radio con una concentración relativamente elevada. En la semilla referida, se consiguen actividades específicas de 10 $Bq.kg^{-1}$. Un valor significativo si se compara con otros alimentos que por lo general está entre 13 y 186 $mBq{\cdot}kg^{-1}$ (peso húmedo); prácticamente hay una diferencia de dos a tres órdenes de magnitud. https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_radium.

En el suelo existen compuestos químicos con NORM. En depósitos de sulfato de calcio hidratado ($CaSO_4$•n H_2O: yeso) se consigue el compuesto:

$^{226+228}RaSO_4$; U y ^{210}Pb en concentraciones relativamente elevadas, entre 0,1 y 2,2 $kBq \cdot kg^{-1}$.

La utilización del yeso en las diferentes aplicaciones puede generar un riesgo radiológico; principalmente si es un ambiente húmedo, que favorece la liberación de radio. Este elemento radiotóxico se incorpora en el metabolismo humano junto a su producto volátil (gas ^{222}Rn) con sus isótopos, las hijas ($^{214, 218}Po$). El polonio con frecuencia es transportado por partículas de polvo en suspensión y pueden difundir en el ambiente; el proceso de adhesión se produce porque los átomos de polonio tienen carga eléctrica (IAEA, 2017).

Los otros productos finales de la cadena de las familias radiactivas, como los isótopos plomo-210 y polonio-210, por ser insolubles, impactan menos en el ambiente.

Una primera observación es que los fenómenos relacionados con procesos químicos indican que la materia prima empleada en la industria contiene inevitablemente material radiactivo NORM y sus residuos junto con los subproductos permean inexorablemente nuestro hábitat. Un aspecto es resaltado en la Figura 9.

Figura 9. Radioisótopos de la familia primordial junto con los técnicamente enriquecidos, están presentes con diferentes concentraciones en nuestro entorno. Valores particulares caracterizan los materiales que componen construcciones, alimentos, vehículos, cultivos, playas entre otros. La imagen refleja esencialmente nuestro entorno caracterizado por una radiación ionizante de fondo. Está causada, por el gas radón en un 50% y otro tanto se debe a la radiación cósmica, terrestre. Fuente: European Commission, 2025.

Anteriormente hicimos referencia al uranio; este radionúclido presente en el ambiente terrestre y acuático se transfiere a una variedad de alimentos; por ejemplo, se consigue en mariscos con las concentraciones que son más altas en comparación con las verduras. La tasa de ingesta media per cápita de uranio acumulado en el cuerpo humano se ubica en un rango entre 11 y 60 $mBq \cdot d^{-1}$.

La variación en los valores se debe también a la posible presencia de materiales TENORM; en algunas zonas contaminadas, las tasas pueden alcanzar valores considerados de riesgo para la salud humana.

La Tabla 5, indica la presencia de los radioisótopos TENORM más comunes que podrían estar presentes en nuestro entorno cotidiano. Los círculos numerados identifican las zonas de la imagen anterior en las cuales los radioisótopos, indicados, se acumulan con preferencia.

Tabla 5. Radioisótopos naturales en referencia a las posiciones (círculos numerados) indicadas en la Figura 9. Casi todos son núclidos de la familias primordiales y potasio-40 sin embargo en el punto 9 se reporta el berilio-9 un radioelemento raramente reportado en los estudios de la radiactividad ambiental; este es un núclido que se forma en la atmósfera y es presente en concentraciones medibles en zonas de mayor altura, por encima de los mil metros sobre el nivel del mar.

① $^{226+228}Ra$, ^{222}Rn	④ $^{226+228}Ra$, ^{40}K, ^{206}Pb, ^{210}Po	⑦ Unat, ^{226}Ra, ^{22}Rn
② Unat, ^{232}Th	⑤ ^{40}K, Unat, Th	⑧ Unat, ^{232}Th
③ ^{222}Rn, $^{218,214}Po$	⑥ $^{226+228}Ra$, ^{232}Th	⑨ ^{9}Be

Otro aspecto para considerar es la generación de calor. Cabe notar, que el fenómeno de decaimiento de los radionúclidos observables en las rocas de la corteza terrestre, generan una parte considerable de la energía calórica y, por cierto, garantiza la supervivencia en la superficie del planeta.

Entre los TENORM mencionamos también la producción de ^{14}C relacionados con los reactores nucleares moderados por grafito. Casi nunca se menciona ^{14}C, pero se produce por neutrones que son absorbidos en isótopos estables de carbono, nitrógeno y oxígeno. Estos elementos químicos están presentes en el grafito, pero se consiguen también en materiales de revestimiento, el refrigerante y otros materiales de la estructura del reactor. Por lo general reacciones de conversión en carbono-14 son: $^{17}O(n,\alpha)^{14}C$, $^{14}N(n,p)^{14}C$ y $^{13}C(n,\gamma)^{14}C$, y la más significativa es $^{17}O(n,\alpha)^{14}C$ que se lleva

a cabo en las barras de combustible con una tasa de producción por año en un reactor tipo GEN-II de agua a presión o en ebullición, entre (0,5 - 1,9) x 10^{12} Bq.GWe^{-1} por año (Davis, 1977).

Existen otros casos que se originan por medio de reacciones nucleares de fisión y fusión; su impacto en el ambiente, a veces, es considerable, como fue demostrado en el accidente de Chernóbil.

Esto, no es el caso cuando los materiales radiactivos se ubican en almacenes controlados, en donde se utilizan blindajes radiológicos, con la función específica de reducir la intensidad de la radiación alrededor de la fuente de radiación a valores dentro de la norma.

8. Radionúclidos Cosmogénicos

Existen radiaciones nucleares de alta energía y la mayor parte se originan fuera de nuestro sistema solar y constituyen los llamados rayos cósmicos. Las primeras observaciones del 1906, sobre radiaciones de origen cósmico, se deben a Domingo Pacini; más tarde en 1911 Victor Hess confirma la hipótesis de la radiación cósmica por medio de una serie de mediciones realizadas en la troposfera. Los resultados experimentales indican que son protones en ~87% de los casos, partículas alfa en ~12% de los casos y el 1% son núcleos completamente ionizados de bajo número atómico, a saber: Li, Be, B, C, O y F.

Los radionúcleidos junto con las radiaciones ionizantes se originan durante las reacciones nucleares en el Sol, en el espacio interestelar de la Vía Láctea y en otras miles de galaxias del Universo. Cuando penetran en la estratosfera de la Tierra, el material cósmico interactúa con el gas en la atmósfera generando una "lluvia" de partículas, incluyendo muones (similar al electrón, pero con mayor masa clasificado en grupo de las partículas elementales: leptones).

Las radiaciones y las partículas cósmicas son de alta energía o relativistas con valores de GeV; pero se ha observado materia cósmica con energía cinética mayor, (10^{18} eV), realizados por medio de detectores nucleares.

Para el estudio de las radiaciones cósmicas y sus efectos en los astronautas, se han expuestos detectores pasivos por ejemplo: plásticos de carbonato de polialildiglicol, (PADC), en la estación espacial internacional (ISS). A título de información, se reportan algunas imágenes utilizadas en dosimetría de las radiaciones ionizantes, (ver, Figura 10).

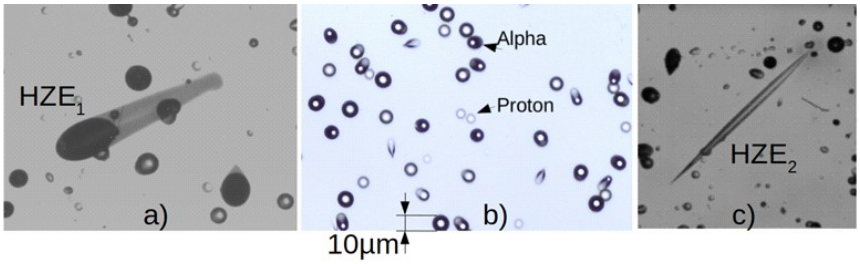


Figura 10. Imágenes de trazas nucleares inducidas por radiaciones cósmicas energéticas y de alto número de carga HZE (por sus siglas en inglés). a) indica una partícula pesada HZE_1 (núcleo del grupo del hierro) de origen cósmica absorbida en alta energía, se observa una traza correspondiente al volumen de átomos ionizados y desplazados; utilizando la técnica de tratamientos químicos se visualiza bajo microscopio óptico la extensión del daño; b**)** imagen de las trazas correspondientes a la absorción de protones y núcleos de helio de origen solar y cosmogénicos; y c) HZE_2 traza correspondiente al daño inducido por un núcleo liviano relativista, con una longitud de algunos milímetros. Fuente: Pálfalvi et al (2015).

En los detectores mencionados se producen también reacciones complejas por ejemplo $^{12}C(n,n'3\alpha)$, un núcleo de carbono del detector, compuesto por $(C_{12}H_{18}O_7)_n$, absorbe un neutrón de alta energía, como consecuencia se rompen los enlaces entre nucleones y se producen tres núcleos de helio ionizado. Este fenómeno, es visualizado bajo un microscopio óptico, con trazas nucleares en CR-39™ después de ser tratados químicamente, ilustrado en la Figura 11.

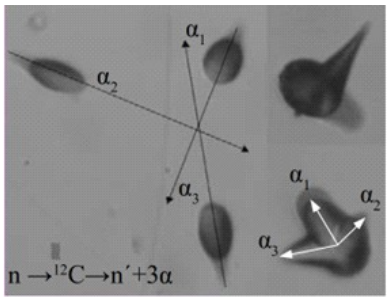


Figura 11. Ilustración de la detección de una fragmentación ternaria. La intersección de las tres directrices indica el punto original de blanco y las manchas oscuras elípticas los puntos de detección de los fragmentos de la reacción. Un proceso nuclear comparativamente raro en el que un neutrón cósmico induce una fisión nuclear ternaria con la producción tres partículas alfas; un fenómeno que supone un modelo del núcleo en la cual existe la presencia de partículas alfas (α) preformadas. Fuente: Pálfalvi et al. (2015)

La otra reacción inducida por neutrones cosmogénicos observada con trazas nucleares es la fisión del oxígeno; esta por excitación se divide en cuatro núcleos más pequeños, (fisión cuaternaria del núcleo del oxígeno-16), según el esquema: $^{16}O(n, n'+4\alpha)$.

Los resultados observados en PADC, son indicativos de los posibles eventos producidos por los rayos cósmicos al penetrar la atmósfera terrestre; efectivamente se producen radionúclidos y diferentes cascadas de electrones, rayos gamma, neutrones, mesones entre otros y forman la radiación cósmica secundaria de origen atmosférico. La frecuencia de las cascadas se intensifica durante los periodos de mayor actividad solar mientras que las reacciones nucleares con producción de radionúclidos cosmogénicos se produce con una tasa casi constante en el tiempo.

Los elementos químicos, N, O con sus isótopos: $^{14,15}N_2$ y $^{16,17,18}O_2$ constituyen la mayor parte los gases de la estratosfera y es frecuente que por captura de partículas de origen cósmico, sean activados. El evento más frecuente y de mayor impacto ambiental es la reacción $^{14}N(n,p)^{14}C$, ilustrado antes. El esquema de la reacción correspondiente se reporta en la Figura 12, en la cual el isótopo ^{14}N, experimenta, por absorción de un neutrón, la transición de un estado excitado a otro estado, expulsando un protón formando el nuevo núcleo, ^{14}C. Algunos ejemplos interesantes, adicionales, se reportan en la Figura 13.

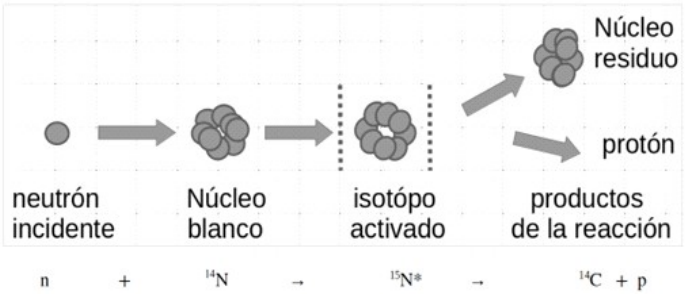


Figura 12. Esquema ilustrativo de las etapas del mecanismo de reacción por medio de la activación nuclear inducida por un neutrón cosmogénico; es una interacción que se lleva a cabo con el núcleo estable del nitrógeno atmosférico. (^{14}N) para formar el núcleo compuesto de transición ($^{15}N^*$) hacia un estado que da origen al carbono-14 y producto de la reacción (protón); https://radioactivity.eu.com/articles/phenomenon/radiocarbon.

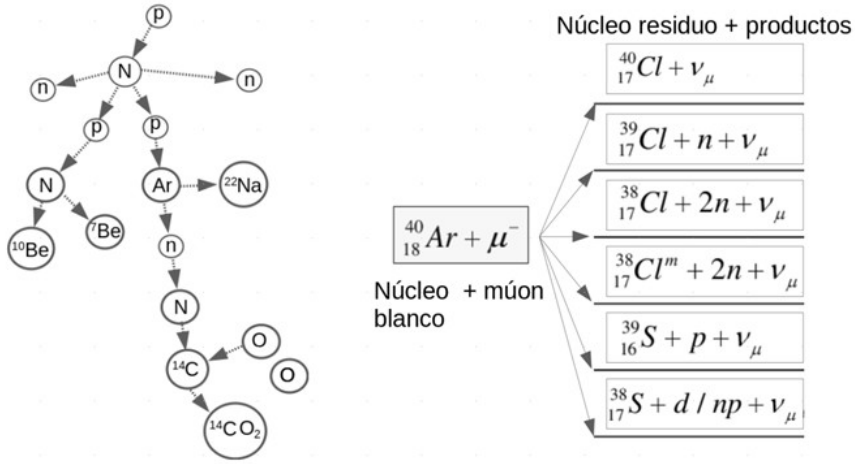


Figura 13. Conjunto de la cadena de reacciones posibles para la formación de radioisótopos cosmogénicos. (a) El núcleo del nitrógeno N atmosférico, absorbe un protón (p) experimentando un fenómeno llamado de espalación caracterizado por la emisión de cuatro nucleones (n). Estos rayos secundarios (n y p), a su vez interactúan con otro núcleo de nitrógeno generando isótopos de berilio o alternativamente son absorbidos por el núcleo del argón con la posibilidad de dar origen, por ejemplo a la formación del sodio-22. Con la transformación N $\rightarrow$ C se genera el ^{14}C que por la presencia del oxígeno se genera la molécula $^{14}CO_2$. Otras reacciones son posibles y a título de ilustración reportamos en (b) algunos inducidos por muones en núcleos del argón-40. Fuente: Hernández-Morquecho et al., (2025).

Las reacciones reportadas en la Figura 13 (imagen a la derecha), son relevantes en aplicaciones y métodos de geocronología; también son utilizadas en la determinación de edades anteriormente mencionadas, en estudios relacionados con tasas de erosión de superficies geológicas.

Es interesante notar que con la producción del carbono-14 en la estratosfera, se forma la molécula $^{14}CO_2$ un gas radiactivo. Por las condiciones atmosféricas existentes, la molécula experimenta difusión y con el tiempo se integra a los ciclos biológicos del ecosistema terrestre. Un aspecto particular es que la molécula radiactiva permanece prácticamente con una concentración constante durante el periodo de existencia da la materia viva. Debido a su vida media ($\tau_{½}$, = 5.730a) decae lentamente (con un valor relativamente grande en comparación el tiempo de vida de los biosistemas de decenios) a un núcleo estable según el esquema:

$^{14}C \rightarrow {}^{14}N + \beta^- + \nu + Q$ (Q es la energía de reacción con valor de 0,1560 MeV)

La difusión del carbono-14 en la atmósfera y la hidrosfera abre la posibilidad para la datación de un intervalo de tiempo de hasta 60,000 años (casi 10 veces el tiempo de semidesintegración). Recordamos de nuevo que este método de datación radiométrica es posible por la incorporación de este elemento beta emisor en los procesos bioquímicos de los organismos vivos. Es ampliamente empleado en la datación de tejido vegetal o animal incluyendo objetos arqueológicos.

Los isótopos del carbono $^{12,13,14}C$ poseen la característica de mantener entre si las proporciones durante toda la vida de los seres vivos. Al completar el ciclo de vida, la proporción se altera, el carbono-14 no es absorbido más y la cantidad inicial disminuye. En caso de conocer la concentración inicial (100%) después de un tiempo t el valor tendrá un porcentaje establecido por la curva de decaimiento reportado en la Figura 8.

Una vez determinado la concentración del ^{14}C en la muestra arqueológica, la curva de decaimiento mencionado permite establecer el intervalo de tiempo de la inactividad biológica, indicando los años trascurridos (datación de la muestra). Una aplicación, se relaciona con la datación del Sudario de Turín (Italia), también conocido como la Síndone. Es una tela de lino con la impresión de la imagen de un cuerpo humano; en la tradición cristiana se considera que refleja la impresión del cuerpo de Jesus Cristo. En 1988, se efectuó la datación con la técnica por carbono-14 con el resultado de que la tela de lino resultó ser originario de los años entre 1260 y 1390.

Otros radioisótopos cosmogénicos son producidos por medio de las reacciones (n, p) y (p, n) incluyendo la espalación; por conveniencia reportamos aquellos que se aplican en los estudios de datación también conocida como datación radiométrica utilizada para establecer la edad de las rocas y fósiles:

(i) ^{3}H (tritio) se origina en las reacciones (n, t), (p, t) o (μ, t) sobre blanco de ^{14}N y ^{16}O del aire, con una tasa de producción de 0,5 ± 0,3 átomos por $cm^2 \cdot s^{-1}$.

(ii) ^{7}Be y ^{10}Be son isótopos del berilio, se forman por reacciones de espalación inducido por protones de alta energía en los átomos atmosféricos (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, neón, helio, entre otros) con una tasa de producción global de 0,015 a 0,030 átomos por $cm^2 \cdot s^{-1}$.

(iii) ^{26}Al cosmogénico se produce en el polvo interplanetario. El mecanismo que produce $1,1 \times 10^{-4}$ átomos por $cm^2.s^{-1}$ se debe a la espalación de argón ^{40}Ar al interactuar con protones de alta energía expulsados por el Sol.

Para completar esta sección incluimos otros radionucleidos cosmogénicos; estos por sus valores de $\tau_{½}$ relativamente elevados, encuentran aplicación en estudios de geología, (Tabla 6).

Tabla 6. Algunos radioisótopos de origen cósmico en aplicaciones de datación de muestras geológicas. Applied Geology, Geochronology, Dating by Cosmogenic Nuclides. Encyclopedia of Geology, 2nd edition. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00124-7

Radioisótopo cosmogénico	^{26}Al	^{32}Si	^{36}Cl	^{39}Ar	^{81}Kr	^{129}I
Tiempo $\tau_{½}$ de semidesintegración	7,17x10^{5} a	153 a	3,01x10^{5} a	269 a	2,29x10^{5} a	1,57x10^{7} a

La producción artificial de nucleidos obtenidos con fuentes radioisotópicas, aceleradores y reactores nucleares, son tratados en la sección que sigue.

Radionúclidos generados por reacciones nucleares (α, n)

Las partículas alfas (α) interactúan con la materia circunstante por medio de dos mecanismos, a saber: dispersión por repulsión de Coulomb y reacciones nucleares. En el caso de producción de neutrones (n), la partícula cargada (α) debe disponer de una energía cinética suficiente (4 - 9 MeV) para vencer la barrera repulsiva del núcleo blanco; la ecuación de la reacción es $^{A}X(\alpha,n)^{A}Y$. Esta describe la interacción entre el núcleo blanco ^{A}X y la partícula α, dando origen al núcleo residual ^{A}Y y a un neutrón como producto.

El parámetro que define la tasa de producción de neutrones en función de la energía, es la sección eficaz transversal σ(E) en unidades de barn (1 b = 10^{-28} m²). Indicado con R el número de interacciones por centímetro cúbico en un segundo, su valor se expresa por medio de la ecuación:

$$R(E) = \Phi(E)\cdot \Sigma(E) = \Phi(E)\cdot \sigma(E)\cdot N \qquad 7$$

en donde los parámetros indicados son: Φ(E)-flujo de partículas alfa ($\alpha\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$); σ(E) – sección transversal microscópica (cm²) para el caso (α,n) y N – densidad de átomos blanco ($^{A}X\cdot cm^{-3}$)

El estrato superficial del suelo está compuesto por un conjunto de elementos incluyendo radionúclidos alfa emisores (NORM). Los valores de las concentraciones de estos elementos se relacionan con la geodinámica del planeta como deslaves, movimientos de masa, terremotos, entre otros,

además de las actividades antropogénicas como la explotación de los recursos naturales (TENORM).

Los neutrones que permean el ambiente, si no son inmediatamente absorbidos por los núclidos adyacentes, difunden experimentando choques múltiples reduciendo su energía cinética (proceso de termalización); el neutrón fuera del potencial nuclear es inestable y decae en protones con una vida de semidesintegración de 10 minutos.

Repetimos que parte de los neutrones en el ambiente, producidos por rayos cósmicos, se manifiestan con una intensidad que depende de la latitud y longitud; se mide hasta un metro de profundidad del suelo.

Existe un segundo grupo de neutrones ambientales, menos conocido denominados *telúricos (geoneutrones),* se originan en la litosfera como productos de reacciones nucleares tipo (α,n). Esta reacción tiene la particularidad de involucrar únicamente radionúclidos alfa emisores que se encuentran entre los componentes de rocas y minerales. La energía cinética de la partícula alfa, es suficiente para vencer la repulsión de Coulomb de los elementos químicos mayoritarios, O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg y así realizar las reacciones (α,n).

Como se ha mencionado, los neutrones medibles en el ambiente n_{amb}, se constituyen por neutrones cósmicos n_{cosm} más los neutrones telúricos n_{tel}; en particular existe la desigualdad $n_{cosm} >> n_{tel}$.

A pesar de que la intensidad del campo de neutrones *telúricos* sea una fracción en comparación con los cosmogénicos, es de notar que, por el fenómeno de acumulación de NORM anómala, ó la impulsada por la actividad local con TENORM, el valor del campo neutrónico inducido por n_{tel} puede alcanzar valores relativamente elevados, $n_{cosm} \sim n_{te}$. En este último caso el impacto adicional mencionado para el ambiente podría contribuir considerablemente, hasta duplicarse.

La siguiente sección trata algunos detalles de interés para el estudio de los neutrones en el ambiente.

9. Neutrones y su impacto en el ambiente

En la sección anterior se han especificado algunos procesos nucleares para inducir la expulsión de la partícula neutra de un isótopo, aquí reportamos algunos detalles sobre los mecanismos posibles para su producción:

(i) Reacciones nucleares inducidos por partículas o fotones. Es posible producir un grupo de isótopos a través de reacciones (α,n) y (γ, n). Algunos

son fundamentales en nucleosíntesis estelar, otros en producción de radionúclidos médicos y energía.

(ii) Inducción de fisión y fusión que dan origen a neutrones con un espectro amplio de energía en reactores nucleares.

(iii) Fisión espontanea de los radioisótopos transuránicos ^{252}Cf , ^{242,244}Cm, ^{244}Cm, ^{238,242}Pu, frecuentemente empleados en aplicaciones industriales; con una multiplicidad neutrónica >2

(iv) Fuentes radioscópicas que se basan en la mezcla de dos materiales, por ejemplo, un alfa emisor ^{241}Am y un blanco Be en proporción de uno a tres; otros frecuentemente utilizados son: ^{226}Ra-Be, ^{212}Po-Be, o ^{24}Na-Be. En este caso se utiliza el radioisótopo gamma emisor ^{24}Na, de bajo peso atómico; las reacciones (γ, n) producen los llamados fotoneutrones. Los valores de las energías gamma cubren un intervalo entre 8 y 20 MeV, suficientes para romper el enlace entre los nucleones. El proceso se le denomina de resonancias de dipolo gigante (GDR por su siglas en inglés) y en casos de un rango de energía menores, nos referimos a las resonancias enanas (*pygmy dipole resonance*). A consecuencia de la absorción del fotón por parte de un núcleo X, se induce un mecanismo de oscilación colectiva de nucleones con expulsión de uno ó más neutrones (fotoneutrones). Reacciones foto-nucleares posibles son: (γ, n), (γ, 2n) o (γ, pn) incluyendo (γ, fis). Las primeras dos reacciones son objeto de estudio en cuanto se producen durante la radioterapia en los materiales de los aceleradores utilizados en tratamiento médico.

Existen condiciones físicas en el planeta para que se produzcan neutrones; en cualquier punto de nuestro entorno se detecta su presencia y sus efectos en relación con la ionización en la materia. Debido a que las reacciones dependen de la energía de la partícula alfa reportamos un espectro discreto de su energía en la Figura 14.

La tasa de producción de neutrones en unidades, $n \cdot g^{-1}$ por año, debido a la concentración natural de los alfa emisores, Unat de 3 ppm y Th 11 ppm en arena y granito es 6,7 y 13,5 $n \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$ respectivamente. La fisión espontánea (auto fisión) del U y el torio contribuyen en menor grado con una tasa de 1,4 $n \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$, (Feige et al., 1968).

Vale la pena señalar que, a pesar de que existan valores elevados de concentración de materia radiactiva en suelos superficiales, (casos TENORM), no se considera de importancia la producción de neutrones geogénicos y se descarta a priori su consideración en los estudios de dosimetría ambiental.

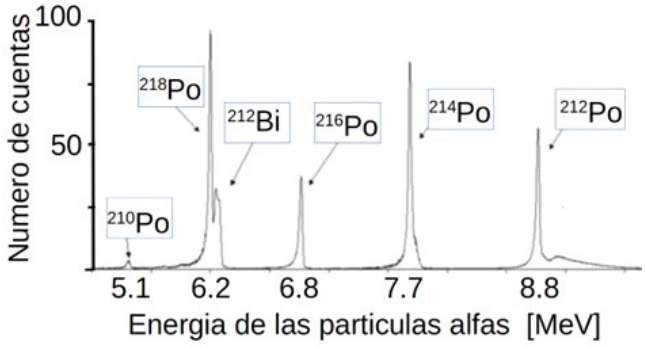


Figura 14. Espectro de energía de las partículas alfas de las familias primordiales Unat, Th, presentes en la corteza terrestre; cubre un amplio rango en energía, suficiente para inducir reacción (α,n) en la mayoría de isótopos; aquellos que disponen de una energía de enlace alrededor del promedio de ocho MeV). https://physicsopenlab.org/2016/11/05/some-alpha-spectra/

Sería conveniente incluir los neutrones de origen geogénicos en futuros programas de monitoreo ambiental especialmente en donde los niveles de radiactividad natural son elevados. Un ejemplo es Ramsar, Irán, en donde la tasa de dosis ambiental es 260 $mSv \cdot a^{-1}$ casi 100 veces el valor promedio mundial; otro ejemplo es la playa de Guarapari (Brasil) con niveles de radiación de fondo que supera el valor de 175 $mSv.a^{-1}$ correspondiente a una tasa de 20 $\mu Sv \cdot h^{-1}$; en algunos lugares, puede llegar a 131 $\mu Sv \cdot h^{-1}$. Para comparación mencionamos que la dosis de una sola radiografía de tórax es 0,42 $\mu Sv \cdot h^{-1}$ comparable a la exposición natural que recibimos durante unos 10 días.

Es importante mencionar que las conclusiones basadas en los resultados de las diferentes campañas de mediciones no han corroborado los valores esperados para la tasa de cáncer; por ejemplo, en el caso de neoplasia pulmonar el resultado indica una correlación negativa con la concentración de radón natural en un intervalo de valores menor de 20mSv·año, Kondo (2011). Para comparación con los datos anteriores indicamos que la tasa 20mSv·año corresponde a la dosis de una persona que vive en una vivienda por un año, en donde respira aire con una concentración de radón de 500 $Bq \cdot m^3$.

Las zonas con elevada concentración de ^{232}Th, presentan valores de la tasa de dosis que puede alcanzar $3x10^4$ veces el promedio mundial, mientras que para ^{226}Ra puede ser de mil veces y para radón 200 veces. Para este caso los valores de Feige et al., (1968), sugieren que la tasa de producción de neutrones geogénicos a nivel de la playa es de 4,3 x 10^5 $n \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$. Un valor para la cual la frecuencia esperada de neoplasia no es despreciable.

Otro fenómeno natural, en el cual se producen neutrones por medio de reacciones nucleares, ocurre durante la formación de truenos. Las mediciones realizadas indican una producción entre (10 - 100) x 10^6 neutrones por descarga eléctrica atmosférica. El "Observatorio de la Tierra" de la NASA, indica que el fenómeno natural de Catatumbo es de alta frecuencia (389 eventos por día) con valores 280 eventos/hora, la mayor densidad de destellos del planeta. Con este fenómeno, a veces se manifiestan explosiones de electrones con energías de hasta 100 MeV, con producción de fotones en el rango energético visible y originan rayos gamma de alta energía. El espectro de energía en las tormentas eléctricas indica la generación de radiación gamma de 511 keV; estos son fotones y ocurren solamente durante el proceso de materialización de la energía EM.

La tasa de producción de los neutrones con los relámpagos que ocurren en la embocadura del rio Catatumbo, al sur del lago de Maracaibo (Venezuela), no se ha considerado como un fenómeno de riesgo radiológico para la salud humana, no obstante, la dosis de radiación estimada sea de 30 mSv por descarga. El fenómeno de las tormentas eléctricas se origina durante el movimiento de grandes masas de aire que al rozar las superficies de las montañas cercanas produce cargas eléctricas y como consecuencia un diferencial de potencial eléctrico considerablemente grande. Cerca del valor máximo permisible por el dieléctrico existente ($30 kV \cdot cm^{-1}$), se inicia el proceso de descarga; durante la cual, se forman electrones libres en aceleración con producción de fotones de alta energía. El fenómeno es similar al mecanismo de producción de rayo-X llamado "*bremsstrahlung*"(radiación de frenado) de alta energía.

Una consecuencia es que, en las tormentas los fotones en presencia de un campo nuclear producen pares de iones (β^+ y β^-) y estos últimos, los positrones interactúan con electrones dando origen de nuevo a dos fotones llamados de aniquilación de 511 keV cada uno.

Fotones (ondas electromagnéticas, o radiaciones γ) con energías mayores del valor de enlace entre nucleones (EH≈8MeV) inducen reacciones nucleares $^{A}X(\gamma,n)^{A-1}Y$, $^{A}X(\gamma,2n)^{A-2}Y$ y electronuclear $^{A}X(e,e'n)^{A-1}Y$. Los elementos ^{A}X presentes en el aire son el blanco y los fotones el agente perturbador de núcleo; se induce la oscilación colectiva (GDR), un mecanismo nuclear que da origen a la expulsión de uno ó dos neutrones.

Se ha determinado una correlación temporal entre intensidad del campo de neutrones y energía de las radiaciones electromagnéticas. Los fotones de *bremsstrahlung* que dispongan de energía en el rango (1,6 – 25 MeV)

son absorbidos por núcleos de N y O, en su la mayor parte. Otros núcleos atómicos con menor frecuencia son, por ejemplo: deuterio, berilio y otros elementos presentes en la atmósfera. Los mecanismos de las reacciones nucleares son: de resonancia de dipolo gigante (GDR), dipolo enano, (PDR), cuasi-deuteron y foto-piones.

De los mecanismos mencionados, el primero (GDR) es el más frecuente. Adicionalmente se materializan también las reacciones: $^{9}Be(\gamma,n)\ ^{8}Be$; $^{2}H(\gamma,n)^{1}H$.

En la atmósfera se consiguen también los isótopos del oxígeno-15 y nitrógeno-13, sintetizados a partir de los isótopos mayoritarios del ^{16}O and ^{14}N según la reacción: $^{16}O\ (\gamma,n)\ ^{15}O$ y $^{14}N+\ (\gamma,n)\ ^{13}N$.

El radionúclido ^{15}O se forma en un estado excitado y decae al ^{15}N, por medio de una transición que involucra la emisión de un positrón (β^{+}). Hemos mencionado que dan origen a dos rayos gamma de 511 keV. Por la detección de estos fotones de aniquilación, se deduce la existencia de los fotoneutrones relacionados con las nubes de tormenta y relámpagos mencionadas. Estas a su vez pueden inducir la formación de nuevos radioisótopos o seguir el proceso de decaimiento de Fermi.

Para concluir la sección mencionaremos que el campo neutrónico que se espera en la zona "Casa del Trueno" puede ser importante desde el punto de radio protección. Si consideramos 280 eventos por hora, y la producción de 1×10^{8} neutrones por descarga, el campo esperado de neutrones es de $6{,}7 \times 10^{11}$ por día o $2{,}5 \times 10^{14}$ por año. Únicamente a título de especulación, en caso de que el suelo contenga 235 g de uranio-235 y que venga fisionado en un año con los neutrones de relámpagos, la energía generada es equivalente suministrar electricidad para 1,6 millones de casas (que tengan un consumo individual anual de 12000kWh).

10. Modificaciones de la estructura de la materia por radiaciones ionizantes

Las radiaciones nucleares con carga eléctrica al pasar por la materia interactúan continuamente con el campo de Coulomb de la estructura atómica. Las radiaciones ionizantes sin carga eléctrica interactúan con el núcleo o los electrones de los átomos a la cual transfieren parcialmente o la totalidad de la energía incidente. Durante la ionización una partícula de masa m con energía cinética E transfiere a un electrón de masa m_o en una sola colisión la energía de $4Em_o/m$. Para un neutrón o protón es alrededor de 0,2 % de su energía cinética inicial.

En el tránsito de una partícula, en un medio plástico (CR-39^{TM}) utilizado frecuentemente para detectar neutrones, protones, alfas, fragmentos de fisión, la tasa de energía transferida es relativamente elevada. En la Figura 15 a la izquierda, se ilustran las dislocaciones de los átomos al momento de que se produce un plasma de iones, con las consecuencias de:

(i) experimentar una excitación atómica con formación de iones con elevada densidad,

(ii) inducir el proceso de relajación con recombinación y formación de moléculas diferenciadas, y

(iii) crear la zona de ionización con ruptura de los enlaces entre monómeros $(C_{12}H_{18}O_7)_n$ del plástico detector. En la Figura 15, a la derecha se presenta una vista lateral, en la cual los iones experimentan difusión que define las dimensiones de la traza nuclear latente.

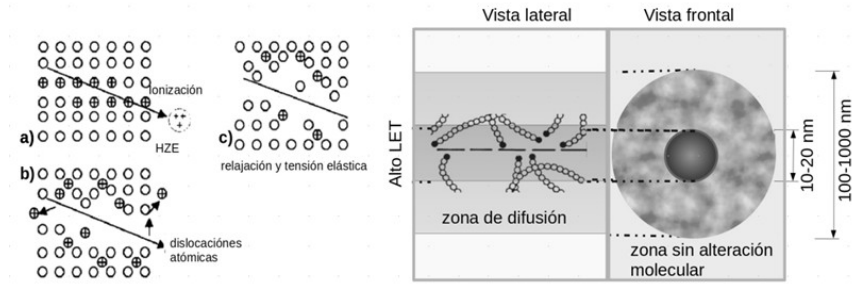


Figura 15. Ilustración de las modificaciones estructurales en los detectores de trazas nucleares a consecuencia de la ruptura del enlace C–H covalente (4.3 eV) en policarbonato. Los daños inducidos son proporcionales a la energía, masa y carga eléctrica de las partículas incidentes; una característica importante en dosimetría, estudio de las reacciones nucleares y lar radiaciones cósmicas, Fleischer et al. (1975).

En los detectores pasivos, la ionización por parte de la partícula alfa con energía cinética de 4,3 MeV, inducen 10v pares de iones a lo largo de un camino de centenas de micrómetros; la capacidad de transferencia de energía especifica (LET por su sigla en inglés) de 10 keV.μm^{-1}, es suficiente para la formación de trazas latentes en CR-39^{TM}.

Las radiaciones nucleares con energía superior a la energía de umbral interactúan con la materia por medio dos mecanismos principalmente, ionización directa a nivel de la corteza electrónica de los átomos (E > ~eV) e indirectamente por medio de los productos de las reacciones nucleares con los núcleos.

En la ionización directa, las partículas cargadas generan un plasma (material ionizado) de alta densidad a lo largo de una trayectoria relativamente breve. El valor de la densidad de ionización especifica es una variable en cuánto indica la cantidad de material que puede ionizar en su trayectoria. Las partículas con alta densidad de ionización específica, como las partículas alfa, pierden su energía rápidamente debido a que ionizan gran cantidad de material. Un ejemplo que describe el poder de frenado en función de la longitud de alcance de una partícula cargada en un material dado es descrito por la curva de Bragg (Figura 16).

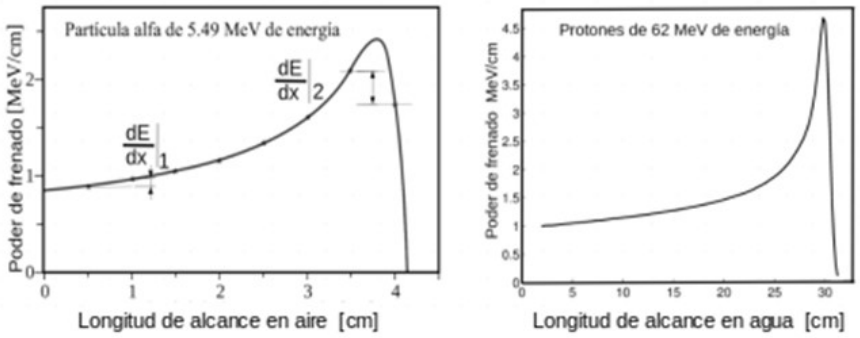


Figura 16. Curva de Bragg para diferentes partículas y energías en un medio absorbedor. Notar la diferencia en los gradientes $(dE/dx)_1$ $(dE/dx)_2$ observable de la comparación de los gráficos. Se evidencia el caso de un haz de protones con la transferencia de energía de mayor efectividad. https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg_peak

La pérdida de energía de la radiación incidente, es una función $1/v^2$; y se caracteriza por la presencia de un pico generado por un aumento abrupto de la sección transversal de interacción, instantes antes de detenerse. La explicación radica en el tiempo disponible para la partícula incidente e interactuar con los átomos; en la fase inicial la partícula dispone de alta velocidad, por lo tanto, con tiempos breves con valores de dE/dx, relativamente pequeños. Al finalizar el trayecto la velocidad de partícula es menor dando la posibilidad de involucrar un número creciente de átomos y así transferir la energía todavía disponible. En la última fase la (dE/dx) es mayor; al finalizar la trayectoria interviene la neutralización de la carga de la partícula por captura de electrones libres.

La curva de Bragg consta de dos fases, una en la cual inicialmente $(dE/dx)_1$ es pequeña, y la otra hacia al final de la trayectoria en donde el valor de $(dE/dx)_2$ es significativamente mayor: $(dE/dx)_2 >> (dE/dx)_1$

La curva de Bragg para protones de alta energía frenados en agua es diferente al caso anterior y es resaltado por medio del pico estrecho en la figura. Por otra parte, ese fenómeno se aprovecha en terapia de protones; este nucleón de hecho ataca y destruye las células cancerosas con precisión, al mismo tiempo garantiza un beneficio, por no inducir daños en los tejidos sanos del entorno.

Se incluye en la figura anterior también, la curva de Bragg para el caso de las partículas alfas de algunos MeV absorbidos en aire (condiciones estándar 20°C (293,15 K) y 1 atm (101,325 kPa) para resaltar los mecanismos de perdida de energía en diferentes medios. De la comparación de las dos curvas, se deduce que el mecanismo de perdida de energia en la materia absorbente es similar, pero se evidencia una dependencia de la carga, masas y energías incidente. Un aspecto considerado relevante en dosimetría, sea espacial, radiológica o ambiental.

En caso de las radiaciones beta (β^+ y β^-) el mecanismo de pérdida de energía en la materia es similar: por cierto, es una ionización en la cual intervienen choques múltiples, en consecuencia, transfieren energía cinética que se manifiesta a lo largo de una trayectoria quebrada.

En contraposición a los procesos mencionados, la radiación electromagnética (EM), (fotones y radiaciones gamma) y las partículas neutras siguen un mecanismo de producción y perdida de energía diferente:

(i) Caso de la radiación electromagnética (fotones). En un caso nos referimos a los fotones generados por electrones que cambian de nivel de energía de un mismo átomo y en otro caso a los generados por electrones de frenado, como ocurre en los equipos Röntgen (rayos-X),

(ii) Caso de la radiación gamma; esta es radiación EM que se origina del núcleo atómico. En los dos casos, la anterior y esta, la energía se transfiere a la materia por tres mecanismos:

- efecto fotoeléctrico (del átomo se expulsa un electrón),

- efecto Compton (se expulsa un electrón también pero el fotón sigue con menor energía), y

- producción de pares, un fotón o radiación gamma en la cercanía de un campo nuclear se materializa en un par (β^+ y β^-). En dado caso pueden inducir una reacción nuclear.

(iii) Caso de los neutrones libres. Estas partículas neutras pueden inducir interacción con los átomos o con sus núcleos, y luego ionización (proceso indirecto de ionización). La pérdida de energía en algunos casos se realiza en pasos bruscos como ocurre en grafito; en la cual los desplazamientos de los átomos en la estructura cristalina inducen un aumento considerable de volumen. Este fenómeno es conocido como el efecto o la enfermedad de Wigner, (IAEA, 2000). En los reactores con moderador de grafito es un problema adicional. Los neutrones durante la fase de transporte en la materia experimentan además de choques, también decaimiento, transformándose en protones. Estos, a su vez son absorbidos e incrementan la temperatura del sistema.

La consecuencia de la absorción de las radiaciones EM, fotones, gamma y neutrones es en definitiva un mecanismo de producción de calor en los materiales.

11. Calor de origen radiogénico

La geotermia entendida como la utilización de la energía emanada de forma natural, se origina parcialmente de las desintegraciones nucleares espontáneas y las reacciones nucleares. Aproximadamente el 50% del calor interno de la Tierra es de origen primordial, el resto, se origina de la ionización inducida por los productos de la desintegración radiactiva indicado como calor radiogénico. Este fenómeno que ocurre también en la corteza y el manto terrestre, es de particular importancia, por cuanto ofrece un mecanismo de protección favoreciendo un enfriamiento más lento del planeta. La producción de calor radiogénico se debe en la mayor parte a los radioisótopos; algunos son indicados en la tabla 7.

En la Tabla 7, entre los radioisótopos que participan en la producción de calor, mencionamos el torio. Los yacimientos de la región de Cerro Impacto, (Estado Amazonas) junto con el depósito más pequeño de El Baúl, (Estado Cojedes), ubica a Venezuela en el quinto lugar con más 300 mil toneladas de torio a nivel mundial, Greaves (2011).

A título de curiosidad los yacimiento de torio y uranio de Venezuela, con base a la tabla anterior contribuyen con una producción de calor en la superficie suficiente para llevar mil litros de agua a la temperatura de ebullición.

12. Dosimetria ambiental, dosis y dosis efectiva

La radiación ionizante transfiere energía a la materia por medio de la producción de un par electrón-hueco (par) con los siguientes valores: 0,4

Tabla 7. Radioisótopos que intervienen en la producción de calor emanado por la corteza terrestre. Los valores indicados son aparentemente pequeños pero considerando las cantidades de material radiactivo nos percatamos de su importancia especialmente donde las concentraciones en la superficie son mayores, por ejemplo en el Cerro Impacto.

Radio-isótopo	Calor especifico (W/kg)	$\tau_{½}$ (a)	Concentración en la corteza ($kg_{isótopo}/kg$)	Producción de calor en la corteza W/kg
^{232}Th	26.4×10^{-6}	14.0×10^{9}	124×10^{-9}	3.27×10^{-12}
^{238}U	94.6×10^{-6}	4.47×10^{9}	30.8×10^{-9}	2.91×10^{-12}
^{40}K	29.2×10^{-6}	1.25×10^{9}	36.9×10^{-9}	1.08×10^{-12}
^{235}U	569×10^{-6}	0.704×10^{9}	0.22×10^{-9}	0.125×10^{-12}

eV_{par} para celdas solares, 3,0 eV_{par} para detectores de germanio (Ge), 30-35 eV_{par} para la ionización de los gases, 300 eV_{par} para centelladores orgánicos.

En el caso de medios acuosos es ~10 eV_{par} es decir que en una célula por ejemplo en fase de meiosis, con dos divisiones celulares sucesivas, al absorber una radiación nuclear alfa de 10 MeV el número de pares de iones producidos es de un millón. El campo de Coulomb generado por los iones induce un fuerza repulsiva ocasionando una modificación en la estructura molecular que pueden ser temporal o permanente; este fenómeno, se relaciona con el concepto dosis D = energía/masa. En la cual la energía es de la partícula incidente, p.e. alfa y la masa se refiere a la célula que en promedio es de alrededor de 1 nanogramo (10^{-9}g).

La dosis por radiaciones ionizante es entonces, una medida conveniente para indicar el daño ocasionado en la materia. Es importante conocer no solamente que estamos expuestos a las radiaciones, mas también, en que cantidad y así establecer los niveles de riesgos potenciales asociados.

Para evaluar el grado de los peligros asociados a las radiaciones ionizantes, es necesario poner en relación la dosis con el daño inducido. De la comparación entre dosis y daño es decir el efecto observable, tendremos un método de cuantificación del riesgo o nivel del peligro en el contexto de la experiencia humana. En la Figura 17 se presentan algunos tipos de radiaciones ionizantes y su absorción en diferentes materiales.

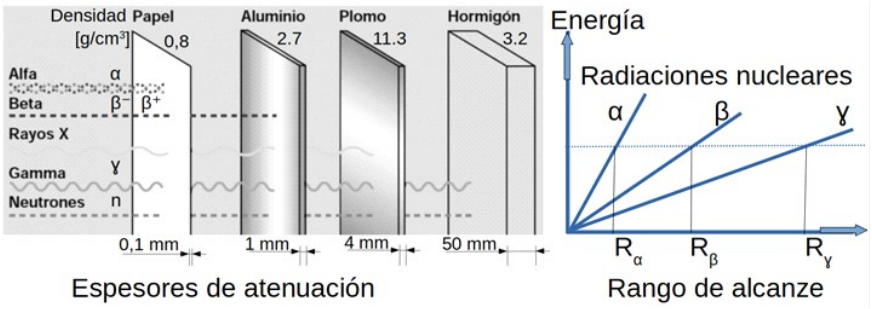


Figura. 17. Ilustración de la capacidad de penetración de las radiaciones ionizantes en algunos materiales con diferentes espesores y densidades. A la derecha se presenta una comparación entre los valores de alcance R para radiaciones alfa, beta y gamma. Se ilustra, por ejemplo con una línea vertical, la energía transferida para un espesor dado (R_α), con el objeto de resaltar la importancia de la densidad del material absorbente es decir la capacidad de reducir los daños resultantes de alteración atómica o molecular. Con una línea horizontal indicamos una densidad de ionización constante en la cual la diferencia entre rangos depende del tipo de radiación: $R_\alpha < R_\beta < R_\gamma$. https://www.cnsc-ccsn.gc.ca/eng/ resources /radiation/types-and-sources-of-radiation/.

La relación entre dosis (D) de radiación absorbida o retenida en el material y los daños inducidos (por ejemplo, modificación en la estructura molecular), se expresa con D(E,m) = E (J)/m (kg), en la cual la energía transferida es E y m, la masa que la retiene. Si la energía de la radiación ionizante es de 1 J y es absorbida por la masa de 1 kg, entonces la dosis D(E,m) =1 Gy (Gray).

Generalmente se utiliza sus múltiplos: µGy, mGy, cGy para caracterizar zonas ambientales con NORM y TENORM, y para casos particulares, por ejemplo, radioterapia, son kGy.

Se ha introducido también el Sv (Sievert) con la misma definición de dosis para indicar la cantidad de radiación ionizante que produce el mismo efecto biológico de los rayos X; en este caso 1Gy=1Sv.

Adicionalmente se ha introducido:

(i) Dosis equivalente (H_T) es la dosis absorbida multiplicada por un factor de ponderación de la radiación (W_T), $H_T = D(E,m) \times W_T$ tiene en cuenta los diferentes tipos de daño biológico inducida en un tejido u órgano T. Se expresa en Sievert, (Sv).

(ii) Dosis efectiva E, es la dosis equivalente multiplicada por un factor de ponderación. Se calcula considerando el tipo de radiación, la cantidad absorbida por el cuerpo y la susceptibilidad de los tejidos y órganos (Sv); $E= W_T \times H_T$,

(iii) Dosis efectiva colectiva (S) es la suma de todas las dosis efectivas en un intervalo de energía y tiempo recibidas por una población expuestas a radiación en unidad de (Sv-persona), https://icrpaedia.org/Collective_effective_dose.

Los neutrones, un componente del campo de radiación ambiental, inducen una dosis insignificante comparado con los valores relacionados con las otras radiaciones. Sin embargo, es importante tomarlo en consideración debido a la sensibilidad de algunos tejidos.

La dosis de neutrones requiere de la introducción del parámetro de factor de calidad; no tiene dimensión y su valor varía entre 2 y 20. Dörschel et al., (1966). La Norma Venezolana, en relación con la Protección Radiológica indica los factores de ponderación (W_R) según el tipo y calidad de la radiación ionizante y los factores de ponderación (W_T) de los tejidos, COVENIN, (1999).

El cuerpo humano está expuesto a las radiaciones de origen natural. Por ejemplo, en Venezuela la dosis es de 2,6 $mSv \cdot a^{-1}$ por persona. De este valor el 53% corresponde al gas radiactivo radón de las familias radiactivas y el remanente se debe a la radiación gamma de fondo.

La exposición a la radiación beta y gammas emitida por cesio-137, ya sea externa o interna, no tiene un efecto preponderante sobre algún tejido específico, por lo cual se emplea la dosis efectiva para indicar la dosis de exposición de todo el cuerpo. En oposición, para el caso del yodo-131, que preferentemente se acumula en la glándula tiroides, la dosis efectiva se expresa en dosis equivalente para incluir la información sobre los efectos de un tejido específico.

El ambiente en nuestro entorno sufre modificaciones por la actividades geodinámicas y antropológicas que modifican la composición elemental de suelo y el aire. Como consecuencia es de esperar que ocurra también una variación en las concentraciones de radioisótopos en la materia. Mediciones de los niveles de radiactividad proveen información sobre la posible dosis de radiaciones recibidos por la población; en este caso, nos referimos a la dosimetría ambiental.

En Venezuela se han instalado diferentes laboratorios para determinar la dosis en viviendas, lugar de trabajo y sitios frecuentados por la población o turistas, estancias en balnearios visitas a cuevas naturales, CONICIT (1996).

Dosis anuales por radiación de origen cósmica depende de la altitud sobre el nivel del mar. La tasa medida al nivel del mar de 0,03 $mSv \cdot a^{-1}$, el valor incrementa exponencialmente con la altura. A este propósito, se reporta una gráfica de los valores de la dosis en función de la altura (Figura 18).

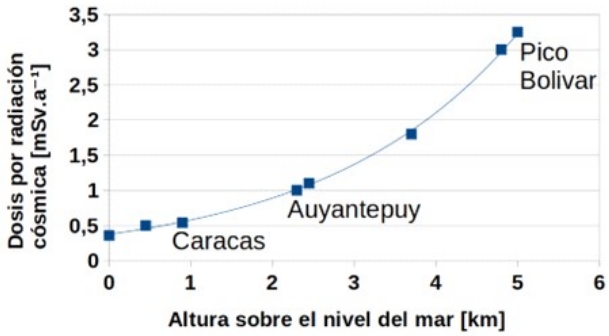


Figura 18. Ejemplo de dosis de origen cósmico a diferentes alturas sobre el nivel del mar. Por extrapolación de la curva, se determina que los viajeros de un avión a 10 km de altura reciben una tasa dosis de 18 $mSv \cdot a.^{-1}$ o 2,1 $\mu Sv \cdot h^{-1}$. Sifri et al., (2018).

La Estación Espacial Internacional (ISS) orbita la Tierra a una distancia de 350 km, dispone de alojamiento para astronautas; ellos durante una misión de cuatro meses reciben una dosis efectiva de 100 mSv. En misiones de larga permanencia en el espacio, los astronautas superan los valores correspondientes al desarrollo de cáncer con una probabilidad del 50%. Podríamos clasificar este tipo de dosis como relacionado al TENORM en cuanto es un fenómeno que dispone de una componente tecnológica (aeroespacial).

Otro ejemplo que se incluye en esta categoría es la dosis de radiación relacionada con:

(i) Ensayos nucleares atmosféricos; la dosis adicional a la cual por ejemplo la población de Venezuela estuvo expuesta en el año 1963 fue de 0,11 $mSv \cdot a^{-1}$.

(ii) Accidentes en plantas nucleoeléctricas; mencionamos entre los más conocidos relacionados con errores humanos como el desastre nuclear de Chernóbil, Rusia (1986), de Three Mile Island, USA, (1979) y del reactor

SL-1, USA (1961). El accidente de Fukushima, Japón, (2011), si bien forma parte de esta categoría, hacemos notar que ha sido inducido por un evento natural (tsunami).

(iii) Incidentes nucleares derivados del uso de energía nuclear: se han producido más de un centenar en los últimos decenios.

(iv) Incidentes radiológicos ocurridos principalmente en centros de tratamiento medico, industria (procesamiento de minerales radiactivo) y el mal uso de fuentes intensas de radiación (aplicaciones en control de calidad).

No obstante, los casos mencionados, sean llamativos, las dosis derivadas de los accidentes nucleares son insignificantes para la población; en particular si es << 100 mSv, ningún efecto inmediato es observable.

Es importante resaltar que los procedimientos aplicados en medicina nuclear involucran el 96% de la exposición humana a valores relativamente elevados. Esto se debe a que aceptamos una dosis adicional de radiación, aunque elevada, con la esperanza de un beneficio tangible para la salud. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_ accidents_and_ incidents.

En relación con este aspecto la comisión internacional de protección contra las radiaciones (CIPR) recomienda, en su publicación N° 26, reducir las exposiciones en el marco del concepto de llamado ALARA es decir al valor más bajo razonablemente posible, dependiendo de factores económicos y sociales involucrando un análisis detallado de costes y beneficios.

Por lo general los materiales procesados y empleados en las diferentes aplicaciones pueden presentar niveles radiactivos considerables excesivos; para limitar los riesgos de posibles accidentes o incidentes se han elaborado estrictas normas de protección radiológica.

En la siguiente sección se describen algunos efectos en las cuales las normas de protección radiológica son convenientemente aplicables para favorecer a la vida silvestre o a los ecosistemas.

13. Efectos biológicos de las partículas ionizantes

La radiación ionizante, por ser un agente físico, modifica y altera la estructura de la materia, con una intensidad que depende de parámetros como tiempo de exposición, masa, carga del haz incidente, densidad de energía transferida.

Organismos biológicos son susceptibles a los efectos asociados a los procesos de ionización, por cuanto pequeña pueda ser, siempre induce un campo electrostático suficiente para interferir con los procesos bioquímicos programados; en un caso podría ser leve con la posibilidad de reparación sin consecuencias, mientras que en un caso extremo podría tener consecuencias mayores, por ejemplo apoptosis celular, (muerte celular programada).

Es posible que una baja dosis de radiación contribuya al crecimiento de las células; de hecho, la evolución biológica desde su inicio, ha ocurrido en un ambiente radiactivo (mayor de los niveles medible hoy en día) y pudo haber sido un factor significativo en la génesis y desarrollo de la vida.

La tasa de dosis es susceptible de inducir efectos muy diversos según el rango de valores; en caso de valores mayores de 20 $mSv \cdot a^{-1}$ podría ser negativo debido a alteraciones irreparables. Un aspecto de especial importancia en el caso del funcionamiento de células, tejidos y órganos entre otros; la ionización puede inducir procesos irreversibles relacionables a lesiones inmediatas o a lesiones que se manifiestan después de un lapso de tiempo (meses o años).

En relación con la correlación entre dosis – efecto, existen incógnitas; de hecho las incongruencias entre las teorías para bajas dosis, se relaciona con la asunción de una relación lineal. La cual no contempla la posibilidad de una recuperación total de las funciones celulares, después de haber recibido una elevada dosis. Casos extremos ocurren con el uso de la radioterapia; las dosis elevadas inducen en el paciente fatiga, náuseas y dolores de cabeza, sin embargo estos malestares desaparecen con relativa rapidez después del tratamiento. En todo caso no es posible descartar que exista un riesgo de que se manifiesten efectos secundarios tardíos, como consecuencia de una terapia nuclear.

Además de los efectos relacionados con las radiaciones ionizantes, existe otro vinculado con la masa de los elementos, llamado efecto isotópico, que intervienen en los procesos bioquímicos; mencionamos algunos ejemplos:

(i) La acumulación de isótopos estables en agua pesada (D_2O); esta y HDO se acumulan en sistemas microbianos y represas. El lago de Valencia (Venezuela) tiene en promedio para cada 6400 litros de agua liviana (H_2O), 1 litro de agua pesada (D_2O + HDO); se debe a la constante evaporación y la lentitud de reposición del agua (ríos inmisarios de bajo caudal) que es un proceso que ha favorecido el incremento de la concentración isotópica.

(ii) La bioacumulación de radioisótopos p.e. uranio. Algunos organismos como el *Geobacter uraniireducens* o el *Geobacter sulfurreducens*, son bacterias aptas para la biorremediación de suelos y aguas contaminados con uranio. Estas bacterias son especializadas para reducir el uranio (VI) a uranio (IV), la cual es una forma menos soluble y móvil, inmovilizándolo eficazmente hasta una concentración de 5000 ppm. Como una curiosidad de la naturaleza mencionamos que el fenómeno se debe a la presencia de una biopelícula que retiene el uranio protegiendo la bacteria de la radiotoxicidad. La tasa de acumulación en la biopelícula varía en función de factores como la forma química del uranio, los tejidos específicos del organismo y condiciones del ecosistema local.

(iii) Casos de acumulación de radioisótopos, ocurren con frecuencia en la naturaleza, típico el caso mencionado relacionado con la bioacumulación en la flora y fauna de compuesto con ^{14}C, ^{40}K, ^{226}Ra.

Los fenómenos de bioacumulación de radioisótopos en humanos seguramente han acompañado la evolución en el planeta desde su inicio. Esto posiblemente nos permita extrapolar que ante el daño inducido por la radiación nuclear, también se manifieste una actividad biopositiva. Posiblemente es una consecuencia de un proceso de adaptación (reparación celular) a la exposición a cuerpo total, prolongada, a dosis bajas de radiaciones nucleares. Por lo tanto, las modificaciones moleculares ocurren aleatoriamente en las diferentes partes de la célula u organismo; así que el amplio espectro de los posibles mecanismos de reparación ha dado origen a la radio resistencia celular.

Esta capacidad es sorprendentemente elevada para muchos bio-organismos, en cuanto contrasta las predicciones oficiales reportadas para los accidentes nucleares, como en el caso de Chernóbil. A este propósito mencionamos, que alrededor del área del desastre, no obstante los elevados niveles de radiación, (40 veces el valor letal para los organismos), se indica:

> "*no han demostrado la existencia de una correlación directa entre la exposición da la radiación y el aumento de otros casos de cáncer u otras enfermedades*" https://www.nationalgeographic.com.es/ ciencia/5-datos-claves-desastre-chernobil_14343.

Después de decenios de los accidentes radiológicos, se refuerza el punto de vista de la existencia de un efecto biopositivo, en cuanto, tanto los animales como las plantas han revelado una capacidad de supervivencia a las radiaciones nucleares, inesperada para muchas especies.

A propósito, mencionamos las bacterias llamadas extremófilas, que han desarrollado una resistencia notable a las condiciones naturales extremas, por ejemplo, radiológica. En particular la bacteria *Deinococcus radiodurans*, que dispone de mecanismos de reparación que le permiten sobrevivir a dosis de 5kGy (que es una dosis de radiación letal). La alta resiliencia está relacionada con la presencia de múltiples copias de su genoma y por haber desarrollado eficientes mecanismos de reparación del programa del ADN (secuencia de los aminoácidos).

Con base a estas consideraciones y observaciones experimentales, se ha propuesto la existencia de un efecto biopositivo es decir que la ionización induzca homeóstasis. Posiblemente estimulando aquellos procesos bioquímicos que de otro modo no se activarían, https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_hormesis.

En la sección siguiente tenemos la oportunidad de establecer criterios de selección para recomendar la intervención en los casos de riesgo ambiental.

14. Índices de riesgos radiológicos

Los posibles riesgos radiológicos y radio ecológicos relacionados con las actividades de minería y explotación petrolera, incluyendo proyectos macro como el "Arco Minero del Orinoco", son objeto de preocupación especialmente donde las industrias son más agresivas, como ocurre en el Estado Zulia, Bolívar o la Faja Petrolífera del Orinoco (Venezuela), para citar algunos ejemplos.

Hoy todavía, a pesar de promover intensamente la transición energética, el "oro negro" y el carbón siguen alimentando las grandes plantas de generación de calor. Como la mayoría de las fuentes naturales, también los fósiles contienen radionúclidos y productos de desintegración nuclear. La combustión del petróleo o carbón es un proceso que concentra radionúclidos en las cenizas por lo tanto son considerados residuos TENORM.

Es práctica común almacenar los residuos industriales TENORM en repositorios temporales expuestos a factores naturales; en tales circunstancias, los desechos se dispersan con un riesgo para el ambiente.

Las políticas ambientales actuales, se orientan hacia la economía circular, en las cuales los residuos se consideran también una fuente de materia prima utilizable en la manufactura de productos comerciales. En principio se logra el doble objetivo, es decir, reducir los volúmenes de desecho en los vertederos y los volúmenes de la materia prima procedente de la minería.

La ventaja ofrecida por esta política se ve disminuida por no valorar en su justa medida la radiotoxicidad de los desechos utilizados.

La opción de reciclaje es viable únicamente si los niveles de riesgo radiológico no impactan en la salud humana.

Para establecer un criterio para la selección y posible uso de los materiales de reciclaje de origen industrial, se han implementado un índice de peligrosidad o de riesgo. El valor numérico del índice se emplea en cuanto sintetiza el nivel de peligrosidad y al mismo tiempo proporciona un método de evaluación de los materiales que se quieren integrar en la economía circular.

A título de ejemplo ilustrativo reportamos algunos detalles en relación con la posible valorización de residuos industriales.

El primer paso a seguir para la selección del material destinado al reciclaje es determinar las concentraciones NORM o TENORM. Existen diferentes técnicas de análisis por ejemplo la espectrometría gamma. La técnica permite establecer si un material cumple con el valor impuesto por las normativas en vigencia (índice de inspección). Los materiales TENORM se pueden incluir en los programas de reciclaje solamente si el valor de la concentración de actividad es igual ó menor de 300 $Bq.kg^{-1}$ para los radioisótopos: ^{226}Ra, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{228}Ac, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl, ^{40}K, ^{232}Th y ^{238}U.

Los principales radionúclidos frecuentemente empleados en los cálculos del índice de riesgo o peligro radiológico son el radio, potasio y torio. El de mayor importancia histórica es el radio. Todos sus isótopos son inestables y de origen natural: ^{226}Ra es parte de la serie ^{238}U, ^{223}Ra de la serie ^{235}U, $^{224,228}Ra$ de la serie ^{232}Th. El ^{225}Ra ($\tau½ = 14,9$ d) de la serie ^{237}Np, (se utiliza en casos esporádicos).

Diferentes expresiones son disponibles para establecer el valor del índice de riesgo. En el caso de materiales reciclados destinados para la construcción de edificios y de viviendas se aplica el criterio que se basa en la tasa de dosis de radiación NORM. El método es de utilidad en predecir si una edificación con el material reciclado, una vez construido, cumple con las normas radiológicas utilizando el índice de riesgo externo (H_{ex} en $Bq \cdot kg^{-1}$). Un material de desecho o residuo industrial para ser empleado debe satisfacer la desigualdad: $H_{ex} \leq 1 Bq \cdot kg^{-1}$. En este caso se garantiza que el material reciclado representa más beneficio que riesgo para el ambiente. En caso de los radionúclidos, radio, torio, potasio, el criterio de selección, se determina con la expresión, (8).

$$H_{ex}[Bq\cdot kg^{-1}]=\left[\frac{A_{Ra}}{370}+\frac{A_{Th}}{259}+\frac{A_K}{4810}\right] \qquad 8$$

Es de notar en la Tabla 8, que únicamente el material para baldosas de cerámica es considerado apto para ser empleadas en el proceso de manufactura. Otros materiales de la tabla no cumplen con el criterio de selección, de hecho, el índice es: $H_{ex} > 1$.

Tabla 8. Algunos valores medios de la concentración de actividad de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K en materia para fabricación de cerámicas y productos finales utilizados en la determinación del índice externo H_{ex}. El material de minería o de reciclaje es apto solamente si se cumple con la condición de que $H_{ex} \leq 1$.

Material	A_{Ra} [Bq·kg^{-1}]	A_{Th} [Bq·kg^{-1}]	A_K [Bq·kg^{-1}]	H_{ex} [Bq·kg^{-1}]
circón	2250	503	325	8,1
caolín	176	169	13	1,1
baldosas de cerámica	114	55	506	0,63
bauxita	419	256	47	2,1

Estos, sin embargo, son utilizados en el proceso de manufactura mezclados con otros materiales, una práctica que reduce la concentración especifica y así se garantiza la reutilización del producto.

En el caso de materiales de reciclaje que se quiere emplear como aditivos, por ejemplo, en la fabricación de ladrillos, el criterio de selección se basa en un nuevo índice que depende de la actividad especifica gamma, I_γ Bq.kg^{-1}. Este establece que, en la mezcla, el material radiactivo no supere el 14% en peso. Este requisito tiene un significado de importancia en protección radiológica; el material con contenido de material NORM o TENORM empleado como aditivo en cualquier tipo de material de construcción no debe exponer al publico a una tasa de dosis mayor de 1 mSv·a^{-1}.

El criterio se relaciona a:

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} \qquad 9$$

en la cual A_{Ra} , A_{Th} y A_k indican la actividad específica de los radioisótopos arriba mencionado, en Bq.kg^{-1}.

Los valores promedios específicos de referencia son: A_{Ra}=35, A_{Th}=35 y A_K=400 Bq·kg^{-1}; aplicando la expresión anterior, el índice gamma para un material con valores promedios NORM es I_γ = 0,425 Bq·kg^{-1}.

Los materiales de reciclaje con índice I_γ > 1,0 no deberían ser empleados en la construcción en cuanto expondrían la población a una tasa de dosis mayor de 1mSv.a^{-1}.

Por ejemplo, un típico producto considerado para su reutilización es el lodo rojo de Pijiguao (Edo. Bolívar). Valores medidos indican que la actividad especifica tiene un valor entre 2,0 y 3,5 kBq·kg^{-1} y correspondiente a un índice I_γ entre 4 y 10 veces la concentración recomendada.

En caso tomar la decisión de su empleo, el material debe ser sometido a un proceso radioquímico u oportunamente tratado con el objeto de reducir su radiactividad especifica ante de ser empleado como aditivo.

Mencionamos también que las cenizas de las plantas termo generadoras contienen TENORM por ejemplo: 16 Bq·kg^{-1} de Radio; 112 en Bq·kg^{-1} de Th y 20 en Bq·kg^{-1} de K. Introduciendo estos valores en la ecuación del índice Iγ, resulta que es: I_γ=16/300+112/200+20/3000 = 0,62 menor de 1. Es un material entonces apto para el reciclaje aceptable como aditivos en los materiales de construcción.

Algunos edificios en Europa construidos entre las dos guerras mundiales fueron edificados utilizando el subproducto de las fundiciones de minerales y de las termo plantas con combustible fósil. Hoy en día la tasa de dosis de radiación en edificios estan entre 2,6 y 4,4 mSv·a^{-1}; algunos raramente con valores mayores

Para los edificios de nueva construcción los valores de norma son menores a: 1,3-1,7 mSv·a^{-1}; sigue siendo mayor del valor recomendado de 1mSv·a^{-1}.

Existen otros casos relacionados con los materiales utilizados en la región de Ramsar (Irán) donde se han medido valores de 8,3 kBq·kg^{-1} para

Ra; 50,0 kBq·kg^{-1} para Th y 3.1 kBq·kg^{-1} para K. El índice gamma correspondiente es I_γ = 15,2 kBq·kg^{-1} considerablemente mayor de uno; el material no cumple con las condiciones necesarias para ser empleado en la construcción de viviendas.

La ecuación (9) se modifica para incluir otros radioisótopos si existen condiciones que ameritan una consideración adicional. Por ejemplo, para el caso de materiales contaminados con cesio-137, el índice I_γ se determina por medio la siguiente expresión:

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{700} + \frac{A_{Th}}{500} + \frac{A_K}{8000} + \frac{A_{Cs}}{2000} \qquad 10$$

Las actividades específicas en esta fórmula han sido descritas antes y la magnitud A_{Cs} se refiere al cesio-137 en unidades de kBq·kg^{-1}. La ecuación anterior se aplica para evaluar mezclas con material reciclado empleados solamente en exteriores, por ejemplo, áreas de recreación o deportivas, carreteras y estructuras de la ingeniería civil. El valor máximo del índice I_γ es uno en caso contrario el material no es apto para reciclaje y se debe someter a un proceso de remediación.

Debido a que las familias naturales radiactivas contienen radionúclidos alfa emisores se ha introducido el índice alfa (I_α). Es de particular utilidad en determinar cuándo una edificación requiere de intervención. Se aplica la relación:

$$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200} \ [\mathrm{B}q.kg^{-1}] \qquad 11$$

El parámetro A_{Ra} se refiere a la concentración del $^{226+228}$Ra. El valor máximo recomendado es de 200 Bq·kg^{-1}, y corresponde a un índice de I_α = 1. En algunas zonas se han medido valores con un índice de I_α = 15; son valores excepcionales que han sido medidos en agua contaminada y residuos fluidos industriales por ejemplo en lodos generados durante los procesos de exploración, extracción de petróleo y gas. En la inspección de una vivienda o área de trabajo para evaluar el riesgo radiológico se utiliza el índice S. Es una cantidad adimensional, determinada por la suma de tres magnitudes independientes: tasa de dosis gamma, G_γ en unidades de [μGy], concentración del gas radón en aire C_{Rn} [Bq·m^{-3}] y la tasa de dosis ambiental equivalente de neutrones H°(10) [nSv·h^{-1}]. Esta última magnitud, gene-

ralmente es menor de las otras dos magnitudes; representa la tasa de dosis equivalente que se produciría en una esfera de tejido a 1cm de profundidad expuesto a un campo de neutrones. La magnitud H°(10) es importante en la evaluación del riesgo y la implementación de medidas de seguridad radiológica.

La expresión para determinar el valor del índice adimensional S es:

$$S=\frac{G_\gamma}{2\left[\mu Gy\cdot h^{-1}\right]}+\frac{C_{Rn}}{400\left[Bq\cdot m^{-3}\right]}+\frac{H^\circ(10)}{40\left[nSv\cdot h^{-1}\right]} \qquad 12$$

En el denominador se indican los valores de referencia: 2 $\mu Gy\cdot h^{-1}$ es la tasa de dosis gamma, 400 $Bq\cdot m^{-3}$ es el valor máximo permisible de concentración de radón intramuros y 40 $nSv\cdot h^{-1}$ representa tasa de dosis de neutrones ambientales.

Índice S es un número de referencia para verificar si una edificación seleccionada cumple con la norma ($S \leq 3$) o menos. La relación (12) es particularmente útil en toma de decisión sobre la conveniencia de aplicar acciones de intervención.

Como ejemplo supongamos que, para un edificio existente o terminado de construir, se tenga la sospecha que residuos de lodo rojo han sido utilizados en la fabricación de ladrillos. Para la toma de decisiones se solicita el servicio radiológico local. Después de realizar las mediciones en el informe se indican los siguientes valores de: dosis gamma, concentración de radón y la tasa de dosis por neutrones, $G_c = 0.73\ \mu Sv\cdot h^{-1}$; $C_{Rn} = 100\ Bq\cdot m^{-3}$; H°(10)= 5 $nSv\cdot h^{-1}$ respectivamente. Por la ecuación (12) obtenemos el siguiente resultado:

$$S = \frac{0{,}73}{2} + \frac{100}{400} + \frac{5}{40} = 0{,}314+0{,}25+0{,}125 = 0{,}77 \qquad 13$$

En este particular ejemplo, el índice es S=0,77 y por lo tanto cumple con las condiciones indicadas en las normativas de radio protección y no se requiere intervención.

Las viviendas nuevas se rigen por valores del índice S modificadas; por ejemplo, se requiere que la presencia del ^{226}Ra, tenga una actividad especifica menor de 120 $Bq\cdot kg^{-1}$ y que, al mismo tiempo, el gas (Rn) emanado no contribuya con una actividad mayor de 200 $Bq\cdot m^{-3}$.

En relación con los neutrones ambientales no se establece un valor límite de referencia.

15. Radón: gas radiactivo natural y su impacto en el ambiente

De los 39 isótopos conocidos de gas radón, de importancia son solamente: ^{220}Rn, $^{222, 219}Rn$, estos dos últimos son de menor significación. Este gas por sus características físicas se considera un elemento radiotóxico y es transportado hacia la superficie por fluidos subterráneos desde las rocas, suelo y en general del estrato geológico. Estos pueden caracterizarse por su contenido, por ejemplo, de uraninita, (pechblenda), monacita y torianita (dióxido de torio) que esta presente, como impureza, en los minerales de circón, titanita, gadolinita y betafita $(Ca, U)_2$, $(Ti, Nb, Ta)_2O_6$.

El gas circula dentro de los ambientes por difusión y es de particular interés para dosimetría ambiental; de hecho, el radón-222 y el radón-220 son importantes por contribuir con el 53% de la dosis ambiental. A pesar de disponer de un "$\tau_{½}$" relativamente breve de 3,8 d, filtra en las viviendas y difunde en los edificios pasando por grietas en las paredes, por los sótanos, cimientos y otras aberturas con la posibilidad de que se acumule juntos a productos radiactivos a su vez, alfa emisores. La mayor parte de $^{218,214}Po$, se adhieren a las partículas suspendidas (aerosoles) y al inhalarse se depositan en el tracto respiratorio los alvéolos pulmonares.

Las concentraciones medibles en el ambiente externo se ubican en un intervalo de valores entre 5 y 15 $Bq \cdot m^{-3}$ mientras en las viviendas y ambientes de baja ventilación, el valor en promedio es: 40 $Bq \cdot m^{-3}$. Valores considerablemente más altos se encuentran en zonas con formaciones geológicas específicas o en edificios con determinadas características de construcción.

Los niveles más altos de radón intramuros se han detectado en hogares y lugares de trabajo de Irlanda, con un promedio de 89 $Bq \cdot m^{-3}$ y un valor considerablemente mayor, 650 $Bq \cdot m^{-3}$ en Ramsar, (Irán); esta ciudad es la más radiactiva del mundo. Como curiosidad incluimos el caso de una vivienda en Matraderecske (Hungría), donde se midió una concentración de 6 $kBq \cdot m^3$, debido a que el suelo contiene uranio con una concentración anómala.

Tanto las plantas como los seres humanos pueden incorporar los radioisótopos alfa emisores por lo tanto cualquier biosistema se expone al riesgo de desarrollar neoplasia. Los resultados de los estudios indican que existe una correlación entre la dosis de radón y riesgo de cáncer de pulmón.

De hecho, las partículas alfas energéticas destruyen las estructuras moleculares de los alvéolos dificultando la respiración. Razón por la cual, es clasificado como un elemento carcinógeno humano por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 1988).

Está prevista una normativa que obliga el empleador informar al personal sobre los niveles de la concentración de Rn en el ambiente de trabajo. Mencionamos que los valores de intervención recomendados oscilan entre 70 y 600 $Bq \cdot m^{-3}$, dependiendo de la normativa vigente para cada nación.

Sobre el riesgo de contraer neoplasia pulmonar, por exposición al gas natural radiactivo para los trabajadores y público en general, reportamos algunos valores en la Tabla 9.

Riesgo de cáncer pulmonar por exposición prolongada al radón-222 a un nivel de 1 Bq/m^{-3}

Tabla 9. Valores estimados de contraer neoplasia en relación al gas radón, (http://www.epa.gov).

	Fumadores	No fumadores
Hombres	310×10^{-6}	59×10^{-6}
Mujeres	200×10^{-6}	40×10^{-6}
Población	160×10^{-6}	

La tabla anterior indica el riesgo de cáncer pulmonar para una población de hombres fumadores y no fumadores. En una población de un millón de individuos expuestos a un ambiente en donde el aire tiene una concentración de radón de 1 $Bq \cdot m^{-3}$, un grupo de 310 personas desarrollan cáncer pulmonar, imputable directamente al gas radiactivo ($^{222,220}Rn$ e hijas). Si no son fumadores, entonces el riesgo es pequeño en comparación.

El riesgo de desarrollar neoplasia, es decir crecimiento anormal e incontrolado de células o tejidos en el cuerpo por estar expuesto a las fuentes NORM, cubre un rango amplio de valores por cuanto depende de la concentración, tiempo de exposición y condiciones ambientales entre otros factores más. La ionización por radiación alfa en un medio da origen a una inducción de un daño oxidativo (alteraciones biológicas) en el ADN, e inestabilidad del genoma. Cooke et al., (2003).

Por lo tanto, una alta densidad de ionización se asocia con la neoplasia. Como ejemplo determinamos los casos fatales que se asocian con la concentración de radón en Venezuela.

La Sociedad Anticancerosa de Venezuela (SAV) reporta para el año 2019, 4.592 muertes por cáncer de pulmón en una población 28 millones de personas. El riesgo de desarrollar cáncer es el número de fatalidades dividido por el número habitantes: 164 por millón de habitantes es decir 164 x 10^{-6} equivalente a 164 micro riesgos. Teóricamente de las 4.592 incidencias de cáncer pulmonar, entre el 3% y el 14% (~138 y 643 personas) son imputable, directamente al gas radiotóxico.

Por otra parte, utilizando un criterio basado en la tasa de dosis, el resultado es menor. Entre riesgo R de incidencia de neoplasia y la dosis debida a las radiaciones ionizantes, existe la relación: Rd < 50 microriesgo por mSv. La dosis debida al radón es 1,3 $mSv.a^{-1}$ y asumiendo la igualdad de 50 µriesgo por $mSv.a^{-1}$ entonces la población de Venezuela se expone a un riesgo fatal de cáncer pulmonar de Rd < 65 µriesgo. El valor obtenido es una aproximación y puede variar dependiendo del criterio adoptado, ver: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation-induced_cáncer.

16. Radiactividad TENORM en las actividades petroleras

Los elementos radiactivos presentes en suelos, formaciones rocosas y depósitos naturales de petróleo y minería en general se acumulan en los subproductos derivados de las actividades de extracción de las riquezas del subsuelo. Por lo tanto, durante las operaciones, los equipos de perforación, extracción y transporte pueden contaminarse con el radio e hijas; estas se encuentran con frecuencia con los metales alcalinos, (sulfatos, carbonatos, silicatos, Ca y Ba).

La consecuencia es que los niveles de radiación ambiental se incrementan en zonas de intensa actividad industrial petrolera; de hecho, observable en el Estado Zulia y la Faja Petrolífera del Orinoco.

Es bien conocida la acumulación de materiales radiactivos naturales en el interior de las tuberías de transporte de crudo y productos secundarios. Las ubicaciones más comunes de contaminación NORM se consigue en las tuberías de boca de pozo, las tuberías de producción, las líneas de agua asociadas con separadores, incluyendo equipos y componentes estructurales.

Elevada concentración de minerales en el fluido, generan incrustaciones de sarro formando obstrucciones que con el tiempo hacen inservible los

ductos de transporte. Este fenómeno induce una situación preocupante por dos aspectos:

(i) aumenta la impedancia de la red de tuberías, dificultando la transferencia de crudo al reducirse considerablemente la sección transversal del tubo,

(ii) se forma en su interior incrustaciones con material NORM, que requiere de norma para una acción de intervención por ser un riesgo potencial para el ambiente.

La formación de las incrustaciones de sarro se debe principalmente a los materiales inorgánicas de las sales de radio y compuestos químicos como bario, estroncio y calcio. El $^{228+226}$Ra y sus ocho productos de decaimiento (cinco alfa y tres beta emisores) se acumulan en las obstrucciones con concentraciones de hasta 1 MBq·kg^{-1}. Representa un riesgo durante el transporte, almacenamiento, actividades de limpieza de tuberías u otros trabajos, por liberar partículas de polvo radiactivo. Está asociado a un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, incluidos el cáncer de huesos y de pulmón, (BEIR, 1988).

El radio, en oposición al U y Th, no es retenido en los minerales, se transporta hasta la superficie. Una ilustración del proceso de transporte desde el subsuelo hasta la superficie terrestre, se esquematiza en la Figura 19.

La formación del sarro se debe a la participación de los iones de los elementos Ba, Ra, Sr, Ca, Na entre otros; se encuentran disueltos en el fluido de transporte y en condiciones de menor presión y temperatura se solidifican formando compuestos por medio de las siguientes reacciones químicas:

$$Ca^{+2}+CO_3^{-2} \rightarrow CaCO_3;\ Sr^{+2}+SO_4^{-2} \rightarrow SrSO_4;\ Ba^{+2}+SO_4^{-2} \rightarrow BaSO_4 \qquad 14$$

Estos elementos forman minerales con estructura cristalina, principalmente $BaSO_4$ (barita) y sulfato de radio. Los análisis de muestras de sarro, recolectados de las tuberías de los sitios de almacenamiento de PDVSA, indican que, en un conjunto de tuberías de desecho, la tasa de radiación gamma externa (radio), en algunos casos, supera el valor de 1 mSv.a^{-1}.

Las tuberías, al cumplir su vida útil, son almacenados en lugares abandonados. Generalmente por los costos involucrados se dejan acumular sin particulares consideraciones en relación la conservación ambiental. Un ejemplo es el parque de tuberías, maquinarias y otros insumos almacenados por industrias nacionales, en áreas abiertas donde estan expuestos a la intempe-

ductos de transporte. Este fenómeno induce una situación preocupante por dos aspectos:

(i) aumenta la impedancia de la red de tuberías, dificultando la transferencia de crudo al reducirse considerablemente la sección transversal del tubo,

(ii) se forma en su interior incrustaciones con material NORM, que requiere de norma para una acción de intervención por ser un riesgo potencial para el ambiente.

La formación de las incrustaciones de sarro se debe principalmente a los materiales inorgánicas de las sales de radio y compuestos químicos como bario, estroncio y calcio. El $^{228+226}$Ra y sus ocho productos de decaimiento (cinco alfa y tres beta emisores) se acumulan en las obstrucciones con concentraciones de hasta 1 MBq·kg^{-1}. Representa un riesgo durante el transporte, almacenamiento, actividades de limpieza de tuberías u otros trabajos, por liberar partículas de polvo radiactivo. Está asociado a un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, incluidos el cáncer de huesos y de pulmón, (BEIR, 1988).

El radio, en oposición al U y Th, no es retenido en los minerales, se transporta hasta la superficie. Una ilustración del proceso de transporte desde el subsuelo hasta la superficie terrestre, se esquematiza en la Figura 19.

La formación del sarro se debe a la participación de los iones de los elementos Ba, Ra, Sr, Ca, Na entre otros; se encuentran disueltos en el fluido de transporte y en condiciones de menor presión y temperatura se solidifican formando compuestos por medio de las siguientes reacciones químicas:

$$Ca^{+2}+CO_3^{-2} \rightarrow CaCO_3;\ Sr^{+2}+SO_4^{-2} \rightarrow SrSO_4;\ Ba^{+2}+SO_4^{-2} \rightarrow BaSO_4 \qquad 14$$

Estos elementos forman minerales con estructura cristalina, principalmente $BaSO_4$ (barita) y sulfato de radio. Los análisis de muestras de sarro, recolectados de las tuberías de los sitios de almacenamiento de PDVSA, indican que, en un conjunto de tuberías de desecho, la tasa de radiación gamma externa (radio), en algunos casos, supera el valor de 1 mSv.a^{-1}.

Las tuberías, al cumplir su vida útil, son almacenados en lugares abandonados. Generalmente por los costos involucrados se dejan acumular sin particulares consideraciones en relación la conservación ambiental. Un ejemplo es el parque de tuberías, maquinarias y otros insumos almacenados por industrias nacionales, en áreas abiertas donde estan expuestos a la intempe-

hasta que decaiga una parte considerable de los venenos. Por lo tanto, después de un periodo de tiempo, el combustible se considera "agotado" y obligatoriamente debe ser remplazado por combustible nuclear fresco. Es de notar que, con esta operación de reabastecimiento del núcleo, se extrae casi la misma cantidad de la carga inicial, es decir ~24 ton; la diferencia es que ahora es un material altamente radiactivo (o caliente). Adicionalmente se han originado 3 ton de metales activados utilizados en la estructura de contención del combustible.

(v) *Gestión de residuos***:** El combustible nuclear gastado, (que en realidad contiene todavía material fisil, uranio y plutonio) es almacenado temporalmente para ser luego tratado como residuos radiactivos.

En cada etapa, desde la extracción hasta la elaboración final de las barras de combustible, existe para el ambiente una probabilidad no despreciable de riesgo de contaminación por fuga radiactiva.

Hacemos notar que el accidente de Chernóbil ocurrió por haber reducido el flujo neutrónico por debajo del nivel crítico, es decir el sistema estaba por apagarse. Para evitar que esto ocurriera desactivaron el sistema automático y la intervención de los operadores llevó al desastre conocido.

Para reducir los riesgos relacionados con el combustible agotado se resguarda por un tiempo prudencial en piscinas ubicadas en el edificio del reactor; con esta medida técnica se reduce el riesgo radiológico asociado al transporte. Durante este tiempo el material ha decaído a niveles permisibles para su traslado al destino final.

El ciclo del combustible U-Pu, pone en tela de juicio que hacer con el combustible agotado. Las tomas de decisión al respecto, por lo general se basan más en criterios económicos que en consideraciones ambientales.

En la actualidad se persiguen dos procedimientos:

(i) disposición final en cuevas y minas de sal abandonadas (por ejemplo, Axel I y II de Alemania) con una característica geológica estable; alternativamente,

(ii) reprocesamiento. Si bien sea una etapa tecnológica de alto riesgo para el ambiente, hay interés en recuperar los 230 $kg \cdot a^{-1}$ de plutonio (^{239}Pu) generado anualmente por un reactor del ejemplo anterior, más el ^{233}U y el ^{238}U. Este método es seleccionado cuando se persigue múltiples objetivos:

a - recuperación del material del combustible original ^{238}U,

b - disponer de isótopos altamente fisiles (^{239}Pu),

c- almacenar solamente una fracción de los 20 m^3 de residuos nucleares altamente radiactivos (aproximadamente 3 $m^3 \cdot a^{-1}$).

28. Aspectos a considerar en el ciclo U-Pu: ecosistema desfavorecido

El primer punto desfavorable para la generación nucleoeléctrica utilizando el ciclo ^{235}U-^{239}Pu es la necesidad de fabricar combustible sólido, en forma de pastillas; 18 millones de cilindro de cerámica del tamaño de un dedal (aproximadamente 9 mm de diámetro y 15 mm de largo).

El segundo punto desfavorable se relaciona con los fragmentos de fisión; las masas A_1 y A_2 se producen con valores mayores en comparación con el ciclo del ^{233}U-Th. Las diferencias de masa se manifiestan significativamente también en los tiempos de semidesintegración. A este propósito se presenta la Figura 24. El tercer punto desfavorable es la producción de neutrones por fisión 2.4 para el ^{235}U, menor en comparación con el ^{233}U, (2.5 n por fisión).

En la Figura 24 se resaltan algunos aspectos radiológicos destacados de la fisión, a saber:

(i) El mecanismo de producción y la distribución de los fragmentos de fisión de doble lomo; para cada fisión el valor de la masa de los fragmentos, A_1 y A_2, sigue una curva de Gauss. El núcleo del uranio-235 después de interactuar con un neutrón genera los fragmentos mencionados, 210 MeV de energía y tres neutrones (a veces dos). Estos nucleones, existiendo las condiciones favorables de contorno, garantizan las reacciones en cadena. Una de las condiciones es que por lo menos uno de los neutrones de fisión produzca una nueva reacción; el otro requisito es que el número de neutrones en el tiempo se mantenga constante. En caso de una pérdida o fuga de neutrones inesperada, el número de reacciones disminuye y el reactor se apaga; en el caso opuesto, un aumento provoca una reacción en cadena exponencial, una situación por la cual por diseño interviene un mecanismo automático de parada de emergencia. Mencionamos, que esta importante función de seguridad fue deshabilitada deliberadamente por el personal técnico, encargado de las operaciones del reactor de Chernóbil.

(ii) Los elementos estroncio-90, cesio-137 y yodo-131. Los primeros dos son producidos con mayor frecuencia y por su similaridad química con el potasio, los organismos vivos lo retienen como parte integrante de los electrolitos fluidos. Por otra parte, el yodo-131, si bien permanece pocas

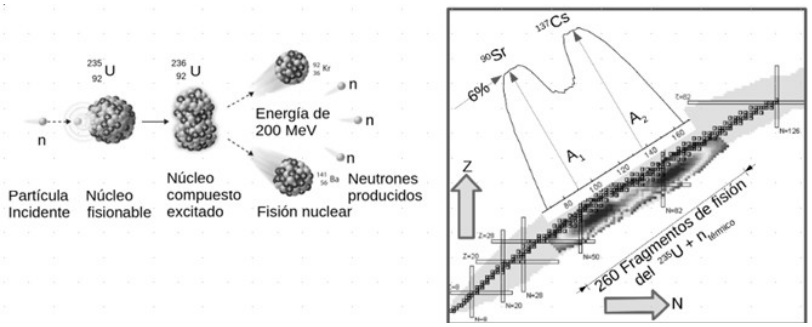


Figura 24. Esquema simplificado de una fisión nuclear del isótopo 235 del uranio; este núclido al absorber un neutrón con energía cinética (térmica) de 0,025 eV. La imagen en la derecha, indica la curva de distribución bidimensional de las masas residuales es decir los nuevos elementos producidos por fisión nuclear alrededor de las masas ($A_1 = {}^{90}Sr$, $A_2 = {}^{137}Cs$) más frecuentemente observados de los 260 radioisótopos producidos. Esta distribución de dos lomos, esta puesta sobre la tabla de los radioisótopos para evidenciar la posición (zonas mas oscuras) de los nucleidos de fisión, Ishizuka et al., (2016).

semanas en el ambiente ($\tau_{½}$ = 8 días), en comparación induce inicialmente una dosis de radiación mayor que la del cesio, como consecuencia, en la fase inicial por una posible fuga (contaminación), es de mayor impacto ambiental por sus efectos biológicos. Hoy en día, la zona de exclusión, con un radio de 30 kilómetros alrededor de lo que queda del edificio del reactor de Chernóbil, el suelo está contaminado por estroncio-90 y cesio-137, que ha puesto por décadas en riesgo las plantas. Los valores de las concentraciones de ^{137}Cs en la capa superficial del suelo estan entre 21,0 y 32,2 $Bq \cdot kg^{-1}$, para el estroncio-90 es en algunas zonas, aproximadamente nueve veces mayor. Recordamos que, en la parte superior de la corteza terrestre, el uranio está en una concentración entre 0,1 y 11 ppm, (suele oscilar entre 10 y 80 $Bq \cdot kg^{-1}$), con un promedio de 2-3 ppm. En Irak está entre 10 y 36 $Bq \cdot kg^{-1}$, en Hungría el promedio es de 30 $Bq \cdot kg^{-1}$ y existe un abanico de valores en la zona de exclusión de Fukushima entre 3 y 1050 $Bq \cdot kg^{-1}$. El torio, generalmente es más abundante que el uranio (245 $Bq \cdot kg^{-1}$).

Retomando la secuencia de la cadena de reacciones, mencionamos que los neutrones de fisión son producidos con un espectro de energía representada por distribución de Watt, la cual se caracteriza por un rango amplio, entre 1 eV y 10 MeV, valor promedio de 2MeV y un pico de 0,7 MeV.

En la mayoría de las plantas nucleoeléctricas, la fisión en cadena se efectúa principalmente con neutrones térmicos 0,025 eV, de esto se des-

prende que es necesario emplear un medio material, por ejemplo agua liviana, agua pesada, grafito, que reduzca la energía de los neutrones de fisión, a los valores lentos o térmicos, (este término se refiere a las moléculas del aire a la temperatura de 20 ^{0}C, que por cierto, se mueven con una energía cinética de 0,025 eV equivalente a una velocidad de 2200 $m \cdot s^{-1}$).

Para completar esta sección se ilustran algunas reacciones de fisión (Figura 25, a la izquierda) destacando el aspecto de la diversidad de fragmentos de fisión. A la derecha se muestran algunos ejemplos de la multiplicidad de radioisótopos que se originan durante la cadena de decaimiento.

Con esta grafica queremos recalcar que los radioelementos originados en la fisión, prácticamente, son familias de radionúclidos (formando los 260 fragmentos de fisión).

En la determinación del impacto ambiental, es necesario entonces, mencionar las cadenas que se generan, estas en algunos casos (ver ^{95}Sr) alcanzan los 15 radioisótopos β^- emisores (incluyendo neutrones por evaporación β^- n).

La complejidad de los fenómenos relacionados con la energía nuclear genera una opinión variable en el público; algunos aspectos son objetos de la sección siguiente.

29. Opinión pública sobre la energía nuclear y la transición a una energía limpia

Tras décadas de experiencia, más de 600 reactores nucleares, tanto de potencia como experimentales, ilustran cuantitativamente los múltiples beneficios de la energía nuclear; estos beneficios han quedado demostrados y hemos sido testigos de los aportes al bienestar de la sociedad.

Sin embargo, existen razones fundadas para oponerse a la fuente nuclear y a la construcción de nuevas plantas nucleoeléctricas de potencia. La razón fundamental es que por diseño funcionan con el problemático ciclo de combustible U-Pu; un ciclo que causa el profundo y grave problema ambiental específicamente por las consecuencias de la explotación, fabricación, reprocesamiento y almacenamiento del combustible.

Los aspectos negativos expresados y publicitados en contra de la energía nuclear son particularmente llamativos para el público en general, estigmatizado por los daños ocasionados y la creencia de que la innovación técnica no puede eliminar el riesgo de errores humanos en la operación de plantas nucleares.

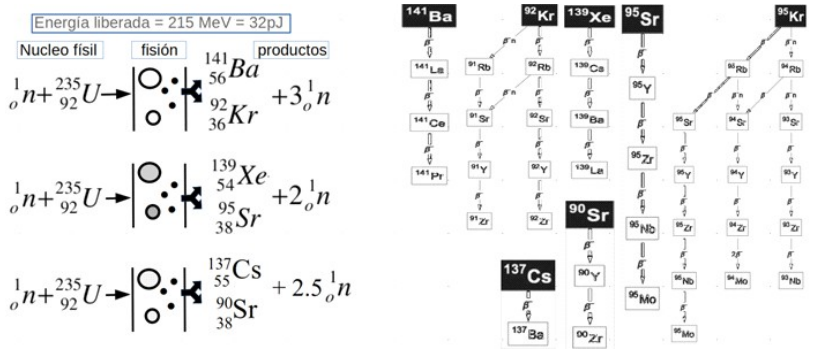


Figura 25. Ejemplos de fisión binaria del ^{235}U con generación de radioisótopos radiactivos. La cadena de decaimiento de los productos a su vez origina nuevos elementos radiactivos, estos son indicados en columnas. La cadena, por ejemplo, del estroncio-95 y criptón-95 se reporta para indicar la complejidad, en relación con la reactividad del reactor y sobre todo la manipulación de los desechos; (https://periodictable.com/Isotopes/054.139/index.full.dm.prod.html).

Adicionalmente los accidentes nucleares, dramatizados y de amplia difusión mediática encontraron eco en los informes de los expertos, tomados como base en las conversaciones a diario.

En algunas oportunidades la desinformación generada sobre lo ocurrido, por ejemplo, en el accidente relacionado con Fukushima ha puesto en sombra significativamente los logros alcanzados por la tecnología nuclear. Además, la secuela de noticias sensacionalistas reforzó en el público general los prejuicios existentes sobre la energía nuclear.

La opinión pública, según las encuestas, indica que estar en contra o a favor es variable e influenciada por las corrientes políticas; frecuentemente se omiten las ventajas intrínsecamente radicadas en el núcleo atómico para favorecer fuentes alternas menos eficientes.

En la actualidad hay de nuevo un interés en la promoción de la fuente energética de origen nuclear apoyado por una iniciativa internacional de particular significación. De hecho, el Parlamento Europeo votó en favor de mantener la energía nuclear en su taxonomía de fuentes sostenibles de energía, abriendo así la participación en los programas de transición energética.

Un impulso significativo se debe a la iniciativa nuclear del gobierno de los Estados Unidos por priorizar una expansión de su capacidad de genera-

ción nucleoeléctrica. La meta es lograr una producción de 200 GW de nueva capacidad neta de energía nuclear para 2050. Entre los aspectos de mayor significación se resaltan:

(i) plazos más cortos para la aprobación de reactores por parte de la Comisión Reguladora Nuclear (NRC),

(ii) incentivo para comenzar a construir pequeños reactores modulares,

(iii) implementación de programas de investigación y desarrollo de los reactores nucleares de IV Generación que deben garantizar altos niveles de seguridad y fiabilidad mediante mejoras adicionales en sus diseños que los hagan más seguros y minimicen el riesgo de accidentes graves y sus consecuencias para el medio ambiente y la salud humana. El logro de estos ambiciosos objetivos también requiere un alto rendimiento y

(iv) formación de recursos humanos. Profesionales que se desempeñen en las áreas de la tecnología nuclear e ingeniería ambiental entre otras actividades relacionadas con la expansión de los programas nucleares.

Es un primer paso importante en cuanto abre las puertas para que los reactores de nueva generación ocupen una posición de relieve en las actuales políticas energéticas. Esta incluye toma de decisiones para orientar la industria hacia el ciclo de combustible $^{233}U - ^{232}Th$, que tiene un peso político debido a su elevada resiliencia a la proliferación de armas nucleares.

Cabe mencionar el hecho que existen varios países, reconocidos o no, como potencias nucleares, y la cuestión de que otros estados se unan a este grupo es un tema que una vez más deteriora la imagen de la fuente nuclear y al mismo tiempo fortalece la opinión negativa.

Casi nunca se menciona en los medios de información masiva, que el problema de la producción de energía nuclear radica en:

(i) la generación de elementos radiotóxicos (americio, neptunio, curio); estos, permanecen en el ambiente durante milenios. Así que es comprensible entonces que tanto la población como los ingenieros ambientalistas favorezcan fuentes de energía alternativas a las nucleares con la esperanza que sean de riesgos, aparentemente, menores,

(ii) el ciclo del uranio-plutonio perseguido por más medio siglo, que ha favorecido la proliferación nuclear con todos sus aspectos negativos,

(iii) la decisión de construir reactores eficientes intrínsecamente orientada hacia la producción de plutonio para la fabricación de explosivos,

(iv) no haber considerado en su justa medida los costos para el ambiente y riesgos inherentes a los combustibles agotados,

(v) guardar silencio sobre la utilización del torio como combustible fértil. Desde la década sesenta, se ha demostrado la factibilidad de reactores con torio, evidenciando los aspectos que facilitarían en superar los obstáculos para la aceptación amplia de la "fuente nuclear" es decir fuente exenta de los graves problemas de los reactores generadores de plutonio.

En relación con este último punto mencionamos, la iniciativa del Foro Internacional de IV Generación (GIF), que propuso, desde el principio del siglo XXI, el desarrollo de sistemas nucleares de cuarta generación. Estas se fundamentan en nuevas tecnologías que caracterizan los seis modelos de reactores que funcionan por medio de:

(i) refrigeración por gas (GFR),

(ii) refrigeración por plomo (LFR),

(iii) sal fundida (MSR),

(iv) neutrones rápidos y refrigerado por sodio (SFR),

(v) refrigeración con agua supercrítica (SCWR), por encima del punto crítico termodinámico del agua (374 °C, 22,1 MPa)

(vi) muy alta temperatura (VHTR).

Este grupo de reactores GEN-IV son por diseño radicalmente diferentes de las generaciones precedentes (Dolan et al., 2014). En particular nos referimos a los reactores de sales fundidas con combustible de torio, con buenas posibilidades de ocupar una posición prominente en la transición energética.

Los reactores con combustible de torio son sistemas de generación de calor en las cuales el Th se transforma por activación neutrónica en ^{233}U; el factor de conversión es de 1 a 35 es decir por cada fisión de uranio-233 se activan 35 núcleos de torio. Estos núclidos después de dos etapas de decaimiento generan uranio fisil, significa que se genera más material fisil de lo que se gasta.

Se estima que las reservas de torio de Cerro Impacto serían suficiente para cubrir la demanda energética, asumiendo 30 GWe, por docenas de siglos a venir.

Venezuela dispone de material fértil para el combustible, experiencia industrial de sales fundidas con la posibilidad de desarrollar otros aspectos

tecnológicos, y emprender el camino nuclear para producir energía. En esta dirección se han realizados algunos estudios de investigación, (op. cit).

30. Reactor nuclear eco-amigable (*ecofriendly)*

Mencionamos, que una instalación para producir energía con combustible nuclear favorece el mantener la calidad de nuestro aire, especialmente si se compara con una central eléctrica quemando combustible fósil. Estas generan contaminantes tóxicos; para una planta térmica de 1 GW las emisiones son: dióxido de azufre (SO_2) 11 mil ton., óxidos de nitrógeno (NOx) 6 mil ton., material particulado (PM), dióxido de carbono (CO_2) y mercurio (Hg) aproximadamente 450 mil ton.

En su complejo, la planta la referida, contribuye a la carga ambiental con la misma cantidad de 100 kg de uranio, es decir con 1 MBq. Además, el medio ambiente se degrada en consecuencia por la emisión de azufre, la lluvia ácida y la llamada niebla tóxica (esmog). Desde este punto vista, el combustible nuclear, se considera una fuente de energía limpia.

En apoyo a esta afirmación queremos reportar un ejemplo de comparación entre la ceniza volátil radiactiva de una planta termoeléctrica de 1MW de potencia, alimentada por carbón en un caso y alimentada con combustible nuclear, en el otro. El contenido de radionúclidos naturales en los combustibles fósiles seguramente es muy bajo, pero el consumo es elevado; la tasa de producción de material radiactivo en cenizas volantes procedentes de la combustión de carbón es de 2700 $Bq \cdot s^{-1}$ con una tasa de dosis de radiación, (carga radiactiva adicional) de 150 $\mu Sv \cdot a^{-1}$. En oposición, una planta nucleoeléctrica con la misma potencia, libera una cantidad de material radiactivo con una tasa de dosis de 0,00025 $\mu Sv \cdot a^{-1}$; la relación entre las tasas de dosis (1 a 600.000) pone en relieve una vez más la importancia de seguir la vía nuclear.

Entendemos que los valores pueden variar debido a que el combustible fósil contiene NORM en concentraciones variables, por lo tanto, los valores reportados son solamente de referencia.

Las centrales nucleoeléctricas generan combustible agotado, mil veces más radiactivos del combustible nuevo. Algunos diseños de plantas GEN-IV tienen la capacidad para quemar los residuos de los reactores actualmente en operación. En particular reactores que utilizan neutrones rápidos, generan energía y al mismo tiempo queman residuos radiactivos generados por otros reactores, por lo tanto, quemando los actínidos de larga vida. Este tipo de reactor, junto con los clasificados como los reactores GEN-IV, for-

man el grupo de sistema de generación de energía nuclear, *eco-friendly* y *environmentally friendly.*

31. Reactor con sales fundidas (*eco-friendly* y *envi-friendly)*

En los años sesenta del siglo pasado, se puso en marcha un sistema basado en el ciclo de combustible (Th-U_{nat}). Se utiliza combustible fluido (LiF-BeF_2-ThF_4-UF_4; 72:16:12:0.4) en un reactor homogéneo de alta temperatura (705°C) en el cual el combustible es utilizado también como refrigerante.

Existe una versión más avanzada, llamado FUJI, desarrollado por Furukawa y colaboradores (décadas de 1980 y 1990). Es de un conjunto estructural con elevada seguridad, baja producción de desecho radiactivo, alta eficiencia energética y ofrece una barrera tecnológica para la proliferación nuclear.

Venezuela, para participar en la transición energética y el desarrollo tecnológico, ha propuesto diferentes modelos de reactores utilizando combustible Th-U; Th-Pu (Dolan et al., 2014).

Algunas industrias están desarrollando reactores con U-Th, de diseño modular (*Small Modular Reactor*) con una capacidad de hasta 300 MWe por unidad. Para recalcar la importancia de la iniciativa mencionaremos China y Rusia como los países en la vanguardia SMR operativos. Otros 19 países han propuesto docenas de conceptos y seguramente algunos serán operativos en un futuro próximo. https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor.

Entre los diferentes diseños en fase preindustrial mencionamos los reactores de sales fundidas con sus aspectos más importantes que son:

(i) Disponibilidad de materia prima en el mundo; torio es 3 veces más abundante que el uranio,

(ii) Utilización eficiente del combustible, la energía aprovechable es 40 veces mayor en comparación al ciclo U-Pu; favorecido por la emisión de un número mayor de neutrones de fisión,

(iii) Capacidad de producir combustible nuclear sin necesidad de reabastecimiento basado en el mecanismo de transformación nuclear material fértil $\longrightarrow$ material fisil,

(iv) Utilización de combustible gastado, generado por otros reactores que contiene cantidades significativas de material fisible, productos de fisión, elementos transuránicos y actínidos menores altamente radiotóxicos.

La Figura 26 evidencia de manera sintética los aspectos positivos de los reactores con ciclo de combustible U-Th (reactor LFTR o LiFTeR) en comparación con los modelos PWR, BWR, VVER o similar, actualmente operativos (con ciclo U-Pu). En la mencionada figura la línea horizontal es de referencia y corresponde a la radiotoxicidad del uranio natural.

Existen otros aspectos que favorecen definitivamente el combustible de Th, a saber:

(i) Es un reactor homogéneo con combustible fluido por ejemplo de sales de LiF (fluoruro de litio) y BeF_2 (fluoruro de berilio) comúnmente conocida como FLiBe con ThF + UF; otra sal además de la mencionada, es LiF–NaF–KF (FliNaK).

(ii) No se necesita fabricar barras de combustible. El fluoruro de uranio enriquecido (uranio-235 o -233) forma una sola solución de sal fundida. Una ventaja importante, en cuanto se reduce la complejidad mecánica de movimiento del combustible, como cambio de la potencia entre otros.

(iii) Funciona con temperatura alta, a presiones casi atmosféricas; una característica de seguridad importante en cuanto se reduce el riesgo de explosión.

(iv) El combustible fluido puede ser utilizado en la transferencia de calor a un intercambiador para producir vapor o con otro fin.

(v) El material fisil es ^{233}U que dispone de A=233, es decir de dos unidades de masa menor que el ^{235}U. En este caso los fragmentos de fisión tienen valores de $\tau_{½}$ de siglos (no miles de años).

El núclido fértil captura un neutrón y decae con doble transición β^+ para generar combustible físil ^{233}U. Existe también la alternativa de una reacción (n,2n) en la cual el núcleo del Th captura un neutrón, pero evapora dos; un proceso particularmente significativo en cuanto intensifica el campo neutrónico y al mismo tiempo, se genera ^{232}U (emite energía gamma de 2,6 MeV). Este aspecto dificulta sobremanera la proliferación nuclear, por lo tanto, se considera un producto disuasorio para la fabricación de explosivos nucleares. De particular importancia para la preservación de la paz y la seguridad internacional.

Las etapas de las posibles transiciones son ilustradas en un cuadriculado de la Figura 27.

El isótopo ^{232}U no es fisil, pero genera un obstáculo tecnológico significativo (resiliencia) a la proliferación nuclear, por la dificultad de manipular $^{233+232}U$, un material mixto de emisores gamma.

Un reactor tipo sales fundidas, MSR, por diseño, es de elevada seguridad. Por ejemplo, un accidente tipo Chernóbil no sería viable ni es posible, por funcionar a baja presión, 0,5 MPa (72 psi, 5,1 $kg \cdot cm^{-2}$) y por disponer de un mecanismo pasivo que modifica la geometría del reactor. Una técnica con bajo riesgo de fuga de material radiactivo de la sal fundida. Este fluido está a la temperatura de 973ºK, (~ 700 ºC) y favorece un mayor rendimiento del sistema termodinámico; el punto de ebullición de 1673°K (1400 °C) ofrece una seguridad adicional.

Los reactores inicialmente podrían arrancar utilizando por ejemplo las ojivas nucleares de plutonio, desincorporados por los tratados internacionales. Es un aspecto que se podría aprovechar para la reducción de la carga ambiental relacionado con el almacenamiento de material altamente radiotóxico, como lo es el plutonio.

En relación a la explotación minera de torita, la contaminación ambiental por la radiactividad de los subproductos de minería es considerablemente menor. La emanación del ^{220}Rn y la presencia de la hija ^{212}Pb, junto otros radionúclidos como: ^{228}Ra, ^{232}Th , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{228}Ac contribuyen en menor grado a la carga radiactiva ambiental en comparación con los del uranio natural.

Otro punto a favor del torio es que la tasa de dosis asociadas con el mineral extraído es muy baja en contraste con el impacto del proceso similar

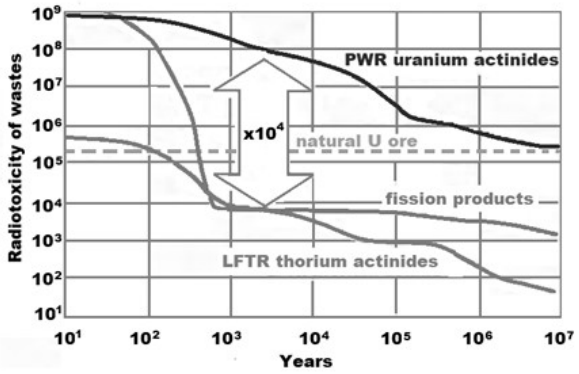


Figura 26. Carga radiactiva comparativa para el ambiente considerando los ciclos de combustible del reactor con agua a presión (PWR) y del reactor con sales fundidas de fluoruro de litio (LFTR o LiFTeR). Se evidencia la diferencia entre las curvas correspondientes a combustible agotado del reactor PWR, a los fragmentos de fisión y la última, distante de la primera curva, en cuatro ordenes de magnitud, es el combustible agotado de un reactor LFTR (reactor a torio con sales de fluoruro). https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_fluoride_thorium_reactor.

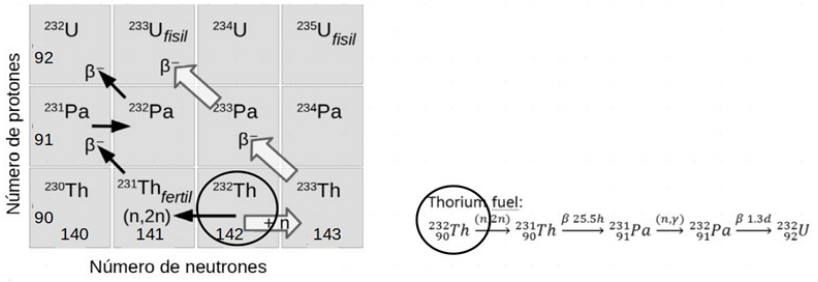


Figura 27. Diagrama parcial de la tabla de los radioisótopos que ilustra las transiciones a partir de cuadriculado que indica el ^{232}Th para generar $^{233+232}$2U. Son posibles dos tipos de reacción (n, γ) con producción de ^{233}Th y la segunda es (n,2n) para ^{231}Th. La primera reacción induce transiciones para la formación de ^{233}U y la otra el isótopo ^{232}U; Karlsruhe Nuclide Chart; https://joint-research-centre.ec.europa.eu.

para el uranio. Una ventaja apreciable que se debe al pequeño valor del tiempo de semidesintegración del ^{220}Rn, que es de 55,6 s.

Se han mencionado los aspectos positivos de la utilización del torio; naturalmente existen también algunos puntos negativos. Estos están relacionados con las sales mencionadas por ser muy corrosivas y la solución es utilizar nuevos materiales y técnicas de producción, aunque se disponga de estudios previos. Es una opinión difusa que, teniendo interés en el desarrollo de reactores con torio, son aspectos superables con las tecnologías actuales como se ha demostrado por los resultados obtenidos de las iniciativas en el campo internacional.

En este aspecto hay buenas posibilidades de que se construyan reactores de GEN-IV, en cuanto existen iniciativas industriales de importancia, motivados por la creciente demanda de energía eléctrica, particularmente en relación con las aplicaciones de modelos de inteligencia artificial. Todas las actividades realizadas en línea dependen de una cantidad grande de servidores remotos y es bien sabido que consumen una cantidad significativa, (2%) del consumo eléctrico global. Es de esperarse que en base al pronóstico de instalar 2 millones de unidades de servidores de IA para 2027, estos consumirían 100 veces más electricidad que Venezuela (6,3 x 10^{11} kW-h).

32. Vulnerabilidad de los reactores nucleoeléctricos en zonas de conflicto armado

El sentido común de los diseñadores de centrales nucleares sugirió excluir enfoques de seguridad en caso de que un reactor estuviese expuesto a

un posible ataque militar. Esta línea de conducta, se fundamenta sobre el principio de que los efectos, afectarían las partes involucradas en el conflicto incluyendo regiones lejanas; es decir un reactor de investigación o de potencia, inherentemente contiene un elemento disuasorio de gran importancia.

Actualmente somos testigos de la alta capacidad tecnológica para albergar con elevada seguridad instalaciones nucleares de potencia que al mismo tiempo garantiza también una eficiente protección radiológica del medio ambiente.

Este logro ha sido obtenido con un proceso gradual en el tiempo desde 1953, el año en que entró en funcionamiento el primer reactor comercial en Obninsk (Rusia).

Las mejoras paulatinamente introducidas desde entonces han sido impulsados por los accidentes nucleares ocurridos por error humano, también coadyuvado por los resultados obtenidos de los estudios sobre los efectos de las radiaciones en los biosistemas y los materiales en general.

Con el estado del arte actual ya están operando reactores de la generación III^{+} y algunas industrias estan por construir centrales nucleoeléctricas de GEN-IV como parte integrante de la cuarta revolución industrial.

Los nuevos diseños incluyen aspectos de seguridad que favorecen la resiliencia en zonas de conflictos armados. Posiblemente es una iniciativa sugerida por las experiencias del pasado. De hecho, hoy en día, nos percatamos que la característica de disuasión de un reactor nuclear operante o menos, se vió disminuida como lo evidenciaron los ataques llevados a cabo contra el conjunto nucleoeléctrico, (ZNPP) de Zaporizhzhia, (Rusia).

En Ucrania se han instalado 15 reactores con potencia entre 440 y 1000 MWe, con tecnología de GEN-II y GEN III^{+}. El factor de mayor preocupación se debe a que en la región hay experiencia relacionada con un desastre nuclear (Chernóbil). De la gravedad del impacto ambiental ya tenemos referencia, y se puede extrapolar cuan graves consecuencias podría tener un ataque militar, tanto para la población como para el medio ambiente.

No obstante, entre los reactores ZNPP, existen algunos construidos bajo el concepto de resistencia más allá de diseño, se generó preocupación en la población con eco internacional que se profundizó después del lanzamiento de cuatro misiles sobre el complejo de ZNPP.

La combinación de sistemas de seguridad, pasiva y activa, con características avanzadas, posiblemente, hubieran podido resistir a los dispositivos

utilizados en el conflicto. Considerando también que la estructura de contención (vasija) dispone de cinco barreras protectoras, una de ellas es de acero y hormigón con espesor de más de 2 m.

Si bien hasta la fecha (2025) como consecuencia del conflicto militar no se han reportado fugas de material fisil ni del "sarcófago" de Chernóbil ni del complejo de Zaporizhzhia, es evidente que el reciente ataque con drones incrementa el sentir del ya elevado nivel de riesgo para las edificaciones de contención, y silos de almacenamiento de los combustibles agotados. En relación con esto, resaltamos la elevada vulnerabilidad de los almacenes en seco; en caso de un ataque de misiles contra las barricas de combustible agotado, causaría una fuga de material radiactivo con consecuencias similares al caso Chernóbil.

Las barricas, contienen casi la misma cantidad de uranio de la carga inicial más fragmentos de fisión con las cadenas radiactivas y los núcleidos transuránicos. Este material se caracteriza por una vida media corta que, en promedio, ronda cerca de los 80 años, pero contienen $^{239+240}$Pu altamente radiotóxicos junto a los actínidos menores de vida media prolongada.

No obstante, aunque sean solamente siete los radionúclidos de fisión con $\tau_{½}$ entre $2x10^4$ y $1,6 \times 10^7$ años, constituyen un porcentaje importante (6%) del total de los productos de fisión. https://energyeducation. ca/encyclopedia/Spent_nuclear_fuel

La central nuclear de Zaporizhzhia contiene 2200 ton de combustible nuclear gastado, y en caso de fuga, 132 ton de material radiotóxico (actínidos) dominarían en el medio ambiente, provocando ionización en la materia, por siglos a venir.

Para evidencia de la vulnerabilidad de los barriles de contención de combustible agotado, almacenados en seco en las cercanías de los reactores, presentamos algunos datos técnicos en la Figura 28.

Los datos técnicos indican que en el interior de la capsula, caben nueve toneladas de combustible agotado; diseñada para su transporte desde el reactor a su destino. El barril se caracteriza por una protección o barrera radiológica, optimizado para cumplir con las normas. Esta unidad difícilmente podría resistir a una explosión, aunque sea de pequeña potencia.

El aspecto de resiliencia es mejorable si se utilizan reactores MSR de cuarta generación. En caso de fuga, los actínidos de vida media, mucho menores, tendrían un impacto ambiental con un factor de 10^{-4} menor.

Seguramente habrá otros conflictos militares y los futuros reactores involucrados, aunque con mejoras tecnológicas, podrán ofrecer ciertamente una mayor seguridad, con la certeza que inevitablemente siempre presenta una instalación nuclear: un aspecto de vulnerabilidad intrínseca.

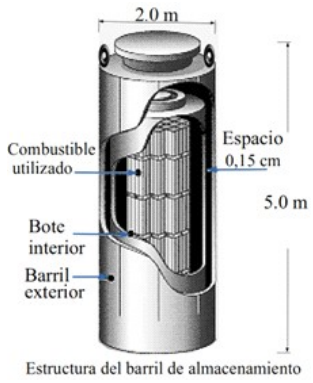


Figura 28. El contenedor de combustible usado en la central de Zaporizhzhia es de doble volumen para favorecer el enfriamiento por medio de la circulación de aire entre las barras con combustible agotado; una solución que mejora la eficiencia del blindaje biológico. (Terranova et al., 2024)

Literatura citada

ARCO MINERO
2022. Consultado en: https://fundaredes.org/informes/2022-ambiente-Arco-Minero-del-Orinoco-y-la-destruccion-de-la-reserva-natural.pdf

MEDINA ARAUJO, S. M. Y P. J. REYES TORRES
2002. Radiaciones ionizantes y efectos sobre la materia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 12: 31-39. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101203.

BARROS, H., M. DIAZ-LAGOS, S. A. MARTINEZ-OVALLE, L. SAJO-BOHUS, J. L. ESTUPIÑAN
2018. Alpha emitter NORM crystal scales in industrial pipelines: A study case. *Jour. of Environmental Radioactivity,* 192: 342–348.

BOLESO, R.
2025. La vida extraordinaria de Stanislao Cannizzaro: Una guía completa sobre su biografía y sus contribuciones científicas. https://www.kedin.es/biografia-de-stanislao-cannizzaro/ . Acceso 2025.

BEIR IV
1988. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: Beir IV. National Research Council (US) Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. Washington (DC).

CASTRO, D., D. PALACIOS, F. URBANI, P. LEÓN. Y L. SAJO-BOHUS
1997. Radón en agua potable del Litoral Central. *Saber*, 9: 89 -95.

CONICIT
1996. Proyecto MPS-RPVII 260076. Radiactividad ambiental. Informe Final. Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación). http://www.nuclear.fis.usb.ve.

COOKE M. S., M. D. EVANS, M. DIZDAROGLU AND J. LUNEC
2003. Oxidative DNA damage: mechanisms, mutation, and disease. *Faseb J.* (10):1195-214. DOI: 10.1096/fj.02-0752rev.

COVENIN
1999. 3496; Disponible en: https://www.sencamer.gob.ve › PNVC-2257-2024

COVENIN
2023. Colores, símbolos y dimensiones de señales de seguridad. (2da. Revisión). *2256:2023. Protección radiológica*. https://www.sencamer.gob.ve › PNVC-2257-2024.

DALRYMPLE, G. B.
2001. The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved. *Special Publications, Geological Society of London*, 190 (1): 205-221.

DAVIS, W., JR.
1977. Carbon-14 Production in Nuclear Reactors. ORNLjNUREGjTM-12, Dist. Category UC-IlContract No.W-7405-eng-26. Office of Scientific and Technical Information. USA.

DAYAH, M.
2024. Tabla Periódica de los Elementos. Disponible en: https://ptable.com/ #Properties

DOLAN, T., I. PÁZSIT, A. RYKHLEVSKII AND R. YOSHIOKA (EDS)
2024. Woodhead Publishing Series in Energy Molten Salt Reactors and Thorium Energy, Second Edition.

DÖRSCHEL, B., V. SCHURICHT, AND J. STEUER
1996. *The physics of radiation protection*. Nuclear Technology Publishing Ashford, Kent, U.K.

EUROPEAN COMMISSION
2025. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/projects-and-activities/ nuclear-safety/radioactivity-environment_en

FEA, G.
1935. Tabelle Riassuntive e Bibliografia Delle Trasmutazioni Artificiali. Nuovo Cimento 12, 1.

FEIGE, Y., B. G. OLTMAN AND J. KATSHER
1968. Production rates of neutrons in soils due to natural radioactivity. *J. Geophys. Res*., 73: 3135-3142

FLEISCHER R. L., P. BUFORD PRICE AND R. M. WALKER
1975. *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*. University of California Press, Berkeley.

GREAVES, E. D.
2011 Impacto, Venezuela´s Thorium Deposit, paper presented at IAEA Technical Meeting on World Thorium Resources from 17–21 Oct. 2011, India.

GUGGENHEIMER, K.
1934. Remarkes sur la Constitution des Novaux Atomiques. I. *Journal de Physique et le Radium* 5- 253; https://en.wikipedia.org/wiki/Table_of_nuclides

HERNÁNDEZ-MORQUECHO, M. A., ACCIARRI, R., ASAADI, J., BACKFISH, M. ET AL.,
2025. Measurements of Pion and Muon Nuclear Capture at Rest on Argon in the LArIAT *Experiment. Phys. Rev. Lett*., 134, 13, 131801-8. DOI 10.1103/ PhysRevLett.134.131801.

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY)
2000. TECDOC 1154. *Irradiation damage in graphyte due to fast neutrons in fusion and fission system*. Vienna, Austria

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY)
2009. Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente. Proceso de rehabilitación de zonas afectadas por actividades y accidentes pasados. Guía de seguridad Nº WS-G-3.1 STI/PUB/1282 ¦ 978-92-0-315009-5. Viena, Austria. http://www-ns.iaea.org/standards/

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY)
2010. Monitorización del medio ambiente y de las fuentes de radiación con fines de protección radiológica. Colección de Normas de Seguridad No. RS-G-1.8. Safety Standards Series. STI/PUB/1216 ¦ 978-92-0-306010-3

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY)

2017. F. Carvalho, S. Fernandes, S. Fesenko, E. Holm, B. Howard, P. Martin, M. Phaneuf, D. Porcelli, G. Pröhl, J. Twining. The Environmental Behaviour of Polonium, Technical Reports Series No. 484. International Agency of Atomic Energy, Vienna, Austria.

IARC (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER)

1988. Investigaciones en Cancer y sustancias cancerígenas. Organización Mundial de la Salud. Naciones Unidas. https://es.wikipedia.org/wiki/Agencia_ Internacional_ para_la_Investigaci%C3%B3n_sobre_el_C%C3%A1ncer

ISHIZUKA, C., S. CHIBA, A. KARPOV AND Y. ARITOMO

2016. Dynamical approach to isotopic-distribution of fission fragments from actinide nuclei. EPJ Web of Conferences. 122. 01003. 10.1051 /epjconf/ 201612201003.

IVIC

2025. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. https://ivic.gob.ve/

JOBBÁGY, V., T. ALTZITZOGLOU, P. MALO, V. TANNER, M. HULT, M ET AL.,

2017. A brief overview on radon measurements in drinking water. *Jour. of Environmental Radioactivity,* 173: 18-24.

KONDO, S.

2011. Hormetic Effects On Human Cancer Mortality Are Inducible Only After Long-Term Irradiation At Low Dose Rates. *Health Physics* 100(3): 340-341. DOI: 10.1097/HP. 0b013e3181e9b120

LAOS, R., Y S. BENNER

2014. El origen de la vida y la primera molécula capaz de replicarse a sí misma. Revista *De Química*, *28*(1-2), 24-33. Recuperado a partir de https:// revistas.pucp.edu. pe/index. php/quimica/article/view/10416.

MAPA RADIOACTIVIDAD

2025. Mapping the spatial distribution of global 137Cs fallout in soils of South America as a baseline for Earth Science studies, Earth Science Review. Disponible en: https://www.cea.fr/ drf/english/Pages/News/Scientific-results/2021/ mapping-radioactive-fallout-from-atmospheric-nuclear-tests-to-study-soils-in-south-america.aspx

PÁLFALVI JÓZSEF AND L. SAJÓ-BOHUS

2015. Cosmic Radiation Detection by Solid State Nuclear Track Detector Technique. *Solid State Phenomena* Vol 238: 16-54. Trans Tech. Publications, Switzerland; doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.238.16

PRÃVÃLIE R.

2014. Nuclear weapons tests and environmental consequences: a global perspective. *Ambio,* 43(6):729-744. doi: 10.1007/s13280-014-0491-1.

ORGEL, L. E.

1994. The origin of Life on Earth. *Scientific American*, 271: 52-61.

RADVANYI, P. AND J. VILLAIN

2017. The Dicover of Radioactivity. *Comptes Rendus Physique*, 18(9): 544-550. https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.008.

RAHMAN, R. O. ABDEL. M. ELMESAWY, I. ASHOUR AND Y. T. HUNG

2014. Remediation of NORM and TENORM Contaminated Sites—Review Article. *Civil and Environmental Engineering Faculty Publications*. 99. https://engagedscholarship.csuohio.edu/encee_facpub/99.

SAJO-BOHUS, L.

1997. Effects of Nuclear Explosions in Venezuela. *Atlantida*. (Anales de la Universidad Simón Bolívar). 37:82-86,

SAJO-BOHUS, L., E. D. GREAVES, A. BENITES, L. RAMIREZ, W. J. CONTRERA, R. ORTEGA Y J. PALFALVI

1997. Niveles de radón en la red de estaciones de meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana. *Atlantida*. Anales de la Universidad Simón Bolívar 36: 10-16.

SAJO-BOHUS L., J. A. LÓPEZ, Y M. CASTRO-COLIN

2023. Historical perspective of a nuclear power plant at risk in a war zone. *Supl. Rev. Mex. Fis.* 4(1):011002 1-10. Available from: https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf-s/article/view/6724.

SAFITRI, R., L. MISKA AND E. YUSIBANI

2018. Simulation calculation of cosmic radiationdose at latitude 0p. The 8th International Conference on Theoretical and Applied Physics. *Journal of Physics*: Conf. Series 1120 (2018) 012074. doi:10.1088/1742-6596/1120/1/012074.

TERRANOVA, M. L. AND O. A. P. TAVARES

2024. Trends and Perspectives on Nuclear Waste Management: Recovering, Recycling, and Reusing. *J. Nucl. Eng.*, 5: 299-317. https://doi.org/10.3390/jne5030020).

UNSCEAR

2000. UN. Sources and effects of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*. Vol. 1; Naciones Unidas, New York, USA.

VILLALBA, M. L, L. COLMENERO-SUJO, H. RUBIO-ARIAS, A. PINALES-MUNGUÍA, M. S. ESPINO VALDÉS, R. DE LA GARZA, H. SILVA-HIDALGO Y O. VIRAMONTES-OLIVAS

2015.Cuantificación de radón (^{222}Rn) en aire y dosis de radiación en baños termales del norte de México. *Nova Scietia*, 7(15):153-167.

WIKIPEDIA

2025. Historia de la Tierra. https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_Tierra Acceso 2025.

WIKINUCLEOS

2025. Nucleosíntesis primordial. https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_primordial. Acceso 2025.

Nota. Muchas de las páginas electrónicas accesadas se encuentran en el texto.

Laszlo Sajo Bohus

Diplomado en Energía Nuclear. Doctor en Física, Especialista e Física Atómica y Nuclear (Milán, Italia). Ph.D. en Física (Birmingham U.K.). Profesor Emérito de la Universidad Simón Bolívar. Miembro Correspondiente (Edo. Vargas) de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. Orden de Mérito (Hungría). Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba. Orden 18 de Julio. Premio al Merito. Profesor Titular de la Universidad SimónBolívar. Investigador nivel IV, CONICIT. Presidente de la Sociedad Venezolana de Protección Radiológica. Vice-presidente de la Sociedad Nuclear de Venenezuela. Miembro electo de la Sociedad de Física Eötvös (Hungría), de la Sociedad Venezolna de Física y de la Sociedad Venezolana de Física Médica. Fundador de la Asoción Latino Americana de Física Nuclear y Aplicaciones. 1170 citaciones y 180 publicaciones.

CAPÍTULO X

LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

1. La transición energética. Definiciones

No existe una definición de transición energética aceptada universalmente y de hecho, existe interpretaciones que pueden ser contradictorias o sesgadas dependiendo de la intencionalidad o los intereses de los autores.

Una definición amplia podría ser:

"*el conjunto de cambios en los modelos de producción, distribución y consumo de energía para hacerlos más sostenibles.*"

El objetivo es transformar un sistema energético basado en los combustibles fósiles en un sistema energético basado en las energías renovables. De hecho, la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas es la principal causa del cambio climático. La combustión de estos combustibles fósiles emite mucho dióxido de carbono. Los combustibles fósiles no son renovables porque, una vez consumidos, sólo pueden regenerarse en una escala temporal geológica de millones de años. El petróleo, el carbón y el gas, por ejemplo, tardaron millones de años en formarse y, por tanto, están presentes en cantidades limitadas.

En general, se acepta por transición energética a la serie de cambios consistentes en la incorporación de nuevas técnicas de generación y aprovechamiento de la energía; cambiando con ellas los vectores energéticos en los que se sustenta el desarrollo de una sociedad.

El Foro Económico Mundial (WEF, 2020.) define una transición energética efectiva como:

"*una transición oportuna hacia un sistema energético más inclusivo, sostenible, asequible y seguro que proporcione soluciones a los desafíos globales relacionados con la energía, al tiempo que crea valor para las empresas y la sociedad, sin comprometer el equilibrio del triángulo energético*."

Así mismo, la ONU (ONU, 2024), define la transición energética como un proceso continuo que requiere estrategias y planificación energética a largo plazo, con un enfoque adaptado al país en la aplicación de tecnologías energéticas apropiadas para alcanzar emisiones netas cero. Sabemos que una trayectoria de emisiones netas cero será más exitosa si se reconocen y mitigan las compensaciones en la oferta y la demanda de energía. Esto significa un enfoque integrado y centrado en las personas, en el que todas las tecnologías energéticas disponibles desempeñan su importante papel en la transformación de los sistemas energéticos locales y nacionales.

2. La Matriz energética. Definición y situación actual

El término "**matriz energética**" se refiere a la combinación de las diversas fuentes utilizadas para satisfacer las necesidades energéticas en una región geográfica determinada. Incluye los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y las numerosas fuentes de (madera y otras bioenergías, hidroeléctricas, eólicas, solares.

Estas fuentes de energía primaria se utilizan, por ejemplo, para generar, proporcionar combustible para el transporte y calentar y enfriar edificios residenciales e industriales.

Se entiende como energía primaria a aquella que se encuentra disponible en la naturaleza y que puede ser empleada para su uso energético directo, es decir sin sufrir modificación física o química alguna o bien ser transformada en energía secundaria. Así pues, la energía secundaria engloba al conjunto de recursos energéticos que resultan de la transformación de las fuentes de energía primaria, de forma tal que tras los procesos pertinentes, los productos finales obtenidos resultan más aptos para para el aprovechamiento energético. (Planet Energies, 2018).

La composición de la matriz energética varía mucho de un país o región a otro y puede cambiar significativamente según el período.

Las variables incluyen:

(i) La disponibilidad de recursos utilizables en el país o la posibilidad de importarlos.

(ii) El grado y el tipo de energía que deben satisfacerse.

(iii) Las decisiones políticas que están determinadas por factores históri cos, económicos, sociales, demográficos, medioambientales y geopolíticos.

Una de las características relevantes del siglo XX y comienzo del siglo XXI es el acelerado crecimiento del consumo energético.

La Figura 1 muestra el crecimiento de las fuentes de energía primaria para suplir las demandas. Se observa un crecimiento sostenido entre el año 2000 y el 2023 de manera cuasi lineal con una tasa interanual de crecimiento del orden de 4,57% hasta alcanzar un consumo equivalente de 172.119,08 TWh en el año 2023. Esto significa que desde el año 2000 el consumo energético se ha multiplicado por casi 1,60. Se muestra también la variación del consumo energético per cápita, el cual ha experimentado un crecimiento sostenido pasando de 17.951,19 KWh/pc por año en 2000 a 21.395,89 KWh/pc en el año 2023, un crecimiento equivalente a casi 20% con un crecimiento interanual del 0,8%.

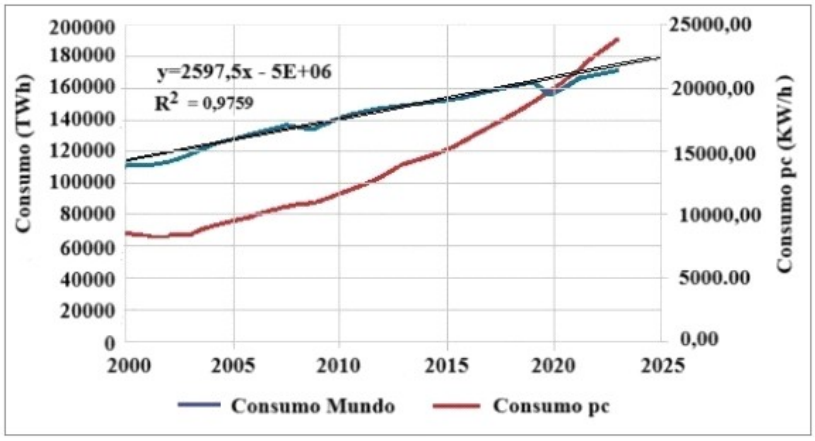


Figura 1. Consumo Mundial de Energía. Total y pc. Fuente: 2024 Energy Institute Statistical Review of World Energy.

En la Figura 2 se muestra como desde mediados del siglo XX ha existido una preponderancia absoluta de las fuentes de energía fósil, tales como carbón, petróleo y gas natural. El predomino de estas fuentes se mantiene aún hasta el año 2023 y se mantienen elevadas tasas de crecimiento. La energía hidroeléctrica también ha mantenido un crecimiento sostenido, pero a tasas sustancialmente menores, esto en parte es debido a que en el mundo se ha creado una matriz de opinión que induce a pensar que los grandes desarrollos hidroeléctricos incentivan múltiples efectos ambientales y eventualmente promoverían movimientos sísmicos en las zonas aledañas.

Adicionalmente, dado que ya existe un desarrollo de este tipo de energía desde comienzos del siglo XX, los principales y mejores sitios ya han sido utilizados.

La energía nuclear tuvo un alto desarrollo hasta el año 1990 pero motivado a la presencia de algunos accidentes ocurridos en plantas importantes Chernóbil (1986), Tokaimura (1999), Fukushima (2011) y a las dificultades en la disposición de los desechos que generan las plantas, su crecimiento se ha visto bastante ralentizado y su participación en la matriz energética mundial ha permanecido relativamente constante en los últimos 40 años. A partir del año 2005 ha comenzado a tener una participación importante las energías renovables, eólica, solar, y biocombustibles, mostrando importantes tasas de crecimiento.

La Figura 2 muestra la variación de las distintas fuentes de energía primaria a nivel global desde el año 2020.

La elevada participación de las energías primarias de origen fósil en la matriz energética mundial para el año 2023, se hace evidente en la Figura 3 donde se muestra una contribución que alcanza hasta el 81%.

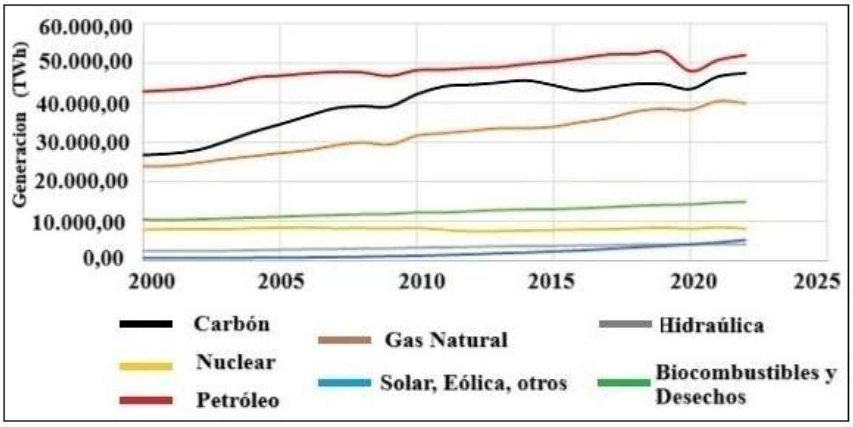


Figura 2. Variación de la Matriz Energética Mundial. Fuente: IEA World Energy Balances 2023.

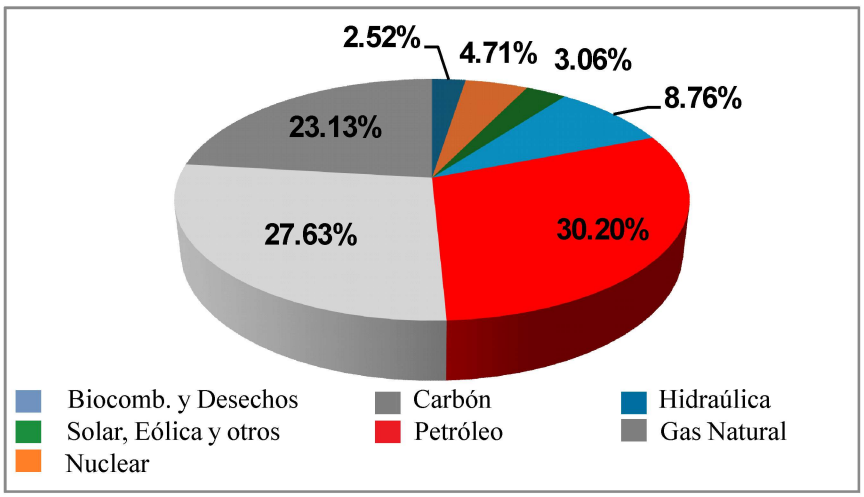


Figura 3. Matriz Energética Mundial 2023. Fuente: IEA World Energy Balances 2023

3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

En la Figura 4 se puede observar la evolución de emisiones de GEI en los últimos años en el periodo 2000-2023. El crecimiento se mantiene sostenido hasta el presente sin que se observe cambios de pendientes que induzcan a pensar que se está llegando a un pico de emisiones.

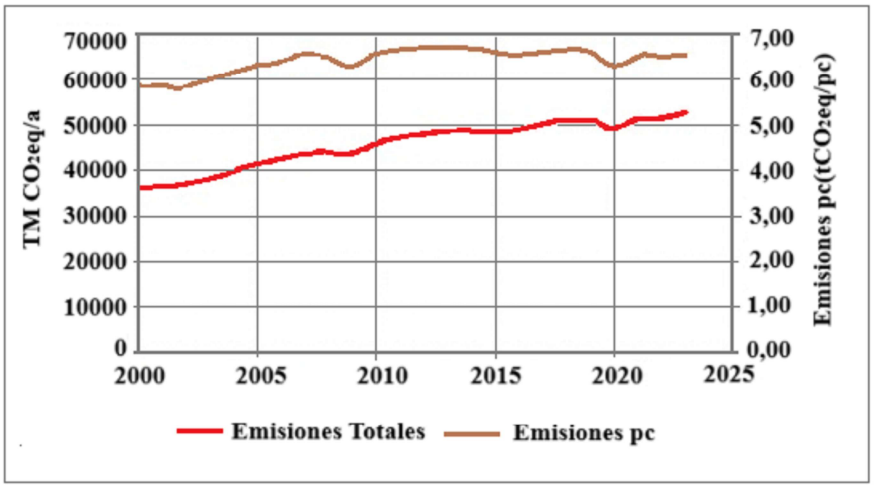


Figura 4. Emisiones Mundiales de GEI. Totales y pc.Fuente: EDGAR 2024 (Emissions Database for Global Atmospheric Research) Community GHG Database.

Solo se produjo una pequeña reducción en el año-2020 producto de la pandemia por el COVID que afectó el mundo, pero luego se retomó la misma tasa de crecimiento. En esta recuperación ha incidido la situación mundial con motivo de la guerra de Ucrania que género una crisis mundial de abastecimiento de energía provocada por la regulación de las fuentes provenientes de Rusia. Esta condición obligó a varios países a reabrir las minas y retomar el uso del carbón como una medida temporal para capear la crisis. Igualmente se incrementó el uso de gas natural como fuente de energía. Para el año 2023 el total de emisiones mundiales de GEI alcanzo el volumen de 52.962,9 $MtCO_2eq$ (EDGAR, 2024)

A partir del año 2000 las emisiones de GEI pc mostraron un incremento sostenido desde 5,86 TCO_2eq hasta alcanzar el valor de 6,56 TCO_2eq en el año 2010. A partir de allí y hasta el presente este valor se ha mantenido relativamente constante con una pequeña disminución causada por la pandemia de COVID en el año 2020. Para el año 2023 las emisiones de GEI pc llegaron a 6,59 TCO_2eq

Las emisiones de GEI están compuestas principalmente por cuatro gases como son el CO_2, CH_4, NO_2 y F Gas. La incidencia de estos gases en el cambio de la fuerza radiativa así como su permanencia en el tiempo en la atmosfera es diferente por lo que es necesario obtener la equivalencia de estos gases en volumen equivalente de CO_2 que es el gas de referencia para la determinación de las concentraciones de GEI (Brander, 2012).

Un equivalente de dióxido de carbono o CO_2, abreviado como CO_2-eq, es una medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios gases de efecto invernadero sobre la base de su potencial de calentamiento global (GWP), convirtiendo las cantidades de otros gases en la cantidad equivalente de dióxido de carbono con el mismo potencial de calentamiento global. (European Environment Agency 2017).

La Figura 5 muestra la variación de estos cuatro gases a partir de 1990. Se observa que el mayor crecimiento corresponde al CO_2, el cual pasa de 23050 a 37097 $MtCO_2e$, un incremento de 14045 $MtCO_2e$, superior al 60% en el periodo 1990-2022. El volumen de emisiones de los otros gases GEI permanece relativamente constante para ese mismo periodo.

La Figura No 6 muestra los valores porcentuales de emisión de los principales GEI para el año 2022.

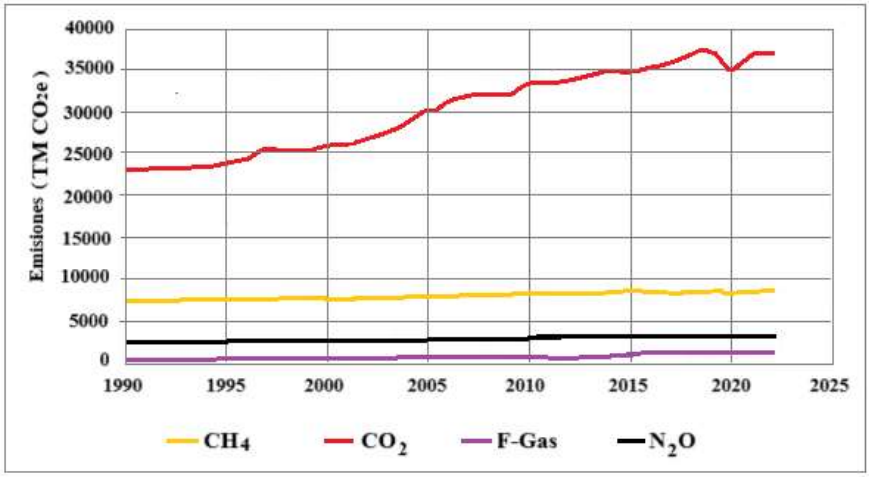


Figura 5. Emisiones de GEI por tipo. Fuente: Climate Watch. World. Sectors/ Subsectors: Total including LUCF. Gases: All GHG. Calculation: Total. Show data by Gases.

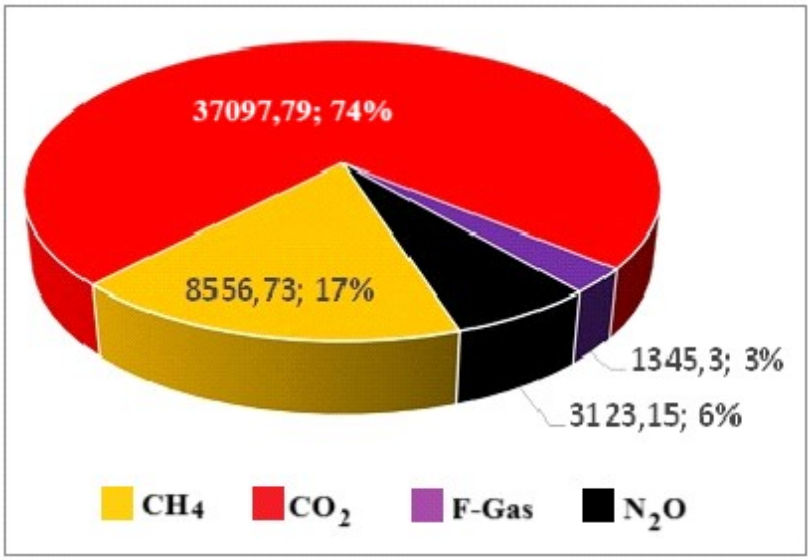


Figura 6. Porcentaje de emisiones de GEI por tipo. 2022. Fuente: Climate Watch. World. Sectors/Subsectors: Total including LUCF. Gases: All GHG. Calculation: Total. Show data by Gases.

Según un nuevo informe de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2024), los niveles atmosféricos de los tres principales gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) alcanzaron nuevos máximos históricos en 2023, lo cual supone otra fatídica advertencia del cambio climático. Nunca antes en la historia de la humanidad la acumulación de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera había sido tan rápida: en solo dos decenios. El último análisis de las observaciones de la Red de Observación *In Situ* de la Vigilancia de la Atmósfera Global (GAW) de la WMO muestra que las concentraciones promedio globales en la superficie de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) alcanzaron nuevos máximos en 2023, con CO_2 en 420,0 ± 0,1 ppm, CH_4 en 1934 ± 2 ppb y N_2O en 336,9 ± 0,1 ppb. Estos valores constituyen, respectivamente, aumentos del 151%, 265% y 125% en relación con los niveles preindustriales (antes de 1750).

La Figura 7 muestra la variación de las concentraciones de CO_2 hasta Julio de 2024, cuando alcanzó el valor de 425,55 ppm (NOAA, medido en el Observatorio Mauna Loa). Se observa un crecimiento lineal sostenido en el periodo 2000-2024 pasando de 369,71 a 425,55, equivalente a un crecimiento del 15%.

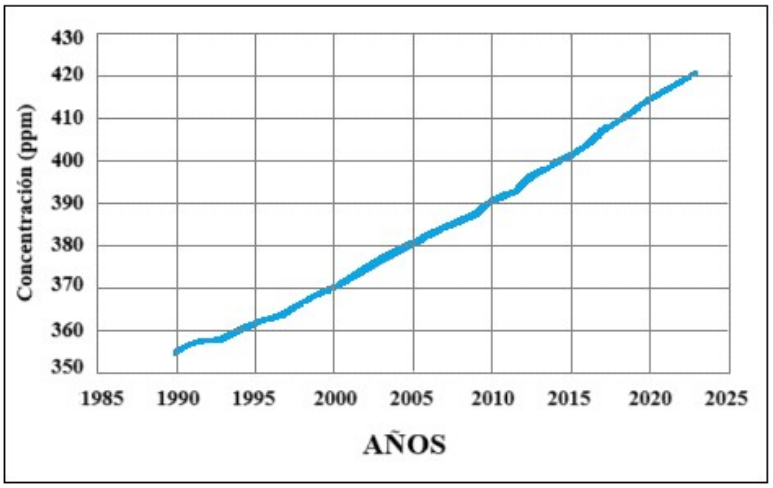


Figura 7. Concentración de CO_2 en la Atmosfera. Fuente: NOAA 2024.

El mayor volumen de emisiones de GEI está concentrado en un pequeño número de países donde destaca el volumen de emisiones de la China que alcanza 15.942 $MtCO_2$ en el año 2023, tal como se observa en la Figura 8 (Edgar 2024).

La Figura No.8 muestra la variación de las emisiones de los 10 países mayores emisores de GEI. Hasta el año 2004 el principal emisor era EEUU pero el crecimiento acelerado de esas emisiones en China a partir del año 2000 le permitió superar rápidamente ese volumen y continuar creciendo a un ritmo sumamente elevado duplicando en volumen de emisiones en tan solo 15 años. Otros países, como la India y Rusia, también han mantenido un crecimiento pero a un ritmo sustancialmente menor. Dentro de este grupo de países solamente EEUU ha podido reducir el volumen de emisiones pasando de 7.203 3 $MtCO_2$ en el año 2000 a 5.960 en el año 2023.

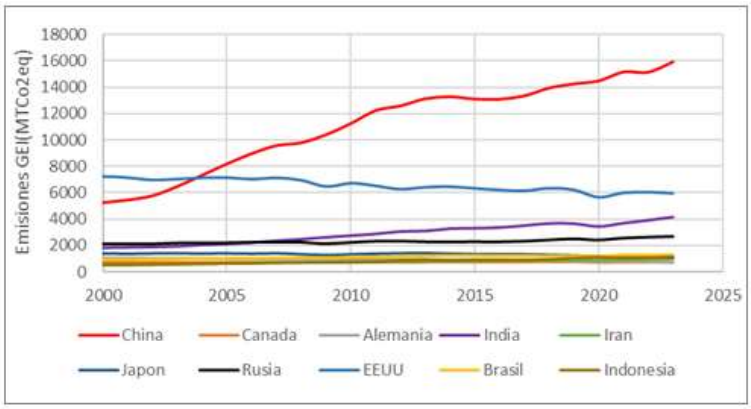


Figura 8. Países mayores Emisores de GEI. Fuente: Edgar, 2024.

La Figura No. 9 muestra el volumen de emisiones de los mayores emisores para el año 2023. Claramente se deduce del grafico que, los principales países emisores son China, EEUU, India, Federación Rusa y Brasil.

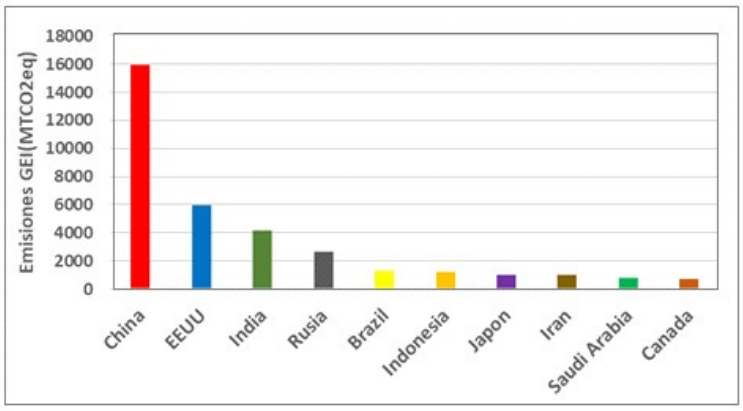


Figura 9. Países Mayores Emisores GEI. 2023, Fuente: EDGAR 2024.

Se observa además que China emite un volumen mayor del doble de las emisiones de EEUU (15.940 vs 5.960 MT CO_2eq) y más de 4 veces las emisiones de la India (4.133 MTCO_2eq). Igualmente se puede deducir que el volumen de emisiones de China es similar a la suma de los siguientes siete mayores emisores de GEI.

3.1. Gases de Efecto Invernadero por sectores

Los diferentes sectores de la economía tienen aportes diferenciales en el volumen total de emisiones de GEI. Tal como se observa en la Figura 10. La mayor participación corresponde al sector de la energía con una participación del 38%, seguido por el sector correspondiente al transporte con un 20,7% y un 17% correspondiente al sector industrial. Luego aparecen los sectores correspondientes a edificaciones y procesos con 8,88% y 8,38% respectivamente (EDGAR, 2024).

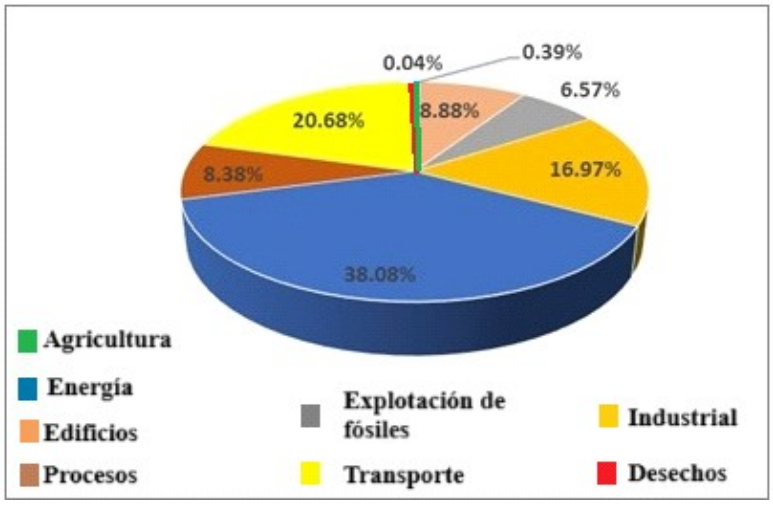


Figura 10. Porcentaje de emisiones de GEI por Sector Fuente: EDGAR, 2024

4. Cambio Climático

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos. Estos cambios pueden ser naturales, debido a variaciones en la actividad solar o erupciones volcánicas grandes. Pero desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. (ONU, s.f.)

La quema de combustibles fósiles genera emisiones de gases de efecto invernadero que actúan como una manta que envuelve a la Tierra, atrapando el calor del sol y elevando las temperaturas. Así, las emisiones principales de gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). Estos proceden del uso de la gasolina para conducir un automóvil o del carbón para calentar un edificio o una vivienda, por ejemplo. El desmonte de tierras y bosques también puede liberar dióxido de carbono. La agricultura y las actividades relacionadas con el petróleo y el gas son fuentes importantes de emisiones de metano. La energía, la industria, el transporte, los edificios, la agricultura y el uso del suelo se encuentran entre los principales emisores.

La temperatura media de la Tierra es ahora 1,1 °C más elevada que a finales del siglo XIX, antes de la revolución industrial, y más elevada en términos absolutos que en los últimos 100 000 años. Los datos muestran que la última década (2011-2020) fue la más cálida registrada. En esa línea, cada una de las cuatro décadas últimas ha sido más caliente que cualquier otra década desde 1850, lo cual es una clara demostración del incremento sostenido de la temperatura global del planeta

Mucha gente piensa que el cambio climático significa principalmente temperaturas más cálidas. Pero el aumento de la temperatura es sólo el principio de la historia. Como la Tierra es un sistema, en el que todo está conectado, los cambios de una zona pueden influir en los cambios de todas las demás.

Las consecuencias del cambio climático incluyen ahora, entre otras, sequías intensas, escasez de agua, incendios graves, aumento del nivel del mar, inundaciones, deshielo de los polos, tormentas catastróficas y disminución de la biodiversidad.

Una vez definido lo que se entiende por cambio climático, conviene resaltar tres aspectos que caracterizan el fenómeno de cambio climático y que permiten hacerse una idea de la naturaleza de la problemática que este entraña

En primer lugar, en cuanto a su extensión geográfica el cambio climático se caracteriza por ser global, es decir por afectar en escala planetaria y sus manifestaciones se pueden hacer sentir en cualquier lugar de la Tierra.

En segundo lugar, en cuanto a su extensión temporal, el cambio climático se caracteriza por ser persistente; es decir, por prolongarse en el tiempo

más allá de la radicación de la causa que lo provocó. Esto significa que la limitación o eventual erradicación total de las emisiones de GEI, no acabara con el cambio climático de manera inmediata porque los GEI emitidos con anterioridad permanecerán en la atmosfera por un lapso de tiempo prolongado.

Tercero, en relación a su evolución temporal, el cambio climático se caracteriza por tener una evolución exponencial en consonancia con las evoluciones demográficas y económicas que han inducido un crecimiento en la demanda energética, la cual a su vez ha producido un incremento en el consumo de combustibles cuya quema se encuentra detrás del cambio climático a través de las emisiones antropogénicas de GEI.

4.1. Aumento de Temperatura

El clima del planeta está cambiando más de prisa e intensamente que en cualquier otra época: la actividad humana es la causa principal. El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales y sociales de la humanidad debido a las consecuencias que puede tener.

(i) La Tierra recibe las radiaciones solares. Una parte de la recibida rebota (se refleja) en la atmósfera terrestre, las nubes y el suelo y regresa al espacio exterior.

(ii) Parte de la radiación de onda corta atraviesa la atmósfera alcanzando la superficie terrestre y calentándola.

(iii) La tierra calentada reemite sus propias radiaciones de calor, denominadas infrarrojas, de onda más larga.

(iv) Parte de las radiaciones infrarrojas escapan al espacio.

(v) Otra parte de esa radiación infrarroja es atrapada y retenida por los gases de efecto invernadero, calentando las capas bajas de la atmósfera y evitando que todo el calor se pierda en el espacio. A mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor retención de calor.

(vi) Esos gases extra incrementan el efecto invernadero natural y provocan el calentamiento global que da lugar a un cambio global en el clima: es el cambio climático.

Este balance energético se muestra en la Figura 11.

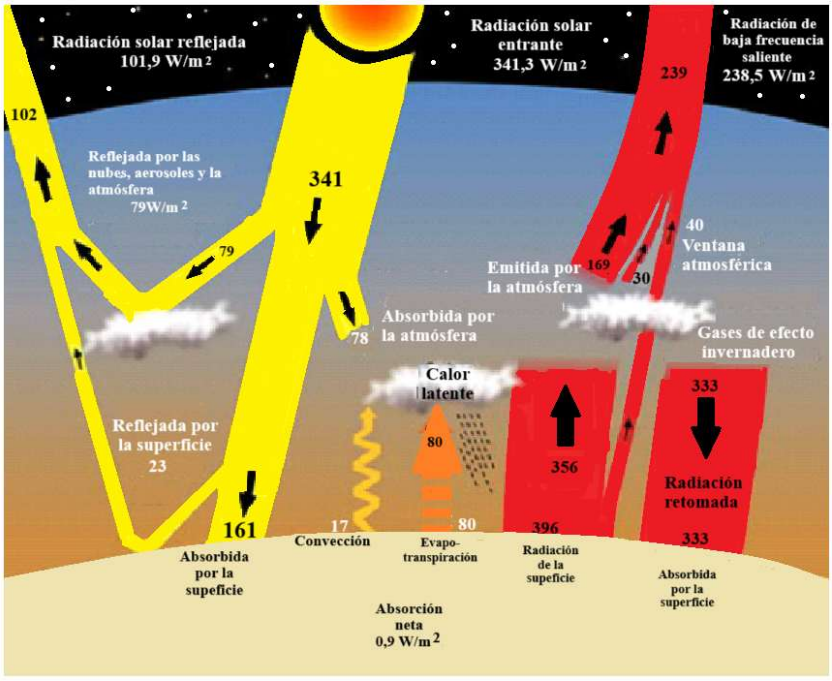


Figura 11. Balance Energético de la Tierra. Fuente: NASA (2010).

4.2. La temperatura del planeta sube: es el calentamiento global

Las temperaturas de la superficie del planeta aumentan a gran ritmo. Basados en el análisis de seis conjuntos de datos de temperatura global la World Meteorological Organization (WMO 2025) obtuvo que la temperatura media anual cerca de la superficie en 2024 fue de 1,55 °C ± 0,13 °C por encima del promedio del periodo 1850-1900. El año 2024 fue el año más caliente en el período de 175 años de observación. El anterior año más caliente había sido el 2023 con una anomalía de 1,45 °C ± 0,12 °C. Cada uno de los años entre 2015-2024 fue individualmente los diez años más calientes del registro. Al igual que cuando tenemos fiebre, unos pocos grados respecto de nuestra temperatura normal nos afectan profundamente, ese aumento de temperatura media es suficiente para que el clima cambie de forma acelerada y profunda.

4.3. La medida justa: el efecto invernadero natural

La causa del calentamiento global es el incremento del **efecto invernadero** natural por el aumento de la concentración en la atmósfera de los gases de efecto invernadero producido por las actividades humanas.

El efecto invernadero "natural" permite la vida en la Tierra tal y como la conocemos, con una "cómoda" temperatura media global de 14,5 ºC al retener parte del calor del Sol que la Tierra devuelve al espacio, como el tejado de cristal de un invernadero. Sin él, la temperatura media sería de -18 ºC y nuestro planeta un lugar estéril y helado.

A partir de la era industrial, el aumento de la concentración de CO_2 (Dióxido de Carbono) y otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, producidos sobre todo por el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) en la producción de energía, en el transporte y en la industria, ha provocado un incremento del efecto invernadero. La tala y quema de bosques y algunos métodos de explotación agropecuaria y otras actividades también contribuyen.

4.4. Acuerdo de Paris

El Acuerdo de París es un **tratado internacional** sobre el cambio climático **jurídicamente vinculante**. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21 en París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016.

Su objetivo es **limitar el calentamiento mundial** a muy por debajo de 2 ºC, preferiblemente a 1,5 ºC, en comparación con los niveles preindustriales.

Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen alcanzar el **máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero** lo antes posible para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo.

El Acuerdo de París es un hito en el proceso multilateral del cambio climático porque, por primera vez, un acuerdo vinculante hace que **todos los países** se unan en una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos (UNFCCC, 2015).

La aplicación del Acuerdo de París requiere una transformación económica y social, basada en la mejor ciencia disponible. El Acuerdo de París funciona en un ciclo de cinco años de medidas climáticas cada vez más ambiciosas llevadas a cabo por los países. En 2020, los países presentaron sus planes de acción climática conocidos como *contribuciones determinadas a nivel nacional* (NDC).

5. Contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC)

En sus contribuciones determinadas a nivel nacional (conocidas como NDC por sus siglas en inglés), los países comunican las medidas que tomarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Los países también comunican en dichas contribuciones las acciones que tomarán para crear resiliencia y adaptarse a los efectos del aumento de las temperaturas.

Esta versión del informe de síntesis de NDC sintetiza información de las 166 últimas NDC disponibles, que representan a 193 Partes en el Acuerdo de París, incluidas las 142 NDC nuevas o actualizadas comunicadas por 169 Partes, registradas en el registro de NDC4 al 23 de septiembre de 2022, que cubren el 94,9 por ciento de las emisiones mundiales totales en 2019, que se estiman en 52,6 Gt de CO_2eq sin incluir uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS5). Un total de 39 Partes han comunicado NDC nuevas o actualizadas desde el 12 de octubre de 2021 (fecha límite para las presentaciones cubiertas en la versión anterior de este informe), 24 de las cuales después de la COP 26. (UNFCCC, 2022) Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report by the secretariat. United Nations. FCCC/PA/CMA/2022/4).

Las emisiones globales totales de GEI (sin UTCUTS) teniendo en cuenta la implementación de las últimas NDC se estiman en alrededor de 53,4 (51,8-55,0) Gt CO_2eq en 2025 y 52,4 (49,1-55,7) Gt CO_2eq en 2030 que son:

(i) En 2025, un 53,7% más que en 1990 (34,7 Gt CO_2 eq), un 12,6% más que en 2010 (47,4 Gt CO_2eq) y un 1,6% más alto que en 2019 (52,6 Gt CO_2eq)

(ii) En 2030, un 50,8% más que en 1990, un 10,6% más que en 2010 y un 0,3% más bajo que en 2019, así como un 1,9% más bajo que el nivel estimado para 2025, lo que indica la posibilidad de que las emisiones globales alcancen su punto máximo antes de 2030.

En comparación, las emisiones totales de GEI de las Partes que comunicaron NDC nuevas o actualizadas se estiman en 45,6 Gt CO_2eq para 2019, y los niveles totales de emisiones de GEI resultantes de la implementación de sus NDC se estiman en alrededor de 46,4 (4,9–47,8) Gt CO_2eq en 2025 y 45,6 (42,7-48,6) Gt CO_2eq en 2030. Estos niveles de emisión son aproximadamente 3,8 (3,3-4,3) por ciento más bajos para 2025 y 9,5 (9,2-9,7) por ciento más bajos para 2030 que los niveles estimados para estos años según

sus NDC anteriores. En términos absolutos, los niveles de emisión proyectados para 2025 y 2030 para este grupo de Partes son ahora más bajos que según sus NDC anteriores en 1,8 (1,5-2,1) Gt CO_2eq y 4,8 (4,3-5,2) Gt CO_2eq respectivamente. En comparación con el nivel de 2010, se estima que las emisiones totales de GEI de esas Partes serán un 12,3% (8,8–15,9%) más altas para 2025 y un 10,5% (3,4-17,6%) más altas para 2030; mientras que, en comparación con el nivel de 2019, se estima que sus emisiones totales de GEI son un 1,6 por ciento más altas (con un rango desde 6.5 menor a 6.4 mayor) para 2030.

5.1.Los NDC siguen siendo insuficientes

Un nuevo informe de la ONU, FCCC (2022) muestra que los países están cambiando el sentido de la curva de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero hacia abajo, pero subraya que estos esfuerzos siguen siendo insuficientes para limitar el aumento de la temperatura mundial a 1,5 grados centígrados para finales de siglo.

Según el informe, las promesas climáticas combinadas de 193 Partes en el marco del Acuerdo de París podrían situar al mundo en la senda de unos 2,5 grados centígrados de calentamiento para finales de siglo.

Además, también muestra que los compromisos actuales aumentarán las emisiones en un 10,6 % para 2030, en comparación con los niveles de 2010. Se trata de una mejora con respecto a la evaluación del año pasado, según la cual los países iban a aumentar las emisiones en un 13,7 % para 2030, en comparación con los niveles de 2010.

La publicación también muestra que los compromisos actuales reducirán las emisiones en un 0,3 % para 2030, en comparación con los niveles de 2019. Esto contrasta con el informe de síntesis del año pasado, que mostraba que las emisiones proyectadas seguirían aumentando después de 2030. Sin embargo, si bien las emisiones ya no aumentan después de 2030, todavía no muestran la rápida tendencia a la baja que la ciencia considera necesaria en esta década.

Como se puede apreciar, es necesario urgentemente incorporar medidas de mitigación y adaptación que permitan mantener los niveles de emisión muy por debajo de lo que se intenta a través de las NDC de los países signatarios del Convenio de Paris. En este sentido, la transición energética presenta una de las mayores incidencias mundiales para alcanzar el objetivo del incremento de temperatura.

6. Transición Energética

El Acuerdo de París, firmado en la COP21 tiene dentro de sus objetivos, el mantener el incremento de la temperatura media en la Tierra muy por debajo de los 2 °C hasta el año 2100 en comparación con la temperatura preindustrial.

Mantener el incremento de la temperatura por debajo de los 2°C es técnicamente factible; sin embargo, el sistema energético mundial debe pasar por una profunda transformación para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, incrementar la eficiencia y incorporar en gran medida a las energías renovables. Una transformación energética mundial de estas características, tomando en cuenta la transformación que ya está en marcha en muchos países, crearía un mundo más próspero e integrador.

Actualmente, la tendencia de las emisiones de GEI apunta a que no se cumpla ese objetivo. Los planes gubernamentales siguen muy lejos de satisfacer las necesidades de reducción de las emisiones. Con las políticas actuales y previstas, el mundo agotaría en menos de 20 años su "*presupuesto de carbono (CO_2)*" relacionado con la energía para mantener el incremento de la temperatura muy por debajo de los objetivos , mientras que los combustibles fósiles , tales como el petróleo, el gas natural y el carbón, seguirían siendo predominantes en la matriz energética durante décadas.

Para cumplir el objetivo de mantenerse por debajo de los 2°C es fundamental actuar de forma inmediata. Las emisiones acumuladas deben reducirse en 47 Gt adicionales has el 2050 en comparación con las políticas actuales y previstas, si se quiere cumplir dicho objetivo

La eficiencia energética y las energías renovables son los principales pilares de la transición energética. Aunque existen diferentes vías para mitigar el cambio climático, las energías renovables y la eficiencia energética son las opciones óptimas para lograr la mayoría de las reducciones de emisiones requeridas con la rapidez necesaria. En conjunto pueden aportar más del 90% de las reducciones de emisiones de CO_2 relacionadas con la energía, utilizando tecnologías seguras, fiables, asequibles y ampliamente disponibles.

Es necesario impulsar las energías renovables y la eficiencia energética en todos los sectores. La cuota total de energías renovables debe pasar del 15% del suministro total de energía a unos dos tercios (67%) en el 2050. Para cumplir los objetivos climáticos, la intensidad energética de la econo-

mía global deberá reducirse a dos terceras partes hasta el 2050 de modo que el suministro total de energía primaria de ese año se situé ligeramente por debajo de los niveles de 2015. Esto solo se puede lograr con una mejora notable de la eficiencia energética.

En 2050, todos los países podrán incrementar notablemente el porcentaje que presentan las energías renovables respecto del uso de energía total. REmap , una hoja de ruta global elaborada por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA 2018) indica que las energías renovables pueden alcanzar y aun superar, el 60% del consumo de energía final de muchos países. Por ejemplo, China podría incrementar su cuota de participación del 7% en 2015 al 67% en 2050. En la Unión Europea esta cuota podría pasar del 17,7% a más del 70 %. India y Estados Unidos podrían ver incrementadas sus cuotas a más del 67%.

IRENA en su Hoja de Ruta (IRENA 2018) indica que La descarbonización del sector eléctrico, con predominio de fuentes de energías renovables es uno de los pilares de la transición hacia un futuro energético sostenibles. Según sus estimaciones, la cuota de energías renovables en el sector eléctrico pasaría del 25% en 2017 al 85% en 2050 sobre todo gracias al crecimiento de la energía solar y eólica. Esta trasformación requeriría nuevos enfoques en la planificación de la red eléctrica, las operaciones en sistemas y mercados y la regulación y política pública. A raíz del apagón ocurrido en España en 2025 se ha hecho una revisión exhaustiva de los sistemas de protección y de los requerimientos de inercia en los sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables. Asi mismo manifiesta que, según sus cálculos propios cálculos, a medida que la electricidad baja en carbono se convierta en el principal vector energético, la cuota de electricidad consumida en los sectores de uso final tendría que duplicarse, pasando del 20% en 2015 al 40% en 2050. Los vehículos eléctricos y las bombas de calor serán cada vez más frecuentes en la mayor parte del mundo. Como conclusión, en lo que respecta a la energía final, la electricidad renovable representaría poco menos del 60% del uso total de energía renovable, dos veces y media su aportación al consumo total de energía renovable en la actualidad. (IRENA.2018. Transformación Energética Mundial. Hoja de Ruta hasta el 2050. Agencia Internacional de Energías Renovables. Abhu Dabi)

El sector eléctrico ha realizado importantes avances en los últimos años pero el ritmo de progreso debe acelerarse. En 2017, el sector eléctrico sumo 167 GW de capacidad energética renovable en todo el mundo, lo cual supone un crecimiento del 8,3% con respecto al año anterior y la continuación de

las tasas de crecimiento anteriores con una media del 8% anual desde el 2010. La generación de electricidad renovable marco un record con una cuarta parte de la generación de electricidad mundial. Las instalaciones solares y eólicas también alcanzaron nuevos máximos históricos con la adición de 94GW de energía fotovoltaica y 47 GW de energía eólica, incluidos 4 GW de parques eólicos marinos. Los costes de generación de electricidad renovable siguen bajando.

Los sectores de industria, transporte y edificios tendrán que utilizar energía renovable. En esos sectores debe haber una importante presencia de fuentes renovables, con un incremento del suministro de electricidad renovable pero también de energía solar térmica, la geotermia y la bioenergía. La electricidad renovable tendrá un papel cada vez más importante pero los combustibles renovables y los usos directos que hacen falta para el calor y el transporte representan una gran contribución. En este sentido, la biomasa podría generar aproximadamente dos terceras partes de la energía renovable destinada a producir calor y combustible, la solar térmica una cuarta parte y la geotermia y otras fuentes renovables el resto.

La eficiencia energética es crítica en el sector de edificios. Sin embargo, la lentitud con la que mejora la eficiencia energética en el sector, debido en gran parte a que la tasa de renovación de los edificios es muy baja, tan solo del 1% anual del parque inmobiliario, sigue siendo un problema. Es necesario triplicar esta tasa de renovación. En el sector industrial, la elevada demanda energética de determinadas industrias, el elevado contenido de carbono de determinados productos y las elevadas emisiones de los procesos obligan a encontrar soluciones novedosas y adoptar el concepto de ciclo de vida.

El informe de IRENA, *Transformación Energética mundial: Hoja de Ruta hasta 2050 (2018)* menciona seis ámbitos prioritarios en los que deben actuar los responsables de las políticas públicas y las tomas de decisiones:

1. Aprovechar las potentes sinergias entre la eficiencia energética y las energías renovables. Esta debe ser una de las máximas prioridades de la política energética porque su efecto combinado puede satisfacer rentablemente el grueso de las necesidades de descarbonización relacionadas con la energía para 2050.

2. Planificar un sector eléctrico en el que una elevada proporción de la energía sea renovable. Para transformar el sistema eléctrico global será necesario un cambio fundamental en la forma de concebir y operar los sis-

temas energéticos. Para ello será necesario realizar una planificación del sistema eléctrico a largo plazo, así como formular políticas más holísticas y adoptar enfoques más coordinados entre sectores y países. Esto es crucial en el sector eléctrico, donde la implantación oportuna de las infraestructuras y la reformulación de las normativas sectoriales son condiciones indispensables para una integración rentable de la generación solar y eólica a gran escala. Estas fuentes de energía serán la columna vertebral de las redes eléctricas para 2050.

3. Aumentar el uso de la electricidad en el transporte, los edificios y la industria. Deben integrarse las normas de ordenación urbana y construcción, así como otros planes y políticas, en particular con el fin de hacer posibles una descarbonización exhaustiva y rentable de los sectores de transporte y generación de calor mediante electrificación. Sin embargo, la electricidad renovable es tan solo parte de la solución para estos sectores. Cuando no sea posible electrificar los servicios energéticos en el transporte, los edificios y la industria, será necesario aplicar otras soluciones como la bioenergía moderna, la energía solar térmica y la geotermia. Para acelerar la implantación de estas soluciones será esencial establecer un marco político que lo facilite.

4. Fomentar la innovación en todo el sistema. Del mismo modo que el desarrollo de nuevas tecnologías ha desempeñado un papel esencial en el progreso de las energías renovables en el pasado, será necesario que prosiga la innovación tecnológica en el futuro para el éxito de la transición energética mundial. Las iniciativas de innovación deben abarcar todo el ciclo de vida de una tecnología, incluyendo las fases de demostración, implantación y comercialización. Pero la innovación es mucho más que la investigación y el desarrollo tecnológico (I+D). Debe incluir nuevos enfoques de gestión de los sistemas energéticos y de los mercados, así como nuevos modelos de negocio. Para conseguir las innovaciones que necesita la transición energética, los gobiernos nacionales, los sectores internacionales y el sector privado deben actuar en forma intensiva, enfocada y coordinada.

5. Armonizar las estructuras socioeconómicas y la inversión con la transición. Es necesario un enfoque integrado y holístico para armonizar el sistema socioeconómico con los requisitos de la transición. Para realizar la transición energética hacen falta importantes inversiones complementarias a la inversión necesaria para la adaptación al cambio climático que ya está en marcha. Cuanto menos tarde en materializarse la transición energética, menores serán los costos de adaptación al cambio climático y el trastorno socioeconómico. El sistema financiero debe armonizarse con mayores re-

quisitos de sostenibilidad y transición energética. Las inversiones que se tomen hoy definirán el sistema energético las próximas décadas. Es preciso reasignar con urgencia los flujos de inversión de capital a las soluciones bajas en carbono para evitar que las economías queden atrapadas en un sistema energético intensivo en carbono, así como para reducir al mínimo los activos en desuso. Es indispensable establecer rápidamente marcos políticos y reglamentarios que ofrezcan a todas las partes interesadas relevantes una garantía clara y firma a largo plazo de que los sistemas energéticos se transformaran para cumplir objetivos climáticos con incentivos económicos que reflejen debidamente los costos ambientales y sociales de los combustibles fósiles y eliminando obstáculos para acelerar la implantación de soluciones bajas en carbono.

6. Velar por que los costos y beneficios de la transición se repartan de forma equitativa.. El alcance de la transición necesaria es tal que solo se podrá conseguir por medio de un proceso colaborativo en el que se implique a toda la sociedad. Para conseguir una participación efectiva, los costos y beneficios de la transición energética deben repartirse equitativamente y la propia transición debe llevarse a cabo con justicia. El acceso universal a la energía es un componente esencial de una transición justa y equitativa. Aparte del acceso a la energía, los servicios energéticos disponibles presentan actualmente enormes desigualdades en distintas regiones. El proceso de transición solo se completará cuando converjan los servicios energéticos en todas las regiones.

7. Una transición energética justa

Navarro Leach (2020) da a entender que, el concepto de transición energética nace del mundo técnico-científico, para pasar a ser utilizado en el campo de los grandes eventos de debate a nivel internacional y luego pasa a ser un término utilizado en grandes declaraciones de tipo político.

Para definirlo hay que tener en cuenta que se parte de un sistema energético con altas emisiones de CO_2, y hay que ir a otro sin emisiones de CO_2. Para pasar de una realidad a otra, no vale con poner los dos modelos a competir sin más, hace falta una hoja de ruta, un modelo de transición. Esa es la clave, convenir primero que es socialmente bueno pasar a un modelo sin emisiones de CO_2.

Al final el sistema de energía sin emisiones de CO_2, con todas las instalaciones ya amortizadas, probablemente sea más barato e inmune a intromisiones geopolíticas, Europa o España serán más autosuficiente. En

este caso lo central es cómo hacer la también en ver cómo se desincentiva la producción del CO_2 y ver cómo se compensan los sobre esfuerzos de todas las partes.

Para llevar a cabo esta renovación energética hace falta inversión en instalaciones e infraestructuras y harán falta incentivos económicos públicos, pero hay que tener en cuenta que creará beneficios compensatorios a medio y largo plazo.

En la transición energética no basta con pasar de energías no renovables a la utilización de energías renovables, es necesario a su vez conseguir una nueva manera de gestión de la energía donde debe primar el ahorro y la eficiencia energética y donde no se vea disminuida la calidad del servicio.

Paulitz, Henrik (2006) hace una acotación relevante en cuanto a la democratización y descentralización del sistema energético para la transición y dice que para conseguir la transición energética, si nos centramos en el caso de la electricidad, propone realizar un cambio desde un modelo de generación "centralizada" (que va desde la generación por grandes centrales de producción, a través de una gran red de transporte, para vender la energía a unos distribuidores que la llevan hasta los consumidores finales) a otro de generación "distribuida" o "descentralizada" que consiste en la generación de energía por pequeños productores (*prosumers*[1]) que muchas veces producen lo que necesitan para consumir la energía ellos mismos o para consumidores muy cercanos sin necesitar, al menos teóricamente, la red de transporte, sólo la de distribución.

Y complementa el análisis añadiendo que la transición energética pretende conseguir una "democratización" de la energía. Se pasa de una industria energética tradicional, con grandes centrales eléctricas centralizadas o grandes refinerías de petróleo, que actúan en el mercado como un oligopolio y que consiguen mejores precios, no por el ahorro de recursos, sino por economías de escala frente a una suma de muchos actores que utilizan las energías renovables que pueden instalarse de forma descentralizada, produciendo cerca e involucrando a los ciudadanos en la producción de la energía (parques eólicos, parques solares o sistemas fotovoltaicos que pueden incluso ser instalados por individuos o pequeñas comunidades)

Esta forma renovada de suministro de energía descentralizado nos ayuda, no solo a sustituir las energías fósiles por las renovables, lo que es bueno para frenar el cambio climático y la descarbonización, sino que también

sustituir el elevado consumo de combustibles fósiles en el país y permitiría la liberación de esos volúmenes para la exportación, con la consiguiente entrada de divisas.

El Gobierno de España (Gobierno de España.2019) en su documento *Estrategia para una Transición Justa* expresa que las diferentes normativas sobre la transición energética indican que esta debe ser "justa". Esto quiere decir que en dicha transición se cumplan las reglas de mercado para no ocasionar pérdidas a las empresas. Tampoco puede subir demasiado el precio de la energía para no crear daños a los consumidores y al tejido productivo. Hay que compensar esfuerzos, esta es la filosofía que hay detrás del término "transición justa".

El Gobierno de España (Gobierno de España 2018) como colofón de su exposición de motivos del Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre,

> "*medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores*".,

concluye como resumen de su argumentación que la transición energética está caracterizada por la descarbonización, el ahorro, la eficiencia, la descentralización de la generación, la participación más activa de los consumidores y un uso más sostenible de los recursos.

Literatura Citada

BRANDER, M., AND G. DAVIS

2012. Greenhouse Gases, CO_2, CO_2e, and Carbon: What Do All These Terms Mean? Econometrica, White Papers. *Econometrica*. /https://ecometrica.com/assets/GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1.pdf.

EDGAR (EMISSIONS DATABASE FOR GLOBAL ATMOSPHERIC RESEARCH)

2024. Community GHG Database (a collaboration between the European Commission, Joint Research Centre (JRC), the International Energy Agency (IEA), and comprising IEA-EDGAR CO2, EDGAR CH4, EDGAR N2O, EDGAR F-GASES version EDGAR_2024_GHG (2024) European Commission.

EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY)

2017. Glossary, based on: IPCC Third Assessment Report, 2001. Carbon dioxide equivalent. https://www.eea.europa.eu/help/glossary#c4=10&c0=all&b_start=0.

GOBIERNO DE ESPAÑA. MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, JUSTICIA Y RELACIONES CON LAS CORTES.

2018. Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.BOE núm. 242, de 06/10/2018.

GOBIERNO DE ESPAÑA. MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

2019. Estrategia para una Transición Justa. https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/transicion-justa.html

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)

2023. World Energy Balances. Paris. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY)

2018. Transformación Energética mundial: Hoja de Ruta hasta 2050. *(Transforming the energy system – and holding the line on the rise of global temperatures, Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi (ISBN 978-92-9260-149-2).*

LAN, X., P. TANS AND K. W. THONING

2025. Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version Tuesday, 05-Aug-2025 15:05:29 MDT https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07

NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION)

2024 Global Monitoring Laboratory. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO_2) https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html

NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION)

2010. The Earth's Radiation Budget. Science Mission Directorate. http:// science.nasa.gov/ems/13_radiation budget.

NAVARRO LEACH, C.

2020. La transición Energética. Trabajo Final de Grado. Universidad de Zaragoza. España.

ONU (UNITED NATIONS ORGANIZATIOON)

2022. Synthesis report. FCCC/PA/CMA/2022/8 (2022. Long-term low-emission development strategies). 26 October 2022.

ONU. FCCC/PA/CMA/

2022. Long-term low-emission development strategies Synthesis report by the secretariat. Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement 26 October 2022. https://unfccc.int/documents/619180

ONU (UNITED NATIONS ORGANIZATIOON)

(s.f). Acción por el clima. https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change).

ONU (UNITED NATIONS ORGANIZATIOON)

2024. Our work areas. Energy transition. https://www.undp.org/energy/our-work-areas/energy-transition

PAULITZ, H.
2006. Revolutionierung der gesellschaftlichen Verhältnisse durch dezentrale Energiegewinnung. *Solarzeitalter*, 4

PLANET ENERGIES
2018. What is the Energy Mix?. https://www.planete-energies.com/en/media/article/what-energy-mix

UNFCCC (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATIC CHANGE)
2015. El Acuerdo de París. https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris.

WEF (WORLD ECONOMIC FORUM)
2020 Energy Transition 101. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Transition_ 101_2020.pdf

WEF (WORLD ECONOMIC FORUM)
2020. Fostering Effective Energy Transition. 2020 edition. https://www3.eforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2020_Edition.pdf

WEF (WORLD ECONOMIC FORUM)
2020. Energy Transition 101: Getting back to basics for transitioning to a low-carbon economy Briefing Paper. July 2020. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Transition_101_2020.pdf

WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION)
2022. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021. *Greenhouse Gas Bulletin.* No. 18–26.

WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION)
2023. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. *Greenhouse Gas Bulletin*. No. 19-15 https://wmo.int/publication-series/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-19.

WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION)
2024. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023. *Greenhouse Gas Bulletin.* No. 20-28.

(Footnotes)

[1] En el ámbito energético, un prosumidor (prosumer) es aquel que consume energía eléctrica y además la produce.

Jesus Augusto Gomez

Ingeniero Civil. UCV 1967. Master of Science (Water Reosurces Planning) Colorado State University. Gerencia para Ingenieros. IESA . Consultor en Hidroelectricidad, Energías Renovables y Cambio Climático. Miembro Correspondiente por estado Sucre, Academia de Ingeniería y el Hábitat. Integrante y ex presidente de la Comisión de Energía. Miembro de la Comisión Académica Española de la ANIH. Subcomisión de Energía. Miembro de la Secretaria Académica para el Cambio Climático, Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (ACFIMAN). Coordinador del Grupo de Trabajo de la Ciencia del Cambio Climático. Miembro del Grupo Orinoco.

CAPÍTULO XI

MOVILIDAD URBANA

1. Introducción

La movilidad urbana constituye uno de los grandes desafíos y oportunidades para la sostenibilidad ambiental, la equidad social y el desarrollo económico de las ciudades en el siglo XXI. El acelerado proceso de urbanización ha transformado las dinámicas espaciales, sociales y ambientales de las ciudades, impactando la gestión ambiental, la calidad del aire, el consumo energético y el bienestar público (MobiliseYourCity, 2023).

De acuerdo con el World Cities Report 2024 de ONU-Hábitat, la tendencia global a la urbanización supone que hacia 2050 la mayor parte de la población mundial residirá en ciudades, intensificando así la presión sobre las infraestructuras de movilidad y sobre los recursos medioambientales. El informe enfatiza que la respuesta a estos retos demanda enfoques integrados e innovadores, capaces de reconciliar el desarrollo económico con la sostenibilidad y la resiliencia urbana (ONU-Hábitat, 2024). Ante este contexto, los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) emergen como una estrategia esencial, diseñada para avanzar desde la eficiencia operativa hacia la accesibilidad, equidad e inclusión, y priorizando la calidad de vida de los ciudadanos (MobiliseYourCity, 2023; López et al., 2022).

El caso de la Zona Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México, ilustra cómo los retos y oportunidades de la movilidad urbana se vuelven aún más complejos en contextos de crecimiento desigual, rezago en cultura vial y limitaciones históricas en la infraestructura de transporte. García y Ramírez (2023) destacan que la movilidad urbana en dicha área es fundamental para asegurar una calidad de vida digna, y advierten sobre la necesidad de generar estrategias de planeación basadas en los requerimientos reales de la población. Su estudio aplica indicadores respaldados por organizaciones internacionales alineados con la Agenda 2030, y subraya que involucrar a los actores de significación, gobierno, sociedad civil y ciudadanía, resulta indispensable para diseñar e implementar políticas públicas de movilidad sostenibles y eficaces.

Estos autores enfatizan el papel de las competencias ciudadanas como parte del enfoque contemporáneo de movilidad sostenible, donde la transformación no solo depende de la infraestructura y las tecnologías, sino de la participación social informada, la gobernanza colaborativa y la integración de recomendaciones de organismos internacionales para garantizar el acceso universal y la equidad en el espacio urbano.

Asimismo, la movilidad urbana sostenible requiere articular políticas de transporte, uso de suelo, salud y ambiente, a través de marcos normativos inclusivos, evaluación permanente, y coordinación interinstitucional, tal como han documentado estudios y organismos multilaterales (López et al., 2022; MobiliseYourCity, 2023).

En suma, la movilidad urbana contemporánea debe entenderse como un proceso técnico, político, social y cultural indispensable para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial el ODS 11 "Ciudades y comunidades sostenibles" y el ODS 13 "Acción por el clima" (United Nations [UN], 2015; MobiliseYourCity, 2023), y como aspecto estratégico para el bienestar en contextos urbanos cada vez más complejos y dinámicos.

2. Concepto y evolución de la movilidad urbana

1.1 Definición y dimensiones de la movilidad urbana

La movilidad urbana se entiende, en términos amplios, como el proceso mediante el cual las personas y bienes se desplazan dentro del espacio urbano por razones relacionadas con actividades laborales, educativas, comerciales, sociales y recreativas; estos desplazamientos se efectúan por una variedad de modos de transporte, desde la marcha a pie y la bicicleta, hasta vehículos motorizados privados y sistemas de transporte público colectivo (ONU-Hábitat, 2024; Italia, 2023). En la literatura especializada, la movilidad ha superado su enfoque tradicional "de flujo" (número de viajes o velocidad de desplazamiento) y avanza hacia el paradigma de accesibilidad, definido como la capacidad efectiva de todos los grupos de la población urbana para alcanzar oportunidades, servicios y bienes esenciales, independientemente de sus condiciones socioeconómicas (Banco Mundial, 2024a; Ferrara de Giner et al., 2019).

Este cambio de enfoque implica reconocer que la movilidad es una función del diseño urbano, la localización de los servicios, la distribución territorial y la equidad social, así como de la calidad y eficiencia de los sistemas de transporte (Italia, 2023; Yañez-Pagans et al., 2019). Así, el análisis con-

temporáneo de la movilidad urbana abarca dimensiones físicas (infraestructura vial, conectividad, redes modales) que afectan directamente la capacidad de desplazamiento y conectividad urbana, sociales (inclusión, seguridad, accesibilidad universal) como elementos para la equidad y la justicia urbana, ambientales (emisiones, consumo energético, calidad del aire) fundamentales para la sostenibilidad y económicas (costo de acceso, eficiencia productiva, competitividad urbana) abordando la productividad urbana y la equidad en el acceso a oportunidades. La Tabla 1 detalla aspectos e indicadores relacionados con tales dimensiones.

Tabla 1. Dimensiones de la movilidad urbana.

Dimensión	Aspectos principales	Indicadores
Física	Infraestructura vial, conectividad.	Cobertura modal, densidad.
Social	Inclusión, género, accesibilidad universal.	% viajes accesibles, seguridad.
Ambiental	Emisiones GEI, calidad del aire.	Ton CO_2 eq, niveles de PM2.5
Económica	Costos, eficiencia, productividad urbana.	Tiempo de viaje, % PIB.

Nota. Elaboración propia con base en Italia (2023), MobiliseYourCity (2023), Navarro Quesada et al. (2022) y López et al. (2022).

La movilidad urbana es considerada como un elemento central para que los ciudadanos accedan a oportunidades y servicios urbanos, aunque persisten brechas en cobertura, calidad y accesibilidad, y se reconocen los retos de sostenibilidad ambiental y equidad en el desarrollo de los sistemas de transporte (Italia, 2023).

1.2 *Historia, evolución y tendencias globales*

La evolución de la movilidad urbana está estrechamente vinculada a los procesos históricos de urbanización, innovación tecnológica y transformación de patrones productivos (ONU-Hábitat, 2024; Ferrara de Giner et al., 2019). Las primeras grandes ciudades modernas desarrollaron sus sistemas formales de transporte en el siglo XIX, con la introducción de tranvías y ferrocarriles urbanos, marcando el inicio de la planificación de la movilidad como elemento central en la morfología urbana (Yañez-Pagans et al., 2019). Sin embargo, fue en el siglo XX, especialmente tras la Segunda Guerra Mundial, cuando la expansión del automóvil privado transformó radicalmente las ciudades, cuando se generó una urbanización dispersa, aumentó la

dependencia energética, la segregación espacial y el deterioro de las condiciones ambientales (Italia, 2023; Banco Mundial, 2024a).

A partir de los años 80, los problemas de congestión, contaminación y exclusión social llevaron a gobiernos y organismos multilaterales a replantear el enfoque de la movilidad. Surgieron conceptos como transporte público integrado, movilidad activa, intermodalidad y recientemente, movilidad sostenible e inteligente (ONU-Hábitat, 2022; MobiliseYourCity, 2023). Actualmente, las tendencias internacionales subrayan la emergencia de políticas y tecnologías orientadas a la reducción de la huella ecológica, la electrificación de flotas y el fortalecimiento de infraestructuras para caminar y pedalear (Giráldez et al., 2022; Italia, 2023).

La Figura 1, sintetiza los principales hitos y tendencias en la evolución conceptual de la movilidad urbana, desde sus orígenes en el siglo XIX hasta las propuestas más actuales orientadas a la sostenibilidad y la inclusión.

Figura 1. Principales hitos y tendencias en la evolución conceptual de la movilidad urbana. Elaboración propia.

3. Diagnóstico y desafíos actuales de la movilidad urbana

El diagnóstico contemporáneo de la movilidad urbana revela profundas tensiones estructurales entre el crecimiento sostenido de la demanda de desplazamiento, la equidad en el acceso, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de la infraestructura existente (Ferrara de Giner et al., 2019;

ONU-Hábitat, 2024). Estas tensiones se agravan en los contextos urbanos de América Latina, donde las brechas territoriales y socioeconómicas acentúan la desigualdad en el acceso a sistemas de transporte eficientes y seguros.

Estudios recientes destacan que los principales desafíos actuales en materia de movilidad urbana incluyen: congestión vehicular crónica, contaminación atmosférica y acústica, inequidad modal y espacial, y débil integración intermodal. Estos fenómenos están estrechamente ligados a patrones urbanos de expansión periférica, motorización individual y gobernanza fragmentada (Italia, 2023; Yañez-Pagans et al., 2019).

Desde una perspectiva de inclusión social, la movilidad condiciona de manera directa el acceso a oportunidades laborales, educativas y de salud, generando lo que se ha denominado "pobreza de movilidad" (Oviedo y Titheridge, 2015). Investigaciones como las de Joshi et al. (2021) destacan que múltiples grupos vulnerables como mujeres, personas con discapacidad, personas mayores y habitantes de zonas periféricas, enfrentan barreras estructurales para desplazarse, exacerbando su exclusión social en las ciudades latinoamericanas.

Adicionalmente, la exposición crónica a contaminantes derivados del tránsito motorizado representa un riesgo para la salud pública urbana. Se estima que, en ciudades densamente pobladas, los niveles de PM2.5 y NO_2 superan regularmente los umbrales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), con efectos comprobados sobre la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras (OMS, 2021; Banco Mundial, 2024a).

En este contexto, el reto para la planificación contemporánea es avanzar hacia sistemas de transporte seguros, inclusivos, eficientes y ambientalmente responsables, que contribuyan a reducir las desigualdades territoriales y a promover una ciudad más equitativa y habitable.

3.1 Congestión, contaminación y calidad del aire

La congestión vehicular representa una de las externalidades negativas más relevantes en entornos urbanos densamente poblados, generando pérdidas económicas sustanciales, aumento significativo en los tiempos de desplazamiento y deterioro de la calidad de vida (Bocarejo, 2020; Calatayud et al., 2021). Se estima que, en ciudades como Ciudad de México, Bogotá y Lima, la congestión urbana impone costos directos e indirectos equivalentes al 3% o más del PIB metropolitano, debido al tiempo perdido y a las ineficiencias operativas.

Además, la saturación vial propiciada por la predominancia del vehículo privado, incrementa los niveles de contaminación atmosférica. La literatura científica subraya que el transporte motorizado aporta entre el 30% y 50% de las emisiones de material particulado en áreas urbanas (PM2.5 y PM10), y cerca del 70% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO,), especialmente en ciudades con flotas envejecidas y combustibles de alta contaminación (Riojas Rodríguez et al., 2016; Gouveia et al., 2024). Esto tiene particular relevancia en países de ingresos medios, donde la flota circulante tiende a ser más antigua y a utilizar tecnologías menos limpias (Yañez-Pagans et al., 2019).

En relación con los efectos en la salud pública, investigaciones recientes muestran una correlación robusta entre los niveles elevados de PM2.5 y NO, y el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como incremento en la mortalidad prematura en ciudades como São Paulo y Ciudad de México. Un incremento de 10 μg/m³ en niveles mensuales de PM2.5 se relaciona con un aumento de aproximadamente 1,3% de mortalidad cardiovascular y 0,9% de mortalidad respiratoria entre adultos, con efectos más pronunciados en grupos mayores de 60 años (Gouveia et al., 2024).

En la Tabla 2 se resume un conjunto de indicadores económicos, ambientales y sanitarios, que contribuyen a dimensionar la magnitud del problema y visibilizar la urgencia de diseñar políticas combinadas de movilidad urbana y calidad ambiental, que integren eficiencia operativa, reducción de emisiones, equidad en el acceso y enfoque preventivo de salud pública. La selección de ciudades como Ciudad de México, Bogotá, Lima y São Paulo como referencia, responde a factores metodológicos, comparativos y de disponibilidad de datos internacionalmente verificables. Estas ciudades son recurrentemente elegidas en reportes académicos y multilaterales por ser las mayores áreas metropolitanas de América Latina, la disponibilidad, cobertura y comparabilidad de estadísticas sistemáticas y públicas sobre congestión vehicular, calidad del aire y tiempos de viaje, recopiladas por organismos internacionales como OMS, CAF, BID, IQAir, TomTom Traffic Index, permitiendo análisis comparativos año a año. Además, estas urbes suelen aparecer en los informes y rankings líderes a nivel mundial asociados a altos niveles de congestión, material particulado y emisiones, incidencia en salud y pérdidas económicas, y constituyen ejemplo de tendencias urbanas y retos complejos, pues enfrentan problemas urbanos estructurales que ilustran los desafíos prototípicos de la región: motorización acelerada, transporte público insuficiente, segregación, presión ambiental y desigualdad social; condiciones comúnmente estudiadas y ampliamente documentadas.

Tabla 2. Indicadores de congestión y contaminación en principales ciudades latinoamericanas (2023).

Ciudad	Índice de congestión (%)	PM2.5 (µg/m³)	Tiempo medio de viaje (min)	Mortalidad atribuible a contaminación (%)	Ciudad
Ciudad de México	53	33	68	10,2	Ciudad de México
Bogotá	51	27	61	8,7	Bogotá
Lima	48	35	70	10,5	Lima
São Paulo	42	22	55	7,1	São Paulo

Nota. Elaboración propia con base en Italia (2023); OMS (2022); Gouveia et al. (2024); TOMTOM Traffic Index (2024); Giráldez Zúñiga et al. (2022).

3.2 Accesibilidad, equidad social y barreras en la movilidad urbana

La distribución desigual de la infraestructura urbana y de los servicios de transporte en las ciudades latinoamericanas continúa profundizando las disparidades históricas y excluye sistemáticamente a grupos vulnerables, entre los que se incluyen mujeres, niños, adultos mayores, personas con discapacidad y habitantes de zonas periurbanas, del acceso equitativo a oportunidades y servicios básicos (ONU-Hábitat, 2024). El acceso limitado al transporte público eficiente y a infraestructuras adecuadas constituye una de las principales expresiones de desigualdad estructural urbana, como lo evidencian investigaciones de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la CAF – Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe, que concluyen que hasta un 30% de los hogares en áreas metropolitanas de América Latina enfrenta barreras significativas para el acceso regular y seguro a sistemas de transporte urbano (Navarro Quesada et al., 2022; Italia, 2023). Las dificultades para la movilidad se acentúan en la periferia y afectan de manera desproporcionada a sectores de bajos ingresos y a personas dependientes del transporte público.

Diversos organismos multilaterales y estudios empíricos coinciden en identificar tres grandes categorías de barreras en la movilidad urbana: físicas, económicas y socioculturales. Las barreras físicas refieren a las condiciones de la infraestructura, como la falta de rampas, el mal estado de las aceras o la ausencia de señalización universal, lo que limita principalmente la movilidad de personas con discapacidad y de adultos mayores (TUMI/GIZ, 2024). Las barreras económicas resultan del costo elevado del transporte público en relación con los ingresos familiares, lo que impide a muchos hogares de bajos ingresos acceder a recorridos diarios esenciales o limita su participación en actividades educativas y laborales (Italia, 2023). Finalmen-

te, las barreras socioculturales comprenden fenómenos como la inseguridad, el acoso y la discriminación en el uso de los sistemas de transporte, factores que afectan especialmente a mujeres, jóvenes y habitantes de áreas suburbanas o periféricas, y que han sido documentados recientemente por ONU-Hábitat y TUMI (ONU-Hábitat, 2024; TUMI/GIZ, 2024).

La evidencia latinoamericana demuestra que la mejora de la equidad y la accesibilidad en la movilidad urbana requiere estrategias integrales que contemplen la modernización y ampliación de sistemas de transporte, políticas tarifarias diferenciadas, participación ciudadana y la incorporación de criterios de inclusión en el diseño de infraestructura y servicios (Italia, 2023; Navarro Quesada et al., 2022; TUMI/GIZ, 2024).

Las barreras de accesibilidad en la Tabla 3, demuestran que la movilidad en las ciudades latinoamericanas sigue constituyendo un factor determinante de la exclusión social y de la reproducción de las desigualdades urbanas, lo que exige la priorización de políticas inclusivas e interseccionales en la planificación y gestión del transporte urbano (Italia, 2023; Navarro Quesada et al., 2022; ONU-Hábitat, 2024).

Tabla 3. Tipos de barreras de accesibilidad en la movilidad urbana.

Tipo de barrera	Caracterización	Principales afectados
Física	Falta de rampas, mal estado aceras.	Personas con discapacidad, adultos mayores.
Económica	Tarifas elevadas en transporte público.	Hogares de bajos ingresos.
Sociocultural	Inseguridad en transporte nocturno o periferias.	Mujeres, jóvenes.

Nota. Elaboración propia con base en Italia (2023); Navarro Quesada et al. (2022); ONU-Hábitat (2024); TUMI/GIZ (2024).

3. Impactos sobre la salud pública y el bienestar social

Las externalidades negativas asociadas al sistema de transporte urbano impactan de manera directa la salud pública, tanto por la exposición a contaminantes atmosféricos como por el riesgo creciente de siniestros viales. La Organización Mundial de la Salud (2022) estima que, en América Latina, alrededor de 123,5 muertes prematuras por millón de habitantes cada año pueden atribuirse a la exposición al material particulado fino (PM2.5), lo que sitúa a la contaminación del aire como una de las principales amenazas ambientales para el bienestar de la población urbana. A nivel regional, la

cifra total supera las 380.000 muertes prematuras anuales relacionadas con la mala calidad del aire (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2023).

Estudios recientes demuestran que la insuficiente infraestructura para la movilidad activa, como andenes adecuados o ciclovías seguras, y la configuración urbana orientada principalmente al vehículo motorizado, contribuyen significativamente al aumento del sedentarismo, la obesidad, la diabetes tipo 2 y las enfermedades cardiovasculares (Huang et al., 2021; OMS, 2022; Giraldez et al., 2022). Además, la inseguridad vial y la alta prevalencia de accidentes en zonas urbanas actúan como barreras estructurales y psicológicas para la adopción de modos de transporte saludables y sostenibles (OMS, 2022).

El contexto pospandemia ha reforzado estos desafíos: la percepción de riesgo sanitario en el uso del transporte público generó una disminución significativa de su demanda y un aumento de la dependencia del vehículo privado, agravando la exposición a contaminantes y profundizando las desigualdades de acceso, sobre todo entre mujeres, personas mayores y trabajadores informales (Giraldez et al., 2022; TUMI y GIZ, 2021). Este escenario remarca la urgencia de promover un modelo de movilidad urbana centrado en la salud pública, la seguridad y la resiliencia.

La Figura 2 ilustra de manera integrada los efectos más significativos de la movilidad urbana deficiente sobre la salud pública y la equidad social en América Latina. Mediante una síntesis gráfica, se identifican tanto los principales impactos sanitarios atribuibles a la contaminación ambiental y a la siniestralidad vial, como las barreras estructurales que limitan el acceso igualitario al transporte. Asimismo, se destacan las respuestas institucionales y políticas emergentes que buscan mitigar estos efectos negativos y promover entornos urbanos más saludables, seguros e inclusivos. A través de esta visualización, se facilita comprender la complejidad del fenómeno, así como las interrelaciones que existen entre los determinantes de la movilidad y el bienestar poblacional, elementos centrales en el análisis y la formulación de estrategias orientadas a una movilidad sostenible y equitativa.

4. Modos y componentes de la movilidad urbana sostenible

Los sistemas de movilidad urbana sostenible se estructuran a partir de la integración coherente de modos de transporte y políticas que priorizan la reducción de impactos ambientales, la mejora de la equidad social y la eficiencia operativa. De acuerdo con ONU-Hábitat (2022) y la Italia (2023), el objetivo central es satisfacer las necesidades de desplazamiento de toda la población urbana minimizando externalidades negativas como la contaminación, el consumo de recursos, los accidentes y la congestión.

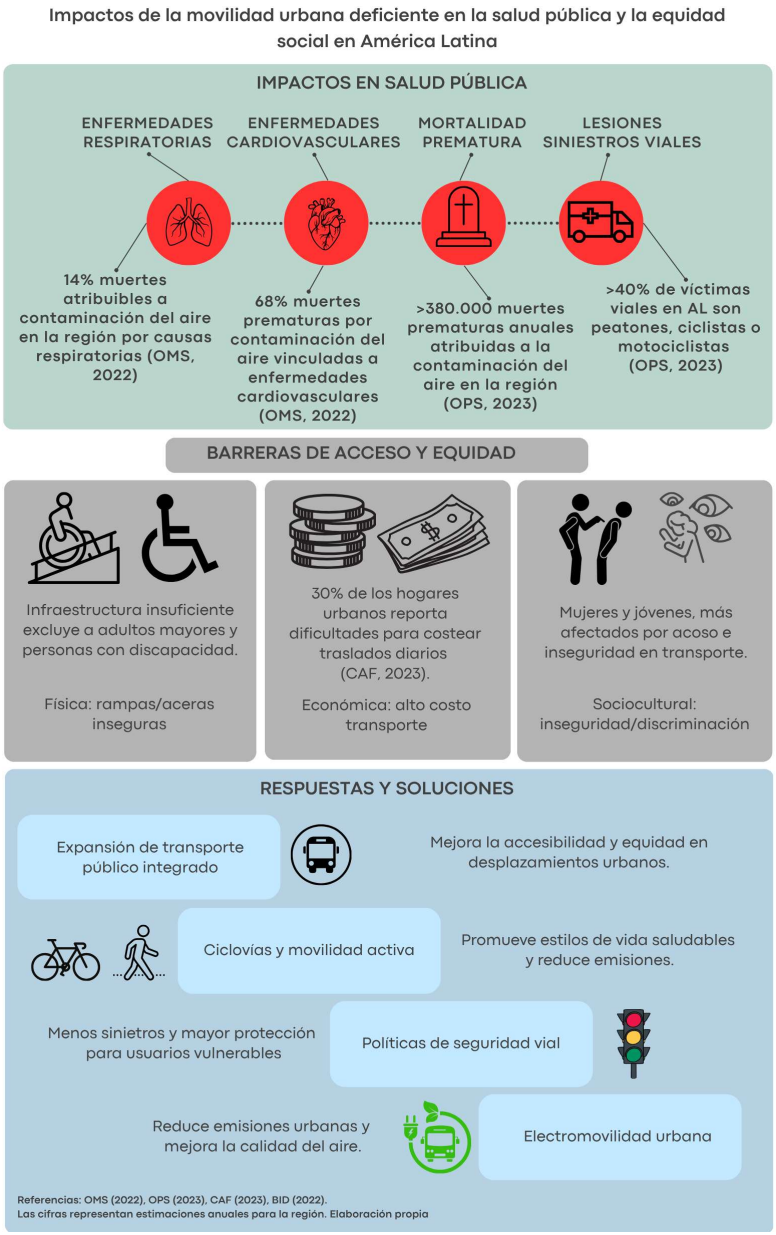


Figura 2. Impactos sanitarios, barreras de equidad y respuestas políticas ante la movilidad urbana deficiente en América Latina (2025). Nota. Elaboración propia con cifras que representan estimaciones anuales para la región procedentes de OMS (2022), OPS (2023), Italia (2023), BID (2022).

En la literatura actual, la movilidad urbana sostenible se basa en una jerarquía modal que prioriza primero la movilidad activa, peatonal y ciclista, seguida por el transporte público masivo, el transporte de mercancías eficiente, los vehículos compartidos, la movilidad eléctrica y, en último lugar, el vehículo privado tradicional (Banister, 2008; Hidalgo y Huizenga, 2013; ONU-Hábitat, 2022).

4.1 Transporte público masivo y eficiente

El transporte público constituye la columna vertebral de los sistemas de movilidad urbana sostenible en América Latina y el Caribe. Diversos estudios han demostrado que sistemas como el Bus Rapid Transit (BRT), el metro, el tranvía y el tren suburbano poseen la capacidad de trasladar grandes volúmenes de pasajeros con una huella ambiental significativamente menor por usuario-kilómetro en comparación con el uso del automóvil particular (Moscoso et al., 2020; Hidalgo y Huizenga, 2013; Scholl et al., 2021). La promoción y consolidación de estos modos de transporte es importante para reducir la congestión vial, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y propiciar una mayor equidad en el acceso a oportunidades urbanas (Moscoso et al., 2020; Scholl et al., 2021).

La electrificación de flotas, la integración tarifaria, la modernización de infraestructuras y la intermodalidad surgen como estrategias acertadas para optimizar la eficiencia sistémica y avanzar hacia la descarbonización del sector transporte (Yañez-Pagans et al., 2018; BID, 2022; Hidalgo y Huizenga, 2013). Asimismo, la transformación digital, a través de sistemas inteligentes de gestión y pago, contribuye a mejorar la experiencia del usuario y la eficiencia operativa del transporte masivo (BID, 2022; Calatayud et al., 2022). La integración de estas innovaciones es especialmente relevante frente a los desafíos actuales de las ciudades latinoamericanas, caracterizadas por procesos de expansión periférica, desigualdades territoriales y una demanda creciente de soluciones de movilidad seguras, accesibles y resilientes (Moscoso et al., 2020; Scholl et al., 2021).

Con el fin de ofrecer un panorama comparativo sobre el desempeño ambiental de los distintos modos de transporte urbano, la Tabla 4 presenta las emisiones medias de dióxido de carbono (CO,) por pasajero-kilómetro y la capacidad aproximada de transporte para cada alternativa. Esta información permite visualizar cómo la elección del modo de transporte influye tanto en la generación de emisiones contaminantes como en la eficiencia del sistema en términos de movilización masiva de pasajeros.

Tabla 4. Comparativo de emisiones de CO, por modo de transporte urbano (g. CO, /pasajero-kilómetro).

Modo de transporte	Emisiones (g. CO_2/pasajero-km)	Capacidad aprox. (pasajeros/hora)
Metro	13	40.000
BRT (eléctrico)	18	17.000
Autobús (diésel)	78	6.000
Automóvil privado	205	1.500

Nota. Elaboración propia con base en Moscoso et al., 2020; Hidalgo y Huizenga, 2013.

Casos como la modernización y electrificación progresiva de la flota de TransMilenio en Bogotá, con lo que se logró reducir hasta en un 78% la concentración de material particulado en el sistema por la incorporación de buses con estándares Euro V y Euro VI (normativas europeas que regulan las emisiones contaminantes de vehículos) y el ingreso masivo de vehículos eléctricos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021; La República, 2021), la ampliación y eficiencia energética de la Red de Metro de Santiago, así como la masificación de autobuses eléctricos en Shenzhen, ciudad al sur de China y pionera a nivel mundial, demuestran que la apuesta por sistemas de transporte masivo sostenibles es viable, urbana y ambientalmente replicable (Hidalgo & Huizenga, 2013; BID, 2022).

4.2 Movilidad activa: peatones y ciclistas

El fomento de la movilidad activa, caminar y usar la bicicleta, es fundamental desde las perspectivas ambiental, de salud pública y de equidad social. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024) destaca que promover desplazamientos a pie y en bicicleta contribuye a reducir la contaminación, aumenta la actividad física, disminuye el sedentarismo y las enfermedades crónicas relacionadas, además de fomentar la recuperación del espacio público y facilitar el acceso económico para amplios sectores de la población.

Para que la movilidad activa sea eficaz y segura, es necesario contar con infraestructura adecuada, que incluya aceras amplias y continuas, cruces peatonales seguros, ciclovías protegidas, iluminación y conectividad con

otros modos de transporte (OMS, 2025; OPS, 2024). Además, integrar políticas de transporte, salud y urbanismo contribuye a crear entornos urbanos que favorezcan estos modos sostenibles.

Según la OMS (2025), algunas recomendaciones clave para promover la movilidad activa incluyen la construcción de infraestructura segura, la regulación de velocidades vehiculares, campañas de concienciación y el uso de incentivos financieros que fomenten estos hábitos.

En la región de América Latina y el Caribe, la OPS (2024) resalta que estas estrategias generan beneficios múltiples: reducción de emisiones contaminantes locales, disminución de enfermedades crónicas, mejora en la calidad de vida y la inclusión social a través del acceso universal y asequible a medios de transporte activos.

La gráfica en la Figura 3 compara la participación modal de la bicicleta y la caminata en el total de los desplazamientos urbanos diarios en varias capitales latinoamericanas. Estos datos permiten visualizar las diferencias y similitudes en la importancia de la movilidad activa en las políticas y prácticas de transporte urbano de la región. La información procede de encuestas de movilidad y reportes institucionales recientes, lo que proporciona un panorama actualizado sobre la relevancia de estos modos en el sistema de transporte local. Son ejemplo de ciudades líderes en movilidad activa, Bogotá con más de 600 km de ciclorrutas y 7% de participación modal, y Copenhague y Ámsterdam, con más de 30% de viajes diarios en bicicletas.

4.3 Logística urbana sostenible: importancia y recomendaciones

La logística urbana es de especial interés tanto para la competitividad económica como para la calidad ambiental de las ciudades. En América Latina, el transporte de mercancías puede representar hasta el 15% de los viajes urbanos y, si no se gestiona adecuadamente, genera impactos significativos en la congestión, la contaminación y el deterioro del entorno urbano (Giambiagi y García, 2022). La intensa actividad de vehículos de carga en horarios pico aumenta las emisiones contaminantes y contribuye a la congestión, afectando directamente la habitabilidad urbana

Para optimizar la logística urbana y reducir su huella ambiental, se recomiendan diversas estrategias. Una de ellas es el fomento de vehículos eléctricos y de combustibles limpios para el transporte de carga. La transición hacia flotas de reparto de cero emisiones locales es una prioridad, con ejemplos exitosos en ciudades como Shenzhen en China, París en Francia y

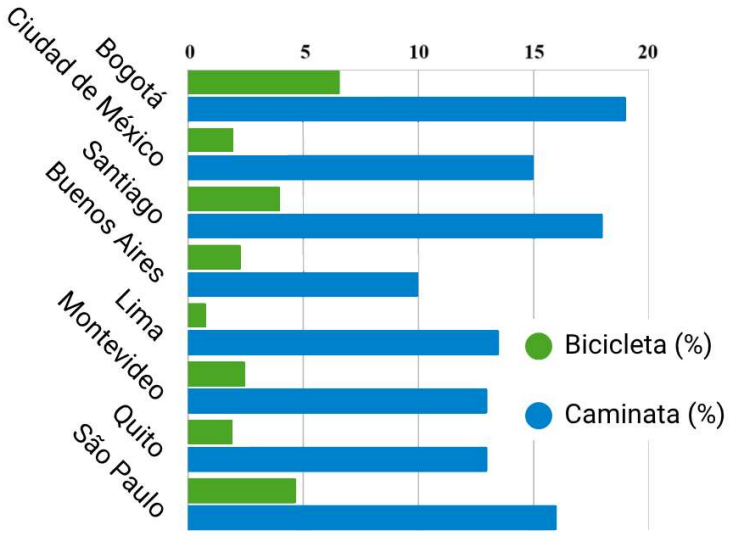


Figura 3. Participación modal de la bicicleta y la caminata en capitales latinoamericanas. Nota. Elaboración propia con base en BID (2021), Moscoso et al. (2019), ITDP (2020), Subsecretaría de transporte de Chile (2022).

Londres en Inglaterra, lo que contribuye significativamente a la mejora de la calidad del aire urbano (International Transport Forum [ITF], 2023). Otra estrategia es la reorganización de los horarios de carga y descarga mediante la implementación de "ventanas horarias" fuera de los períodos de mayor tráfico (horarios nocturnos, por ejemplo), lo cual ayuda a descongestionar las vías y reducir emisiones, con prácticas aplicadas en ciudades como Barcelona en España y Bogotá en Colombia (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE], 2024). Finalmente, la consolidación de cargas y el desarrollo de centros logísticos urbanos (CLU) son importantes, ya que permiten agrupar envíos y transferir mercancías a vehículos más pequeños o menos contaminantes para la denominada "última milla", disminuyendo así el número total de viajes y sus impactos. Ejemplos de estos avances incluyen Madrid en España y Ciudad de México en México (ITF, 2023; OCDE, 2024).

En la Tabla 5 se sintetizan las principales innovaciones ambientales implementadas en la logística urbana contemporánea, identificando para cada estrategia sus beneficios ambientales asociados y señalando ciudades que

Tabla 5. Innovaciones ambientales en logística urbana.

Estrategia	Beneficio ambiental	Ciudades pioneras
Vehículos eléctricos	Cero emisiones locales	Shenzhen, París, Londres
Ventanas horarias nocturnas	Reducción de congestión	Barcelona, Bogotá
Consolidación de cargas	Menos viajes y emisiones	Madrid, Ciudad de México

han ejercido un papel pionero en su adopción. Esta presentación permite comparar enfoques y avances concretos en diferentes contextos urbanos a nivel internacional. Estas estrategias están respaldadas por investigaciones recientes y directrices de organismos internacionales que promueven sistemas de transporte más sostenibles y resilientes (Italia, 2023; ITF, 2023; OCDE, 2024; Subsecretaría de Transportes de Chile, 2022).

5. Intermodalidad y nuevos modelos de movilidad

La intermodalidad, entendida como la integración efectiva entre distintos modos de transporte, es fundamental para reducir la dependencia del vehículo privado y optimizar los recursos urbanos. Esta integración busca combinar modos como caminar, viajar en bicicleta, transporte público y vehículos compartidos, así como facilitar la conectividad física, tarifaria e informativa para el usuario final (Scorcia, 2023; Moscoso et al., 2019).

Los avances en digitalización y movilidad inteligente (*Smart Mobility*) potencian esta intermodalidad con nuevos modelos. Por ejemplo, los sistemas *Mobility as a Service* (MaaS) integran en una aplicación única la planificación, reserva y pago de diversas opciones de transporte, facilitando la experiencia del usuario y fomentando alternativas al automóvil privado (Asociación Internacional del Transporte Público [UITP], 2023). Además, la proliferación de vehículos compartidos (*carpooling*, *carsharing*), y la micromovilidad eléctrica (e-*scooters,* patinetas, bicicletas eléctricas), completan la red de transporte público y ofrece soluciones flexibles para la última milla (Moscoso et al., 2019; ITF, 2023). Asimismo, las plataformas digitales que ofrecen información en tiempo real sobre rutas, frecuencias y disponibilidad de modos de transporte, permiten a los usuarios tomar decisiones informadas y optimizar sus desplazamientos (Scorcia, 2023; ITF, 2023). La integración efectiva de estas tecnologías con la infraestructura tradicional es importante para avanzar hacia sistemas de movilidad accesibles, eficientes y sostenibles en los entornos urbanos (UITP, 2023).

El esquema en la Figura 4 representa la centralidad del usuario en los sistemas de movilidad urbana sostenible, integrando la mayor cantidad posible de modos y plataformas para facilitar la intermodalidad y la eficiencia en los desplazamientos, un concepto fuertemente promovido por la literatura reciente (Scorcia, 2023; ONU-Hábitat, 2023).

6. Infraestructura, políticas y estrategias para la movilidad urbana sostenible

La transición hacia sistemas de movilidad urbana sostenibles demanda la integración de infraestructuras resilientes, políticas públicas multidimensionales y estrategias innovadoras de gestión y financiación. Diversos organismos internacionales y la literatura científica coinciden en que la efectividad de estas acciones depende de la articulación multisectorial, la gobernanza participativa y la incorporación de criterios ambientales y sociales en la toma de decisiones. El respaldo de la ingeniería ambiental resulta fundamental para minimizar los impactos negativos derivados de la movilidad, garantizar la equidad y afrontar desafíos emergentes como el cambio climático y la digitalización (ONU-Hábitat, 2024; UITP, 2024).

En este marco, la movilidad urbana sostenible reconoce la necesidad de sistemas de transporte integrados, la priorización del transporte público eficiente y la movilidad activa, así como la reducción de la dependencia de los vehículos motorizados privados. La planificación adecuada no solo mejora la calidad de vida urbana, sino que también contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles (UN, 2015; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022; UITP, 2024).

6.1 Diseño y planificación urbana integrada

El diseño urbano integrado constituye un eje primordial para la promoción de una movilidad sostenible. Esta aproximación busca optimizar la organización espacial de la ciudad asegurando la proximidad entre viviendas, servicios, empleo y equipamientos, con el fin de reducir la necesidad de desplazamientos motorizados extensos y disminuir la huella ecológica del transporte urbano (Newman y Kenworthy, 2015; Cervero, 2013; ONU-Hábitat, 2024).

Entre los principios del urbanismo sostenible destacan la densificación urbana en entornos compactos y policéntricos, que permite el desarrollo de modelos de ciudad basados en la movilidad activa y el transporte público

Figura 4. Esquema de integración modal. Nota. Esquema propio con base en Scorcia (2023), World Cities Report (ONU-Hábitat, 2023).

eficiente. El impulso de usos mixtos del suelo permite combinar residencias, actividades económicas y servicios sociales, generando sinergias que reducen los desplazamientos y fomentan comunidades vibrantes y cohesionadas (Cervero y Kockelman, 1997; Bertolini, 2017).

La creación y mejoramiento del espacio público, a través de redes peatonales continuas, corredores verdes y sistemas de ciclovías, constituye otro pilar del urbanismo contemporáneo, ya que promueve la accesibilidad universal, mejora la cohesión social y favorece la protección ambiental (Gehl, 2010; UITP, 2024).

Ejemplos internacionales relevantes incluyen la «ciudad de 15 minutos» en París, propuesta por Carlos Moreno, que promueve la proximidad funcional, y las supermanzanas de Barcelona, que reorganizan el tráfico y recuperan espacio público para peatones y ciclistas, logrando mejoras sustanciales en accesibilidad y calidad ambiental (Moreno et al., 2021; Rueda, 2019).

A continuación, la Tabla 6 resumen elementos fundamentales de la planificación urbana orientada a la movilidad sostenible, junto con ejemplos internacionales.

6.2 Innovación tecnológica, digitalización y sistemas inteligentes

La integración de tecnología en la movilidad urbana está transformando profundamente la gestión y operación de los sistemas de transporte, permitiendo la toma de decisiones en tiempo real, mayor eficiencia operativa y una experiencia mejorada para el usuario (Franco y Estupiñán, 2023; Palacios et al., 2023). Entre las principales tendencias identificadas se encuentran los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que incluyen la automatización de señales, control dinámico del tráfico, priorización del transporte público, gestión de flotas y monitoreo ambiental. Por ejemplo, en Singapur se ha implementado un sistema ITS que utiliza inteligencia artificial para reducir la congestión vehicular y las emisiones contaminantes, mientras que Londres ha desarrollado proyectos piloto que combinan vehículos conectados con redes 5G para optimizar la coordinación del tráfico (Espinoza, 2021).

Paralelamente, el uso de Big Data y sensores urbanos contribuye a la recolección masiva de datos generados por dispositivos conectados y aplicaciones móviles, facilitando el modelado de patrones de movilidad, la optimización de rutas y la adecuación dinámica de la oferta de transporte público. Este análisis de datos apoya plataformas inteligentes para la toma de decisiones basadas en inteligencia artificial, mejorando la gestión urbana (Celering, 2024).

Asimismo, la Movilidad como Servicio (MaaS) emerge como una innovación disruptiva que integra diversos modos de transporte y medios de pago en una plataforma digital única, facilitando la planificación y ejecución de viajes intermodales sin fricciones. Helsinki es reconocida a nivel mundial por la implementación pionera de MaaS, que ha logrado simplificar el uso combinado de metro, autobús, bicicleta y taxi en una sola aplicación móvil (The Agility Effect, 2020).

Tabla 6. Elementos de la planificación urbana para movilidad sostenible.

Elemento	Beneficio principal	Ejemplo internacional
Densidad urbana	Reducción de viajes motorizados	Estocolmo, París
Usos mixtos	Menos desplazamientos extensos	Melbourne, Bogotá
Espacio público	Fomento de movilidad activa	Copenhague, Medellín

Finalmente, la expansión de vehículos eléctricos y compartidos, incluyendo micromovilidad (scooters, bicicletas) y automóviles compartidos bajo modelos flexibles, complementan el transporte público, especialmente en los trayectos iniciales y finales de los desplazamientos urbanos, favoreciendo la accesibilidad y reducción del uso del vehículo privado (Palacios et al., 2023). La efectividad de estas soluciones requiere un fuerte soporte institucional, inversiones coordinadas entre sectores público y privado, y una colaboración intersectorial que garantice la interoperabilidad tecnológica y la seguridad de la información (Palacios et al., 2023).

En diversos contextos urbanos, estas tecnologías se han reflejado en resultados concretos: los sistemas ITS sincronizados en Singapur y Londres han permitido disminuir significativamente la congestión y las emisiones contaminantes; la plataforma MaaS de Helsinki ha simplificado la movilidad, mejorando la integración modal y la experiencia del usuario; las aplicaciones que ofrecen información en tiempo real han aumentado la puntualidad y satisfacción en ciudades como Santiago y Barcelona; y, finalmente, la supervisión ambiental vía sensores ha facilitado una gestión proactiva de la calidad del aire, como en Ciudad de México (Palacios et al., 2023; Espinoza, 2021; The Agility Effect, 2020).

En la Tabla 7, el resumen de distintas soluciones tecnológicas aplicadas en movilidad urbana en los últimos años. Se señalan los beneficios identificados en cada caso y las ciudades o proyectos piloto donde estas innovaciones han mostrado resultados concretos, facilitando así la comparación y el análisis sobre la adopción de tecnologías avanzadas en contextos urbanos.

6.3 Financiamiento, gobernanza y enfoque de género y accesibilidad universal

El sostenimiento y la modernización de la movilidad urbana requieren una arquitectura financiera sólida y esquemas de gobernanza integrados que impulsen transparencia, corresponsabilidad y equidad en el acceso al servicio público./ Una estrategia innovadora y eficaz combina instrumentos financieros mixtos, gobiernos multinivel y un enfoque transversal de inclusión social.

En relación con los modelos de inversión mixta, se evidencia un fuerte impulso hacia esquemas que combinan inversión pública, recursos privados y financiamiento multilateral. La valorización del suelo ligada al transporte, esquemas PPP (participación público-privada) y cobros por congestión se utilizan como mecanismos para expandir el financiamiento sin sobrecargar la tarifa al usuario/ (Acosta et al., 2025).

Sobre la gobernanza multinivel, las políticas eficaces requieren la coordinación entre gobiernos locales, regionales y nacionales, con participación activa del sector privado y sociedad civil. Este enfoque es esencial para garantizar corresponsabilidad y alineación institucional en la movilidad urbana/ (Navarro et al., 2022).

Tabla 7. Soluciones tecnológicas recientes en la movilidad urbana.

Solución	Beneficio	Ciudad / proyecto destacado
ITS sincronizados	Menor congestión y emisiones	Singapur, Londres
Plataforma MaaS	Simplificación del viaje, integración de modos	Helsinki
Información en tiempo real	Mayor satisfacción y puntualidad	Santiago, Barcelona
Supervisión ambiental	Gestión proactiva de la calidad del aire	Ciudad de México

Nota. Elaboración propia con base en Franco y Estupiñán (2023); Espinoza, 2021; Palacios et al. (2023); Celering (2024); The Agility Effect, 2020.

A propósito de la transversalidad de equidad, género y accesibilidad, las políticas integrales deben diseñar infraestructura y servicios seguros y accesibles para mujeres, personas mayores, infancia y personas con discapacidad. La integración de enfoque de género en movilidad pública revela patrones diferenciados de viaje y percepción de inseguridad, y propone medidas para mejorar la seguridad, la participación y el diseño urbano inclusivo/ (Martínez et al., 2022). Por su parte, CAF también enfatiza que las mujeres realizan la mayor parte de sus trayectos diarios mediante modos sostenibles (transporte público, caminar, bicicleta) y promueve guías prácticas para planificadores urbanos que integren la perspectiva de género en diseño, operación y gobernanza/ (Ortiz et al., 2021).

En este contexto, diversos instrumentos financieros y mecanismos de gobernanza han sido aplicados en distintas ciudades del mundo con resultados contrastables. La Tabla 8 resume algunos de los enfoques más relevantes, destacando su funcionalidad, modalidad de implementación y ejemplos prácticos. Estos casos ilustran cómo la combinación de financiamiento innovador, gestión participativa y enfoque de inclusión social puede fortalecer la sostenibilidad y equidad del sistema de movilidad urbana.

7. Casos de estudio y buenas prácticas internacionales

El análisis de casos internacionales provee evidencia empírica sobre la factibilidad y los resultados obtenidos mediante la implementación de estra-

tegias de movilidad urbana sostenible en contextos diversos. Estos ejemplos ilustran cómo ciudades de distintas regiones han abordado desafíos ambientales, sociales y de gobernanza desde la movilidad, sirviendo de referencia para investigadores, gestores públicos y diseñadores de políticas.

7.1 América Latina

En Latinoamérica, las ciudades han sido laboratorios de innovación para la movilidad sostenible, enfrentando contextos de urbanización acelerada, desigualdad y restricciones presupuestarias. Los casos que se mencionan, resultan representativos en la región por cuanto destacan por sus avances y aprendizajes en el sector.

La ciudad de Bogotá en Colombia, es ampliamente reconocida por su sistema de BRT, TransMilenio, que ha transformado la movilidad urbana desde su puesta en marcha, permitiendo una notable reducción de emisiones y tiempos de viaje, y fomentando la movilidad activa mediante una red de ciclorrutas superior a 600 km. Además, iniciativas como la Ciclovía dominical y TransMiCable han promovido la inclusión social, mejorado la calidad del aire y reducido la congestión (Chavarro, 2024). Se estima que la implementación de TransMilenio ha representado hasta 197.000 toneladas menos de CO_2 emitidas anualmente (Moré y Giret, 2013; Chavarro, 2024), evidenciando un impacto ambiental sustancial, a la vez que las políticas de movilidad han conseguido elevar la participación modal de la bicicleta y reducir los tiempos de viaje, especialmente entre las poblaciones más vulnerables.

Por otra parte, Curitiba en Brazil sigue siendo un referente mundial en movilidad urbana sostenible gracias a la constante modernización de su sis-

Tabla 8. Instrumentos financieros y de gobernanza para movilidad urbana.

Instrumento	Descripción	Ejemplo
Fondos multilaterales	Créditos con asistencia técnica de instituciones como CAF y BID.	Programas regionales de Latinoamérica.
Tarificación vial	Cobro por congestión urbana y peajes para gestionar demanda y financiar infraestructura.	Modelos como Londres o Milán.
Valorización del suelo	Captación de plusvalías urbanísticas asociadas con proyectos de transporte masivo.	Experiencias en Bogotá y São Paulo.
Participación ciudadana	Presupuestos participativos, consultas públicas en planificación del transporte.	Quito, Medellín.
Políticas de género e inclusión	Planes de movilidad sensibles al género, accesibilidad universal y seguridad.	Santiago de Chile, Buenos Aires.

Nota. Elaboración propia con base en Ortiz et al. (2021) y Acosta et al. (2025).

tema de *Bus Rapid Transit* (BRT) y a la implementación de políticas urbanas integradas que priorizan la sostenibilidad, la equidad y la innovación tecnológica. Su sistema BRT, reconocido como uno de los mejores de Sudamérica, cuenta con carriles exclusivos, estaciones modernas y tecnología avanzada para optimizar el flujo de pasajeros (Scarlan, 2023). En particular, la adopción de buses híbridos y eléctricos ha permitido una significativa reducción en el consumo de combustibles fósiles y emisiones contaminantes, fortaleciendo el compromiso ambiental de la ciudad.

Además, Curitiba mantiene una alta proporción de desplazamientos en transporte público, estimada en alrededor del 80%, gracias a una integración tarifaria eficiente y a un desarrollo urbano orientado al transporte (BID, 2019). La ciudad también ha avanzado en infraestructura para la movilidad eléctrica, incluyendo la instalación de puntos públicos de recarga rápida para vehículos eléctricos urbanos y la promoción de un sistema masivo de bicicletas compartidas con flotas convencionales y eléctricas, favoreciendo la movilidad activa y la descarbonización del transporte (Lyft Urban Solutions, 2023).

Tras la pandemia, Curitiba profundizó su enfoque en la reconfiguración del espacio urbano para priorizar la movilidad sostenible, ampliando espacios para peatones y ciclistas y adaptando su sistema de transporte para mayor resiliencia y seguridad sanitaria. Estos esfuerzos incluyen educación ciudadana para consolidar la movilidad sustentable y la integración de nuevas tecnologías digitales en la gestión urbana, aspectos que le han valido reconocimientos internacionales como la distinción de Ciudad Inteligente 2023 en el Smart City Expo World Congress (Scarlan, 2023).

En la ciudad de Santiago de Chile, se ha modernizado el sistema metropolitano a través de la ampliación de la red de metro, la electrificación progresiva de la flota de buses urbanos y la interoperabilidad tarifaria mediante tarjetas inteligentes. Destaca la incorporación de más de 700 buses eléctricos, lo que sitúa a Santiago como líder regional en electromovilidad, y ha permitido una reducción sustancial de hasta 30% en polución por material particulado fino (PM2.5) en zonas críticas. Estos avances han mejorado la experiencia del usuario y la cobertura del transporte público metropolitano (C40 Cities, 2020; Ministerio de Energía de Chile, 2022).

En relación con la ciudad de Buenos Aires en Argentina, el programa Metrobús, junto a la expansión de ciclovías segregadas y la revitalización de corredores peatonales, ha generado un salto en la eficiencia del transporte público y la seguridad vial. Metrobús, con su diseño de rutas específicas y paradas espaciadas, disminuyó un 40% los tiempos de viaje y logró un incre-

mento del 40% en viajes en bus, además de contribuir a una reducción significativa de la siniestralidad. El sistema EcoBici y la peatonalización de centralidades urbanas han profundizado el cambio cultural a favor de la movilidad activa y sostenible (Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2021; C40 Cities, 2021).

La Tabla 9 contiene un resumen de las principales estrategias implementadas y los resultados alcanzados en las cuatro ciudades latinoamericanas emblemáticas en materia de movilidad urbana sostenible. Esta recoge indicadores sobre los efectos en la participación modal, la reducción de emisiones, la congestión vial y la seguridad, que evidencian los impactos positivos y las buenas prácticas derivadas de las políticas públicas analizadas en este apartado. Tales datos permiten comparar y comprender la diversidad de enfoques adoptados en contextos urbanos con retos y características específicas, sirviendo de referencia para futuras iniciativas en la región.

Estas experiencias muestran que la articulación de políticas públicas, inversión sostenida e innovación en modelo urbano pueden generar transformaciones estructurales en la movilidad, la equidad y la sostenibilidad ambiental en la región.

7.2 Europa y Asia

Las regiones europeas han consolidado enfoques integrales en la descarbonización, movilidad activa e innovación tecnológica, combinando marcos legales, planificación y cultura urbana. En ese marco, vale mencionar algunos ejemplos internacionales sobresalientes.

En la ciudad de París, Francia, la implementación del modelo de la "Ciudad de 15 minutos" ha transformado sustancialmente la urbe mediante usos mixtos del suelo, peatonalización y una expansión significativa de las redes ciclistas (Moreno et al, 2021). Este enfoque ha logrado una disminución comprobada de las emisiones, un acceso más equitativo a los servicios y una mejora generalizada de la calidad del espacio público. Las redes de ciclovías y la reducción del tráfico motorizado han sido factores de significación en la reducción de gases contaminantes (Alianza por la regeneración, s.f.; Nan Arquitectura, 2024).

Por otro lado, Copenhague, Dinamarca, es reconocida mundialmente por su movilidad ciclista. En esta aproximadamente el 62% de los ciudadanos utiliza la bicicleta como medio de transporte principal para ir al trabajo o

Tabla 9. Resultados de políticas de movilidad sostenible en ciudades latinoamericanas.

Ciudad	Estrategia central	Resultados principales
Bogotá	BRT y ciclorrutas.	+7% viajes en bicicleta, –35% congestión vial.
Curitiba	BRT y zonificación.	–27% emisiones GEI, integración socioespacial.
Santiago de Chile	Metro y electrificación.	Reducción 30% en polución PM2.5.
Buenos Aires	Metrobús y ciclovías.	+40% viajes en bus, reducción siniestralidad.

Nota. Elaboración propia con base en Chavarro (2024); Moré y Giret (2013); Scarlan (2023); C40 Cities (2020); Ministerio de Energía de Chile (2022); Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (2021); C40 Cities (2021).

escuela (Los Angeles Times, 2019). La ciudad ha diseñado y ejecutado infraestructura de vanguardia, como autopistas ciclistas y puentes exclusivos, lo que se acompaña de regulaciones estrictas para disminuir el uso de automóviles privados. La cultura ciclista local y la planificación urbana han sido determinantes para este éxito.

En el caso de la ciudad de Barcelona en España, el modelo de supermanzanas consiste en la agrupación de manzanas urbanas para reducir el tráfico motorizado y recuperar espacio público para peatones y actividades sociales. Diversos estudios apuntan a una reducción del tráfico motorizado de hasta el 21%, y en algunos barrios, el objetivo es reducir el porcentaje de viajes en vehículo automotor del 25% al 5%. Esto, junto con la mejora de la infraestructura para el transporte público y la movilidad activa, ha permitido avanzar hacia una ciudad más saludable y sostenible (Castaño, 2023; Euronews, 2025).

Por su parte, la ciudad de Shenzhen en China es pionera a nivel mundial al contar con una flota de más de 16.000 autobuses totalmente eléctricos desde 2018, lo que ha evidenciado la viabilidad técnica y ambiental de la electrificación del transporte público en grandes ciudades asiáticas (Banco Mundial, 2021). Los beneficios han sido notables en la mejora de la calidad del aire, con una reducción de emisiones equivalente a cientos de miles de toneladas de CO, anuales, y una drástica reducción del ruido urbano.

7.3 Recomendaciones de organismos multilaterales

Diversas organizaciones internacionales, como ONU-Hábitat, el Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la CAF – Banco

de Desarrollo de América Latina y el Caribe, se han posicionado como referentes en la formulación de estrategias, recomendaciones y líneas de acción base para el desarrollo de la movilidad urbana sostenible en ciudades de América Latina y el mundo.

Entre las recomendaciones más relevantes destacan: priorizar el transporte público masivo, accesible y bajo en emisiones, instando a invertir en sistemas de transporte público eficientes (metro, autobús de tránsito rápido) y en tecnologías limpias, con el objetivo de reducir la congestión urbana y las emisiones de gases de efecto invernadero (Banco Mundial, 2024a; Italia, 2023); implementar modelos urbanos de proximidad y usos mixtos del suelo, como la propuesta de la "ciudad de 15 minutos", donde los servicios esenciales estén accesibles a pie o en bicicleta, promoviendo así una movilidad activa y reduciendo la dependencia del automóvil (Del Romero Renau et al., 2023); desarrollar y consolidar corredores y redes integradas de ciclismo y caminata, complementando los modos tradicionales y favoreciendo el uso de la movilidad activa, enfatizando el diseño de infraestructura segura para ciclistas y peatones, así como su integración con nodos de transporte público ((Del Romero Renau et al., 2023; Italia, 2023); incorporar tecnologías inteligentes de transporte (ITS y movilidad como servicio), adoptando sistemas de gestión inteligente del tráfico, información en tiempo real, y soluciones digitales que optimicen el uso de la infraestructura urbana y mejoren la experiencia de los usuarios (Italia, 2023); fortalecer mecanismo de inclusión social, equidad de género y accesibilidad universal, puesto que las directrices multilaterales defienden que toda planificación debe garantizar acceso seguro e igualitario a la movilidad para todos los grupos sociales, priorizando acciones afirmativas hacia mujeres, personas con discapacidad y comunidades vulnerables (Banco Mundial, 2024a).

Respecto a la inversión internacional reciente, la evidencia recogida en informes técnicos y bases de datos institucionales muestra que, durante el período 2018-2023, la CAF destinó más de 2,6 mil millones de USD a 36 proyectos de movilidad sostenible en seis países de la región: Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Uruguay (Italia, 2023). Por su parte, entre 2010 y 2024, el BID aprobó 28 operaciones de préstamos de inversión en movilidad urbana por un total de 3.318 millones de dólares en 24 países, inversiones que han posibilitado que aproximadamente 4,6 millones de personas tengan mayor acceso a la movilidad urbana sostenible (BID, 2025); mientras que el Banco Mundial financió 19 proyectos globales por unos 1.500 millones de dólares (Italia, 2023; BID, 2021; Banco Mundial, 2023); por su parte, el Banco Mundial entre 2014 y 2024, aprobó 28 operaciones de

transporte urbano con un financiamiento total de 5.700 millones de dólares (1.850 millones de dólares para los países de la Asociación Internacional de Fomento (AIF) y 3.850 millones de dólares para los países del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF), (Banco Mundial, 2024b).

Estas líneas de acción y niveles de inversión reflejan un consenso en la literatura técnica internacional sobre la necesidad de sistemas integrados, eficientes y equitativos de transporte, como base para la transición hacia ciudades saludables y sostenibles (Sánchez-Sepulveda et al., 2024). No obstante, la aplicación de estas recomendaciones implica retos contextuales, como la coordinación interinstitucional y la reducción de brechas sociales y territoriales.

8. Perspectivas futuras y desafíos para la movilidad urbana sostenible

El futuro de la movilidad urbana involucra una transformación estructural de los patrones de desplazamiento, los sistemas de transporte y la relación de la ciudadanía con el espacio urbano. Esta transición no solo responde a los compromisos asumidos en los tratados internacionales sobre cambio climático y derechos humanos, sino también a la presión social por ciudades más saludables, accesibles y resilientes (ONU-Hábitat, 2024; Banco Mundial, 2024a).

8.1 Tendencias tecnológicas y transformaciones emergentes

En esa transformación estructural sin precedentes que experimenta la movilidad urbana global, impulsada por la urgencia climática, la densificación de las ciudades y la aceleración tecnológica en ámbitos como la electrificación, la digitalización, la inteligencia artificial y los sistemas de transporte autónomo, según Heineke et al. (2023), para 2035 se proyecta una fuerte disminución en la proporción de desplazamientos realizados en vehículos privados (del 45% al 29%) y un aumento significativo en el uso de modos emergentes como robotaxis (8%) y servicios de micromovilidad y transporte público integrados.

En particular, más del 60% de los usuarios urbanos en mercados desarrollados manifiestan disposición a utilizar servicios de *shuttles* autónomos compartidos, mientras que hasta un 37% afirma que la micromovilidad podría sustituir más de la mitad de sus viajes en automóvil privado (Heineke et al., 2023). Esta reconfiguración modal no solo redefine los hábitos de desplazamiento, sino que también conlleva impactos económicos y ambientales relevantes.

En un estudio específico sobre ciudades europeas, Bayrak et al. (2024) estima que un aumento del 22% en el uso de bicicletas (eléctricas y tradicionales) podría sustituir un volumen equivalente de kilómetros realizados en automóvil. Esta transición tendría efectos sistémicos como descongestión urbana, mejora de la calidad del aire, reducción de emisiones de CO, y recuperación de espacio público urbano.

En conjunto, estos datos evidencian que la transición hacia un ecosistema de movilidad urbana más sostenible con base en plataformas digitales, vehículos compartidos, electrificación y autonomía parcial, representa una oportunidad concreta para mejorar el desempeño ambiental, económico y social de las ciudades en la próxima década.

En el escenario global, destacan diversas tendencias que, según la literatura académica y los informes internacionales, redefinirán la movilidad sostenible entre las que se encuentran las que se refieren.

8.1.1 Electromovilidad y descarbonización del transporte

La introducción masiva de vehículos eléctricos y la electrificación del transporte público contribuye a la reducción de emisiones locales e impulsa la innovación en almacenamiento energético e infraestructura de recarga (Italia, 2023).

Al respecto de la electrificación de flotas, se proyecta que para 2030, más del 60% de los autobuses urbanos nuevos y hasta el 30% de los automóviles vendidos en zonas urbanas a nivel global serán eléctricos o híbridos enchufables, tendencia especialmente acelerada en China, la Unión Europea y ciudades pioneras de América Latina como Santiago, Bogotá y Ciudad de México.

Por su parte, en cuanto a infraestructura de carga, el despliegue de cargadores rápidos y ultra-rápidos públicos y privados será importante para la adopción masiva del vehículo eléctrico. Los modelos integrados de "*charging-as-a-service*" y micro-redes urbanas podrían permitir mayor resiliencia y flexibilidad en momentos de alta demanda energética.

En relación con la descarbonización integral, la electrificación se combina con el desarrollo de biocombustibles, hidrógeno verde y estrategias de integración energética urbana para descarbonizar otros modos como el transporte de mercancías o los servicios logísticos de última milla.

8.1.2 Digitalización, inteligencia artificial y sistemas inteligentes

El avance de plataformas MaaS, aplicaciones de gestión de datos urbanos, sistemas inteligentes de transporte e inteligencia artificial (IA) está trans-

formando la gestión del tránsito, la planificación y la experiencia del usuario (Yañez-Pagans et al., 2019).

Acerca de la gestión inteligente del tránsito (ITS), el uso de sensores de tráfico, cámaras, Big Data y algoritmos de IA permite una gestión dinámica de semáforos, rutas y prioridades, reduciendo congestión y tiempos de viaje hasta un 25% en urbes avanzadas (Hannon et al., 2019).

Ahora bien, sobre los algoritmos predictivos, la IA aplicada al transporte logra prever picos de demanda, optimizar frecuencias de transporte público y sugerir rutas alternativas en tiempo real, con beneficios directos en la reducción de emisiones y accidentes.

8.1.3 Movilidad como Servicio (MaaS) y plataformas integradas

La proliferación de bicicletas eléctricas, *scooters* y sistemas de movilidad compartida reducen la dependencia del automóvil privado y ofrecen soluciones flexibles para el "primer y último kilómetro" (ONU-Hábitat, 2024).

En relación con la consolidación de la Movilidad como Servicio, se prevé que para 2035, hasta el 50% de los viajes urbanos en grandes ciudades puedan ser gestionados mediante aplicaciones MaaS, que integran bicicletas, *scooters*, trenes, buses y movilidad compartida sobre una única plataforma de reserva y pago.

Por otro lado, a propósito de las plataformas multimodales, las plataformas digitales permiten transiciones más fluidas entre modos (por ejemplo, entre bicicleta pública y metro, o bus y micromovilidad) y personalizan la experiencia del usuario en función de preferencias, sostenibilidad y accesibilidad.

8.1.4 Vehículos autónomos y conectados

Aunque en fase experimental, los vehículos autónomos y conectados representan una disrupción potencial, pero también retos en regulación, seguridad y cambio modal (Newman y Kenworthy, 2015).

Sobre la emergencia de la autonomía, aunque aún en fase piloto en la mayoría de regiones, para 2035 los vehículos autónomos podrían representar entre 10% y 20% de los viajes urbanos en mercados desarrollados (Heineke et al., 2023). Su potencial reside en la reducción de hechos viales, la optimización de flotas de taxis y el transporte a demanda, así como a la conversión de parte del espacio público actualmente destinado a estacionamientos.

En tanto, en cuanto a vehículos conectados, la conectividad vehículo-infraestructura (V2X) facilitará una integración más segura y eficiente en-

tre transporte público, privado y peatones, reforzando la visión "cero víctimas" y favoreciendo la gestión ecológica del tránsito (Hannon et al., 2019).

8.1.5 Micromovilidad, movilidad compartida y nuevas formas de servicio

La dinámica urbana contemporánea ha catalizado la emergencia de un ecosistema de transporte diverso y en constante evolución, marcado por la irrupción de la micromovilidad, la expansión de los modelos de servicio compartido y la optimización logística mediante tecnologías innovadoras. Estas nuevas formas de desplazamiento y distribución no solo representan alternativas a la movilidad tradicional basada en el vehículo particular, sino que también ofrecen soluciones prometedoras para abordar desafíos críticos como la congestión, la contaminación y la accesibilidad.

A este respecto una de las tendencias es el crecimiento exponencial, pues se calcula que la micromovilidad eléctrica (bicicletas, patinetas, *scooters*) puede cubrir hasta el 30% de los desplazamientos urbanos cortos para 2030. Su éxito depende de la existencia de infraestructura segura, políticas regulatorias claras e integración con el transporte masivo.

Otra tendencia es la movilidad bajo demanda. Los servicios de *carsharing* (vehículos compartidos), *ride-hailing* (transporte por aplicación) y vehículos bajo suscripción, ofrecen flexibilidad y accesibilidad sin ejercer presión sobre el parque vehicular total ni la infraestructura vial.

Por último, la logística urbana inteligente, donde los sistemas de "*smart last mile*" utilizan IA y vehículos eléctricos automatizados (e incluso robots y drones en zonas piloto), para optimizar la distribución de mercancías y reducir emisiones y congestión en el comercio electrónico.

8.1.6 Urbanismo táctico, ciudades post-pandemia y resiliencia

Las secuelas de la pandemia de COVID-19 han acelerado algunas tendencias, como la revalorización de la vida de barrio, el teletrabajo y el uso intensivo del espacio público. El urbanismo táctico, intervenciones rápidas y de bajo costo para poner a prueba cambios en la movilidad y el uso del espacio, se ha consolidado como herramienta de gobernanza ágil (Moreno et al., 2021).

En relación con el urbanismo digital y la planificación basada en datos, un par de tendencias son de interés: ciudades sensorizadas y gestión urbana integral, donde la sensorización masiva (Internet de las Cosas [IoT]) y el análisis de macrodatos permiten una planificación dinámica, adaptativa y transparente, además de facilitar mecanismos de gobernanza participativa y monitoreo ambiental continuo (Italia, 2023; ONU-Hábitat, 2024); gemelos

digitales urbanos, tal que herramientas de modelización a gran escala ("*Digital Twins*") permitirán prever, simular y ajustar políticas de movilidad antes de su implementación física, disminuyendo riesgos y optimizando inversiones.

A la luz de estas tendencias emergentes, se proyectan cambios significativos en la composición modal, las tecnologías de transporte y las herramientas de planificación urbana. Diversos estudios prospectivos y organismos internacionales han comenzado a estimar el impacto de estas transformaciones sobre los patrones de movilidad en las principales ciudades del mundo. La Tabla 10 resume algunas de las proyecciones más relevantes para el período 2030–2035, en relación con la electrificación, digitalización, automatización y gestión inteligente del tránsito urbano.

En síntesis, el avance hacia la descarbonización, la digitalización y la gestión integrada de la movilidad redefinirá la experiencia urbana en todas sus dimensiones: ambiental, social, tecnológica y cultural. El éxito de la transición dependerá, no solo de la adopción tecnológica, sino de la capacidad de las ciudades para generar un ecosistema regulatorio, institucional y educativo capaz de orquestar la equidad, la resiliencia y la adaptabilidad frente a nuevas disrupciones.

8.2 Desafíos estructurales

Existen retos persistentes que la ingeniería ambiental y los planificadores urbanos deberán abordar. Entre estos, las desigualdades sociales y territoriales, pues persisten brechas de acceso para mujeres, población de bajos ingresos y grupos vulnerables, lo que exige políticas focalizadas e infraestructura inclusiva (ONU-Hábitat, 2024); financiamiento y gobernanza, dado que el financiamiento de la movilidad sostenible depende de la creatividad en modelos de inversión y tarifas inteligentes, así como de la integración de actores públicos y privados (Italia, 2023); adaptación al cambio climático, por cuanto las ciudades deben anticipar eventos extremos (olas de calor, inundaciones) que afectan la resiliencia de la infraestructura de transporte y agravan los problemas de salud pública (ONU-Hábitat, 2024); gestión de datos y privacidad, ya que la masificación del monitoreo y análisis digital de la movilidad requiere protocolos éticos para la protección de datos y la equidad en el acceso a la tecnología (Calzada, 2021).

8.3 Oportunidades para la ingeniería ambiental

La ingeniería ambiental tiene un rol estratégico en la integración disciplinaria y en la innovación de instrumentos que permitan monitorear, modelar y mitigar impactos de la movilidad, así como diseñar espacios urbanos más

Tabla 10. Proyecciones de transformación tecnológica en movilidad urbana (2030-2035).

Tendencia	Proyección para 2030-2035	Oportunidad	Principal desafío
Vehículos eléctricos urbanos	30-50% de las ventas totales (zonas urbanas).	Reducción emisiones locales.	Cobertura infraestructura.
Buses urbanos eléctricos	> 60% de flota nueva.	Reducción emisiones locales.	Cobertura infraestructura.
MaaS y plataformas integradas	50% de los viajes urbanos gestionados digitalmente.	Intermodalidad, eficiencia.	Inclusión tecnológica, privacidad.
Vehículos autónomos	10-20% de viajes urbanos en mercados avanzados.	Reducción emisiones locales.	Cobertura infraestructura.
Micromovilidad eléctrica	Hasta 30% de viajes urbanos de menos de 5 km.	Primer y último kilómetro	Regulación y seguridad vial
Reducción de tiempos de viaje	Hasta –25% con ITS y análisis de Big Data.	Planificación basada en evidencia. Flexibilidad, participación.	Protección de datos personales. Permanencia, escalabilidad.
Gemelos digitales urbanos	Planificación y simulación a escala en 50% de ciudades top.	Planificación basada en evidencia. Flexibilidad, participación.	Protección de datos personales. Permanencia, escalabilidad.

Nota. Elaboración propia con base en Heineke et al. (2023), Bayrak et al. (2024), Italia (2023), Yañez-Pagans et al. (2019), Hannon et al. (2019), ONU-Hábitat (2024), Newman y Kenworthy, (2015), Moreno et al. (2021), OMS (2022).

saludables y sostenibles. El uso de indicadores de desempeño ambiental en transporte, la planificación colaborativa y la evaluación de ciclo de vida de tecnologías serán herramientas de significación en las próximas décadas (Ferrara de Giner et al., 2019; Italia, 2023).

9. Urbanismo táctico y regeneración urbana como facilitadores de la transición hacia la movilidad sostenible.

Las ciudades del siglo XXI enfrentan el reto de rediseñar su movilidad y sus espacios urbanos para hacer frente a problemas ambientales, desigualdades sociales y urgencias derivadas del cambio climático y el agotamiento de los modelos tradicionales basados en el automóvil privado. La ingeniería ambiental, junto con el urbanismo contemporáneo, juega un papel fundamental en la promoción de soluciones innovadoras, equitativas y resilientes.

9.1 Urbanismo táctico: estrategias, escalabilidad y límites

El urbanismo táctico ha emergido como una de las herramientas más dinámicas y flexibles para transformar el espacio público urbano, fomentar

la movilidad activa, mejorar la seguridad vial y experimentar, a bajo costo, con políticas de movilidad sostenible (Moreno et al., 2021). Este enfoque se basa en intervenciones rápidas, reversibles y participativas, que buscan reconfigurar temporalmente calles, plazas y avenidas a fin de priorizar a peatones, ciclistas, transporte público y actividades sociales.

Algunas estrategias de urbanismo táctico incluyen la creación de ciclovías temporales, "calles abiertas" para el tránsito exclusivo de peatones y bicicletas, ampliación de aceras, instalación de mobiliario urbano removible, implementación de "*parklets*" (mini-parques en plazas de estacionamiento), y reducción temporal del límite de velocidad vehicular. Estas prácticas permiten evaluar el impacto real de los cambios antes de su formalización mediante obra permanente, impulsar procesos intensivos de participación ciudadana y promover una cultura de movilidad activa y de apropiación del espacio público por diversos grupos sociales

Durante la pandemia de COVID-19, muchas ciudades implementaron urbanismo táctico para responder a la necesidad de distanciamiento social, habilitando corredores peatonales adicionales y ciclovías emergentes, con resultados tan positivos que en numerosos casos estas intervenciones pasaron a volverse permanentes (Moreno et al., 2021; ONU-Hábitat, 2024). Barcelona y Bogotá representan ejemplos emblemáticos de éxito en este campo: la capital catalana se apoyó en las "supermanzanas" y el urbanismo blando, mientras que la capital colombiana multiplicó su red de ciclorrutas en tiempo récord.

No obstante, se reconoce que el urbanismo táctico presenta desafíos, entre ellos la dificultad para escalar proyectos temporales a soluciones estructurales y la necesidad de coordinar con regulaciones urbanísticas, presupuestos e intereses contrapuestos (ONU-Hábitat, 2024).

Para comprender la diversidad de enfoques que adopta el urbanismo táctico en distintas ciudades, la Tabla 11 sintetiza algunos de los tipos de intervención más representativos, sus objetivos principales y ejemplos emblemáticos a nivel internacional. Esta sistematización permite visualizar cómo estas acciones contribuyen, desde distintas escalas y contextos, a promover la movilidad activa, recuperar el espacio público y fortalecer la seguridad urbana.

Tras revisar los casos expuestos en la tabla, se identifican características compartidas en las intervenciones de urbanismo táctico: bajo costo, reversibilidad, inmediatez y un fuerte componente participativo ciudadano.

Estas cualidades permiten que los cambios sean evaluables en tiempo real y generen evidencia para su consolidación como políticas públicas permanentes. El caso de las supermanzanas en Barcelona, implementadas inicialmente como intervenciones tácticas en 2013 y que ahora se consolidan con obras estructurales, ejemplifica cómo estas estrategias pueden escalar hacia propuestas urbanas inclusivas y sostenibles, siempre que se acompañen de procesos de diseño participativo y evaluación rigurosa (Sansão Fontes et al., 2019; Pacheco, 2021). Además, experiencias como la de Barcelona se van reproduciendo en otras ciudades como Buenos Aires, Quito y Nueva York, reforzando la idea de que el urbanismo táctico puede ser un catalizador eficaz de transformación urbana (Medina, 2025).

9.2 Planes de regeneración urbana y movilidad sostenible

Junto con el urbanismo táctico, los planes de regeneración urbana constituyen instrumentos de mayor amplitud y permanencia, orientados a recuperar barrios, corredores urbanos y grandes áreas degradadas, conjugando objetivos ambientales, sociales y económicos. Estos planes suelen articular políticas de mejora de la vivienda y el entorno, revitalización del espacio público y, centralmente, reconfiguración de la movilidad para favorecer modos sostenibles.

Los procesos exitosos de regeneración urbana incorporan: rehabilitación y densificación de tejidos urbanos obsoletos con mejora de la conectividad; creación de corredores verdes y ejes de movilidad activa conectados con el transporte masivo; intervenciones para garantizar accesibilidad universal; integración de innovación tecnológica y estrategias de eficiencia energética en el diseño urbano y de transporte; mecanismos de participación y corresponsabilidad social, contemplando la gobernanza multinivel (Italia, 2023; ONU-Hábitat, 2024).

Ejemplos ilustrativos incluyen los programas de revitalización integral de Medellín en Colombia), que combinaron la creación de sistemas de transporte público (Metrocable, tranvía) con mejoras en el espacio público, integración social y reducción de la inseguridad, y el Plan Madrid Río en la capital española, donde la recuperación de zonas industriales y viarias derivó en parques lineales y corredores peatonales y ciclistas, de alta valoración comunitaria.

A nivel internacional, la incorporación de criterios de movilidad sostenible en los planes de regeneración urbana ha demostrado reducir significativamente la huella de carbono, revitalizar la economía local, aumentar la

Tabla 11. Tipos y objetivos del urbanismo táctico en movilidad urbana.

Tipo de intervención	Objetivo principal	Ejemplo destacado
Ciclovías temporales	Movilidad activa, seguridad.	Bogotá, París.
Calles abiertas / peatonales	Recuperar espacio público.	Nueva York, Quito.
Parklets	Revalorizar microespacios.	San Francisco, Buenos Aires.
Intervenciones escolares	Seguridad de niños y familias.	Barcelona, Ciudad de México.

Nota. Elaboración propia con base en ONU-Hábitat (2024); Moreno et al. (2021).

cohesión y seguridad social, y mejorar la calidad ambiental de las ciudades (Italia, 2023; Moreno et al., 2021; ONU-Hábitat, 2024).

La imagen en la Figura 5 representa cómo el urbanismo táctico actúa como catalizador de cambios inmediatos y laboratorio de innovación, alimentando los planes de regeneración urbana que consolidan, estabilizan y expanden soluciones hacia modelos urbanos resilientes y sostenibles.

9.3 Síntesis de retos y oportunidades para la movilidad urbana sostenible

En el contexto contemporáneo, la movilidad urbana sostenible enfrenta una compleja encrucijada de desafíos estructurales, sociales, ambientales y tecnológicos. De allí, esta síntesis que enfatiza la naturaleza multidimensional de estos retos y detalla tanto las amenazas como las ventanas de oportunidad para la ingeniería ambiental y la gestión urbana (UITP, 2024).

9.3.1 Retos estructurales y sistémicos

Desigualdad urbana persistente. Las brechas socioespaciales se manifiestan en el acceso desigual a servicios de transporte eficientes, seguros y asequibles, especialmente para poblaciones vulnerables como mujeres, personas con discapacidad, adultos mayores y habitantes de periferias urbanas. Esta realidad perpetúa ciclos de segregación socioeconómica y dificulta la movilidad equitativa (Pereira et al., 2016).

Fragmentación institucional y gobernanza débil. La multiplicidad de actores y la falta de coordinación intergubernamental dificultan la implementación de políticas integradas y sostenibles. Las carencias en capacidades técnicas y en marcos regulatorios limitan la eficacia de las transformaciones requeridas (Huerta y Gars, 2020).

Financiamiento insuficiente y modelos de negocio poco innovadores. La sostenibilidad económica de los sistemas de transporte urbano se ve amenazada por la escasez de recursos, dependencia excesiva de subsidios y dificultades para captar inversión privada y multilateral de forma equilibrada (Ardila-Gomez y Ortegon-Sanchez, 2016).

Adaptación frente al cambio climático y resiliencia. Las urbes enfrentan riesgos crecientes asociados a eventos climáticos extremos como inundaciones, olas de calor y deslizamientos, que comprometen la operación y la seguridad de infraestructuras de movilidad. A su vez, la urgencia de descarbonizar el transporte desafía la transición tecnológica y energética (UITP,2024).

Gestión de datos y privacidad. La proliferación de sistemas inteligentes, el uso de Big Data y el desarrollo de plataformas MaaS plantean retos en torno a la protección de la privacidad, la equidad en el acceso tecnológico y la interoperabilidad de soluciones digitales (Docherty et al., 2018).

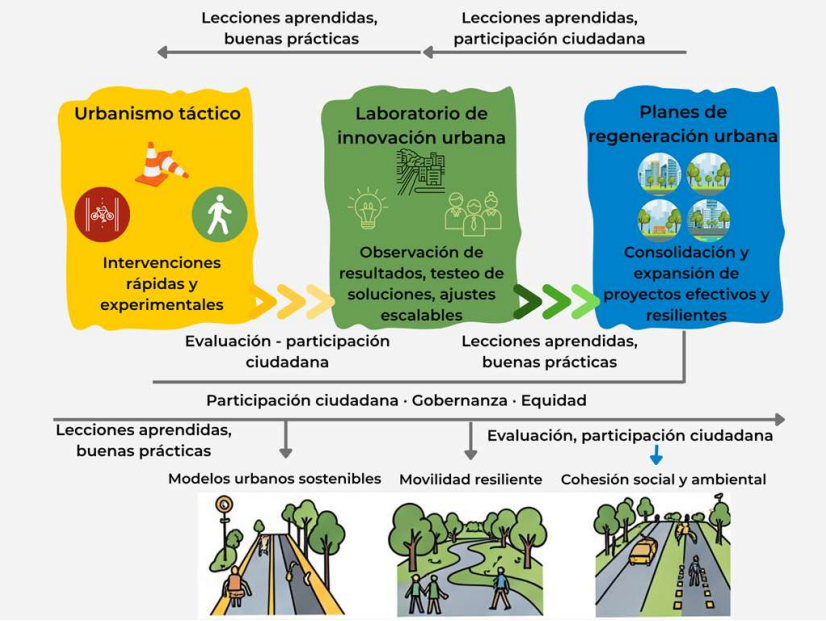


Figura 5. Esquema de sinergia entre urbanismo táctico y regeneración urbana.

Resistencia sociocultural al cambio modal. Persisten patrones culturales a favor del uso del vehículo particular y percepciones negativas hacia el transporte público y la movilidad activa, agravados por temas de seguridad y confort. Cambiar hábitos requiere políticas integradas de comunicación, educación y participación social (Rasmusen et al., 2023).

9.3.2 Oportunidades emergentes para la transformación

Innovación tecnológica y digitalización. El despliegue de tecnologías como vehículos eléctricos, infraestructuras inteligentes, integración de plataformas digitales y MaaS abre nuevas posibilidades para la optimización de recursos, la reducción del impacto ambiental y la personalización de servicios urbanos (Shaheen y Cohen, 2020).

Urbanismo táctico y regeneración urbana. Las intervenciones rápidas y experimentales facilitan la apropiación ciudadana del espacio, permiten probar soluciones de bajo costo y allanan el camino hacia planes de regeneración urbana de mayor escala, contribuyendo a la resiliencia y la cohesión social (Gurdon, 2023).

Movilidad activa y accesibilidad universal. El fortalecimiento de redes peatonales y ciclovías, junto con el diseño universal y la transversalización de enfoques de género y diversidad, potencia el acceso de toda la ciudadanía al derecho a la ciudad, disminuye enfermedades crónicas y mejora la calidad de vida urbana (GIZ et al., 2022).

Participación comunitaria y gobernanza colaborativa. Existen avances significativos en metodologías de codiseño, presupuestos participativos y mecanismos de consulta pública que legitiman y robustecen las decisiones en movilidad, facilitando la identificación y resolución temprana de conflictos (Euroclima, 2024).

Economía circular y financiamiento innovador. El desarrollo de soluciones basadas en la economía circular, la biomímesis (que nos invita a ver la naturaleza no solo como un recurso a explotar, sino como un mentor y un modelo del cual aprender para crear un futuro más sostenible y armonioso), así como la infraestructura verde pueden atraer recursos internacionales y favorecer la creación de ecosistemas económicos urbanos más robustos y adaptativos (UNEP FI, 2021).

Las oportunidades para avanzar hacia una movilidad urbana verdaderamente sostenible radican en la capacidad de las ciudades y la ingeniería

ambiental para orquestar soluciones intersectoriales, flexibles y adaptativas, que integren la voz comunitaria, potencien la innovación tecnológica, apuesten por la equidad y garanticen un balance entre viabilidad económica, resiliencia ambiental y cohesión social. Esto proporcionará una base sólida sobre la cual cimentar nuevas estrategias capaces de transformar los patrones de desplazamiento y la calidad de vida urbana, incluso en los escenarios de mayor incertidumbre a futuro.

10. Conclusiones

La movilidad urbana, en el contexto de la ingeniería ambiental y la gestión integrada de las ciudades contemporáneas, constituye un eje multidimensional donde convergen desafíos históricos, tecnológicos, sociales, ambientales y económicos. El análisis desarrollado en este capítulo aporta una visión crítica y proactiva sobre el papel de la movilidad como factor transformador y determinante en el desarrollo sostenible de las áreas urbanas.

La transición hacia modelos de movilidad sostenible no puede ser concebida solo como una mejora sectorial del transporte, sino como un proceso sistémico de transformación de la ciudad. Esto exige articular políticas públicas, planificación urbana, innovación tecnológica, educación ambiental y mecanismos sólidos de gobernanza, así como la promoción decidida de modos activos de desplazamiento, como la caminabilidad y el ciclismo, que potencian entornos urbanos saludables y democratizan el acceso al espacio público.

Una movilidad eficiente, accesible y equitativa es indispensable para garantizar la calidad del aire, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los efectos adversos del cambio climático, en sintonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Nueva Agenda Urbana. El paradigma contemporáneo privilegia la accesibilidad sobre la mera movilidad, enfatizando que el acceso efectivo y seguro a oportunidades básicas como trabajo, educación, salud y recreación debe estar garantizado para todos los sectores de la población, considerando la intersección de género, edad, etnia, discapacidad y condición socioeconómica; de este modo, los enfoques inclusivos y sensibles a la diversidad refuerzan el derecho a la ciudad.

Persisten desafíos críticos, como la segregación territorial, la exclusión socioeconómica en las periferias urbanas y la falta de infraestructura accesible para mujeres, niños, personas mayores y con discapacidad. Afrontar estos retos exige enfoques de diseño universal, políticas tarifarias justas y la transversalidad del enfoque de derechos en las decisiones de transporte y

urbanismo, así como la incorporación explícita de indicadores integrales que evalúen impactos ambientales, sociales y económicos de las políticas de movilidad.

En la última década se ha visto un avance exponencial en la digitalización de la movilidad: sistemas inteligentes de transporte, plataformas multimodales (MaaS), gestión en tiempo real de la red vial y Big Data han permitido una optimización significativa en la eficiencia, reducción de emisiones, mejora de la experiencia del usuario y personalización de servicios. La electrificación de flotas, los vehículos autónomos y la masificación de la micromovilidad perfilan un futuro donde la transformación tecnológica debe estar acompañada de marcos regulatorios éticos y equitativos, garantizando la protección de datos y la accesibilidad a la innovación digital en todas las capas sociales.

El urbanismo táctico ha demostrado ser una estrategia eficaz para implementar soluciones rápidas, flexibles y participativas a problemas de movilidad y espacio público. Estas intervenciones han servido como laboratorios de innovación ciudadana, prefigurando políticas permanentes a través de la experiencia práctica. Paralelamente, los planes de regeneración urbana consolidan estas innovaciones y las escalan hacia una transformación estructural, recuperando barrios, revitalizando corredores verdes y garantizando conectividad multimodal. La combinación de flexibilidad táctica con una visión estratégica, sustentada en la cocreación con la sociedad civil y alianzas público-privadas-comunitarias, es significativo para alcanzar ciudades más seguras, cohesionadas y resilientes ante el cambio climático o crisis inesperadas, como lo evidenció la reciente pandemia que obligó a replantear temporalidades, densidades y patrones de movilidad urbana.

A pesar del avance teórico y la acumulación de buenas prácticas, persisten retos estructurales que limitan la ejecución efectiva de políticas integrales de movilidad urbana: fragmentación institucional y falta de gobernanza multinivel efectiva, insuficiencia de recursos financieros y mecanismos innovadores de inversión, resistencia sociocultural al cambio modal, con predominio del paradigma automovilístico y barreras culturales frente a la movilidad activa, vulnerabilidad climática y diversidad de riesgos ambientales que demandan infraestructuras de transporte más resilientes y adaptativas. La superación de estos obstáculos requiere fortalecer capacidades técnicas locales, integrar a la ciudadanía en la toma de decisiones y avanzar en marcos normativos más flexibles y transparentes.

La ingeniería ambiental, apoyada en la investigación interdisciplinar y la colaboración internacional, tiene ante sí la oportunidad de liderar el rediseño

de la movilidad urbana. La adopción de tecnologías limpias, la consolidación de economías circulares en el transporte y el impulso de modelos urbanos compactos, policéntricos y de usos mixtos son tendencias que seguirán creciendo en las próximas décadas. La orientación hacia la descarbonización total del sistema de movilidad, la integración de inteligencia artificial y redes de infraestructura verde permitirán enfrentar tanto viejos como nuevos desafíos, favoreciendo ciudades más saludables, justas y resilientes.

Así, para alcanzar ciudades verdaderamente sostenibles, competitivas e inclusivas, es primordial concebir la movilidad urbana no como un fin en sí mismo, sino como un derecho y servicio público fundamental, capaz de potenciar la equidad, la salud y la prosperidad comunitaria. La movilización de voluntades políticas, la innovación permanente, la comprensión de las particularidades socioculturales y la cooperación internacional, junto con la evaluación continua de impactos desde una perspectiva integral, marcan la hoja de ruta imprescindible para los próximos años.

En conclusión, la movilidad urbana sostenible constituye el nervio central de la agenda ambiental contemporánea. Su abordaje exige la conjugación de saberes técnicos, sensibilidad social, visión prospectiva y gobernanza democrática, enmarcando las funciones de la ingeniería ambiental y la planificación urbana como disciplinas al servicio del bienestar colectivo y el equilibrio ecosistémico urbano.

Literatura Citada

ACOSTA, C., F. JAUREGUI-FUNG, B. LANA Y D. AULESTIA

2025. *Financiamiento del desarrollo urbano: suelo y movilidad pública en ciudades de Asia y América Latina*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2025/12), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/f33b4274-6111-4fce-aff5-53f05bab9d76/content

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ

2021. *La calidad del aire en TransMilenio mejoró tras modernización de la flota*. https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/calidad-del-aire-en-transmilenio-mejoro

ALCÁNTARA DE VASCONCELLOS, E.

2010. *Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad*. CAF. https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/414/An%C3%A1lisis_de_la_movilidad_urbana._ Espacio,_medio_ambiente_y_e quidad.pdf

ALIANZA POR LA REGENERACIÓN

s.f.. *Ciudad de los 15 minutos*. Alianza por la Regeneración. https://alianzaporlaregeneracion.es/transporte-y-movilidad/ciudad-de-los-15-minutos/

ARDILA-GÓMEZ, A. Y A. ORTEGÓN-SÁNCHEZ

2016. *Sustainable Urban Transport Financing from the Sidewalk to the Subway: Capital, Operations, and Maintenance Financing*. World Bank Group. https://goo.su/ATmg

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICO [UTIP]

2023. *Hacia un estilo de vida multimodal: Reforzando el transporte público con movilidad activa y micromovilidad* [Policy Brief]. https://www.uitp.org/publications/policy-brief-multimodal-lifestyle/

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICO [UITP]

2024. *Global Economic Outlook 2024: Taking the pulse of the public transport sector*. Union Internationale des Transports Publics. https://www.uitp.org/publications/global-economic-outlook-2024/

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICO [UITP]

2024. *Adapting public transport to climate change: The key for resilient cities*. [Policy Brief]. Recuperado de https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2024/08/20240806_Adapting-PT-Climate-Change_WEB.pdf

BANISTER, D.

2008. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy, 15*(2), 73–80. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005

BID (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO)

2019. *Programa de Movilidad Urbana Sostenible de Curitiba*. https://www.iadb.org/es/proyecto/BR-L1532

BID (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO)
2021. *El rol del transporte activo en la mejora de la movilidad de las personas de bajos ingresos en América Latina y el Caribe.* https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-rol-del-transporte-activo-en-la-mejora-de-la-movilidad-de-las-personas-de-bajos-ingresos-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf

BID (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO)
2022. *Hechos estilizados de la movilidad urbana en América Latina y el Caribe* (Nota técnica IDB-TN-2420). https://doi.org/10.18235/0004239

BID (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO)
2025. *Movilidad con impacto: Soluciones de transporte que mejora vidas* [Artículo de blog]. Banco Interamericano de Desarrollo. https://blogs.iadb.org/efectividad-desarrollo/es/movilidad-con-impacto-soluciones-de-transporte-que-mejora-vidas/

BM (BANCO MUNDIAL)
2024a. *Transporte: Panorama general*. https://www.bancomundial.org/es/topic/transport/overview

BM (BANCO MUNDIAL)
2024b, 13 de marzo. *Promoting livable cities by investing in urban mobility.* World Bank. https://www.worldbank.org/en/results/2024/03/13/promoting-livable-cities-by-investing-in-urban-mobility

BM (BANCO MUNDIAL)
2021. *Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group*. The World Bank. https://documents1.worldbank.org/curated/en/708531625052490238/pdf/Electrification-of-Public-Transport-A-Case-Study-of-the-Shenzhen-Bus-Group.pdf

BAYRAK, Y., K. HEINEKE, B. KLOSS Y D. SCURTU
2024. *The micromobility city: Measuring the impact of greater bicycle use*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/the-micromobility-city-measuring-the-impact-of-greater-bicycle-use

BERTOLINI, L.
2017. *Planning the mobile metropolis: Transport for people, places and the planet*. Palgrave Macmillan.

BOCAREJO, J.
2020. Congestion in Latin American Cities: Innovative Approaches for a Critical Issue. *International Transport Forum Discussion Papers* No./ 2020/28. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/938de08e-en

C40 CITIES
2020. *Selección de rutas para escalar la operación de buses eléctricos en Santiago de Chile: Recomendaciones para el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones*. ICCT – International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ZEBRA-seleccion-rutas-stgo-nov2020.pdf

C40 CITIES

2021. *Sustainable mobility in Buenos Aires* [Estudio de caso]. https://www.c40.org/es/case-studies/sustainable-mobility-buenos-aires/

CALATAYUD, A., S. SÁNCHEZ GONZÁLEZ, F. BEDOYA-MAYA, F. GIRALDEZ ZÚÑIGA Y J. M. MÁRQUEZ

2021. *Urban Road Congestion in Latin America and the Caribbean: Characteristics, Costs, and Mitigation*. https://doi.org/10.18235/0003149

CALZADA, I.

2021. Smart City Citizenship. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 5 (1), 145-110. https://doi.org/10.2139/ssrn.3804956

CASTAÑO, J.

2023. 11 de marzo. *Las 'superilles' de Barcelona se convierten en referente internacional para humanizar las ciudades y reducir las emisiones*. Público. https://www.publico.es/actualidad/superilles-barcelona-convierten-referente-internacional-humanizar-ciudades-reducir-emisiones.html

CELERING

2024. *Movilidad urbana inteligente*. https://celering.com/movilidad-urbana-inteligente/

CERVERO, R. Y K. KOCKELMAN

1997. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199–219. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00009-6

CERVERO, R.

2013. *Transport infrastructure and the environment: Sustainable mobility and urbanism* (IURD Working Paper Series No. 2013-03). University of California, Berkeley. https://escholarship.org/uc/item/3690j6pw

CEPAL (COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE)

2022. *Inclusión y movilidad urbana con un enfoque de derechos*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47974/S2200483_es.pdf

CHAVARRO, N.

2024. *TransMilenio y Ciudadanos Sostenibles: Tejiendo un Futuro de Movilidad Consciente y Comprometida con el Corazón de la Ciudad.* [Seminario de investigación, Universidad Escuela de Administración de Negocios.] https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/d89b067e-9c1d-4d4b-a6ac-96faa57c0b17/content

DEL ROMERO RENAU, L., P. PUERTOS, N. MARTÍNEZ, M. PIÑERA, C. PONCE, L. SÁNCHEZ, J. SILVESTRE Y J. TORRES DA SILVA

2023. Cambio climático, movilidad y transporte en una ciudad capital verde europea. *Desarrollo, Estado y Espacio*, 2(1), e0023. https://doi.org/10.14409/dee.2023.1.e0023

DOCHERTY, I., G. MARSDEN Y J. ANABLE

2018. The governance of smart mobility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 115, 114-125. https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.09.012

ESPINOZA, S.

2021. *Gestión del tráfico mediante sistemas de transporte inteligentes con dispositivos en las vías y los vehículos*. SITT y CIA SAS. https://sittycia.com/blog-2/gestion-del-trafico-mediante-sistemas-de-transporte-inteligentes-con-dispositivos-en-las-vias-y-los-vehiculos/

EUROCLIMA

2024. *Movilidad urbana 2018-2024: Resultados y lecciones de la implementación* (Calderón Peña, P. & Rincón, M. Eds.). Agencia Francesa de Desarrollo (AFD) y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. https://www.euroclima.org/

EURONEWS

2025. *Reducir el tráfico un 25% en Barcelona, la ciudad con mayor densidad de coches de la UE*. Euronews. https://es.euronews.com/green/2025/03/25/reducir-el-trafico-un-25-en-barcelona-la-ciudad-con-mayor-densidad-de-coches-de-la-ue-podr

FERRARA DE GINER, G., M. TORRES PARRA, E. BUROZ Y R. LAIRET (EDS.)

2019. *Fundamentos de la Ingeniería Ambiental*. Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/attachments/80958614/12fe9486-936f-4736-afc6-18887236be3d/Libro_Fundamentos _de_Ingenieria_Ambiental.pdf

FRANCO CALDERÓN, J. A., Y E. ESTUPIÑÁN ESCALANTE

2023. Movilidad y transporte inteligente: una revisión de aplicaciones y tecnologías emergentes en el contexto urbano. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 10(20), 79-87. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9438226.pdf

GARCÍA SEPÚLVEDA, S. A., Y A. RAMÍREZ VIVEROS

2023. Movilidad urbana como vía para el desarrollo sostenible: Caso Nuevo León. *Política, Globalidad y Ciudadanía*, 9(17), 5–23. https://doi.org/10.29105/pgc9.17-10

GEHL, J.

2010. *Cities for people*. Island Press.

GIAMBIAGI, D., Y B. G. GARCÍA

2022. *Guía para ciudades más saludables: Principios e instrumentos para promover la salud a través de la planificación y la gestión urbana*. CAF - Banco de Desarrollo de América Latina https://www.caf.com/media/4663135/guia-para-ciudades-mas-saludables.pdf

GIRALDEZ ZÚÑIGA, F., S. SÁNCHEZ GONZÁLEZ Y A. CALATAYUD

2022. *Hechos estilizados de la movilidad urbana en América Latina y el Caribe*. https://doi.org/10.18235/0004239

GIZ, MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA, Y UNIVERSIDAD EAFIT

2022. *Estrategia nacional de movilidad activa con enfoque de género y diferencial*. Programa EUROCLIMA+. https://www.giz.de/en/downloads/GIZ-2022-es-ENMA-Digital.pdf

GOBIERNO DE LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES

2021. *La Ciudad y su compromiso ambiental con el transporte*. https://buenosaires.gob.ar/noticias/la-ciudad-y-su-compromiso-ambiental-con-el-transporte

GOUVEIA, N., J. L. RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, J. KEPHART, A. ORTIGOZA, D. RODRÍGUEZ, R. M. BETANCOURT, J. L. SANGRADOR, A. V. DIEZ ROUX, B. N. SÁNCHEZ, G. YAMADA AND THE SALURBAL GROUP

2024. Short term associations between fine particulate air pollution and cardiovascular and respiratory mortality in 337 cities in Latin America. *Science of the Total Environment*, 920, Article/ 171073. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171073

GURDON, C.

2023. Avanzando hacia una planificación integrada y sostenible del transporte urbano en América Latina. *EURE*, 49(146), 1-19. https://www.redalyc.org/journal/196/19673772014/19673772014.pdf

HANNON, E., S. KNUPFER, S. STERN Y J. T. NIJSSEN

2019. *The road to seamless urban mobility: an integrated perspective*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/the-road-to-seamless-urban-mobility

HEINEKE, K., N. LAVERTY, T. MÖLLER Y F. ZIEGLER

2023. *The future of mobility.* McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-global-implications

HERNÁNDEZ CERDA, C., A. ÁVILA GALARZA Y D. CERDA ALONSO

2023. Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1):165-184. https://www.scielo.sa.cr/pdf/rca/v57n1/2215-3896-rca-57-01-17718.pdf

HIDALGO, D. Y C. HUIZENGA

2013. Implementation of sustainable urban transport in Latin America. *Research in Transportation Economics,* 40(1):66-77. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.034

HUANG, Y., Y. LI, N. GOUVEIA, O. R. SÁNCHEZ-CCOYLLO Y G. D. THURSTON

2021. Ambient fine particulate matter in Latin American cities: Levels, population exposure, and associated urban factors. *Science of the Total Environment*, 772, 145035. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145035

HUERTA, O. Y J. GARS

2020. Planning mobility in a fragmented metropolitan area: The case of Prague and its suburbs, *OECD Regional Development Papers*, No. 8, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/4cdf2d31-en.

INSTITUTO DE POLÍTICAS PARA EL TRANSPORTE Y EL DESARROLLO [ITDP]

2020. *Ranking Ciclociudades 2020: un año de resiliencia y creatividad para la movilidad en bicicleta.* https://mexico.itdp.org/download-category/movilidad-activa/

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE)

2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

ITF (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM)

2023. *ITF Transport Outlook 2023*, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en.

ITALIA, M.

2023. *Movilidad urbana para más y mejores oportunidades*. Corporación Andina de Fomento (CAF). https://www.caf.com/media/4666452/impacto-caf-movilidad-urbana-informe-completo.pdf

JOSHI, S., A. BAILEY Y A. DATTA

2021. On the move? Exploring constraints to accessing urban mobility infrastructures. *Transport Policy*, 102, 61–74. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.11.005

LA REPÚBLICA

2021. *La calidad del aire en TransMilenio mejoró 78% con vinculación de la nueva flota de buses.* https://www.larepublica.co/economia/la-calidad-del-aire-en-transmilenio-mejoro-78-con-vinculacion-de-la-nueva-flota-de-buses-3199935

LYFT URBAN SOLUTIONS

(s.f.). *Curitiba* [Sitio web]. Recuperado el 24 de julio de 2025, de https://lyfturbansolutions.com/es/ciudades/curitiba

LÓPEZ, C., R. CUVILLO, P. MORCILLO, M. E. LÓPEZ-LAMBAS Y A. MONZÓN

2022. *Evolución de los Planes de Movilidad Urbana Sostenible*. Observatorio de la Movilidad Metropolitana, TRANSyT, Universidad Politécnica de Madrid. https://observatoriomovilidad.es/wp-content/uploads/2022/11/Monografia_I_OMM_2022_Evolucion_PMUS_A4.pdf

LOS ANGELES TIMES

2019. *Copenhague ha llevado los viajes en bicicleta a un nivel completamente diferente*. Los Angeles Times. https://www.latimes.com/espanol/internacional/articulo/2019-08-09/copenhague-ha-llevado-los-viajes-en-bicicleta-a-un-nivel-completamente-nuevo

MARTÍNEZ, R., C. MALDONADO Y J. SCHÖNSTEINER (EDS)

2022. *Inclusión y movilidad urbana con un enfoque de derechos humanos e igualdad de género: marco de análisis e identificación de instrumentos de política para el desarrollo de sistemas sostenibles de movilidad urbana en América Latina*, Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/74), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio. cepal.org/server/api/core/bitstreams/f668d5e7-f15b-40dd-8a3e-26e73e6a18b0/content

MEDINA, M. Á.

2025. *Salvador Rueda, creador de las supermanzanas:* "*No estoy contra los coches, sino a favor de darle derechos a la ciudad*". El País. https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2025-05-07/salvador-rueda-creador-de-las-supermanzanas-no-estoy-contra-los-coches-sino-a-favor-de-darle-derechos-a-la-ciudad.html

MINISTERIO DE ENERGÍA DE CHILE

2023. *Estudio UC demuestra uso de hidrógeno verde en el transporte público*. https://energia.gob.cl/noticias/nacional/estudio-uc-demuestra-uso-de-hidrogeno-verde-en-el-transporte-publico

MOBILISEYOURCITY

2023. *Desarrollando Planes de Movilidad Urbana Sostenible*. https://www.mobiliseyourcity.net/sites/default/files/2023-06/Desarrollando %20Planes %20de %20Movilidad%20Urbana%20Sostenible.pdf

MORÉ JARAMILLO, R. A. Y M. GIRET

2013. Movilidad sostenible en Bogotá D.C.: caso metro Bogotá. *Revista de Tecnología*, 12(2), 52–59. *https://revistas.unbosque.edu.co/index.php/RevTec/article/download/769/366/992*

MORENO, C., Z. ALLAM, D. CHABAUD, C. GALL Y F. PRATLONG

2021. Introducing the "15-Minute City": Sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities. *Smart Cities, 4*(1), 93–111. https://doi.org/10.3390/smartcities4010006

MOSCOSO, M., T. VAN LAAKE, C. QUIÑONES, C. PARDO Y D. HIDALGO (EDS)

2019. Transporte urbano sostenible en América Latina: evaluaciones y recomendaciones para políticas de movilidad. *Despacio*: Bogotá, Colombia. https://www.despacio.org/wp-content/uploads/2020/02/SUTLac-ESP-05022020-web.pdf

NAN ARQUITECTURA

2024. *La ciudad de los 15 minutos: un modelo urbano para el bienestar y la sostenibilidad.* Nan Arquitectura. https://nanarquitectura.com/2024/11/06/la-ciudad-de-los-15-minutos-un-modelo-urbano-para-el-bienestar-y-la-sostenibilidad/44896

NAVARRO, D., C. ACOSTA, D. AULESTIA Y F. JAUREGUI FUNG

2022. *Informe de resultados del encuentro* "*Movilidad urbana sostenible: Un diálogo interregional sobre la industria y el financiamiento del transporte público colectivo*" (Documento de proyecto LC/TS.2022/123). CEPAL. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/1322b061-7609-4cfa-816a-cdd6ee0787cb/content

NEWMAN, P.Y J. KENWORTHY

2015. *The end of automobile dependence: How cities are moving beyond car-based planning*. Island Press.

ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO

2024. *Urban Logistics Hubs,* ITF Roundtable Reports, No. 195, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/da4dee9f-en.

OLIVARES MENDOZA, J. A.
2022. Movilidad urbana sostenible, una alternativa para la mejora ambiental: el caso de Guadalajara. *CienciaUAT*, 17(2). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2395-86692022000200007

ONU-HÁBITAT (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAD-HÁBITAT)
2022. *Los ocho principios del transporte en la vida urbana*. https://onu-habitat.org/index.php/los-ocho-principios-del-transporte-en-la-vida-urbana

ONU-HÁBITAT (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAD-HÁBITAT)
2024. *World Cities Report* 2024: Cities and Climate Action. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. https://unhabitat.org/wcr/

OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD)
2021. *WHO Sustainable transport for health*. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/341598/WHO-HEP-ECH-AQH-2021.6-eng.pdf?sequence=1

OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD)
2022. *WHO Ambient air quality database, 2022.* https://translate.google.com/translate?u=https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database/2022&hl=es&sl=en&tl=es&client=srp

OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD)
2024. *Actividad física*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity

OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD)
2025. *Unos desplazamientos a pie y en bicicleta más seguros son cruciales para la seguridad vial y para gozar de una mejor salud*. https://www.who. int/es/news/item/09-05-2025-safer-walking-and-cycling-crucial-for-road-safety-and-better-health

OPS (ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD)
2024. 25 de marzo. *Actividad física*. https://www.paho.org/es/temas/actividad-fisica

ORTIZ, S., A. CIOCOLETTO, M. FONSECA, R. CASANOVAS Y B. VALDIVIA
2021. *Movilidad cotidiana con perspectiva de género. Guía metodológica*. Caracas: CAF. https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1725

OVIEDO, D. Y H. TITHERIDGE
2015. Mobilities of the periphery: Informality, access and social exclusion in the urban fringe in Colombia. *Journal of Transport Geography*, 55, 152-164. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.08.009.

PACHECO, L. F.
2021. 14 de diciembre. *Barcelona, ejemplo de urbanismo táctico para otros escenarios.* Revista BCN-NY. Universidad de Barcelona. https://www.ub.edu/revista-bcn-ny2022/2021/12/14/barcelona-ejemplo-de-urbanismo-tactico-para-otros-escenarios/

PALACIOS, A., L. RUBIO Y C. VANOLI

2023. *El poder de los datos para mejorar la movilidad en América Latina*. CAF – Banco de Desarrollo de América Latina. https://www.caf.com/es/blog/el-poder-de-los-datos-para-mejorar-la-movilidad-en-america-latina/

PEREIRA, R. H. M., T. SCHWANEN Y D. BANISTER

2016. Distributive justice and equity in transportation. *Transport Reviews*, 37(2), 170-191 https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1257660

PESCE, G., H. CHIACCHIARINI Y F. PEDRONI

2024. Alternativas de movilidad urbana sostenible para un campus universitario: matriz de impactos y valoración eco-socio-ambiental. *Revista de Investigación en Modelos Financieros*. 13(1), 132-147. *https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6949*

RASMUSSEN, L. R., N. AGERHOLM, H. LAHRMANN Y A. V. OLESEN

2023. Exploring attitudinal factors influencing modal shift: a latent class analysis of Danish commuters. *Frontiers Future Transporation,* 4:1140572. https://www.frontiersin.org/journals/future-transportation/articles/10.3389/ffutr.2023.1140572/pdf

RIOJAS RODRÍGUEZ, H., A. S. SOARES DA SILVA, J. L. TEXCALAC SANGRADOR Y G. L. MORENO BANDA

2016. Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: implications for climate change. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 40(3), 150–159. https://iris.paho.org/handle/10665.2/31229

RUEDA, S.

2017. *Superblocks for the Design of New Cities and Renovation of Existing Ones: Barcelona's Case*. Fundación Ecología y Desarrollo (PDF). https://goo.su/WGdXoo

SANCHEZ-SEPULVEDA, M., J. NAVARRO, D. AMO-FILVA, D. FONSECA, F. ANTÚNEZ-ANEA Y A. BARRANCO-ALBALAT

2024. A data-driven approach to enhance urban infrastructure for sustainable mobility and improved quality of life in highly populated cities. Case study: Barcelona. *Frontiers in Built Environment*, 10:1439700. https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1439700

SANSÃO-FONTES, A., M. PESOA, A. ARAUJO-SOUZA, J. SABATÉ, Y L. NEVES

2019. Urbanismo Táctico como prueba del espacio público: el caso de las supermanzanas de Barcelona. *EURE*, 45(136), 209-232. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19660434010

SCARLAN, M.

2023. Curitiba, la ciudad sustentable e inteligente brasileña modelo. *Utopia Urbana*. https://utopiaurbana.city/2023/11/25/curitiba-la-ciudad-sustentable-e-inteligente-brasilena-modelo/

SCHOLL, L., A. FOOK, J. D. BARAHONA Y M. E. RIVAS

2021. *Transporte para el desarrollo inclusivo: Un camino para América Latina y el Caribe.* Banco Interamericano de Desarrollo. https://publications.iadb.org/es/transporte-para-el-desarrollo-inclusivo-un-camino-para-america-latina-y-el-caribe

SHAHEEN, S., Y A. COHEN

2020. Mobility on demand (MOD) and mobility as a service (MaaS): Early understanding of shared mobility impacts and public transit partnerships.Chapter 3 (pp. 35 62). En: *Demand for Emerging Transportation Systems: Modeling Adoption, Satisfaction, and Mobility Patterns*. Transportation Sustainability Research Center, UC Berkeley. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815018-4.00003-6

SCORCIA, H.

2024. *Medir para mejorar el transporte público en América Latina y el Caribe.* CAF - Banco de Desarrollo de América Latina. https://www.caf.com/es/blog/medir-para-mejorar-el-transporte-publico-en-america-latina-y-el-caribe/

SUBSECRETARÍA DE TRANSPORTES DE CHILE [SUBTRANS]

2022. *Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible. https://www.subtrans.gob.cl/wp-content/uploads/2022/11/Documento-oficial-ENMS-2023*-SECTRA.pdf

THE AGILITY EFFECT

2020. *Helsinki, ciudad pionera del «MaaS».* https://www.theagilityeffect.com/es/case/helsinki-ciudad-pionera-del-maas/

TOMTOM TRAFFIC INDEX

2024. *Global Traffic Index*. https://www.tomtom.com/traffic-index/

TUMI Y GIZ

2018. *Enfoques para la Movilidad Urbana con Perspectiva de Género*. Sustainable Urban Transport Project (SUTP). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). https://www.transformative-mobility.org/assets/publications/SUTP_SB7a_Gender_Responsive_Urban_Mobility_ES.pdf

TUMI Y GIZ

2021. *Re-thinking public transport in a post-COVID world: Safe, inclusive, and resilient*. Transformative Urban Mobility Initiative. https://transformative-mobility.org

UNEP FI (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME FINANCE INITIATIVE)

2021. *Desmitificando las finanzas para economías circulares* [PDF]. https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/Circular-Economy-Report-2020-ESP.pdf

UNITED NATIONS

2015. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. https://sdgs.un.org/2030agenda

YAÑEZ-PAGANS, P., D. MARTINEZ, O. A. MITNIK, L. SCHOLL Y A. VÁZQUEZ

2019. *Sistemas de transporte urbano en América Latina y el Caribe: Lecciones y retos* (Serie de Desarrollo a través del Sector Privado; NT No. 8). Corporación Interamericana de Inversiones/Banco Interamericano de Desarrollo. https://www.idbinvest.org/en/download/8735

Celia Marilyn Herrera de Morales

Ingeniera Civil; Especialista en Diseño de Carreteras; doctoranda en Ciencias de la Ingeniería (UCV). Consultora externa del Banco Interamericano de Desarrollo en transporte y movilidad urbana. Directora del Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello. Presidenta de la Sociedad Venezolana de Ingeniería de Transporte y Vialidad. Miembro activo de comisiones en la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, Fedecámaras y el Consejo Superior de la Cámara Inmobiliaria de Venezuela. Profesora en pre y postgrado de la Universidad Católica Andrés Bello, Universidad Metropolitana y UCV. Consultora internacional en movilidad sostenible con experiencia en impacto ambiental, diseño vial, transporte, seguridad vial y planes de movilidad urbana.

ISBN: 978-980-7106-18-4