

LA ENCRUCIJADA CLIMÁTICA

PAOLO MARAGNO, CARLOS GENATIOS, MARIANELA LAFUENTE



LA ENCRUCIJADA CLIMÁTICA

PAOLO MARAGNO
CARLOS GENATIOS
MARIANELA LAFUENTE



Título:

La encrucijada climática

Portada:

Imagen de la portada y de la contraportada: Mitigación y adaptación al cambio climático (*Climate change mitigation and adaptation*) (Autor: Emmanuella Ackon, 2024. Lic. *Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication*).

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Climate_change_mitigation_and_adaptation.png

Depósito legal: DC2025002039

ISBN: 978-980-7106-22-1

EDICIONES:

CITECI, Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat

Autores:

Paolo Maragno, Carlos Genatios, Marianela Lafuente

Coordinación de edición:

Paolo Maragno

Diseño gráfico:

Marisa Almiñana M.

Revisión de edición:

Marianela Lafuente

Diagramación:

Paolo Maragno

Este informe debe ser citado del siguiente modo:

Maragno, P., Genatios, C. & Lafuente, M. (2025). La encrucijada climática. Ediciones CITECI y ANIH. Caracas, Venezuela.

DESCARGO DE RESPONSABILIDADES

El contenido de este informe no refleja necesariamente los puntos de vista o políticas del Centro CITECI, de la ANIH o de las demás organizaciones contribuyentes. Las designaciones empleadas y la presentación del material no implican la expresión de ninguna opinión por parte de Centro CITECI, de la ANIH u otras organizaciones colaboradoras sobre el estado legal de ningún país, territorio o ciudad o sus autoridades, ni sobre la delimitación de sus fronteras o límites. Si bien se han realizado esfuerzos razonables para garantizar que el contenido de esta publicación sea objetivamente correcto y se mencione correctamente, el Centro CITECI y la ANIH no aceptan responsabilidad por la exactitud o integridad de los contenidos, y no será responsable de ninguna pérdida o daño que pueda ocasionarse directa o indirectamente mediante el uso de, o la confianza en, los contenidos de esta publicación.

© 2025 CITECI, ANIH

Todos los derechos reservados

www.citeci.com; <https://acading.org.ve>

CONTENIDO

CONTENIDO	III
FIGURAS	V
TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
1. EL CAMBIO CLIMÁTICO	5
1.1 DEFINICIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO	7
1.2 EL ORIGEN ANTRÓPICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN PROGRESO	7
1.2.1 <i>El Efecto Invernadero</i>	7
1.2.2 <i>Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potencial, GWP)</i>	10
1.2.3 <i>Forzamiento Radiativo (Radiative Forcing)</i>	11
1.3 EFECTOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL	12
1.3.1 <i>Disminución del hielo y de la cubierta de nieve</i>	13
1.3.2 <i>Aumento del nivel de los mares</i>	16
1.3.3 <i>Aumento de la humedad atmosférica, eventos extremos húmedos y secos</i>	18
1.4 BREVE RESEÑA DE LOS RIESGOS ASOCIADOS CON LAS AMENAZAS DEL CG	22
2. EL CICLO DEL CARBONO	25
2.1 EL CICLO LENTO. LA RUTA GEOLÓGICA	26
2.1.1 <i>Migración del CO₂ de la atmósfera al suelo</i>	26
2.1.2 <i>Migración del CO₂ de la atmósfera a los océanos y mares</i>	27
2.1.3 <i>Fosilización</i>	28
2.2 CIERRE DEL CICLO LENTO: RESTITUCIÓN DEL CO ₂ A LA ATMÓSFERA	29
2.3 EL CICLO RÁPIDO. LA RUTA BIOLÓGICA	30
2.3.1 <i>La fotosíntesis oxigénica</i>	30
2.4 CIERRE DEL CICLO RÁPIDO. RESPIRACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA	32
2.5 FUENTES Y SUMIDEROS DE CO ₂	32
2.5.1 <i>Fuentes antrópicas de CO₂</i>	33
2.5.2 <i>Emisiones antrópicas por actividad y país</i>	34
2.5.3 <i>Sumideros artificiales</i>	38
3. LAS HUELLAS DEL HOMBRE	41
3.1 LA HUELLA DE CARBONO	41
3.1.1 <i>Cálculo de la Huella de Carbono</i>	42
3.2 LA HUELLA ECOLÓGICA	46
3.2.1 <i>Conceptos</i>	47
3.2.2 <i>Factores de equivalencia y normalización</i>	48
3.2.3 <i>Procedimiento de cálculo de la Huella Ecológica</i>	51
3.2.4 <i>Ejemplo de cálculo</i>	52
3.3 BIOCAPACIDAD	54
4. AMENAZAS E IMPACTOS DE LOS EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS	59
4.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS TÉRMINOS UTILIZADOS	60
4.2 EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS	61
4.2.1 <i>Olas de calor intenso</i>	63
4.2.2 <i>Olas de frío intenso</i>	63
4.2.3 <i>Lluvias intensas</i>	66
4.2.4 <i>Sequías</i>	68
4.2.5 <i>Huracanes</i>	74
4.2.6 <i>Tornados</i>	77
5. VARGAS 1999: UN FENÓMENO EXTREMO QUE GENERÓ UN DESASTRE	83
5.1 LA ZONA AFECTADA	84

5.2	LAS LLUVIAS EXTREMAS DE 1999	86
5.3	LA MAGNITUD DEL EVENTO DE 1999	96
5.4	PERÍODO DE RETORNO Y ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA PARA EL DISEÑO INGENIERIL	97
5.5	FENÓMENOS SIMILARES OCURRIDOS EN EL PASADO.....	100
5.6	CONSECUENCIAS.....	101
6.	ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS CLIMÁTICOS	107
6.1	POLÍTICAS DE MITIGACIÓN	108
6.1.1	<i>Organismos líderes en la lucha contra el Calentamiento Global</i>	<i>109</i>
6.1.2	<i>Principales acuerdos de cooperación internacional</i>	<i>111</i>
6.2	METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE RIESGOS MEDIANTE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN	113
6.2.1	<i>Inundaciones y deslaves</i>	<i>115</i>
6.2.2	<i>Sequías</i>	<i>118</i>
6.2.3	<i>Huracanes</i>	<i>119</i>
6.2.4	<i>Tornados</i>	<i>121</i>
7.	RESILIENCIA DE CIUDADES COSTERAS: LOS CASOS DE ROTTERDAM Y SINGAPUR.....	125
7.1	ROTTERDAM, HOLANDA.....	126
7.2	SINGAPUR	133
7.2.1	<i>Inundaciones</i>	<i>134</i>
7.2.2	<i>Pérdidas de tierras costeras</i>	<i>135</i>
7.2.3	<i>Escasez de suministro de agua potable.....</i>	<i>135</i>
7.2.4	<i>Estrés por calor (Heat Stress) y demanda de energía.....</i>	<i>136</i>
7.2.5	<i>Manglares y Biodiversidad marina.....</i>	<i>136</i>
7.2.6	<i>El Dique Marina (Marina Barrage).....</i>	<i>137</i>
7.3	COMENTARIOS FINALES.....	139
8.	LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA.....	143
8.1	TIPOS DE ENERGÍA.....	144
8.1.1	<i>Fuentes de Energía Primaria</i>	<i>145</i>
8.1.2	<i>Fuentes de Energía Secundaria (Derivados secundarios o vectores energéticos)</i>	<i>151</i>
8.1.3	<i>Esquemas de Transformación de Energía</i>	<i>151</i>
8.2	DISTRIBUCIÓN DEL USO DE ENERGÍAS EN EL MUNDO.....	153
8.2.1	<i>Diversificación vs. dependencia de una fuente dominante</i>	<i>154</i>
8.2.2	<i>Grado de sostenibilidad y resiliencia energética</i>	<i>155</i>
8.2.3	<i>Lecciones estratégicas para la transición energética global.....</i>	<i>155</i>
8.2.4	<i>Conclusión</i>	<i>156</i>
8.3	ESCENARIOS FUTUROS	157
8.3.1	<i>Proyecciones Climáticas Basadas en Escenarios</i>	<i>157</i>
8.3.2	<i>Análisis Regional y Sectorial de Impactos Climáticos.....</i>	<i>160</i>
8.4	LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: AHORRO, EFICIENCIA Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES	162
8.4.1	<i>Ahorro de energía</i>	<i>163</i>
8.4.2	<i>Aumento de la eficiencia energética</i>	<i>166</i>
9.	TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS EMERGENTES.....	171
9.1	REACTORES NUCLEARES MODULARES	171
9.1.1	<i>Tipos de SMR.....</i>	<i>173</i>
9.2	BATERÍAS DE ESTADO SÓLIDO	176
9.2.1	<i>Diseños de última generación</i>	<i>176</i>
9.3	EL HIDRÓGENO “VERDE”	181
9.3.1	<i>Producción de Hidrógeno “Verde”: Principios, Tecnologías y Aplicaciones.....</i>	<i>183</i>
9.3.2	<i>Tratamiento y almacenamiento del hidrógeno.....</i>	<i>186</i>
9.3.3	<i>Aplicaciones del hidrógeno verde.....</i>	<i>186</i>
9.3.4	<i>Ventajas del hidrógeno verde</i>	<i>187</i>
9.3.5	<i>Retos comerciales y tecnológicos.....</i>	<i>187</i>

9.3.6	Generación de electricidad mediante hidrógeno. Las celdas de combustible.....	187
10.	ANIMACIONES Y VIDEOS	193
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	194

FIGURAS

FIG. 1-1	MOVIMIENTO DE PRECESIÓN DEL EJE TERRESTRE (FUENTE: DIVAD, 2010. LIC. <i>CREATIVE COMMONS</i> DOMINIO PÚBLICO).....	5
FIG. 1-2	CICLO DE PRECESIÓN DEL EJE TERRESTRE ALREDEDOR DEL POLO NORTE DE LA ECLÍPTICA (AUTOR: TFR000, 2012. LIC. <i>CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHARE ALIKE 3.0 UNPORTED</i>).....	6
FIG. 1-3	CAMBIO EN LA TEMPERATURA GLOBAL PROMEDIO DESDE NIVELES PREINDUSTRIALES, EN °C.....	7
FIG. 1-4	ESPECTRO DE ABSORCIÓN INFRARROJA DE ALGUNOS GASES Y VAPORES (FUENTE: MKS-NEWPORT. LIC. <i>WIKI COMMONS</i> DOMINIO PÚBLICO).....	8
FIG. 1-5	EL EFECTO INVERNADERO. CUANTIFICACIÓN DE LAS RADIACIONES INCIDENTES, ABSORBIDAS Y REFLEJADAS 2000-2004 (FUENTE: NASA, TRADUCIDO POR IQRS, REDIBUJADO POR CHRISTOPH – LIC. <i>WIKI COMMONS</i> DOMINIO PÚBLICO).....	8
FIG. 1-6	ESPECTROGRAFÍA DEL VAPOR DE AGUA Y DEL MONÓXIDO DE CARBONO EN A BANDA DEL INFRARROJO (FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE ROBERT RHODE. LIC. <i>WIKI COMMONS</i> DOMINIO PÚBLICO).....	9
FIG. 1-7	CONCENTRACIÓN GLOBAL PROMEDIO DE LOS PRINCIPALES GASES GHGs (FUENTE: <i>THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI)</i>).....	9
FIG. 1-8	FACTOR DE EMISIONES GEI DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE CHILE EN KG CO ₂ -EQ/MWH (FUENTE: MINISTERIO DE ENERGÍA – CHILE).....	11
FIG. 1-9	FORZAMIENTO RADIATIVO CAUSADO POR LOS PRINCIPALES GHGs, 1979-2022 (FUENTE: RCRAIG09. LIC. <i>WIKI COMMONS BY-SA 4.0</i> DOMINIO PÚBLICO).....	12
FIG. 1-10	INDICADORES DEL CALENTAMIENTO GLOBAL	12
FIG. 1-11	A) RETIRO DEL MANTO DE HIELO EN GROENLANDIA 1992-2005. B) PERDIDA PROMEDIO DE MASA DE HIELO EN GROENLANDIA. 13	
FIG. 1-12	BALANCE CUMULATIVO DE MASA DE LOS GLACIARES EN EUROPA DESDE 1967 HASTA 2018, TOMANDO COMO REFERENCIA EL AÑO 1997.....	14
FIG. 1-13	GLACIAR PASTORURI UBICADO EN EL CENTRO DEL PERÚ EN LA CORDILLERA BLANCA.....	14
FIG. 1-14	PÉRDIDA DE GLACIARES EN AMÉRICA DEL SUR EN PORCENTAJE	15
FIG. 1-15	FRENTE DE LOS GLACIARES DICKSON, CUBO Y FRÍAS EN 1965, 1984 Y 2020	15
FIG. 1-16	BALANCE DE MASA CUMULATIVO DE CUATRO GLACIARES ESTADOUNIDENSES, 1952 – 2019 (FUENTE: EPA, 2021).....	16
FIG. 1-17	AGUA ALTA EN VENECIA. (FUENTE: EVENISE, 2007 LIC. <i>CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHARE ALIKE 3.0</i>).....	16
FIG. 1-18	PROGRAMA ARGO (FUENTE: LABORATORIO OCEANOGRÁFICO Y METEOROLÓGICO DEL ATLÁNTICO DE LA NOAA).....	17
FIG. 1-19	ZONA COSTERA VENECIANA. IZQ: SITUACIÓN ACTUAL. DER: SITUACIÓN PREVISTA PARA UN AUMENTO DE TEMPERATURA DE 2 °C 17	
FIG. 1-20	TORMENTA NOCTURNA EN PORT LA NOUVELLE	18
FIG. 1-21	EL HURACÁN HARVEY, TEXAS, 2017.....	19
FIG. 1-22	LLUVIA INTENSA.....	19
FIG. 1-23	OLAS DE CALOR	20
FIG. 1-24	SEQUÍA	21
FIG. 1-25:	INCENDIOS FORESTALES.....	21
FIG. 1-26	EVENTOS EXTREMOS SECOS Y HÚMEDOS Y SU INTENSIDAD (FUENTE: NASA, TOMADA DE <i>CLEANTECHNICA</i>).....	22
FIG. 2-1	EL CICLO DEL CARBONO	26
FIG. 2-2	LA LLUVIA COMO MEDIO DE TRANSPORTE DEL CO ₂ AL SUELO (FUENTE: CREMEDIA, 2004. LIC. <i>CREATIVE COMMONS PUBLIC DOMAIN</i>).....	27
FIG. 2-3	LOS RÍOS TRANSPORTAN MINERALES PRODUCTOS DE LA METEORIZACIÓN. RÍO TAGLIAMENTO.	28
FIG. 2-4	FÓSIL VEGETAL.....	28
FIG. 2-5	ERUPCIÓN DEL VOLCÁN FUEGO EN GUATEMALA. (AUTOR: JUAN FRANCISCO, 2020. LIC. <i>CREATIVE COMMONS</i> GENÉRICA 2.0) ...	29
FIG. 2-6	SUBDUCCIÓN DE PLACAS TECTÓNICAS. (AUTOR: LUIS MARÍA BENÍTEZ. LIC. <i>GNU FREE DOCUMENTATION LICENSE 1.2</i>)	29
FIG. 2-7	VOLCÁN KÍLAUEA , FLUJO DE LAVA (FUENTE: <i>VOLCANO HAZARDS PROGRAM</i> , USGS, 2018. LIC. <i>PUBLIC DOMAIN</i>)	29
FIG. 2-8	CÉLULAS VEGETALES CON CLOROPLASTOS EN SU INTERIOR	30
FIG. 2-9	FOTOSÍNTESIS AEROBIA. (FUENTE: MAULUCIONI, 2013. LIC. <i>CREATIVE COMMONS SHARE ALIKE 3.0</i>)	31
FIG. 2-10	CLOROPLASTO. (FUENTE: SUPERMANU, 2007. LIC. <i>CREATIVE COMMONS SHARE ALIKE 3.0</i>).....	31
FIG. 2-11	EMISIONES DE CO ₂ DE ORIGEN ANTRÓPICA 1750-2022. (FUENTE: PRESUPUESTO GLOBAL DE CARBONO, 2023. LIC. <i>OURWORLDINDATA CREATIVE COMMONS</i>).....	33

FIG. 2-12 CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA 1960 – 2024. (NOAA, MAUNA LOA OBSERVATORY, 2024. LIC. NOAA GENERAL PERMISSION)	34
FIG. 2-13 EMISIONES ANTRÓPICAS	34
FIG. 2-14 SFC EN KG/MWH DE VARIOS COMBUSTIBLES FÓSILES	35
FIG. 2-15 EMISIONES DE CO ₂ POR SECTOR DE ACTIVIDAD. (FUENTE: CLIMATE WATCH, 2023. LIC. OURWORLDINDATA CREATIVE COMMONS).....	35
FIG. 2-16 PORCENTAJE DE EMISIONES DE CO ₂ POR SECTOR DE ACTIVIDAD. (FUENTE: PRODUCCIÓN PROPIA, 2024. DATOS TOMADOS DE: CLIMATE WATCH, 2023. LIC. OURWORLDINDATA CREATIVE COMMONS)	36
FIG. 2-17 EMISIONES DE CO ₂ POR PAÍS. (FUENTE: PRESUPUESTO GLOBAL DE CARBONO, 2023. LIC. OURWORLDINDATA CREATIVE COMMONS)	38
FIG. 3-1 STEAMPUNKS FRENTE A LA LOCOMOTORA DE VAPOR BALDWIN 60000 (AUTOR: KYLECASSIDY, 2009. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0).....	42
FIG. 3-2 PERÍMETRO ORGANIZACIONAL DE LA EMPRESA THIHAGODA (FUENTE: PRODUCCIÓN PROPIA).	43
FIG. 3-3 PERÍMETRO OPERATIVO DE LA EMPRESA THIHAGODA (FUENTE: PRODUCCIÓN PROPIA).....	44
FIG. 3-4 TIPO DE EMISIONES Y ALCANCES PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE UNA CORPORACIÓN (FUENTE: GHG PROTOCOL CORPORATE ACCOUNTING AND REPORTING STANDARD, WRI & WBCSD, 2024).	44
FIG. 3-5 AGRICULTURA EN LA EDAD MEDIA (AUTOR: GILLES DE ROME, 1279. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHARE ALIKE 4.0 INTERNATIONAL).	46
FIG. 3-6 RENDIMIENTO EN KG/HA DE LOS TERRENOS DE PRODUCCIÓN DE CEREALES DE IRLANDA Y BOLIVIA (FUENTE: FAO, 2020-2022 IN THEGLOBALECONOMY.COM).	47
FIG. 3-7 LLANURA DE LA PROVINCIA DE VALLADOLID, ESPAÑA (AUTOR: ANDRECP, 2008. LIC. DOMINIO PÚBLICO).	55
FIG. 4-1 DESPLAZAMIENTO DE LA DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LA TEMPERATURA MUNDIAL HACIA VALORES MÁS ELEVADOS	60
FIG. 4-2 LA CADENA PERVERSA DE EVENTOS Y SITUACIONES QUE CONDUCE AL DESASTRE (FUENTE: IPCC, 2011. SPECIAL REPORT ON EXTREMES EVENTS).....	61
FIG. 4-3 AUMENTO DE EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN EUROPA EN EL PERÍODO 2021/2024 (FUENTE: INVERTO IN CONSULTANCY.UK, 2024).....	62
FIG. 4-4 OCURRENCIA DE DESASTRES PROVOCADOS POR FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EN EUROPA SEGÚN TIPO, 2011-2020 (FUENTE: “THE OFDA/CRED INTERNATIONAL DISASTER DATABASE” ANALYSIS & WRITING BY REGINA BELOW AND JORIS VAN LOENHOUT CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED), IRSS, UCLouvain).....	62
FIG. 4-5 TEMPERATURAS EXTREMAS EN EUROPA DESDE EL 3 HASTA EL 9 DE JULIO 2022 (FUENTE: NOAA, 2022. LIC. DOMINIO PÚBLICO)	63
FIG. 4-6 EL VÓRTICE POLAR ES UN ÁREA EXTENSA DE BAJAS PRESIONES Y AIRE FRÍO QUE RODEA LOS POLOS SUR Y NORTE DE LA TIERRA. EL TÉRMINO VORTEX SE REFIERE AL FLUJO, OPUESTO AL DE LAS AGUJAS DEL RELOJ, QUE MANTIENE EL AIRE FRÍO MÁS CERCA DE LOS POLOS (IZQUIERDA). A MENUDO EN INVIERNO EN EL HEMISFERIO NORTE EL VÓRTICE POLAR SE VUELVE MÁS INESTABLE Y SE EXPANDE, MANDANDO AIRE ÁRTICO FRÍO SOBRE LAS REGIONES TEMPLADAS CON LA CORRIENTE DE CHORRO (DERECHA) (FUENTE: NOAA, 2019. LIC. DOMINIO PÚBLICO).	64
FIG. 4-7 NEVADAS EN REGENT’S PARK, LONDRES DURANTE LA OLA DE FRÍO BEAST FROM THE EAST EN 2018 (AUTOR: IRID ESCENT, 2018. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 2.0)	65
FIG. 4-8 TENDENCIAS EN LA TASA DE MORTALIDAD ATRIBUIBLE A OLAS DE CALOR EN EUROPA EN EL PERÍODO 2000-2020, CALCULADA COMO PROMEDIO ANUAL POR CADA MILLÓN DE HABITANTES A LO LARGO DE UNA DÉCADA (FUENTE: EEA, 2023)	66
FIG. 4-9 ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN TOTAL EN EL PERÍODO DE ENERO A SEPTIEMBRE DE 2021 CON RESPECTO AL PERÍODO DE REFERENCIA 1951-2000. EL COLOR AZUL INDICA PRECIPITACIONES SUPERIORES A LA MEDIA Y EL COLOR MARRÓN PRECIPITACIONES INFERIORES A LA MEDIA (FUENTE: CENTRO MUNDIAL DE CLIMATOLOGÍA DE LAS PRECIPITACIONES, DEUTSCHER WETTERDIENST, ALEMANIA).	67
FIG. 4-10 INSTRUMENTOS DEL OBSERVATORIO CENTRAL DE GPM: EL RADAR DE PRECIPITACIONES DE DOBLE FRECUENCIA (DPR) Y EL SENSOR DE IMÁGENES DE MICROONDAS (GMI) (FUENTE: NASA, 2024).	68
FIG. 4-11 MONITOR DE SEQUÍAS DE ESTADOS UNIDOS (2000-PRESENTE) (FUENTE: NOAA, USDA, CENTRO NACIONAL DE MITIGACIÓN DE SEQUÍAS, 2024).	69
FIG. 4-12 CULTIVO DE MAÍZ AFECTADO POR LA SEQUÍA EN TEXAS EN 2013 (AUTOR: BOB NICHOLS – USDA, 2013. LIC. DOMINIO PÚBLICO).	70
FIG. 4-13 MAPA DEL COSTO ECONÓMICO CAUSADO POR LAS SEQUÍAS, 1994-2014 (FUENTE: WORLD BANK).	71
FIG. 4-14 EMBALSE DE BARRIOS DE LUNA, ESPAÑA, DURANTE LA SEQUÍA DE 2017 (AUTOR: PABLOX. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHARE ALIKE 4.0 INTERNATIONAL)	72
FIG. 4-15 EL HURACÁN MILTON (FUENTE: VIIRS IMAGERY NOAA-21 SATELLITE - EOSDIS WORLDVIEW, 2024. LIC. DOMINIO PÚBLICO)	74

FIG. 4-16 EL SISTEMA DE ALTA PRESIÓN DEL ATLÁNTICO (<i>SUBTROPICAL RIDGE</i> = ANTICICLÓN SUBTROPICAL) GUÍA CON UN GRAN ‘RÍO’ DE AIRE O VIENTOS A LOS CICLONES TROPICALES HACIA EL OESTE Y NOROESTE (FUENTE: NOAA EN ECOEXPLORATORIO, MUSEO DE CIENCIAS DE PUERTO RICO, 2024).	75
FIG. 4-17 TORNADO EF5 ACERCÁNDOSE A ELIE MANITOBA (AUTOR: JUSTIN HOBSON, 2007. LIC. <i>CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0</i>).	77
FIG. 4-18 CAGE SIMULACIÓN DE UN TORNADO (FUENTE: NASA, 2006. LIC. <i>PUBLIC DOMAIN</i>).	77
FIG. 4-19 FORMACIÓN DE UN MESOCICLÓN. A) LA CIZALLADURA DEL VIENTO PRODUCE LA ROTACIÓN HORIZONTAL DEL AIRE. B) LA CORRIENTE ASCENDENTE CAMBIA LA INCLINACIÓN DE ROTACIÓN. C) FORMACIÓN DEL VÓRTICE.	78
FIG. 4-20 SUPERCELDA	79
FIG. 4-21 CUMULONIMBO	80
FIG. 4-22 TORNADO DE VÓRTICES MÚLTIPLES (AUTOR: JASON WEINGART, 2016. LIC.: OBRA DE LIBRE UTILIZACIÓN)	81
FIG. 5-1 SITUACIÓN DEL ESTADO VARGAS (FUENTE: TUBS, 2011. LIC. <i>CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0</i>).	85
FIG. 5-2 LA POBLACIÓN DE VARGAS ESTÁ UBICADA EN UNA ESTRECHA FRANJA ENTRE LA MONTAÑA Y EL MAR.	86
FIG. 5-3 SITUACIÓN DEL ESTADO VARGAS PREVIA A LA TRAGEDIA.	86
FIG. 5-4 A) B) C) D) E) CÓMO SE GENERÓ EL DESLAVE EN VARGAS, DICIEMBRE 2010.	87
FIG. 5-5 EROSIÓN EN LAS MONTAÑAS.	88
FIG. 5-6 EROSIÓN EN LAS MONTAÑAS.	88
FIG. 5-7 EROSIÓN EN LAS MONTAÑAS Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS AL MAR.	88
FIG. 5-8 FLUJOS DE AGUA Y LODO (LOS CORALES).	89
FIG. 5-9 FLUJO DE AGUA Y LODO RETOMA SU CAUCE ORIGINAL EN CARMEN DE URÍA.	89
FIG. 5-10 ROCAS DESPLAZADAS EN LOS CORALES.	90
FIG. 5-11 LOS CORALES (RÍO SAN JULIÁN).	90
FIG. 5-12 SEDIMENTOS Y ROCAS TRANSPORTADOS POR EL RÍO SAN JULIÁN (LOS CORALES).	91
FIG. 5-13 DESTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES EN LOS CORALES POR ARRASTRE DE ROCAS.	91
FIG. 5-14 DESTRUCCIÓN Y SEDIMENTACIÓN EN CARMEN DE URÍA.	92
FIG. 5-15 VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA DESTRUIDAS EN CARMEN DE URÍA.	92
FIG. 5-16 VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA DESTRUIDAS EN CARMEN DE URÍA.	92
FIG. 5-17 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL CONO DE DEYECCIÓN DE LOS CORALES.	93
FIG. 5-18 MODIFICACIÓN DEL FRENTE COSTERO EN CAMURÍ CHICO.	94
FIG. 5-19 MODIFICACIÓN DEL FRENTE COSTERO Y CAMBIO DE CAUCE EN CARMEN DE URÍA.	94
FIG. 5-20 VIVIENDA DESTRUIDA EN LA VEGUITA, MACUTO.	94
FIG. 5-21 EFECTOS DEL DESLAVE EN LOS CORALES.	95
FIG. 5-22 EFECTOS DEL DESLAVE EN MACUTO.	95
FIG. 5-23 PICO NAIGUATÁ: MAR CARIBE Y LITORAL CENTRAL A LA DERECHA (NORTE) Y CARACAS A LA IZQUIERDA (SUR).	97
FIG. 5-24 FUERTES PENDIENTES DEL RÍO SAN JULIÁN EN LA ZONA MONTAÑOSA, LOS CORALES.	97
FIG. 5-25 EL PUERTO DE LA GUAIRA LUEGO DE OCURRIDO EL DESLAVE.	102
FIG. 5-26 DAÑOS EN LA GUAIRA.	103
FIG. 5-27 DAÑOS EN EL CASCO HISTÓRICO DE LA GUAIRA.	103
FIG. 5-28 VISTA AÉREA DE LOS SEDIMENTOS EN LOS CORALES.	103
FIG. 5-29 VISTA DE SEDIMENTOS EN LOS CORALES.	104
FIG. 5-30. VISTA DE DAÑOS Y SEDIMENTOS EN LOS CORALES.	104
FIG. 5-31. DAÑOS EN ZONA URBANA DE LA GUAIRA.	104
FIG. 5-32. DESTRUCCIÓN DEL MUSEO REVERÓN, EN EL COJO.	105
FIG. 6-1 POLÍTICAS DE MITIGACIÓN: ADOPCIÓN DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA (ADAPTACIÓN DIGITAL DE: OI-B-I.FERNANDEZ02, 2010. LIC. <i>CREATIVE COMMONS</i> ATRIBUCIÓN 2.0 GENÉRICA).	109
FIG. 6-2 SEDE DE LA ONU EN NUEVA YORK (AUTOR: HTTPS://WWW.FLICKR.COM/PEOPLE/FLICKR4JAZZ/ , 2008. LICENCIA: <i>CREATIVE COMMONS</i> ATTRIBUTION 2.0 GENERIC)	110
FIG. 6-3 ACCIONES DE ADAPTACIÓN (FUENTE: BLOG IMPACTO, BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, 2021. EN: (BARTELS & SUÁREZ, 2021)).	115
FIG. 6-4 PRESA DE RASTRILLO DE TACAGUA, EDO. VARGAS, VENEZUELA (FOTO: MARIO MENGUAL. EN: GENATIOS, C. Y LAFUENTE, M.: “VARGAS: DESASTRE, PROYECTO Y REALIDAD”, 2020).	116
FIG. 6-5 PRESA DERIVADORA EL CERCADO. PROYECTO RÍO RANCHERÍA, LA GUAJIRA, COLOMBIA (AUTOR: ALEJANDRO RESTREPOURIBE, 2013. LIC. <i>CREATIVE COMMONS BY-SA 4.0</i>).	117
FIG. 6-6 PROYECTO DE PASEO MARÍTIMO EN EL TIGRILLO-NAIGUATÁ (AUTORES: IERU/USB. EN: GENATIOS, C. Y LAFUENTE, M.: “VARGAS: DESASTRE, PROYECTO Y REALIDAD”, 2020).	118

FIG. 6-7 EDIFICIOS CON DISEÑO ADAPTATIVO: EN TAIWÁN, EL AGORA GARDEN COMBINA DISEÑO SOSTENIBLE CON RESISTENCIA ESTRUCTURAL PARA ENFRENTAR VIENTOS EXTREMOS Y SISMOS, USANDO AMORTIGUADORES DE MASA LÍQUIDA. ESTA TECNOLOGÍA ES EFECTIVA CONTRA HURACANES Y TEMBLORES (AUTOR: YU TPTW, 2023. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 4.0).....	119
FIG. 6-8 UNA SECUENCIA DE RADAR DE DOPPLER ON WHEELS DE UN ECO EN CADENA Y UN MESOCICLÓN ASOCIADO EN EL CONDADO DE GOSHEN, WYOMING, 5 DE JUNIO DE 2009 (AUTOR: JOSHUA WURMAN - HTTP://VORTEX2.ORG/DOWLOOPS/, 2009. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0).....	121
FIG. 6-9 REFUGIO CONTRA TORNADOS, DES MOINES, IOWA USA (AUTOR: TOM HURD, 2004. FEMA PHOTO LIBRARY. LIC. DOMINIO PÚBLICO).....	122
FIG. 7-1 MAPA TOPOGRÁFICO DE ROTTERDAM (FUENTE: JANWILLEMVANAALST, 2014. LICENCIA: CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0) ...	126
FIG. 7-2 SISTEMA CONTRA INUNDACIONES Y DE DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES EN ROTTERDAM (IMAGEN ADAPTADA DE: DE URBANISTEN Y TOMADA DE ROTTERDAM CLIMATE INITIATIVE, 2013).....	127
FIG. 7-3 VISIÓN FUTURA DE NUEVAS ÁREAS RESIDENCIALES Y VERDES EN ROTTERDAM INNER CITY (DIBUJADA POR FREEPICK, 2025).	129
FIG. 7-4 PLAZA DE AGUA XL EN RÓTERDAM. DISEÑO URBANO RESILIENTE(FUENTE: DE URBANISTEN, 2013 Y TOMADA DE MORACI ET AL., 2017. LICENCIA: CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL).....	129
FIG. 7-5 CASAS FLOTANTES (FUENTE: MUNICIPALITY OF ROTTERDAM, 2025. LICENCIA: PUBLIC DOMAIN ARCHITECTEN).....	130
FIG. 7-6 ESTRATEGIA ADAPTATIVA EN OUTER DIKE ROTTERDAM (IMAGEN ADAPTADA DE DOEPEL STRUIKERS ARCHITECTS Y TOMADA DE ROTTERDAM CLIMATE INITIATIVE, 2013).....	131
FIG. 7-7 CONSTRUYENDO HÁBITAT CON LA NATURALEZA (FUENTE: STOCKCAKE, 2025. IMAGEN GENERADA MEDIANTE IA. LICENCIA: DOMINIO PÚBLICO).....	131
FIG. 7-8 ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS INNER-DIKE ROTTERDAM ((IMAGEN ADAPTADA DE: DE URBANISTEN Y TOMADA DE ROTTERDAM CLIMATE INITIATIVE, 2013).....	132
FIG. 7-9 PUERTO DE ROTTERDAM (AUTOR: JOSHUA STEVENS - NASA EARTH OBSERVATORY, 2016. LICENCIA: PUBLIC DOMAIN).....	132
FIG. 7-10 EL ENFOQUE “FUENTE-VÍA-RECEPTOR” (SOURCE-PATHWAY-RECEPTOR), CONTRA INUNDACIONES Y PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA (ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN TOMADA DE MEWR; MND, 2016).....	134
FIG. 7-11 REFORZAMIENTO DE LAS DEFENSAS NATURALES EN PLAYA SILOSO, ISLA SENTOSA, SINGAPUR (ADAPTACIÓN DE DRONEPICR, 2017. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 2.0 GENERIC).....	135
FIG. 7-12 PARQUE MARINO DE LAS ISLAS HERMANAS DE SINGAPUR (AUTOR: THAEJAS, 2010. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 3.0).....	137
FIG. 7-13 VISTA DEL DIQUE MARINA EN SINGAPUR (AUTOR: BOB TAN, 2022. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 4.0).....	137
FIG. 7-14 DIQUE MARINA, CON LA CASA DE BOMBAS AL FONDO QUE ALBERGA SIETE BOMBAS DE GRAN CAUDAL (AUTOR: TIMLEE90, 2008. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0).....	138
FIG. 7-15 EL PUENTE MARINA, QUE CONTIENE LAS COMPUERTAS DE PRESIÓN QUE FORMAN LA BARRERA DEL DIQUE MARINA EN SINGAPUR (AUTOR: TIMLEE90, 2008. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA).....	139
FIG. 8-1 COMBUSTIBLES FÓSILES (AUTOR: PIXELTOO, 2023. LIC. CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNATIONAL).....	146
FIG. 8-2 MODELO DE REACTOR NUCLEAR, 2016. (AUTOR: BLS208. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0).....	147
FIG. 8-3 ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA EN RED, 2016 (AUTOR: KENUEONE. LIC. CREATIVE COMMONS CCO 1.0 UNIVERSAL PUBLIC DOMAIN)148	
FIG. 8-4 ENERGÍA HIDRÁULICA (AUTOR: CHALISA JIRUTCHOK, 2016. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHARE ALIKE 4.0 INTERNATIONAL).....	150
FIG. 8-5 USO TRADICIONAL DE LA BIOMASA (AUTOR: JON SULLIVAN, 2006. LIC. DOMINIO PÚBLICO).....	150
FIG. 8-6 CETO: ENERGÍA DE LAS OLAS (AUTOR: CARNEGIE WAVE ENERGY, 2014. LIC. CREATIVE COMMONS BY-SA 3.0).....	150
FIG. 8-7 PLANTA GEOTÉRMICA KRAFLA EN ISLANDIA (AUTOR: ÁSGEIR EGGERTSSON, 2004. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHARE ALIKE 3.0).....	150
FIG. 8-8 MÁQUINA ATMOSFÉRICA DE NEWCOMEN: DEL CARBÓN AL MOVIMIENTO DEL BALANCÍN (AUTOR: EMOSCOPIES, DRAWN USING XARAX SOFTWARE. LIC. CREATIVE COMMONS BY 2.5).....	152
FIG. 8-9 EJEMPLOS DE TRANSFORMACIÓN DE LAS ENERGÍAS PRIMARIAS EN SECUNDARIAS (FUENTE: C. GENATIOS, 2018. CURSO “CAMBIO CLIMÁTICO” MDC).....	153
FIG. 8-10 DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA SEGÚN TIPO (2023) (FUENTE: KPMG, ENERGY INSTITUTE, 2024).....	154
FIG. 8-11 DATOS COMPARATIVOS DEL MIX ENERGÉTICO DE ALEMANIA Y BRASIL – 2023 (FUENTE: STATISTA, 2023 (STATISTA, 2023), (STATISTA, 2023)).....	156
FIG. 8-12 DATOS COMPARATIVOS DEL MIX ENERGÉTICO DE FRANCIA E INDIA – 2023 (FUENTE: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023 Y 2024).....	156
FIG. 8-13 ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS: A) EMISIONES DE CO ₂ B) EFECTOS SOBRE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE C) EFECTO DEL AUMENTO TEMPERATURA SOBRE LOS FENÓMENOS CLIMÁTICOS Y D) SOBRE EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR (FUENTE: IPCC, 2021).....	160
FIG. 8-14 LA PIRÁMIDE ENERGÉTICA (FUENTE: C. GENATIOS, 2018. CURSO “CAMBIO CLIMÁTICO” MDC).....	162

FIG. 8-15 APAGADO DE LUCES NO UTILIZADAS (FUENTE: SELLO POSTAL DE AZERBAIJAN, 2020. LIC. DOMINIO PÚBLICO).....	163
FIG. 8-16 SEMÁFORO CON MÚLTIPLES LEDs (AUTOR: SYAFIQSHAHALAM, 2009. LIC. DOMINIO PÚBLICO).....	167
FIG. 8-17 CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR TIPO DE LÁMPARA (AUTOR: D. ESHAM “BDESHAM”, 2007. LIC. DOMINIO PÚBLICO).	167
FIG. 8-18 CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, 2025).....	169
FIG. 9-1 REACTOR NUCLEAR DE ESFERAS DE GRAFITO (PEBBLE-BED REACTOR) (FUENTE: PICOTERAWATT, 2013. LIC. CREATIVE COMMONS 1.0 DOMINIO PÚBLICO).....	174
FIG. 9-2 ESTRUCTURA DE LAS ESFERAS DE GRAFITO (FUENTE: PICOTERAWATT, 2010. LIC. DOMINIO PÚBLICO).....	174
FIG. 9-3 BATERÍAS RECARGABLES DE IONES DE LITIO: A) CONVENCIONAL B) DE ELECTROLITO SÓLIDO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	177
FIG. 9-4 VISTA EN CORTE DEL NISSAN LEAF MOSTRANDO PARTE DE LA BATERÍA (FUENTE: TENNEN-GAS, 2009. LIC. CREATIVE COMMONS-BY-SA-3.0).	178
FIG. 9-5 A) CARGA Y B) DESCARGA DE UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO CON CÁTODO DE LiCoO ₂ (SE INDICA LA DIRECCIÓN DE LOS ELECTRONES, CONTRARIA A LA DE LA CONVENCION PARA LA DIRECCION DE LA CORRIENTE) (AUTOR: SERGEY WEREWOLF, 2016. LIC. CREATIVE COMMONS)	179
FIG. 9-6 FORMACIÓN DE DENDRITAS EN EL ÁNODO EN FORMACIÓN (AUTOR: SPK9264, 2019. LICENCIA: CREATIVE COMMONS BY-SA 4.0).	180
FIG. 9-7 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE (FUENTE: US DEPARTMENT OF ENERGY, 2025. LICENCIA: DOMINIO PÚBLICO).	182
FIG. 9-8 CELDA DE COMBUSTIBLE (AUTOR: HANDIGEHARRY, 2008. LICENCIA: DOMINIO PÚBLICO).....	188

TABLAS

TABLA 1-1 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL A 100 AÑOS (FUENTE: IPCC, 1996 (SAR) E IPCC, 2007 (AR4)).....	10
TABLA 2-1 CANTIDAD DE CO ₂ EMITIDA POR LA COMBUSTIÓN DE 1 KG O 1 L DE COMBUSTIBLE EN UN MOTOR TÉRMICO.....	36
TABLA 3-1 PARÁMETROS Y FUENTES DE DATOS DE ACTIVIDAD DE LA EMPRESA THIHAGODA (ADAPTADA DE: AWANTHI & NAVARATNE, 2018).	45
TABLA 3-2 FACTORES DE EMISIÓN. (ADAPTADA DE: AWANTHI & NAVARATNE, 2018).	45
TABLA 3-3 DATOS CONSOLIDADOS DE EMISIONES DE LA EMPRESA THIHAGODA PARA EL AÑO 2023 (ADAPTADA DE: AWANTHI & NAVARATNE, 2018).....	46
TABLA 3-4 FACTORES DE EQUIVALENCIA (ADAPTADA DE LIN, ET AL., 2019, NATIONAL FOOTPRINT AND BIOCAPACITY ACCOUNTS. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHAREALIKE 4.0).....	49
TABLA 3-5 FACTOR DE PRODUCTIVIDAD DE ALGUNOS PAÍSES PARA EL AÑO 2019 (ADAPTADA DE: LIN, ET AL., 2019, LIC. CREATIVE COMMONS SHAREALIKE 4.0).....	51
TABLA 3-6 MUESTRA DE CÁLCULO DE LAS HUELLAS DE PRODUCCIÓN, IMPORTACIÓN Y EXPORTACIÓN DE LOS TERRENOS AGRÍCOLAS (TA) PARA UN PAÍS FICTICIO, AÑO 2019 (ADAPTADA DE: LIN, ET AL., 2019. LIC. CREATIVE COMMONS SHAREALIKE 4.0)	53
TABLA 3-7 HUELLA DE CONSUMO PARA LA CATEGORÍA TERRENOS AGRÍCOLAS (TA), PARA UN PAÍS FICTICIO, AÑO 2019 (ADAPTADA DE: LIN, ET AL., 2019. LIC. CREATIVE COMMONS SHAREALIKE 4.0).....	54
TABLA 3-8 HUELLAS CONSOLIDADAS DE PRODUCCIÓN, IMPORTACIÓN, EXPORTACIÓN, CONSUMO Y HUELLA ECOLÓGICA DE UN PAÍS FICTICIO, 2019 (ADAPTADA DE: LIN, ET AL., 2019. LIC. CREATIVE COMMONS SHAREALIKE 4.0).....	54
TABLA 3-9 BIOCAPACIDAD DE UN PAÍS FICTICIO PARA EL AÑO 2019 (ADAPTADA DE: LIN, ET AL., 2019, NATIONAL FOOTPRINT AND BIOCAPACITY ACCOUNTS. LIC. CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-SHAREALIKE 4.0).	56
TABLA 4-1 ESCALA SAFFIR-SIMPSON (FUENTE: NOAA).	76
TABLA 8-1 FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA (FUENTE: PRODUCCIÓN PROPIA).....	149
TABLA 8-2 CUADRO COMPARATIVO: MÉTODOS DE AHORRO DE ENERGÍA DIRECTOS E INDIRECTOS.	166
TABLA 9-1 MATERIALES Y ARQUITECTURAS EN BATERÍAS LI-ION ANODELESS DE ESTADO SÓLIDO (MA, ET AL., 2023).	177
TABLA 9-2 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO “VERDE”.....	182
TABLA 9-3 CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDAS DE ELECTROLITO ÁCIDO Y BÁSICO.....	184
TABLA 9-4 MATERIALES DE LOS ELECTRODOS EN CELDAS PEM.....	184
TABLA 9-5 MATERIALES DE LOS ELECTRODOS EN CELDAS AWE	185
TABLA 9-6 COMPARACIÓN DE COSTOS: PEM VS AWE.....	186
TABLA 9-7 EL CATALIZADOR DEL ÁNODO.....	189
TABLA 9-8 EL CATALIZADOR DEL CÁTODO.....	190

INTRODUCCIÓN

A partir de la segunda mitad del siglo XX, la creciente toma de conciencia de la opinión pública sobre el fenómeno del cambio climático de origen antrópico ha generado un involucramiento progresivo, y cada vez más incisivo, de los distintos actores sociales, en todas sus formas de expresión y niveles de influencia y poder. Las primeras voces de alerta provinieron de organizaciones ambientalistas, a las que, con el tiempo, se sumaron otros sectores: medios de comunicación, comunidad científica, mundo empresarial, clase política, sistema judicial, entre otros.

De este modo, las problemáticas relacionadas con el medio ambiente y, en particular, con el cambio climático inducido por la actividad humana, han pasado a ocupar un lugar central en la agenda social global. Se trata de cuestiones que afectan de manera directa aspectos vitales como la protección de la vida y la salud humanas, la estabilidad económica, la calidad de vida y la preservación de los ecosistemas para las generaciones presentes y futuras.

La multiplicidad de miradas con que distintos sectores enfocan el problema, así como las divergencias existentes incluso dentro de un mismo ámbito, han dado lugar a un debate internacional intenso. En este debate convergen distintas concepciones científico-tecnológicas, intereses económicos dispares y visiones contrapuestas sobre el futuro. Como ejemplo, cabe señalar que la mayoría de las potencias clave, entre ellas la Unión Europea, Estados Unidos, China, India, Japón, Canadá y Brasil, suscribieron en 2015 el **Acuerdo de París**, cuyo objetivo principal **es mantener el aumento de la temperatura media global *muy por debajo* de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, procurando limitarlo a 1,5 °C**. No obstante, el 20 de enero de 2025, el presidente Donald Trump, con concepciones e intereses divergentes de los propósitos del Acuerdo, firmó la Orden Ejecutiva 14162 para retirar de forma inmediata a Estados Unidos de dicho compromiso.

Estos son asuntos de extraordinaria seriedad y complejidad. Por ello, al abordarlos es indispensable hacerlo con rigor y conocimiento científico, evitando afirmaciones ligeras o imprecisas. Con demasiada frecuencia, comunicadores, figuras políticas o supuestos especialistas atribuyen de manera simplista cualquier fenómeno meteorológico al cambio climático. En realidad, en muchos casos no es posible establecer con certeza si un evento responde directamente a este fenómeno. Conscientes de esa dificultad, Ben Clarke, de la Universidad de Oxford, y Friederike Otto, del *Imperial College* de Londres, elaboraron en 2021 un manual para periodistas titulado **Cómo informar sobre fenómenos meteorológicos extremos y cambio climático**, cuyo propósito es ayudar a los profesionales de la comunicación a responder a una pregunta clave: “¿Es responsable de esto el cambio climático?”, donde “esto” alude al impacto destructivo de un evento meteorológico extremo.

Lo que sí está sólidamente documentado por agencias e instituciones internacionales desde mediados del siglo XX es el **aumento significativo en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos**, una tendencia que plantea desafíos urgentes para la humanidad y para la estabilidad de los sistemas naturales que la sustentan.

Adquirida esta conciencia, surge el dilema de cómo enfrentar la compleja problemática que representa el **cambio climático** y, en particular, su manifestación más crítica: el **calentamiento global**. Durante las últimas décadas se ha observado un notable incremento de iniciativas impulsadas por organismos multilaterales, regionales y nacionales, orientadas a contener sus impactos. Se han dispuesto recursos financieros, científicos y tecnológicos con el propósito de afrontarlo mediante las mejores herramientas actualmente disponibles. Estas acciones se materializan, por una parte, en medidas destinadas a **mitigar las causas que lo originan** y, por otra, en procesos de **adaptación de nuestras estructuras sociales, productivas y culturales** para resistir los efectos que el cambio climático ya está generando.

El objetivo estratégico consiste en transformar nuestros sistemas y estructuras en **entidades resilientes a los embates del clima**, mediante la adopción de nuevos paradigmas tecnológicos y hábitos de vida, al tiempo que se impulsa una intensa actividad científica en la

frontera del conocimiento. Solo así podrán sentarse las bases de innovaciones capaces de ofrecer soluciones de mitigación y adaptación verdaderamente eficaces.

Considerando que el aspecto central de la mitigación es la **descarbonización de las economías**, desde hace ya algunas décadas está en marcha un **proceso global de transición energética**. Se promueve la electrificación del sistema de transporte terrestre, hasta ahora dependiente casi exclusivamente de los hidrocarburos, y se avanza en la sustitución progresiva de las fuentes fósiles para la producción de energía eléctrica, térmica y mecánica, reemplazándolas por alternativas de emisiones nulas, como la energía eólica, solar y la nuclear de nueva generación.

No obstante, este proceso no está exento de inconvenientes ni se desarrolla de manera uniforme en el mundo. Las tecnologías energéticas de transición, especialmente la solar y la eólica, aún no han alcanzado su madurez plena: su eficiencia es en varios casos limitada; el impacto paisajístico de las instalaciones a gran escala suscita críticas; requieren extensas superficies terrestres o marinas para lograr una producción a escala industrial; y las prometedoras tecnologías nucleares de nueva generación, a pesar de anunciar altos niveles de seguridad, todavía carecen de suficiente validación práctica.

Los “lados oscuros” de estas tecnologías, es decir, sus efectos inesperados en condiciones no rutinarias pueden manifestarse de manera disruptiva. Tal fue el caso del gigantesco **apagón del sistema eléctrico interconectado europeo** ocurrido el 28 de abril de 2025, que afectó a España, parte de Portugal y al sur de Francia, como se describe en el Capítulo 8 de este libro.

A ello se suma el impacto socioeconómico de la transición energética, que, si no es gestionada con responsabilidad, puede acarrear consecuencias dolorosas. El cierre inevitable de empresas y actividades vinculadas a los viejos esquemas de producción energética conllevará pérdidas de puestos de trabajo difícilmente reciclables en el nuevo paradigma, con el consiguiente aumento de tensiones sociales y la redefinición de equilibrios geopolíticos.

Tampoco la transición avanza con la misma intensidad en todo el planeta. Europa ha sido un ejemplo particularmente virtuoso: en 2023, las energías renovables representaron el **24,5 % del consumo final total de energía**, lo que implicó un incremento de un (1) punto porcentual respecto a 2022 (*European Environment Agency*, 2025). China, aunque todavía dependiente en gran medida de los combustibles fósiles, dio un paso significativo: en 2023, el porcentaje de combustibles no fósiles (renovables, nuclear e hidroeléctrica) en su **mix energético total** alcanzó el **18,3 %**, frente al 17,5 % del año anterior (Yep & S&P Global Staff, 2023). India, en contraste, para ese mismo año continuó dependiendo en un 73 % del carbón para su producción energética (véase Capítulo 8, p. 149), situación compartida por la mayoría de los países en desarrollo, que carecen de capacidad financiera para sostener el cambio de patrón energético, a pesar de los cuantiosos recursos comprometidos por los países industrializados: **300 000 millones de USD anuales** para impulsar la descarbonización, según lo acordado en Bakú durante la **COP29 (noviembre de 2024)**.

A lo largo de la historia de la humanidad, las nuevas tecnologías se han impuesto gracias a las ventajas que ofrecían, aunque su adopción definitiva solía retrasarse por la inercia de las organizaciones humanas y, con frecuencia, por intereses ya establecidos. Sin embargo, con el tiempo han prevalecido, favorecidas además por su constante perfeccionamiento. No hay motivos para pensar que esta vez será distinto: las tecnologías energéticas emergentes avanzan con la promesa de preservar nuestro hábitat y garantizar la sostenibilidad de la civilización.

Con respecto al contenido de este libro, cabe señalar que existen innumerables obras dedicadas al cambio climático y sus consecuencias. La presente pretende **contribuir al debate** mediante un análisis fundamentado en **tesis científicas** y en **datos respaldados por agencias e instituciones reconocidas**, de modo que el conocimiento transmitido alcance el mayor grado de confiabilidad que los actuales instrumentos de observación y deducción permiten.

El Capítulo 1 comienza con la caracterización del cambio climático, un fenómeno que, aunque ha ocurrido de manera natural en distintas etapas de la historia geológica, adquiere hoy un carácter predominantemente antrópico debido a la intensificación del efecto invernadero causado por el hombre. Para explicar este proceso se introducen parámetros científicos como el Potencial de Calentamiento Global (GWP) y el Forzamiento Radiativo, que permiten cuantificar el

impacto de los gases de efecto invernadero sobre el balance energético terrestre. Se abordan los efectos observables de esta alteración, desde la pérdida acelerada de hielo y nieve y el consecuente ascenso del nivel del mar, hasta las modificaciones en la humedad atmosférica que incrementan la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos. Con ello se dibuja un mapa de riesgos que servirá de marco para todo el análisis posterior.

Para comprender tales transformaciones, en el Capítulo 2 nos adentramos en la dinámica del ciclo global del carbono, que funciona simultáneamente en escalas temporales muy distintas: la ruta lenta de carácter geológico y la ruta rápida de naturaleza biológica. La primera involucra procesos como la disolución del CO₂ en océanos, la sedimentación de carbonatos y la fosilización; la segunda está regida por la fotosíntesis oxigénica y la respiración de los seres biológicos. En ambos casos, el balance entre fuentes y sumideros determina la concentración atmosférica de CO₂, y las emisiones derivadas de la actividad humana han roto ese equilibrio, acelerando el calentamiento global.

El impacto humano sobre estos procesos se cuantifica en el Capítulo 3, gracias a indicadores como la huella de carbono y la huella ecológica, que evalúan la presión ejercida sobre los ecosistemas y la comparan con su biocapacidad. Estos parámetros, calculados mediante metodologías estandarizadas y ajustados con factores de equivalencia, permiten evaluar si una región o país vive dentro de los límites de regeneración de la naturaleza o si incurre en un déficit ecológico. Tales mediciones son esenciales para diseñar estrategias de sostenibilidad fundamentadas en evidencia cuantitativa.

En el Capítulo 4, la relación entre el aumento de gases de efecto invernadero y la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos se hace evidente al analizar los datos históricos sobre eventos como olas de calor y frío, lluvias torrenciales, sequías prolongadas, huracanes y tornados. No se trata únicamente de amenazas físicas, sino de fenómenos con efectos en cascada que afectan infraestructuras, salud pública, recursos hídricos y sistemas agrícolas. La comprensión científica de su génesis y comportamiento bajo un clima cambiante es la base para prever impactos y reducir vulnerabilidades.

La interacción entre amenaza y vulnerabilidad se ilustra en el Capítulo 5 con el caso del desastre de Vargas en 1999, donde lluvias extraordinarias en un breve periodo generaron deslizamientos y flujos torrenciales que devastaron la región costera central de Venezuela. El estudio del evento (incluyendo su contexto geográfico, la magnitud de las precipitaciones, el periodo de retorno estimado y los precedentes históricos) permite entender cómo factores físicos y socioeconómicos se combinan para amplificar los efectos de un fenómeno extremo.

La evidencia acumulada lleva a plantear la gestión de riesgos climáticos como un proceso dual: mitigación y adaptación, lo cual se ilustra en el Capítulo 6. La mitigación busca influir sobre las causas que producen las emisiones antrópicas a la atmósfera, impulsando cambios tecnológicos y de estilos de vida mediante acuerdos internacionales y la acción coordinada de organismos especializados. La adaptación, por su parte, se orienta a modificar sistemas y prácticas para resistir mejor los impactos, con metodologías específicas según el tipo de amenaza, desde inundaciones y sequías hasta huracanes y tornados. Ambas dimensiones son interdependientes y necesarias para limitar las pérdidas humanas y materiales, así como aumentar la resiliencia de nuestro entorno vital.

Ejemplos concretos de aplicación de estas estrategias se describen en el Capítulo 7, ilustrando los planes de resiliencia frente al cambio climático desarrollados por dos ciudades costeras, Rotterdam y Singapur. Rotterdam combina ingeniería hidráulica avanzada con soluciones basadas en la naturaleza para gestionar inundaciones y el ascenso del nivel del mar, mientras que Singapur implementa un modelo integral que abarca el control del estrés térmico, la gestión del agua potable, la protección de manglares y obras icónicas como el *Marina Barrage*. La comparación de estos casos muestra que la resiliencia urbana es el resultado de planificación sistémica, innovación y compromiso político.

La reducción del riesgo climático está estrechamente ligada a la transformación de la matriz energética, ya que la dependencia de combustibles fósiles es uno de los motores del calentamiento global. La transición energética, sobre la cual nos detenemos en detalle en el Capítulo 8, implica

reemplazar fuentes emisoras por opciones renovables, diversificar el suministro, mejorar la eficiencia y proyectar escenarios futuros basados en proyecciones climáticas. Esto requiere no solo avances tecnológicos, sino también políticas coherentes y cambios en los patrones de consumo y producción a escala planetaria.

En este contexto, las tecnologías energéticas emergentes, algunas de las cuales se analizan en Capítulo 9, se perfilan como herramientas clave para alcanzar la descarbonización, . Los reactores nucleares modulares ofrecen generación escalable y segura; las baterías de estado sólido prometen resolver limitaciones actuales de almacenamiento energético; y el hidrógeno verde se presenta como un vector versátil, capaz de integrarse en la generación eléctrica mediante celdas de combustible y en aplicaciones industriales de alto consumo energético. Su desarrollo e implementación, combinados con cooperación internacional y estrategias de transición bien diseñadas, podrían redefinir la respuesta global a la crisis climática.

EL CAMBIO CLIMÁTICO

1



1

Desde la primera infancia estamos familiarizados con las diversidades climáticas propias del día y la noche, así como aquellas que marcan la alternancia de las estaciones.

También tempranamente aprendemos que estas variaciones climáticas se deben a la mecánica terrestre: la rotación de nuestro planeta produce excursiones térmicas entre el día y la noche, mientras que la inclinación del eje terrestre con respecto a la eclíptica², en el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, produce las peculiaridades climáticas estacionales.

A estos fenómenos, que podríamos definir de corto alcance temporal ya que su duración es a “escala humana”, hay que añadir toda una serie de movimientos que tienen una ciclicidad milenaria y, en algunos casos, de millones de años (Pérez, s.f.). De estos, el que es digno de mención por tener efectos climáticos observables durante el lapso de vida individual de los humanos, es el de la “Precesión de los Equinoccios”. Este movimiento es debido a la lenta y gradual variación de la orientación del eje terrestre, lo cual produce un desplazamiento de su inclinación de aproximadamente 1° en 72 años (ciclo completo en 25.772 años), afectando de esta manera la distribución de la irradiación solar sobre la superficie del planeta, con lógicas consecuencias sobre el clima (Fig. 1-1)³.

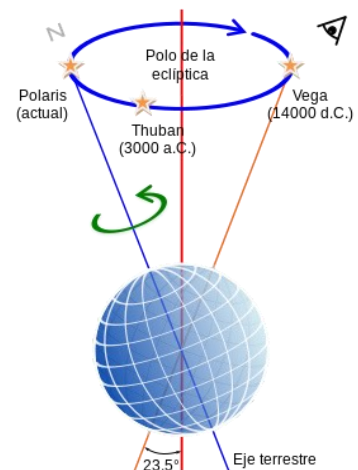


Fig. 1-1 Movimiento de precesión del eje terrestre (Fuente: Divad, 2010. Lic. Creative Commons Dominio Público).

¹ Imagen del título: “Amanecer de dos Soles” (Fuente: Producción Propia, 2025)

² La eclíptica es el plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. La eclíptica tiene una inclinación de $23,45^\circ$ con relación al plano ecuatorial terrestre (Pérez, N.A.).

³ https://es.wikipedia.org/wiki/Movimientos_de_la_Tierra#/media/Archivo:Precession-sphere-ES.svg

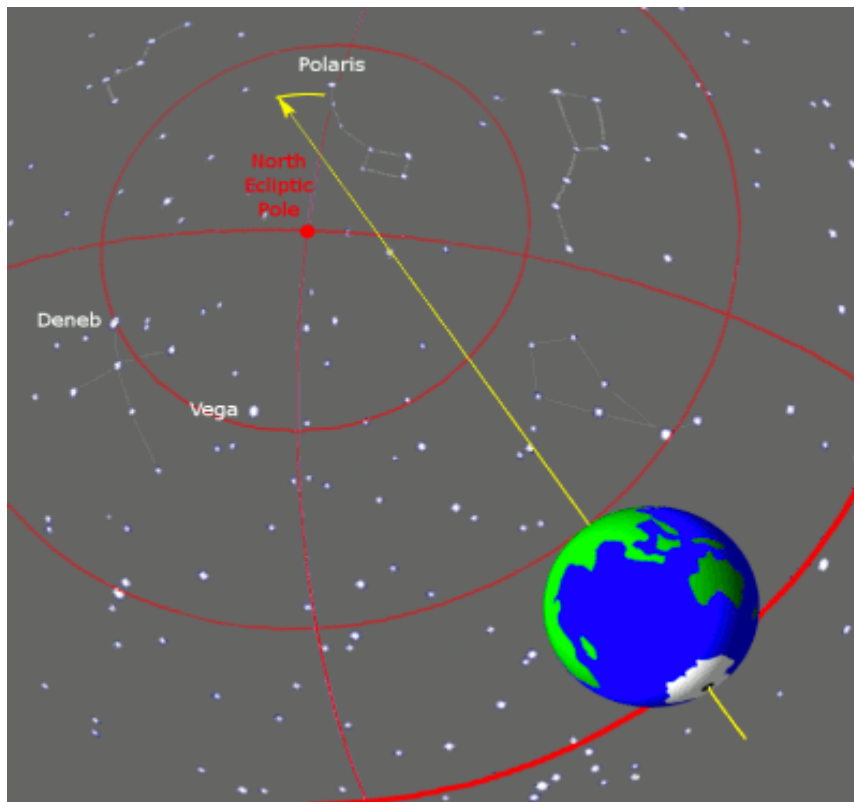


Fig. 1-2 Ciclo de precesión del eje terrestre alrededor del Polo Norte de la Eclíptica (Autor: Tfr000, 2012. Lic. *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported*)⁴.

A los movimientos astrales, hay que añadir, como responsables de las condiciones climáticas, las componentes internas al propio ecosistema terrestre, como las erupciones volcánicas, las corrientes oceánicas, los fenómenos del Niño y la Niña, entre otros.

Podemos catalogar todos los fenómenos reseñados como “naturales”, responsables desde tiempos ancestrales de muchas y a veces dramáticas mutaciones climáticas.

Sin embargo, el clima cambia no sólo bajo el efecto de fenómenos naturales, sino también antrópicos. En efecto, los fenómenos naturales no pueden dar cuenta de la rapidez con que ha venido variando la situación climática en los últimos dos siglos, siendo la actividad humana la principal responsable de estas variaciones. Esto implica que la relativa estabilidad climática que ha gozado la humanidad durante su existencia (a diferencia de lo sucedido a lo largo de la vida del planeta Tierra) está cambiando.

Según la IPCC⁵ la “huella” humana es evidente en esta alteración de los principales factores que inciden en el clima, tanto a nivel local como global, y de esto han venido tomando conciencia tanto la Ciencia como la Opinión Pública.

A raíz de la criticidad de esta situación, este trabajo se restringirá al análisis de las contribuciones antrópicas a las variaciones del clima, tratando de aportar datos sólidos y explicaciones científicas comprensibles, con esto sumándose a las muchas publicaciones que miran a concientizar a la sociedad sobre esta problemática.

⁴ https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3APrecision_animation_small_new.gif?utm_source=chatgpt.com

⁵ *Intergovernmental Panel on Climate Change*, organismo de la ONU responsable de analizar y evaluar los estudios científicos sobre el Cambio Climático.

1.1 DEFINICIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO

En la literatura científica podemos encontrar muchas definiciones de **Cambio Climático (CC)**. Aquí proponemos la siguiente:

“El Cambio Climático se define como la alteración de las condiciones climáticas promedio existentes en una localidad, región o bien en ámbito global, observable durante un período consistente de tiempo (varias décadas).” (Ferrari, 2022)

No hay que confundir las variaciones de las condiciones climáticas que, como hemos visto, son condiciones promedio que se establecen en un largo periodo de tiempo, con las variaciones meteorológicas, que se manifiestan localmente y en tiempos breves (días, semanas).

Las variaciones de las condiciones climáticas se describen mediante variables cuantitativas asociadas a los múltiples factores que representan los efectos del CC (ver sección 1.3, más adelante). Estas variables, en su conjunto, indican que actualmente está en marcha un proceso de Calentamiento Global (CG) del planeta, con todas sus nefastas consecuencias. Para darse cuenta de la significación del CG, basta con observar la Fig. 1-3⁶, que muestra la variación promedio de la temperatura mundial comparada con los valores de la era preindustrial (BBC, 2021).

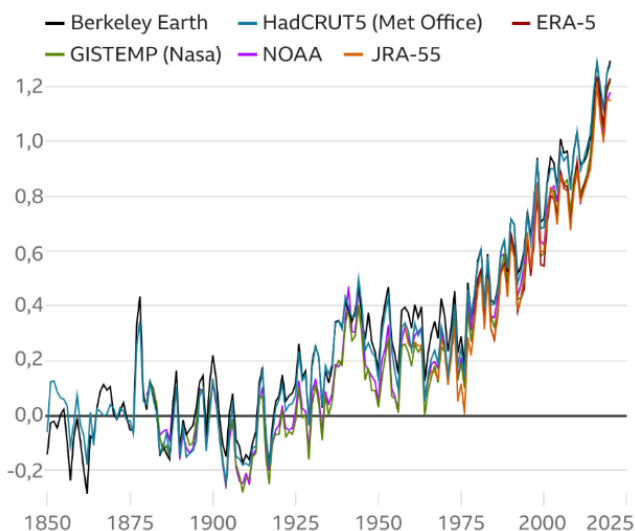


Fig. 1-3 Cambio en la temperatura global promedio desde niveles preindustriales, en °C
(Fuente: Met Office – BBC. Lic. Creative Commons Dominio Público).

1.2 EL ORIGEN ANTRÓPICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN PROGRESO

A partir de la 1era. Revolución Industrial (alrededor del año 1750), las condiciones climáticas han venido experimentando una evolución (más bien involución), de rapidez incremental sin igual en toda la anterior historia de la humanidad. Las actividades antrópicas en los ámbitos industrial, agrícola, minero, de servicios, de transporte han venido creciendo en forma exponencial y en la misma medida han venido aumentando las emisiones de gases denominados de “Efecto Invernadero” en la atmósfera, hecho que ha desencadenado el progresivo calentamiento del planeta⁷.

1.2.1 EL EFECTO INVERNADERO

El Efecto Invernadero es un fenómeno natural que en realidad permite la vida en la Tierra, puesto que su acción hace aumentar las temperaturas de la biosfera en alrededor de 30°, haciéndolas compatibles con las exigencias vitales de los organismos biológicos.

Es un fenómeno provocado por algunos gases presentes en la atmósfera en forma natural o productos de las actividades humanas. Estos gases de larga persistencia se denominan de Efecto Invernadero (Gases de Efecto Invernadero, GEI o *Greenhouse Gases*, GHGs, en inglés). Los principales son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los fluorocarburos (HFCs y PFCs), entre otros.

⁶ Creative Commons grafico de aumento de temperatura media global - Search Images (bing.com)

⁷ Vea el video (1) en la sección “Animaciones y videos”

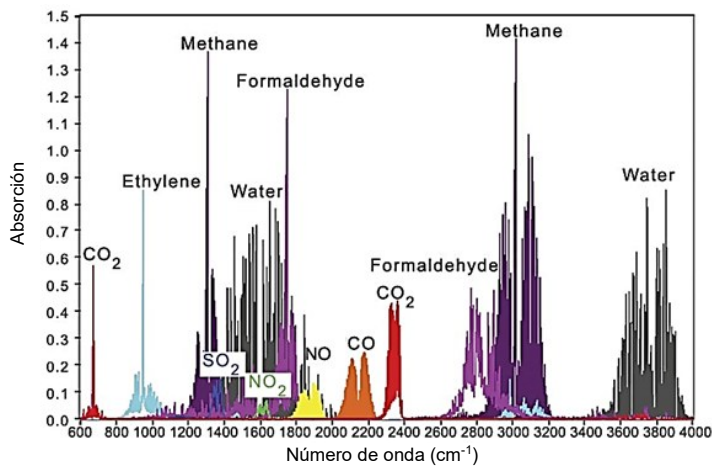


Fig. 1-4 Espectro de absorción infrarroja de algunos gases y vapores (Fuente: MKS-Newport. Lic. Wiki Commons Dominio Público).

Para comprender el mecanismo que regula este fenómeno, es necesario tener en cuenta que la radiación térmica infrarroja es absorbida en grado diferente por los gases presentes en la atmósfera (Ver Fig. 1-4)⁸. Este fenómeno se puede explicar sumariamente mediante una analogía relacionada con el proceso que se produce en los invernaderos. En estos, la luz solar pasa a través del techo de vidrio y va a calentar las plantas, suelo y objetos presentes en el interior. Sin embargo, gran parte de la energía térmica reirradiada por estos objetos, por ser de onda larga

(infrarroja), no logra atravesar el vidrio y es reflejada por este, quedando atrapada en el ambiente interno que, de esta forma, se mantiene cálido. De la misma manera, la fracción de la energía radiante luminosa⁹ proveniente del Sol que logra superar el efecto filtrante de la atmósfera terrestre¹⁰ y llega a la superficie, produce el calentamiento de la corteza terrestre y se transforma en energía térmica, que es una energía radiante de longitud de onda infrarroja¹¹. La corteza terrestre no absorbe todo el calor, sino que refleja una parte de este de regreso a la atmósfera. Pero las ondas térmicas radiantes tienen dificultad en propagarse a través de la tropósfera por la presencia de los gases invernadero. Éstos tienen bajas cualidades transmisivas de las ondas infrarrojas, lo cual se traduce en que sólo una fracción de éstas logra escapar de nuevo al espacio.

Una importante fracción de la energía térmica queda así atrapada en la baja atmósfera, siendo en parte absorbida por los gases invernadero, en parte reflejada de nuevo hacia la superficie, contribuyendo de esta manera a un calentamiento adicional de la biósfera (Fig. 1-5).

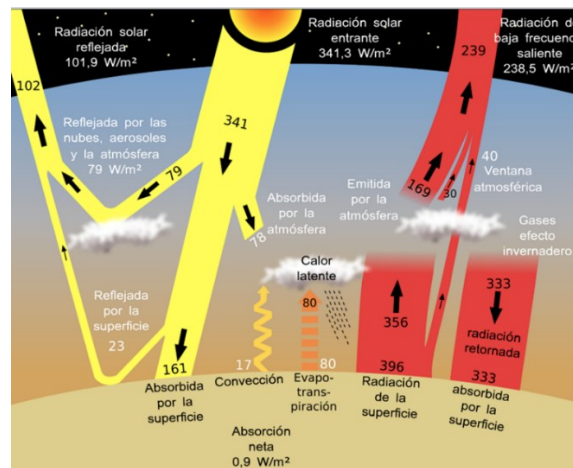


Fig. 1-5 El Efecto Invernadero. Cuantificación de las radiaciones incidentes, absorbidas y reflejadas 2000-2004 (Fuente: NASA, traducido por IqRS, redibujado por Christoph – Lic. Wiki Commons Dominio Público)¹².

⁸ [wikimedia commons infrared spectrum absorption of gases - Search Images \(bing.com\)](#)

⁹ La luz ocupa la banda del espectro electromagnético visible, la cual está comprendida entre las longitudes de onda 0,38 μm y 0,83 μm (nominales).

¹⁰ Aproximadamente un tercio de la energía solar que inicialmente incide en la atmósfera superior es reflejado de regreso al espacio.

¹¹ Las radiaciones infrarrojas (IR) ocupan la banda espectral comprendida nominalmente entre los 0,83 y los 1000 μm

¹² [Sun climate system alternative \(German\) 2008.svg](#)

En la Fig. 1-6 se muestra el espectro de absorción de radiación térmica infrarroja por parte del vapor de agua y del dióxido de carbono presentes en la atmósfera (el color gris representa los picos de absorción del H₂O, el marrón los del CO₂).

En esta figura se puede apreciar que, a pesar de que el CO₂ absorbe el calor en menor medida que el H₂O, sin embargo lo hace en la banda que va de los 12 a los 15 μm, cerrando así la “ventana” dejada libre por el H₂O y por la cual podría escaparse al espacio una buena parte de la energía térmica irradiada por la superficie terrestre.

El Efecto Invernadero, benigno de por sí, se está tornando perjudicial por la excesiva concentración de ciertos gases invernadero en la tropósfera, causada por el incremento de las emisiones de origen antrópica. Esto ha dado origen a un aumento desproporcionado de la temperatura de la biósfera, lo cual amenaza con tener efectos desastrosos sobre la salud del planeta y sus habitantes.

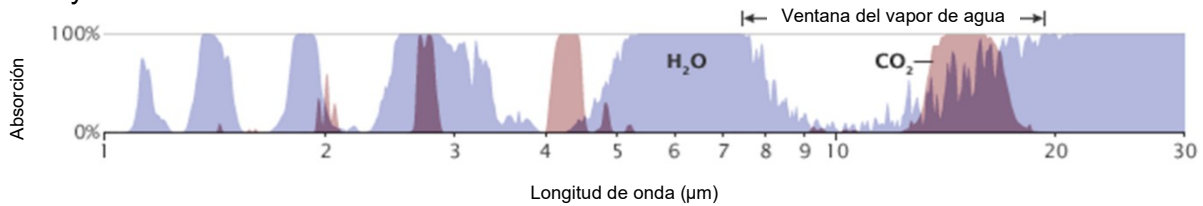


Fig. 1-6 Espectrografía del vapor de agua y del monóxido de carbono en a banda del infrarrojo¹³
(Fuente: imagen adaptada de Robert Rhode. Lic. *Wiki Commons* Dominio Público).

Los gases que mayormente preocupan por su incidencia en el Calentamiento Global son el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los fluorocarburos.

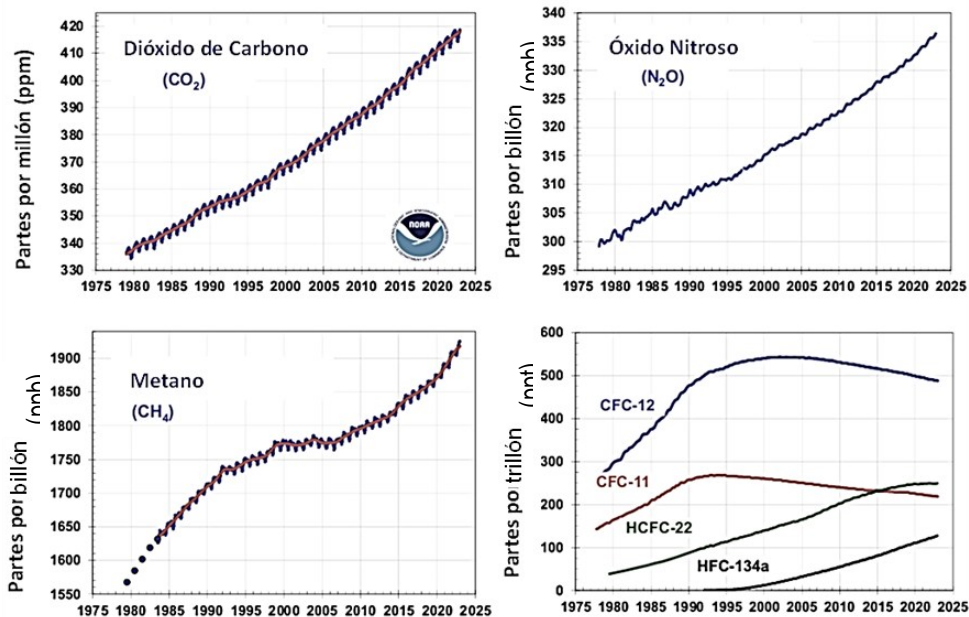


Fig. 1-7 Concentración global promedio de los principales gases GHGs
(Fuente: *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*)¹⁴.

La Fig. 1-7 muestra el constante incremento de los principales gases invernadero desde el año 1979. Los gases señalados en la figura por sí solos tienen un impacto del 96% sobre el calentamiento global.¹⁵

¹³https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/CO2_H2O_absorption_atmospheric_gases_unique_pattern_energy_wavelengths_of_energy_transparent_to_others.png

¹⁴ <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>

¹⁵ En la figura se muestra también la variación de los CFCs que no son propiamente gases de Efecto Invernadero

Por ejemplo, el dióxido de carbono ha aumentado sus niveles de concentración en la atmósfera desde un promedio global de aproximadamente 280 ppm (partes por millón) en época preindustrial, hasta 417 ppm en julio de 2021 (Ferrari, 2022). Esto indica que los sumideros naturales de este gas no logran absorber todo el CO₂ producido por las actividades del hombre.

La concentración del metano prácticamente ha aumentado en más de un 250% en comparación con los 722 ppb (partes por billón) de la era preindustrial, alcanzando en el año 2023 un valor promedio de 1.922 ppb (NOAA, 2023).

La concentración de óxido nitroso en 2021 alcanzó el valor promedio de aproximadamente 334 partes por billón, lo que equivale a un aumento del 124% con respecto a la era preindustrial (Ambientum Portal Ambiental, 2023).

Existe otro conjunto de gases de origen antrópico con un alto potencial de calentamiento de efecto invernadero, a pesar de tener una baja concentración en la atmósfera. Estos son los fluorocarbonos, en sus distintas categorías:

- Los hidrofluorocarburos (HFCs).

Son compuestos orgánicos sintéticos que contienen átomos de hidrógeno y flúor. Los HFCs son principalmente utilizados en sistemas de aire acondicionado y como refrigerantes. Los HFCs son considerados gases de efecto invernadero por su alto potencial de calentamiento global.

- Los perfluorocarbonos (PFCs).

Contienen átomos de carbono y flúor y persisten en el medio ambiente durante largos períodos. Se utilizan en diferentes aplicaciones e industrias. No tienen efectos directos en la salud humana, pero son potentes gases de efecto invernadero.

- Los clorofluorocarbonos (CFCs).

No son propiamente gases de efecto invernadero. Su principal impacto está relacionado con la degradación de la capa de ozono en la estratosfera, no con el calentamiento global.

1.2.2 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (*GLOBAL WARMING POTENCIAL, GWP*)

Los varios gases invernadero no tienen el mismo potencial de calentamiento, puesto que absorben el calor en grados diferentes. La contribución equivalente de un gas invernadero se refiere a su capacidad para absorber calor en comparación con el CO₂. Se mide mediante el Potencial de Calentamiento Global (*Global Warming Potencial, GWP*), que evalúa cuánto más efecto de calentamiento tiene un gas en comparación con el CO₂ durante un período específico de tiempo (generalmente 20 o 100 años). Por ejemplo, el metano (CH₄) tiene un GWP a 100 años (GWP-100) de entre 21 y 25, lo cual significa que una tonelada de metano equivale a 21-25 toneladas de CO₂ en 100 años en lo que a calentamiento se refiere (vea Tabla 1-1). En resumen, el hecho que el metano tenga un GWP mucho mayor que el CO₂, significa que, aunque su concentración en la atmósfera es menor, su impacto en un determinado periodo de

Tabla 1-1 Potencial de Calentamiento Global a 100 años
(Fuente: IPCC, 1996 (SAR) e IPCC, 2007 (AR4)).

Greenhouse gas	SAR GWP	AR4 GWP
Carbon dioxide (CO ₂)	1	1
Methane (CH ₄)	21	25
Nitrous oxide (N ₂ O)	310	298
HFCs		
HFC-23	11,700	14,800
HFC-32	650	675
HFC-41	97	NA
HFC-125	2,800	3,500
HFC-134	1,000	NA
HFC-134a	1,300	1,430
HFC-143	300	NA
HFC-143a	3,800	4,470
HFC-152a	140	124
HFC-227ea	2,900	3,220
HFC-236fa	6,300	9,810
HFC-4310mee	1,300	1,640
PFCs		
CF ₄	6,500	7,390
C ₂ F ₆	9,200	12,200
C ₃ F ₈	7,000	8,830
C ₄ F ₁₀	7,000	8,860
C ₆ F ₁₄	7,500	9,160
C ₈ F ₁₈	7,400	9,300
Sulfur hexafluoride (SF ₆)	23,900	22,800

tiempo en el calentamiento global puede ser mayor.

Una unidad de medida muy utilizada a la hora de estimar los efectos de los gases invernadero, es el CO₂e o CO₂-eq. Una medida expresada en CO₂-eq representa la masa de un gas invernadero convertida a masa de CO₂ equivalente en lo que a calentamiento se refiere. Se calcula como el GWP del gas multiplicado por su masa (GWP_{gas} x mgas).

Como ejemplo de uso de esta unidad de medida, se incluye a continuación la Fig. 1-8¹⁶, donde se muestran las emisiones de los gases GEI producidos por el servicio eléctrico nacional de Chile. En esta figura no se especifica la cantidad absoluta del total de gases GEI emitidos por cada MWh generado, ya que este valor carece de sentido puesto que las masas absolutas de los diferentes gases invernadero no pueden sumarse para cuantificar el efecto de calentamiento. Es necesario convertirlas a una unidad común para hacerlas compatibles, y esta unidad común es el CO₂-eq.

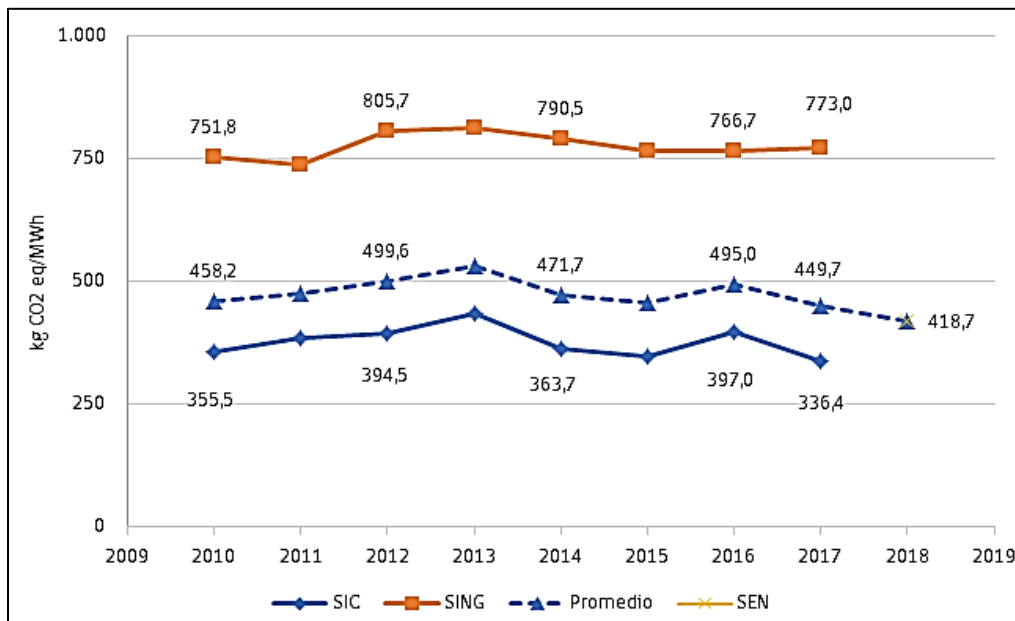


Fig. 1-8 Factor de emisiones GEI del Sistema Eléctrico de Chile en kg CO₂-eq/MWh (Fuente: Ministerio de Energía – Chile).

1.2.3 FORZAMIENTO RADIATIVO (*RADIATIVE FORCING*)

La Tierra se está calentando porque existe un desbalance entre la energía recibida del Sol y la emitida al espacio por el planeta, desbalance a favor de la energía recibida. Con Forzamiento Radiativo nos referimos a la “diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio”. En otras palabras, es la cantidad neta de energía que afecta el sistema climático de nuestro planeta. Un Forzamiento Radiativo positivo significa que la Tierra recibe más energía solar de la que irradia al espacio. Esto provoca el calentamiento del planeta. Un Forzamiento Radiativo negativo significa que la Tierra emana más energía al espacio de la que recibe del Sol, lo que produce enfriamiento. El forzamiento negativo puede ser causado por los aerosoles que reflejan la luz solar o por cambios en la cobertura de nubes. En resumen, un forzamiento positivo calienta el sistema, mientras que un forzamiento negativo lo enfría. El Forzamiento Radiativo se mide en watts por metro cuadrado.

Como ejemplo de empleo de este indicador, consulte la Fig. 1-9 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2023). La escala de la izquierda cuantifica el Reforzamiento

¹⁶ Factor de emisiones GEI del Sistema Eléctrico de Chile en kg CO₂-eq/MWh . (Fuente: Ministerio de Energía – Chile) - Search (bing.com)

Radiativo aportado por el total de los gases invernadero. En la misma figura se puede discriminar la contribución de cada gas al reforzamiento: por ejemplo, en el año 2022 el dióxido de carbono contribuyó con aproximadamente 2,4 W/m² que representa un 70% del total.

En la misma Fig. 1-9 se puede apreciar, en la escala de la derecha, el Índice Anual de Gases Invernadero (*Annual Greenhouse Gases Index, AGGI*), que representa la variación en porcentaje del Forzamiento Radiativo desde 1979 hasta 2022, normalizada al valor de referencia del año 1990.

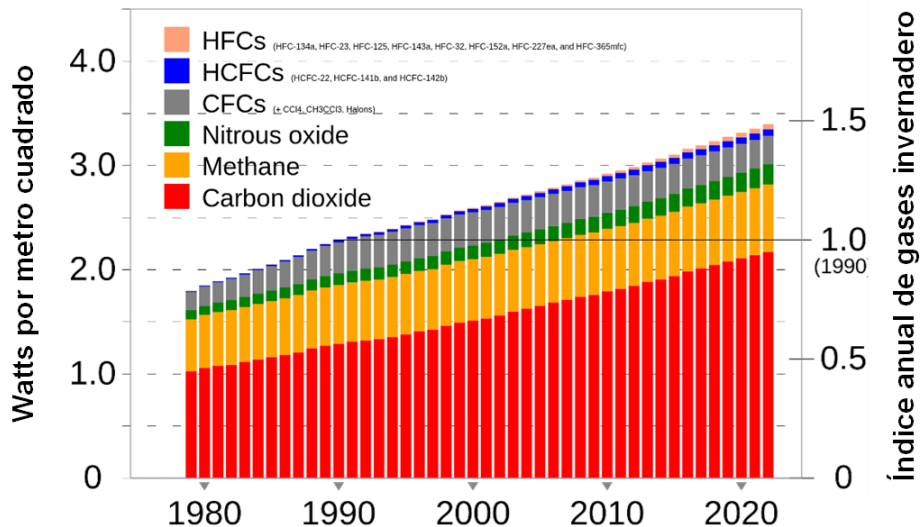


Fig. 1-9 Forzamiento Radiativo causado por los principales GHGs, 1979-2022 (Fuente: RCraig09. Lic. *Wiki Commons BY-SA 4.0* Dominio Público)¹⁷.

1.3 EFECTOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

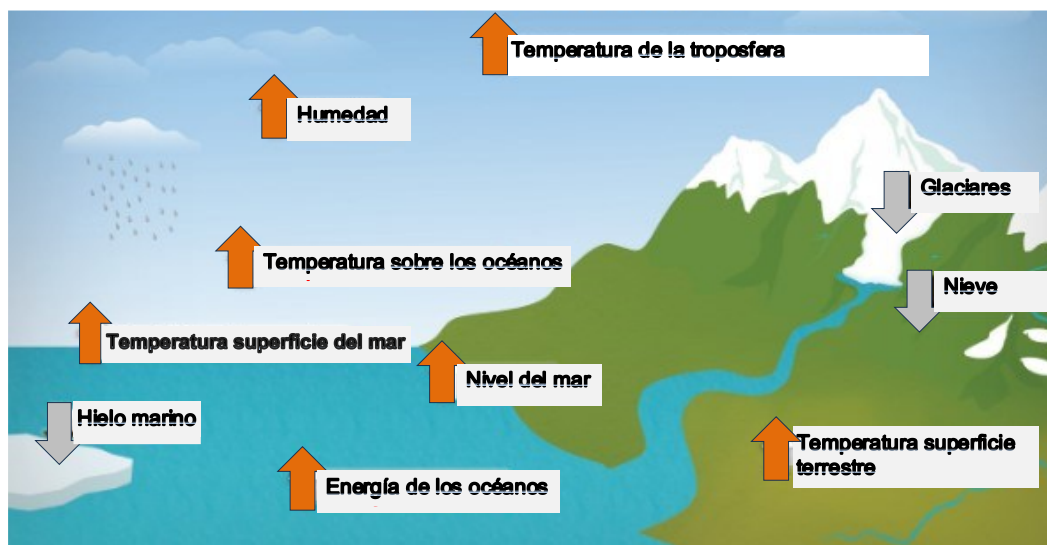


Fig. 1-10 Indicadores del Calentamiento Global (Fuente: NOAA NCDC, basada en datos actualizados por Kennedy et al. 2010).

El Cambio Climático a nivel mundial se manifiesta principalmente como un proceso progresivo de aumento de la temperatura promedio del planeta, proceso conocido como Calentamiento Global (CG). Este aumento de temperatura ha sido evaluado por diversas agencias internacionales, que concuerdan en registrar un valor récord para el año 2023, cuantificado en

¹⁷ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=105256510>

aproximadamente 1,3 °C por el *Met Office* de la BBC (ver Fig. 1-3) y en 1,45 °C por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2024). Los efectos más significativos del CG se reseñan en la Fig. 1-10.

Las variables mostradas en la figura se agrupan y describen a continuación:

- Disminución del hielo y de la cubierta de nieve
- Aumento del nivel de los mares
- Aumento de la humedad atmosférica, eventos extremos húmedos y secos

1.3.1 DISMINUCIÓN DEL HIELO Y DE LA CUBIERTA DE NIEVE

El aumento de las temperaturas provoca la disminución del manto helado del Antártida y de la Groenlandia, así como la disolución de los hielos marinos del Ártico y el retroceso de los glaciares permanentes. Esto es documentado tomando como indicador los balances de masa de los hielos realizados por diferentes agencias científicas internacionales año tras año.

Las regiones que preocupan especialmente son: Groenlandia, la Antártida y los glaciares andinos y asiáticos. En los dos primeros casos porque recogen más del 99% del hielo de agua dulce del planeta, en el de los países andinos y asiáticos porque sus glaciares proporcionan agua a grandes ríos.

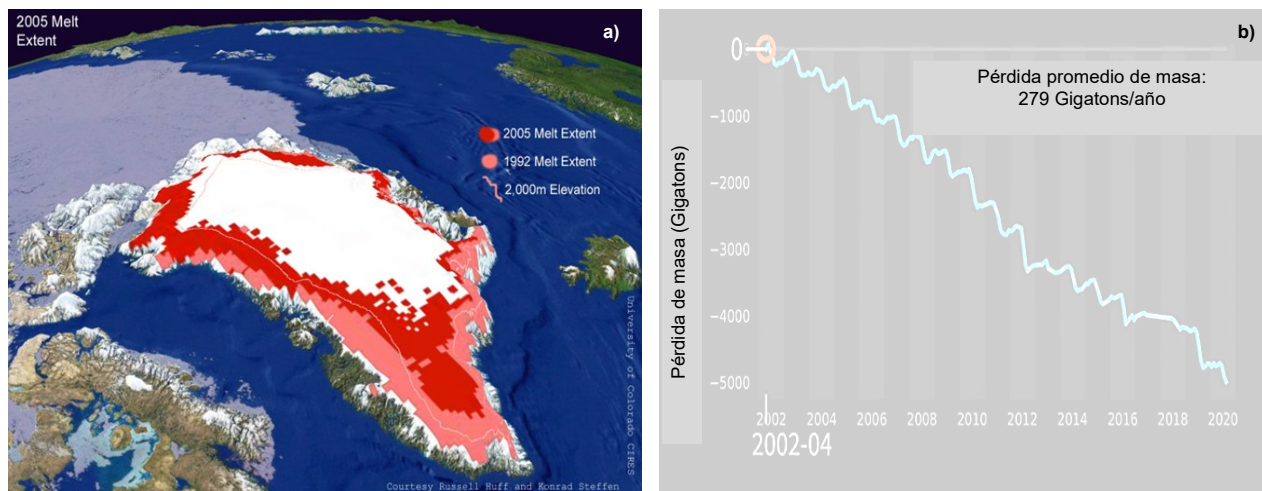


Fig. 1-11 a) Retiro del manto de hielo en Groenlandia 1992-2005. b) Pérdida promedio de masa de hielo en Groenlandia (a) Fuente: Giss NASA¹⁸ b) Fuente: *Sealevel* NASA¹⁹).

Los cambios en las precipitaciones, es decir, si llueve en lugar de nevar, también contribuyen a la disminución de la masa de hielo. "El resultado es que sólo en Groenlandia, entre 2002 y 2020²⁰, se han perdido 279.000 millones de toneladas de hielo al año" afirma Elisa Palazzi (cita en: Ferrari, 2022) (Fig. 1-11).

En la Fig. 1-12²¹ se muestra el balance cumulativo de masa de los glaciares en Europa, es decir la sumatoria de las variaciones anuales de masa de estos glaciares desde 1967 hasta el 2018, tomando como referencia el año 1997. La unidad de medida utilizada es el m w.e. o "metros de agua equivalente" (w.e. en inglés: *water equivalent*), la cual se utiliza comúnmente para

¹⁸ https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/legrande_02/figure-1.jpg

¹⁹ <https://sealevel.nasa.gov/>

²⁰ Vea el video (2) en la sección "Animaciones y Videos"

²¹ <https://climate.copernicus.eu/glaciers-0>

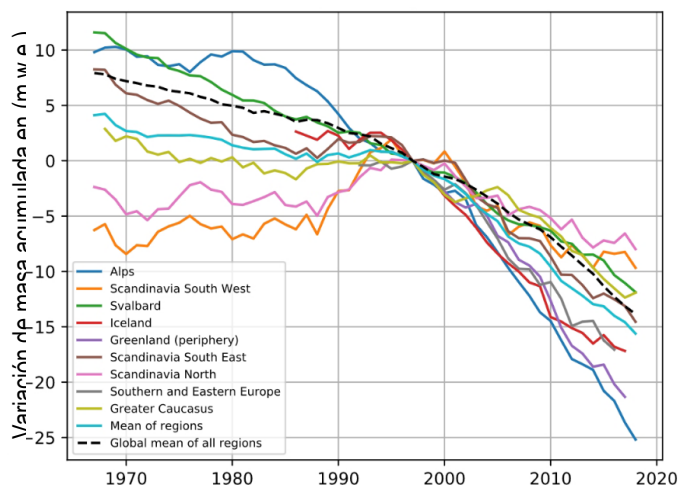


Fig. 1-12 Balance acumulado de masa de los glaciares en Europa desde 1967 hasta 2018, tomando como referencia el año 1997 (Fuente: WGMS / Copernicus, 2017 Undated).

cuantificar la disminución de la masa de hielo en términos de la cantidad de agua que se liberaría si ese hielo se derritiera completamente. Los metros de agua equivalente se refieren a la altura de un volumen de agua con una base igual al área que cubría el hielo antes de derretirse²².

El retiro de los glaciares en la América del Sur ha adquirido dimensiones inquietantes, como lo demuestra el caso de la Cordillera Blanca en Perú (Fig. 1-13)²³. La Cordillera Andina ha experimentado una disminución de la masa de hielo de diferente entidad según subregión, lo cual se indica en la Fig. 1-14²⁴.

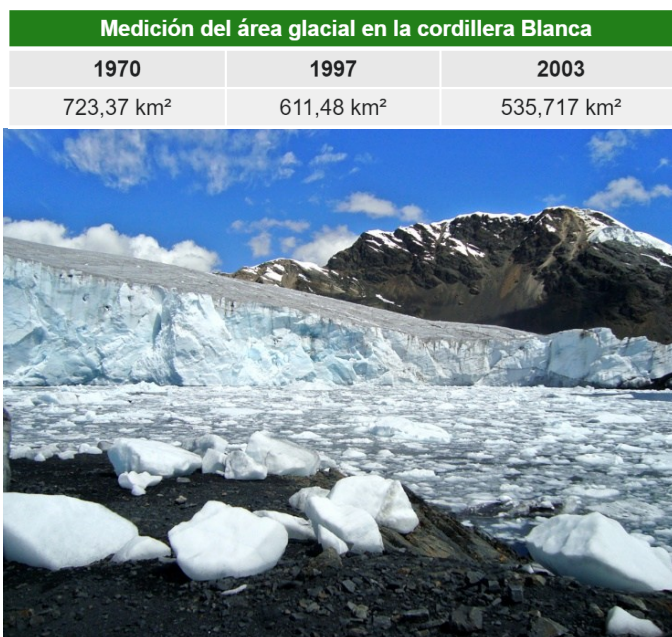


Fig. 1-13 Glaciar Pastoruri ubicado en el centro del Perú en la Cordillera Blanca (Fuente: Edubucher, 2010. Lic. Creative Commons 3.0 Dominio Público).

²² Como ejemplo, consideramos la fusión de una masa de hielo de área 1 (m²) y altura 1,1 (m), es decir de volumen igual a 1,1(m³). El hielo tiene una densidad de 0,917 (g/cm³), por lo tanto al derretirse da origen a un volumen de agua igual a 1,1 x 0,917=1 (m³). En conclusión, un bloque de hielo de volumen igual a 1,1 (m³) equivale a un volumen de agua de igual superficie y altura 1 (m), en otras palabras tiene un balance de masa de 1 (m w.e.).

²³ https://es.wikipedia.org/wiki/Glaciares_de_la_Cordillera_Blanca

²⁴ <https://ambiental.net/2016/08/perdida-de-glaciares-por-cambio-climatico-en-peru/>

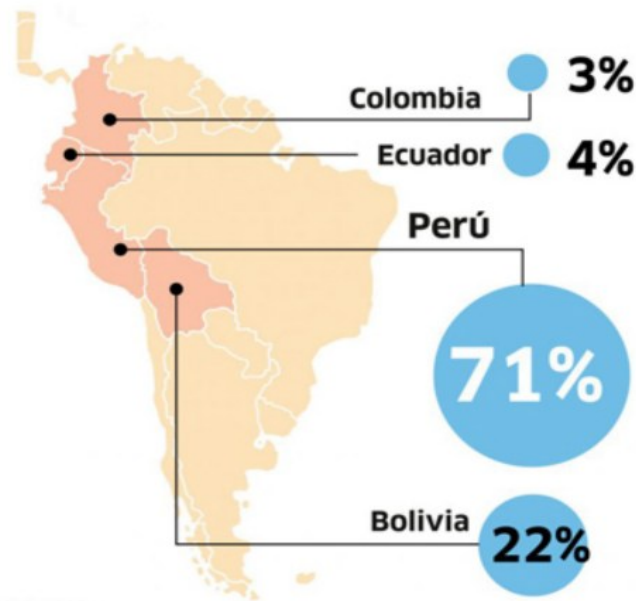


Fig. 1-14 Pérdida de glaciares en América del Sur en porcentaje
(Fuente: CLAES Centro Latino Americano Ecología Social).

Se observa aquí cómo los Andes peruanos han experimentado en porcentaje la mayor pérdida de glaciares en América del Sur (71%).

Los glaciares de los campos de hielo de la Patagonia norte y sur son predictores importantes de lo que esperamos que ocurra en las próximas décadas en otras regiones glaciares. Un estudio realizado por Pilato et al. (2022) en un sector del Parque Nacional Los Glaciares en la frontera entre Argentina y Chile (CHPS), denominado Glaciares Escondidos, muestra alarmantes señales de retroceso. La Fig. 1-15 denota el frente de los glaciares Dickson, Cubo y Frías en 1965, 1984 y 2020, evidenciándose el citado retroceso.

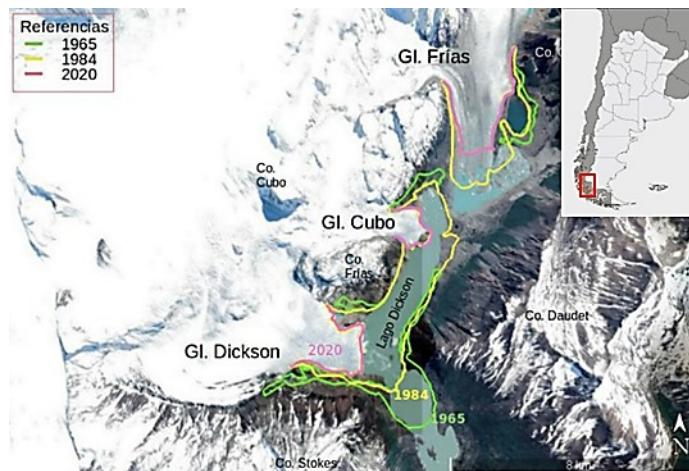


Fig. 1-15 Frente de los glaciares Dickson, Cubo y Frías en 1965, 1984 y 2020
(Fuente: Revista Cartográfica 104, enero-junio 2022, Argentina. p. 140. Lic Creative Commons 4.0 no comercial)

En los Estados Unidos los glaciares se encuentran en las Montañas Rocosas, Sierra Nevada, las Cascadas y en toda Alaska.

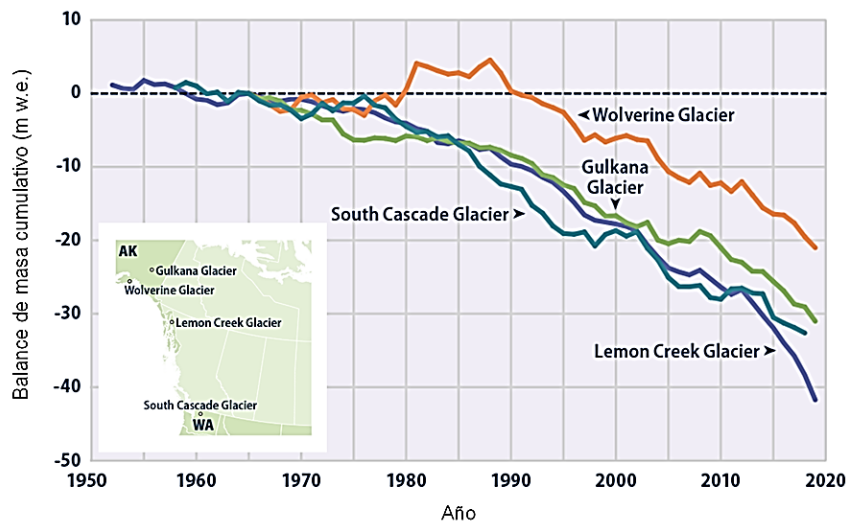


Fig. 1-16 Balance de masa acumulativo de cuatro glaciares estadounidenses, 1952 – 2019 (Fuente: EPA, 2021)²⁵.

Para el seguimiento del fenómeno se han tomado cuatro glaciares de referencia, que son el *Gulkana*, el *Wolverine*, el *Lemon Creek* y el *South Cascade*.

La Fig. 1-16 muestra el balance de masa acumulado de estos cuatro glaciares desde que comenzaron las mediciones en los años 1950 o 1960. Para cada glaciar, el balance de masa se fija en cero para el año base de 1965.

Las tendencias interanuales varían, con algunos glaciares que ganan masa en determinados años (por ejemplo, el glaciar *Wolverine* durante la década de 1980), pero las mediciones indican claramente una pérdida de masa glaciar a lo largo del tiempo (EPA, 2021) (USGS, 2020).

1.3.2 AUMENTO DEL NIVEL DE LOS MARES

Uno de los efectos más conocidos del cambio climático es la subida del nivel global de mares y océanos (Fig. 1-17), que llamaremos genéricamente “el mar”. Este fenómeno es debido a dos factores principales: el derretimiento de glaciares y casquetes polares y el aumento del volumen del agua²⁶. En la sección anterior hemos hablado profusamente de los efectos del calentamiento global sobre glaciares y mantos de hielo, cuya pérdida de masa aporta una importante cantidad de agua al mar. Según el Observatorio Sea Level Change de la Nasa, el nivel del agua marina aumenta de 1 (mm) por cada 360 Gt de hielo derretido [4].



Fig. 1-17 Agua alta en Venecia. (Fuente: EVENISE, 2007 Lic. Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0).

²⁵ [Climate Change Indicators: Glaciers | US EPA](#) (Fig. 2)

²⁶ Vea los videos (3) y (4) en la sección “Animaciones y videos”

Por otra parte, el aumento del volumen del agua es causado por factores como la temperatura y la salinidad. Cuando el agua se calienta, tiende a expandirse, lo que lleva a un aumento en su volumen y, por lo tanto, a un aumento de nivel, efecto que se conoce como expansión térmica. También los cambios en la salinidad del agua influyen en la altura del nivel del mar debido a que producen variaciones en su densidad. Estos cambios de nivel causados por la expansión térmica y las variaciones de salinidad se denominan "cambios estéricos del nivel del mar".



Fig. 1-18 Programa ARGO (Fuente: Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de la NOAA).

Un sistema mundial de sensores oceánicos flotantes, conocido como "Argo", mide la temperatura y la salinidad del océano desde la superficie hasta una profundidad de unos 6.600 pies (2.000 metros). Los flotadores "Argo" (Fig. 1-18)²⁷ nos indican qué parte del aumento del nivel del mar puede atribuirse al incremento de la temperatura y en qué medida el agua se expande. El calentamiento y la expansión del agua contribuyen aproximadamente a un tercio del aumento observado del nivel del mar durante las últimas décadas, habidas cuentas de que el océano

absorbe casi el 90% del calor atrapado en la atmósfera de la Tierra (NASA, 2024 b).

En combinación con las mediciones del deshielo terrestre, podemos identificar y medir la subida media global del nivel del mar, que el ante citado Observatorio *Sea Level Change* cuantifica en 103,3 (mm) desde 1993²⁸. Pueden parecer pocos milímetros, pero tienen efectos importantes: las tierras costeras son invadidas por el mar y los cientos de millones de personas que viven en el límite entre los océanos y la tierra sufren las consecuencias.

Por ejemplo, la zona costera aledaña a Venecia puede modificarse sustancialmente si la temperatura del mar aumenta en 2 °C, tal como muestra la simulación de la Fig. 1-19.

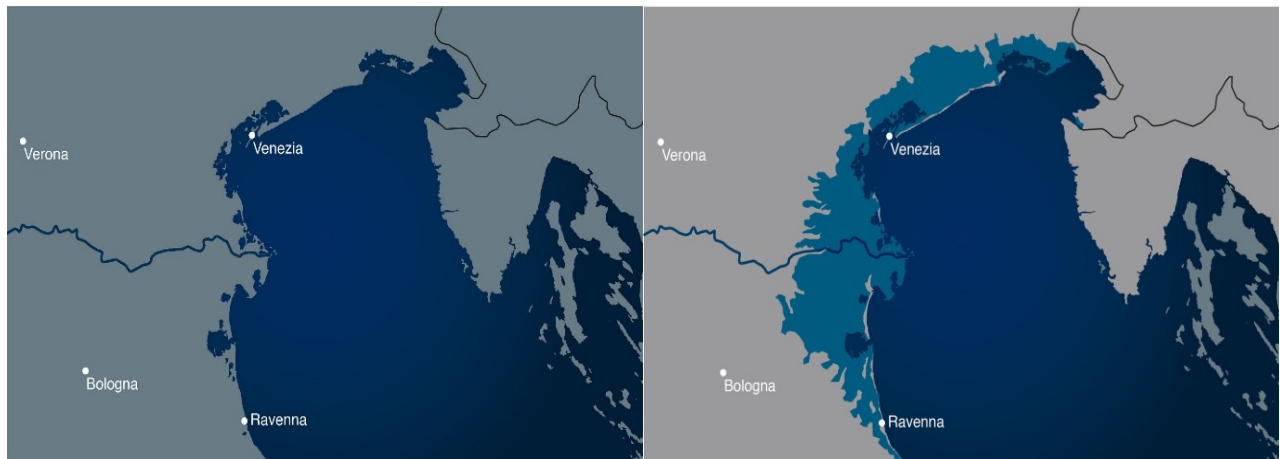


Fig. 1-19 Zona costera veneciana. Izq: Situación actual. Der: Situación prevista para un aumento de temperatura de 2 °C (Fuente: Ferrari, 2022)²⁹.

²⁷ <https://www.aoml.noaa.gov/es/argo/>

²⁸ <https://sealevel.nasa.gov/>

²⁹ <https://www.focus.it/ambiente/natura/che-cosa-cambiamento-climatico-cause-rimedi-giornata-terra>

1.3.3 AUMENTO DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA, EVENTOS EXTREMOS HÚMEDOS Y SECOS

El informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021) documenta un aumento tanto de los eventos extremos húmedos, como de los extremos secos (Barlow, 2021).

1.3.3.1 Eventos extremos húmedos

Los principales eventos extremos húmedos son las lluvias torrenciales y los ciclones tropicales (tormentas, huracanes, tifones) (Fig. 1-20)³⁰ (Fig. 1-21)³¹.(Fig. 1-22)³². Todos ellos tienen su origen en el aumento de la temperatura de la superficie terrestre, lo cual produce una mayor evaporación del agua contenida en los mares y los suelos y, en consecuencia, el aumento de la humedad de la atmósfera y de la resequead de los suelos.

Además, al evaporarse, el agua trae consigo energía calórica que es retenida en la atmósfera por los gases de efecto invernadero, aumentando así su contenido energético, y en parte es devuelta a la superficie terrestre, contribuyendo al aumento de la temperatura superficial (Simon, 2023).

Es aleccionadora la analogía entre este fenómeno y la sudoración del cuerpo humano. Cito textualmente a Matt Simon:

...Piensa en la lluvia cómo el sudor de la Tierra. Cuando tu cuerpo suda y la humedad se evapora de tu piel, arrastra calor con ella. Del mismo modo, el agua que evapora de la tierra y los océanos se lleva el calor de estas superficies...Los gases de efecto invernadero en la atmósfera son como una cobija que dificulta a la Tierra la dispersión del calor hacia el espacio. Cuantos más gases de efecto invernadero, más gruesa se vuelve esta cobija. En respuesta, la Tierra utiliza más refrigeración por evaporación, del mismo modo que se suda más bajo un edredón de plumas que bajo una sábana de algodón. (Simon, 2023).

Con relación a lo anterior, en el mismo artículo Simon señala que “...por cada grado



Fig. 1-20 Tormenta nocturna en Port La Nouvelle
(Autor: Maxime Raynal - Orage PLN. Lic. *Creative Commons* Dominio Público 2.0).

centígrado de calentamiento, el aire puede contener entre un 6% y un 7% más de agua” y ciertamente un mayor contenido de vapor de agua en la atmósfera es predictor de más lluvias. Sin embargo, cuando se trata de fenómenos meteorológicos, no se pueden realizar asociaciones determinísticas de causa y efecto, ya que son muchas las variables que intervienen en la formación de estos eventos. Al respecto, Liz Mayor, científica de la Universidad de Chicago en materia de

precipitaciones, citada por Simón, afirma que un mayor contenido de humedad en la atmósfera no

³⁰ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Port_and_lighthouse_overnight_storm_with_lightning_in_Port-la-Nouvelle.jpg

³¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harvey_2017-08-25_2231Z.png.

³² <https://www.sciline.org/climate/climate-change/torrential-rain/>

significa que vaya a aumentar el nivel promedio de lluvias: pueden producirse precipitaciones menos frecuentes pero más intensas o hasta un aumento de humedad sin que se produzcan lluvias (Mayor, en Simon, 2023).

De la misma manera, científicamente no se pueden atribuir estos fenómenos en forma inequívoca al cambio climático. Un año puede ser naturalmente más húmedo o seco que el siguiente, independientemente del cambio climático. Yoo-Geun Ham, climatólogo de la Universidad Nacional de Channam en Corea del sur, también citado por Simon, declara que “La precipitación en sí misma es una variable muy difícil para detectar señales de calentamiento global” (Ham, en Simon, 2023).

Bajo estas circunstancias, la estadística resulta ser la herramienta más adecuada para estudiar los eventos meteorológicos. Se ha desarrollado recientemente una metodología estadística de investigación, denominada “atribución de fenómenos extremos”. Con este método, habida cuenta de que la meteorología es influenciada por múltiples variables, se procede a investigar en forma individual cada evento y a determinar en qué grado éste puede ser atribuido al cambio climático (Clarke y Otto, 2021).

De manera que, no obstante no se haya podido establecer una relación casual unívoca entre calentamiento global y eventos extremos, los datos estadísticos recolectados permiten concluir que los eventos extremos han aumentado de variabilidad, frecuencia e intensidad en la misma medida en que se ha incrementado el calentamiento global y, a mayor frecuencia de fenómenos extremos, mayores son los riesgos para las poblaciones (Ham, en Simon, 2023) (Jordà, et al., 2024).



Fig. 1-22 Lluvia intensa
(Fuente: sciline.org, April 2024. Lic. *Wiki Commons*).

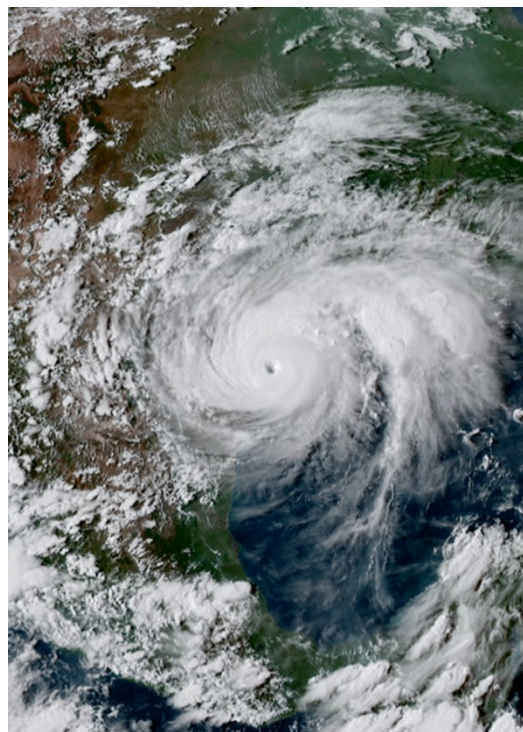


Fig. 1-21 El huracán Harvey, Texas, 2017
(Fuente: ABI by NOAA. Lic. *Wiki Commons* Dominio Público).

1.3.3.2 Eventos extremos secos

Pasamos ahora a comentar los eventos extremos secos, de los cuales los principales son: las olas de calor (Fig. 1-23)³³, las sequías y la desertificación. Es intuitivo asociar las olas de calor con el aumento de la temperatura global promedio, aunque éstas se produzcan con diferente intensidad según la región en cuestión. Las olas de calor suelen ocurrir en el verano y con más probabilidad en las regiones con clima mediterráneo o, en general, caracterizadas por veranos secos. Una ola de calor puede definirse como un período sostenido de tiempo (por lo menos tres días) en el cual las temperaturas diarias

³³ [File:HMS Pembroke Enters Dubai MOD 45152207.jpg - Wikimedia Commons](#)

mínima y máxima de una particular zona geográfica superan en varios grados las medias históricamente registradas.

En los últimos 50 años, la frecuencia e intensidad de las olas de calor han aumentado considerablemente, alcanzando en algunos puntos valores récord. Por ejemplo, en la localidad canadiense de Lytton en 2022 se registraron 49,6 °C, mientras que en Montoro (Córdoba, España) en 2017 los termómetros alcanzaron los 47,2 °C. En años anteriores, incluso recientes, se han producido varios de estos eventos extremos, que no recibieron mucha atención de los medios; sin embargo hoy en día están tomando mucha relevancia (Graziati, 2023) (Vela, 2023).



Fig. 1-23 Olas de calor
(Autor: Jay Allen, Lic. OGL versión 1.0 Dominio Público).

Particularmente graves resultan las olas de calor húmedo, que se verifican mayormente en las regiones costeras y que aumentan la sensación de calor. Como ya se ha comentado, la excesiva evaporación que se produce en los océanos aumenta la humedad presente en la tropósfera, contribuyendo a aumentar el efecto invernadero y el calor en superficie, con consecuencias sobre la salud humana y sobre los ecosistemas afectados (Simon, Humedad por olas de calor, un nuevo riesgo para la salud, 2023).

La sequía es un fenómeno en parte natural, en parte de origen antrópico. Es la escasez significativa de agua en los suelos y cuerpos acuíferos durante un periodo prolongado de tiempo (Fig. 1-24)³⁴. Puede producirse por varios factores, como la escasez de precipitaciones, la excesiva evaporación, la explotación insostenible de aguas para actividades humanas, la deforestación.

Existen varios tipos de sequía, a saber:

- **Meteorológica**, cuando se produce una disminución importante de precipitaciones en una determinada zona por un periodo de tiempo prolongado.
- **Agrícola**, causada por un déficit de humedad en el subsuelo, a nivel de las raíces de los cultivos.
- **Hidrológica**, cuando se registra un descenso del nivel de agua en ríos, lagos, embalses y faldas acuíferas.

Este déficit hídrico puede tener impactos negativos en el ambiente, la agricultura, la economía y la sociedad en general (Bordino, 2024).

Según la definición del Artículo 1 de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), "... (a) por 'desertificación' se entiende la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas..." (UNCCD, 1996).

³⁴ <https://www.publicdomainpictures.net/en/view-image.php?image=274927&picture=tree-sunset-winter-silhouette>

En otras palabras, con desertificación nos referimos a la progresiva pérdida de vegetación de zonas secas, como los pastizales y los matorrales. No se trata del avance de los desiertos, sino de la transformación en desiertos de tierras que, si bien áridas, antes no lo eran. Es un fenómeno que se ha dado en mayor escala en África y en Asia. Por ejemplo, un tercio de los territorios de África sufren de algún tipo de degradación del suelo, incluyendo más del 70% de todos los terrenos agrícolas (Reynolds, 2013).

No hay que confundir la desertificación con la desertización, que el proceso natural en que ciertas regiones se transforman en desiertos, como sucedió con el desierto del Sahara. Hace 6.000 años la región hoy ocupada por el Sahara era una pradera cubierta por vegetación, sin embargo las naturales oscilaciones del eje terrestre lo han transformado progresivamente en lo que es hoy: un arenal donde casi nada crece (Iberdrola, 2024).

La desertificación es producida en parte por fenómenos naturales pero principalmente por las actividades humanas. Se anexa a continuación una reseña de estas causas, tomada principalmente de Iberdrola (2024).

Causas humanas:

- La deforestación
- Las malas prácticas agrícolas
- Las malas prácticas ganaderas
- La sobreexplotación de recursos
- **Incendios forestales intencionales** (Fig. 1-25)³⁵

Causas naturales:

- Altas temperaturas
- Cambio en las precipitaciones



Fig. 1-24 Sequía
(Autor: Karen Arnold. Lic. *Creative Commons-0* Dominio Público).



Fig. 1-25: Incendios forestales
(Autor: John McColgan – Edited by Fir0002, 2000. Lic. Dominio Público).

³⁵ <https://mymodernmet.com/elk-bath-john-mccolgan/>

- Sequías prolongadas
- Incendios naturales

En la Fig. 1-26 se muestra el mapa global con la ubicación de las zonas donde se ha producido eventos extremos húmedos y secos en 2023, así como su intensidad³⁶.

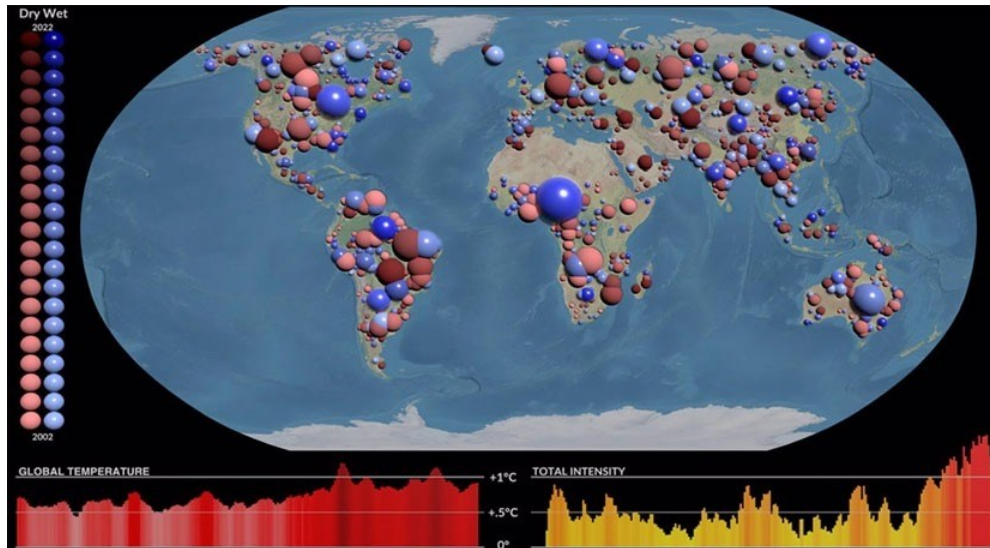


Fig. 1-26 Eventos extremos secos y húmedos y su intensidad
(Fuente: NASA, tomada de *CleanTechnica*).

1.4 BREVE RESEÑA DE LOS RIESGOS ASOCIADOS CON LAS AMENAZAS DEL CG

Los eventos extremos causados por el Calentamiento Global representan una amenaza para la frágil biosfera que alberga todas las formas de vida en la Tierra, puesto que ocasionan riesgos para la vida humana, las especies animales, los ecosistemas y las economías regionales.

Las olas de calor representan un riesgo para la salud, ya que producen deshidratación, especialmente peligrosa en ancianos y niños. Además, representan un riesgo para la vegetación debido a la pérdida de humedad del suelo y para la biodiversidad debido a los incendios forestales.

Por otro lado, las sequías conllevan riesgos económicos asociados a la disminución del caudal de los ríos y al nivel de los embalses. Esto reduce la generación de energía hidroeléctrica y ocasiona resequeamiento del suelo, lo que afecta la producción agrícola y disminuye el área de pastizales para la crianza del ganado. En casos graves, las sequías pueden dar origen a hambrunas que afectan a millones de individuos.

También la desertificación, en cuanto pérdida de tierras secas o semi-áridas pero susceptibles de utilización, produce éxodos de poblaciones y migraciones de animales, creando situaciones gravosas y a veces inhumanas.

El deshielo puede causar la elevación del nivel del mar, con consecuencias catastróficas para las poblaciones y las infraestructuras de las zonas costeras, así como la alteración de los patrones de precipitación y la disponibilidad de agua dulce, eventos nefastos para la agricultura y la seguridad alimentaria. De igual manera puede alterar ecosistemas tanto terrestres como acuáticos, poniendo en peligro la existencia de ciertas especies adaptadas a condiciones específicas. La desaparición de glaciares puede generar inestabilidad de los suelos, derrumbes y deslaves, mientras que la disolución del permafrost genera la liberación del dióxido de carbono y el metano, contribuyendo a agravar el efecto invernadero.

³⁶ vea el video (5) en la sección “Animaciones y videos”

El principal riesgo asociado a las lluvias torrenciales, las tormentas y los ciclones tropicales son las inundaciones, provocadas en las costas por el fuerte oleaje del mar y en tierra firme por el desbordamiento de los cuerpos de agua. Las inundaciones han provocado incontables víctimas y enormes daños, situación que ha inducido a implementar en las zonas a riesgo sistemas de alertas tempranas, programas de evacuación y vías de fuga, construcción de refugios y equipamiento de hospitales.

En capítulos sucesivos, regresaremos en detalle sobre el tema de los riesgos asociados a las amenazas originadas por el Calentamiento Global.



37

³⁷ Imagen de cierre capítulo: "The Lonely Road" (Autor: Alexander Mann, fecha desconocida. Lic. *Public Domain*). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alexander_Mann_-_The_Lonely_Road.jpg

2



El dióxido de carbono (CO_2) es el gas que tiene mayor influencia en el cambio climático, aunque como hemos visto en el Capítulo I, no es el gas con el mayor potencial de calentamiento, su contribución al *mix* de gases efecto invernadero presentes en la atmósfera es el más significativo, alcanzando aproximadamente el 70% del total de estos gases³⁹. Por esta razón, en esta sección haremos referencia sólo al dióxido de carbono, recomendando a los interesados en analizar otros gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), a consultar fuentes más específicas, como Ritchie et al. (2020).

El CO_2 se encuentra de forma natural en la Tierra y es fundamental para la vida en el planeta. De hecho, el átomo de carbono, que constituye la parte central de la molécula de CO_2 , es el componente estructural principal de todas las formas de vida. Además, en la actualidad, su combustión representa el proceso predominante para producir la energía que mueve la mayoría de las actividades humanas.

En la Tierra existen enormes depósitos de carbono, alrededor de 65.500 billones de toneladas métricas (Riebeek, 2011), almacenados principalmente en las rocas (litosfera), los mares (hidrosfera), la atmósfera (en forma de CO_2), la vegetación, los animales terrestres y marinos, el suelo y los fósiles enterrados en el subsuelo. El carbono puede circular de un depósito a otro bajo la acción de diferentes fenómenos, dando origen a lo que se llama el **Ciclo del Carbono**, que representa una especie de “termostato” regulador de la temperatura de la tierra, evitando que todo el carbono termine en la atmósfera o almacenado en las rocas, como en el planeta Venus.

En el ciclo del carbono, se pueden distinguir dos procesos simultáneos, cada uno caracterizado por tiempos de desarrollo completamente diferentes. Por un lado, tenemos el **ciclo lento**, también conocido como **ruta geológica**, que se desarrolla a lo largo de millones de años y presenta una circulación de carbono que oscila entre 10 y 100 millones de toneladas métricas por año. Por otro lado, encontramos el **ciclo rápido**, o **ruta biológica**, cuya duración es comparable

³⁸ Imagen del título: “Efecto super invernadero en Venus” (Fuente: NASA/JPL 1991, Lic. *Wiki Commons* Dominio Público). <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00104>

³⁹ El CO_2 representa solamente el 0,04% de la totalidad de los gases que conforman la atmósfera, siendo el nitrógeno el más abundante, con una proporción del 78%. El oxígeno representa el otro gas de mayor presencia, con una proporción del 21% (Khan Academy, 2024).

a la de la vida biológica y que mueve entre 10 y 100 billones de toneladas métricas de carbono por año.

Usualmente, los agentes que introducen el dióxido de carbono a la atmósfera son denominados **fuentes**. Específicamente, se les llama **fuentes naturales** si su origen es natural, o **fuentes antrópicas** si provienen de las actividades humanas. Por otro lado, los reservorios donde se almacena el CO₂ como consecuencia de mecanismos de extracción o “secuestro” del CO₂ de la atmósfera, se definen como **sumideros**, que también pueden ser de carácter natural o antrópico (Vea el video (6) en la sección “Animaciones y videos”).

Con el apoyo de la Fig. 2-1⁴⁰, pasamos ahora a describir los fenómenos principales que caracterizan el ciclo lento y el ciclo rápido.



Fig. 2-1 El Ciclo del Carbono
(Fuente: Ciclos biogeoquímicos: figura 3, *OpenStax College*. Lic. *Creative Commons by 4.0*)

2.1 EL CICLO LENTO. LA RUTA GEOLÓGICA.

2.1.1 MIGRACIÓN DEL CO₂ DE LA ATMÓSFERA AL SUELO

En la ruta geológica, el CO₂ presente en la atmósfera se transfiere al suelo por medio de la lluvia (Fig. 2-2)⁴¹, siendo éste el principal mecanismo de transferencia. Al precipitar, la lluvia se **infiltra** en el subsuelo llevando consigo el CO₂ disuelto en ella. El dióxido de carbono reacciona con el agua del terreno formando un ácido débil, el ácido carbónico H₂CO₃⁴². También es posible que el CO₂ de la atmósfera reaccione en este mismo ambiente con las moléculas de vapor de agua, formando ácido carbónico.

Una vez en el suelo, el ácido carbónico, que no es un compuesto estable, se disocia fácilmente en iones de hidrogeno H⁺ y de bicarbonato HCO₃⁻.

Estos iones pueden permanecer en la superficie o, por la presencia de agua en el terreno, infiltrarse en las capas más profundas del terreno y reaccionar con minerales como el calcio y el magnesio para formar carbonatos.

⁴⁰ El ciclo del carbono (artículo) | Ecología | Khan Academy

⁴¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rain_on_the_field.jpg

⁴² CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃



Fig. 2-2 La lluvia como medio de transporte del CO₂ al suelo
(Fuente: Cremedia, 2004. Lic. *Creative Commons Public Domain*).

En ambos casos, en períodos de tiempo geológicos, los carbonatos pueden compactarse y cementarse por la intervención de minerales como la calcita, la sílice, los óxidos de hierro, los minerales de arcilla, entre otros, formando rocas sedimentarias carbonatadas, como la dolomita, en un proceso denominado **litificación**. Las rocas sedimentarias carbonatadas así formadas constituyen un importante reservorio de carbono.

El ácido carbónico puede también reaccionar con la calcita⁴³ CaCO₃ presente en las rocas calcáreas como la piedra caliza y el mármol, disolviéndolas gradualmente en un proceso denominado **meteorización química**, en el cual se forman minerales como el magnesio, el calcio, el sodio y en particular iones de calcio Ca²⁺, de bicarbonato⁴⁴ HCO₃⁻ y

de carbonato⁴⁵ CO₃²⁻ (Riebeek, 2011) (*Khan Academy*, 2024) (Tucker & Wright, 1990) (White & Brantley, 1995).

2.1.2 MIGRACIÓN DEL CO₂ DE LA ATMÓSFERA A LOS OCÉANOS Y MARES

La hidrósfera representa el mayor reservorio de dióxido de carbono del planeta. El CO₂ migra de la atmósfera a la superficie de los océanos y los mares y viceversa por el proceso de **difusión**, en el cual las moléculas del gas se mueven naturalmente, sin expendio de energía, siguiendo el gradiente de concentración. De manera que cuando la concentración del gas atmosférico es mayor que la del gas disuelto en el agua se produce la migración del CO₂ atmosférico al agua. La difusión hacia el mar se interrumpe cuando ambas concentraciones se igualan y eventualmente se invierte cuando predomina la concentración del CO₂ marino. En este caso, el gas es liberado a la atmósfera. Este intercambio se produce en forma continua. Las corrientes marinas descendientes pueden eventualmente transportar el CO₂ disuelto en el agua a profundidades mayores (Emerson & Hedges, 2012).

El CO₂ puede transferirse a la hidrósfera también de manera indirecta, por **escurrimiento** superficial y subsuperficial de las aguas hacia los ríos, y de allí a los mares. Los ríos transportan los minerales ionizados producto de la meteorización de las rocas terrestres (Fig. 2-3)⁴⁶. En los mares y océanos, el elevado PH del agua favorece la disociación de los iones de bicarbonato en iones de carbonato CO₃²⁻, los cuales se combinan con los iones de calcio Ca²⁺ para formar carbonato de calcio CaCO₃ en forma sólida⁴⁷. Éste precipita al fondo marino, o es absorbido por moluscos, crustáceos y corales, que lo utilizan para formar sus conchas y exoesqueletos.

A lo largo de millones de años, el carbonato de calcio que se precipita en el lecho marino ya sea directamente o por la muerte de organismos marinos, forma capa superpuestas de sedimentos que gradualmente se compactan y cementan, dando lugar a rocas con elevado contenido de carbono (Brutsaert, 2005).

⁴³ $H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$

⁴⁴ La fórmula química de la meteorización de rocas calcáreas es la siguiente:

$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$

⁴⁵ En ambientes con PH elevado, los iones de bicarbonato pueden perder un ion de hidrógeno, formándose el carbonato: $HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H^+$

⁴⁶ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinzano_al_Tagliamento_03.jpg (*This is a photo of a monument which is part of cultural heritage of Italy*)

⁴⁷ $Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3(s)$



Fig. 2-3 Los ríos transportan minerales productos de la meteorización. Río Tagliamento.
(Fuente: Sirleonidas, 2020. Lic. *Creative Commons Share Alike 4.0 International*)

2.1.3 FOSILIZACIÓN

En otro mecanismo del ciclo lento, el carbono se almacena en los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas), que se forman a partir de los restos de organismos biológicos (Fig. 2-4)⁴⁸ en periodos de tiempo que oscilan entre 100 y 200 millones de años. El proceso de **fosilización** se origina debido a grandes movimientos tectónicos que entierran vastas áreas de vegetación y otras formas biológicas, tanto terrestres como marinas, bajo la corteza terrestre, sometiéndolas a enormes temperaturas y presiones en condiciones anaerobias (Killops & Killops, 2004).



Fig. 2-4 Fósil vegetal.
(Autor: Andy Abir Alan, 2007. Lic. *Creative Commons Share Alike 3.0*)

⁴⁸ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FOSILES_VEGETALES%29_-_panoramio.jpg

2.2 CIERRE DEL CICLO LENTO: RESTITUCIÓN DEL CO₂ A LA ATMÓSFERA



Fig. 2-5 Erupción del volcán Fuego en Guatemala. (Autor: Juan Francisco, 2020. Lic. *Creative Commons* Genérica 2.0)

A continuación, reseñamos las principales manifestaciones de las fuentes naturales de CO₂, entendidas como aquellos procesos que restituyen este gas a la atmósfera:

Durante las erupciones, los volcanes (Fig. 2-5)⁴⁹ expulsan a la superficie las rocas sedimentarias carbonatas del subsuelo, descomponiéndolas y formando silicatos en forma de rocas ígneas, junto a gran cantidad de otros materiales y gases, entre los cuales el CO₂.

En la colisión entre dos placas tectónicas, en donde se produce la

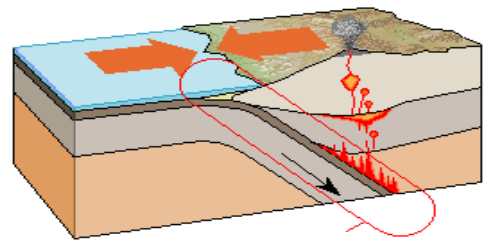


Fig. 2-6 Subducción de placas tectónicas. (Autor: Luis María Benítez. Lic. *GNU Free Documentation License* 1.2)

subducción (Fig. 2-6)⁵⁰ de una placa con respecto a otra, se producen fricciones enormes, a consecuencias de las cuales el material rocoso se funde debido al calor y la presión extremos (Fig. 2-7). Durante este proceso, se liberan gases, incluido el dióxido de carbono, a través de reacciones químicas y la formación de minerales de varios tipos (Dasgupta y Hirschmann, 2010).



Fig. 2-7 Volcán Kīlauea , flujo de lava
(Fuente: *Volcano Hazards Program*, USGS, 2018. Lic. *Public Domain*)⁵¹

⁴⁹ https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Volc%C3%A1n_de_Fuego_-_Guatemala.jpg

⁵⁰ https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Zona_de_subduccion_lmb.png

⁵¹ <https://www.usgs.gov/media/images/kilauea-volcano-lava-flow-gif>

2.3 EL CICLO RÁPIDO. LA RUTA BIOLÓGICA

En la ruta biológica se produce el intercambio de carbono entre la atmósfera y los organismos biológicos terrestres y marinos. El nodo crucial del ciclo (y de la vida en la Tierra) es la **fotosíntesis oxigénica** (es decir con producción de oxígeno), que es realizada por las plantas terrestres, las algas y el fitoplancton marinos. En todos los procesos de fotosíntesis oxigénica se retira dióxido de carbono de la biosfera y se le añade oxígeno, con lo cual se puede entender la importancia de aumentar la cobertura vegetal para contrarrestar los efectos del calentamiento global.

En los ecosistemas terrestres, el dióxido de carbono es absorbido de la atmósfera y metabolizado por las plantas, mientras que en los mares, las algas y el fitoplancton absorben y metabolizan el CO₂ disuelto en el agua, allí presente como producto del intercambio dinámico con la atmósfera y de la respiración de los seres marinos. El metabolismo de los organismos fotosintéticos transforma moléculas inorgánicas en orgánicas, principalmente carbohidratos, y por esta razón se denominan “autótrofos”, es decir “productores de su propio alimento”. Por el contrario, los seres “heterótrofos” son aquellos que se alimentan de otros organismos, tanto vegetales como animales. El carbono orgánico entra en la cadena alimentaria de los heterótrofos al nutrirse éstos de vegetales, y se propaga a lo largo de ella en cuanto los animales carnívoros y omnívoros obtienen su energía y nutrientes a través de la depredación o consumo de otros animales (Khan Academy, 2024).

Con un proceso similar pero de efectos opuestos, la mayoría de los organismos vivos⁵², vegetales o animales, absorben oxígeno y expulsan CO₂ a la atmósfera mediante la **respiración**, un proceso catabólico que, además de liberar dióxido de carbono, implica la descomposición de moléculas orgánicas (como la glucosa) para liberar energía en forma de adenosín trifosfato (ATP).

2.3.1 LA FOTOSÍNTESIS OXIGÉNICA⁵³

La fotosíntesis es un proceso bioquímico complejo mediante el cual, como ya se ha dicho, las plantas, algas y fitoplancton convierten carbono inorgánico en orgánico, liberando oxígeno a la atmósfera. En esta sección, ofreceremos una breve descripción de la fotosíntesis en las plantas terrestres, sugiriendo a los interesados que deseen profundizar en el tema que consulten textos especializados, como Shubhrata (2004).

La fotosíntesis se desarrolla principalmente (pero no exclusivamente) en las células de las hojas de las plantas (Fig. 2-8)⁵⁴ y para ello se necesita la convergencia de tres fenómenos principales, a saber: captación de energía luminosa, absorción de CO₂ de la atmósfera y aporte de agua por parte de las raíces de la planta (Vea el video (2) en la sección “Animaciones y videos”).

En el proceso de fotosíntesis se pueden identificar dos fases: la **fase luminosa** y la **fase oscura** (Ciclo de Calvin). En la fase luminosa, la luz solar (o aquella producida por las lámparas de los invernaderos), es captada por la **clorofila** (en particular, la clorofila del tipo a y b), que es

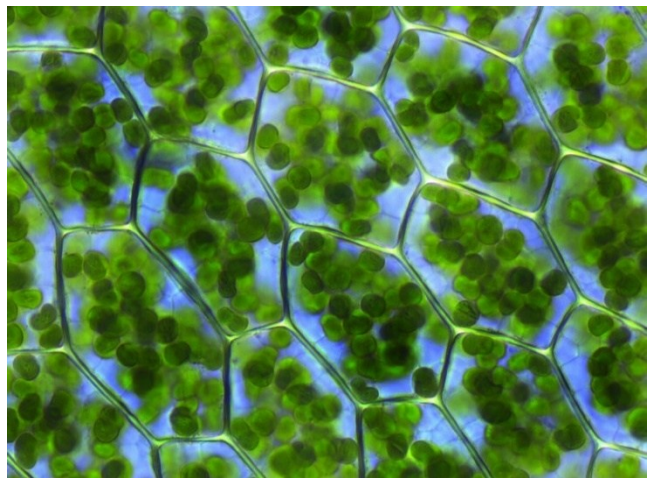


Fig. 2-8 Células vegetales con cloroplastos en su interior
(Autor: Kristian Peters – Fabelfro, 2006. Lic. *Creative Commons by-SA 3*).

⁵² Hacen excepción algunas bacterias, que han evolucionado para sobrevivir en ausencia de oxígeno. Estas bacterias “respiran” en forma anaeróbica, en el sentido que utilizan procesos como por ejemplo la fermentación para producir la energía que necesitan.

⁵³ Vea el video (7) en la sección “Animaciones y videos”

⁵⁴ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Plagiomnium_affine_laminazellen.jpeg

un pigmento verde contenido en los **cloroplastos** (orgánulos citoplasmáticos presentes en las células vegetales) (Fig. 2-10)⁵⁵ y más específicamente en unas estructuras membranosas internas a éstos, llamadas **tilacoides**.

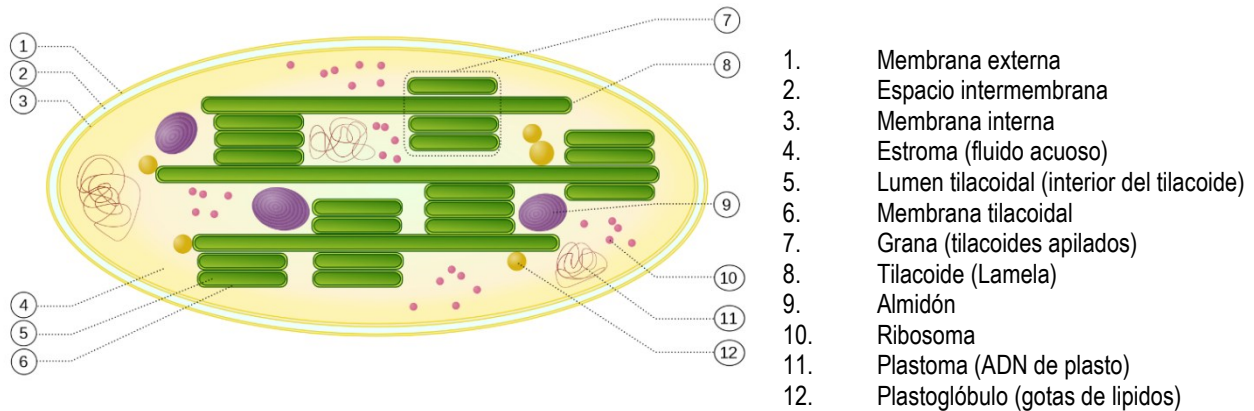


Fig. 2-10 Cloroplasto. (Fuente: SuperManu, 2007. Lic. *Creative Commons Share Alike 3.0*)

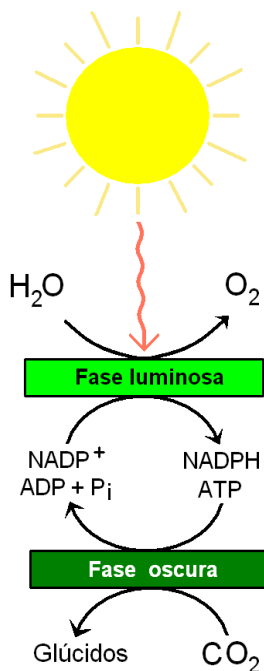


Fig. 2-9 Fotosíntesis aerobia. (Fuente: Maulucioni, 2013. Lic. *Creative Commons Share Alike 3.0*)

Las moléculas de clorofila atrapan fotones de luz, excitando los electrones de las capas exteriores de sus átomos, lo cual induce la **fotólisis** del agua, un proceso mediante el cual el agua se descompone en átomos de oxígeno, protones de hidrógeno y electrones⁵⁶. El agua utilizada en la fotólisis es aquella absorbida por las raíces y transportada a través del sistema de vasos leñosos de la planta (xilema) hasta los cloroplastos, por efecto de la tensión osmótica y de la capilaridad. El oxígeno que se libera en la fotólisis ingresa a la atmósfera y es el oxígeno que respiramos. Los electrones son trasladados en etapas sucesivas a lo largo de dos fotosistemas (llamados PSII y PSI), hasta llegar al “centro de reacción fotosintético”, donde se desencadena una serie compleja de reacciones que realizan la síntesis de moléculas ATP ⁵⁷ y $NADPH$ ⁵⁸. Estas moléculas, transportan electrones e incorporan energía química y son las responsables de impulsar las reacciones de la fase siguiente,

La fase oscura, así definida porque no necesita luz para desarrollarse, tiene lugar en la matriz, o **estroma**, de los cloroplastos. En esta fase se utilizan los protones y electrones transportados por la $NADPH$ y la energía almacenada en las moléculas ATP para reducir el CO_2 y fijar el carbono en moléculas orgánicas, principalmente glucosa ($C_6H_{12}O_6$), mediante una serie de reacciones complejas que conforman el **Ciclo de Calvin** (Fig. 2-9)⁵⁹. El ciclo reinicia con la restitución de moléculas ADP , iones $NADP^+$ y fosfato inorgánico⁶⁰ P_i a la fase luminosa. El CO_2 empleado en esta reacción es absorbido

por la planta a través de unos poros presentes en la superficie epitelial de las hojas (**estomas**).

De esta manera, los organismos fotosintéticos producen los carbohidratos y la energía que necesitan para sus funciones vitales y para formar otros compuestos complejos, como la celulosa,

⁵⁵ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chloroplast.svg>

⁵⁶ Reacción de fotólisis del agua: $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$

⁵⁷ ATP : Adenosín Trifosfato ($C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$)

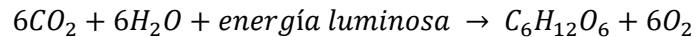
⁵⁸ $NADPH$: Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato ($C_{21}H_{29}N_7O_{17}P_3$)

⁵⁹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reacciones_de_la_fotos%C3%ADntesis.PNG

⁶⁰ ADP : Adenosín Difosfato ($C_{10}H_{15}N_5O_{10}P_2$). $NADP^+$: Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato, oxidado ($C_{21}H_{28}N_7O_{17}P_3$)

que utilizan para construir su estructura de sostén. Además, y muy importante en mitigar el calentamiento global, retiran CO₂ de la atmósfera.

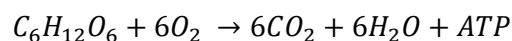
Es posible resumir todo el proceso fotosintético, mediante la siguiente fórmula:



Concluimos observando que se necesitan 6 moléculas de dióxido de carbono, 6 moléculas de agua y el aporte de energía luminosa para formar una molécula de glucosa y liberar 6 moléculas de oxígeno a la atmósfera (Ha, Morrow, & Algiers, 2024).

2.4 CIERRE DEL CICLO RÁPIDO. RESPIRACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

La **respiración** es un proceso metabólico. Específicamente, se trata de un proceso catabólico que implica la descomposición de moléculas orgánicas (como la glucosa) para liberar dióxido de carbono y energía (en forma de ATP). Este proceso es fundamental para el mantenimiento de la vida celular y ocurre en casi todos los organismos vivos. Existen dos tipos de respiración, la aerobia y la anaerobia, de las cuales la que nos interesa aquí es la aerobia, que es el proceso metabólico en el cual las células utilizan oxígeno para descomponer la glucosa y producir dióxido de carbono, agua y ATP. Con la respiración, los animales terrestres ceden CO₂ directamente a la atmósfera, pero existe también una respiración microbiana y una propia de los organismos marinos, donde el CO₂ pasa a la atmósfera aflorando desde el subsuelo o desde las aguas. La fórmula general para la respiración aerobia es prácticamente la inversa de la que describe la fotosíntesis:



Con la respiración aerobia, los organismos biológicos restituyen a la atmósfera una porción del CO₂ que habían utilizado para obtener los nutrientes y la energía necesarios para mantener sus funciones vitales y para fabricar sus elementos estructurales (Ha, Morrow, & Algiers, 2024).

A la muerte de los organismos biológicos, la materia orgánica sufre un proceso de **descomposición**, formándose biomasa, la cual queda expuesta a la atmósfera o bien es enterrada o precipitada al fondo del mar. En todo caso, el proceso de descomposición libera el CO₂ que estaba almacenado en las estructuras de plantas y animales.

La **extracción y quema** de combustibles fósiles por parte del hombre devuelve a la atmósfera en forma de CO₂ el carbono que había quedado almacenado en ellos por millones de años.

Con estos procesos de restitución de dióxido de carbono a la atmósfera, se cierra el ciclo rápido del carbono.

2.5 FUENTES Y SUMIDEROS DE CO₂

Resumiendo lo explicado en las secciones 2.1 a 2.4 con relación a fuentes y sumideros de CO₂, podemos afirmar que el dióxido de carbono es emitido a la atmósfera por las siguientes fuentes de origen natural:

- Las erupciones volcánicas
- La degradación de las rocas carbonatadas
- La respiración de plantas y animales
- La descomposición de materia orgánica

Los sumideros naturales de CO₂, en donde este gas se acumula disuelto en el agua o en forma de carbono orgánico e inorgánico, son básicamente los siguientes:

- Océanos y mares

- Vegetación terrestre, algas y fitoplancton
- Suelos y subsuelos

Sin embargo, para el estudio del fenómeno del Calentamiento Global, son de primera importancia las emisiones producidas por el hombre, puesto que con la era industrial estas emisiones han roto el equilibrio natural del Ciclo de Carbono. El balance de la cantidad de CO₂ que entra y sale de la atmósfera, presenta un saldo cada año mayor a favor de la cantidad en ingreso, dado que la capacidad de retiro y almacenamiento de los sumideros de CO₂ parece haber alcanzado su límite. Y este desequilibrio es producto del nivel actual de emisiones producidas por las actividades del hombre.

De manera que en el resto del capítulo, nos centraremos en las fuentes de emisión antrópicas.

2.5.1 FUENTES ANTRÓPICAS DE CO₂

A partir de la era industrial, las fuentes de emisiones antrópicas de dióxido de carbono han ido aumentando progresivamente, lo cual ha alterado el ciclo natural del carbono, especialmente en los últimos tiempos. Se puede observar en la Fig. 2-11⁶¹ el crecimiento de las emisiones antrópicas de CO₂ desde 1750 hasta el año 2022.

Si consideramos que el total de emisiones naturales de CO₂ (respiración, descomposición, erupciones volcánicas, etc.) para el 2022 ha sido estimado en 350 Gt (Moseman, 2024) y las actividades humanas han producido alrededor de 37,15 Gt de CO₂ (Ritchie & Roser, CO₂ emissions, 2020)⁶² (IEA, 2023), tenemos a nivel global un total de emisiones de aproximadamente 387,15 Gt, de las cuales aquellas de origen antrópico equivalen a un 9,6 %.

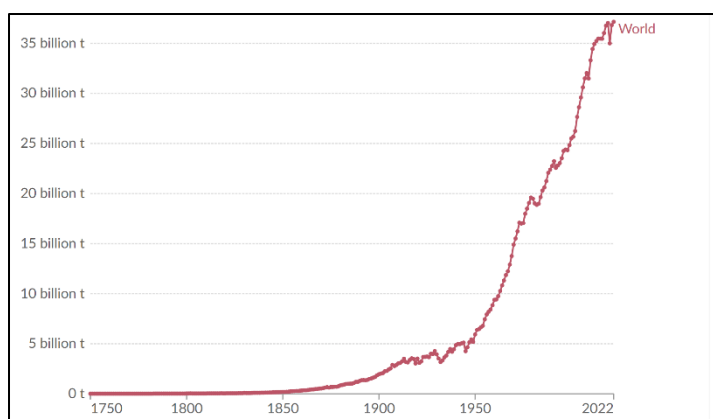


Fig. 2-11 Emisiones de CO₂ de origen antrópica 1750-2022.
(Fuente: Presupuesto Global de Carbono, 2023. Lic. OurWorldinData Creative Commons)

Suponiendo ahora que en el ciclo del carbono exista un equilibrio en el intercambio natural de dióxido de carbono, los sumideros deberían estar en capacidad de absorber el excedente de CO₂ producido por el hombre. Sin embargo, se ha estimado que los sumideros solamente captan aproximadamente el 50 % de las emisiones antrópicas, lo cual deja un déficit para el 2022 de alrededor 19 Gt. Este CO₂ residual irá a aumentar la concentración de CO₂ atmosférico, la cual para ese año se situó en 420 partes por millón (0,042 %) (Fig. 2-12)⁶³ (Moseman, 2024) (Greenfield, 2024).

⁶¹ <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

⁶² Este dato no incluye los efectos de la deforestación y el cambio de uso de las tierras, con lo cual la cifra subiría a 41,5 Gt

⁶³ <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

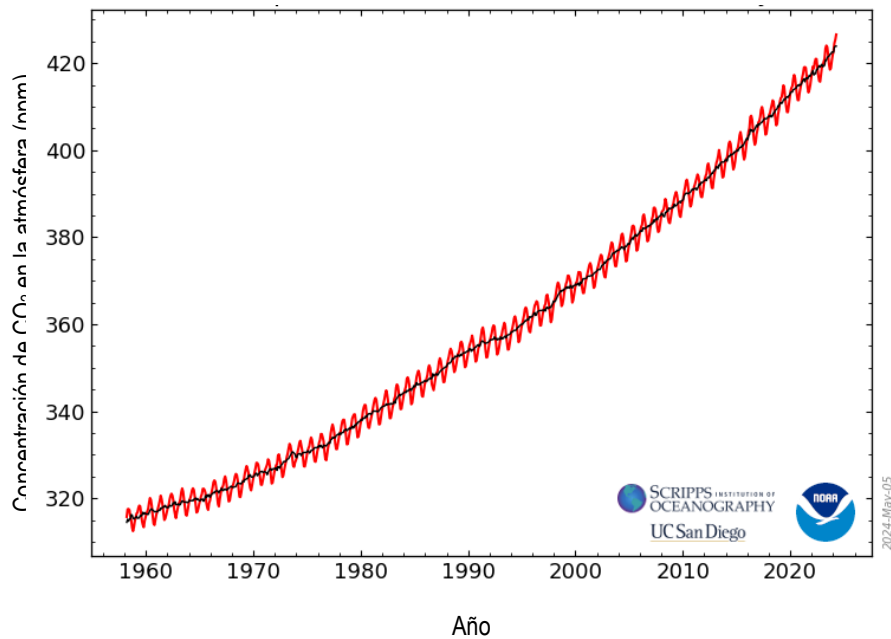


Fig. 2-12 Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera 1960 – 2024. (NOAA, Mauna Loa Observatory, 2024. Lic. NOAA general permission)

Es importante destacar que el CO₂ adicional producido por actividades humanas es lo que está desequilibrando el ciclo natural del carbono y contribuyendo al cambio climático, ya que los sumideros naturales no pueden absorber completamente este exceso de CO₂ (US EPA).

2.5.2 EMISIONES ANTRÓPICAS POR ACTIVIDAD Y PAÍS

Las fuentes antrópicas de dióxido de carbono (Fig. 2-13)⁶⁴ son esencialmente el producto de la quema de materiales fósiles y de biomasa.



Fig. 2-13 Emisiones antrópicas
(Fuente: brgfx. Lic. Gratuita Freepik).

Los principales combustibles fósiles son el carbón (carbón vegetal, coque, antracita, turba etc.), el petróleo y sus derivados (bitumen, gasóleo, gasolina, etc.) y el gas natural.

El uso de la biomasa como fuente de energía es tan antiguo como la historia humana, y actualmente en muchos países de economía rural se continúa quemando madera para la calefacción, la forja de metales y la preparación de alimentos. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX se han desarrollado tecnologías modernas para producir electricidad en plantas que consumen residuos agrícolas y

forestales, desechos animales y urbanos, restos de la producción de alimentos y madera, entre otros.

⁶⁴ https://www.freepik.es/vector-gratis/cartel-contaminacion-aire-automoviles-fabrica_7026452.htm#page=17&query=emisiones%20carbon&position=49&from_view=keyword&track=ais_user&uuiid=f6330ef7-4876-4072-98cb-27eda217775d

La Fig. 2-14⁶⁵ (actualizada en el año 2023) muestra la cantidad (en kg) necesaria para producir la energía de 1 MWh según tipo de combustible fósil. Este parámetro se denomina **consumo específico de combustible** (*Specific Fuel Consumption, SFC*).

Es importante para los tomadores de decisiones conocer la información acerca de cuántas emisiones son

producidas por los diversos sectores de actividad humana, así como de la responsabilidad de los principales países industrializados en ello. Al respecto, *OurWorldinData* (2024) ha elaborado un conjunto de datos y gráficos sobre las emisiones de CO₂ por sector y por país, proponiendo una específica subdivisión sectorial de actividades. Los gráficos que presentamos a continuación son sólo una parte de aquellos que pueden encontrarse en el sitio de *OurWorldinData*⁶⁶, al cual reenviamos para ulteriores consultas.

La Fig. 2-15⁶⁷ reporta los datos de emisiones (en Gt) del período 1990-2020, según sector de actividad, mientras que la Fig. 2-16 se refiere únicamente al año 2020 y muestra los porcentajes de CO₂ emitidos por cada sector.

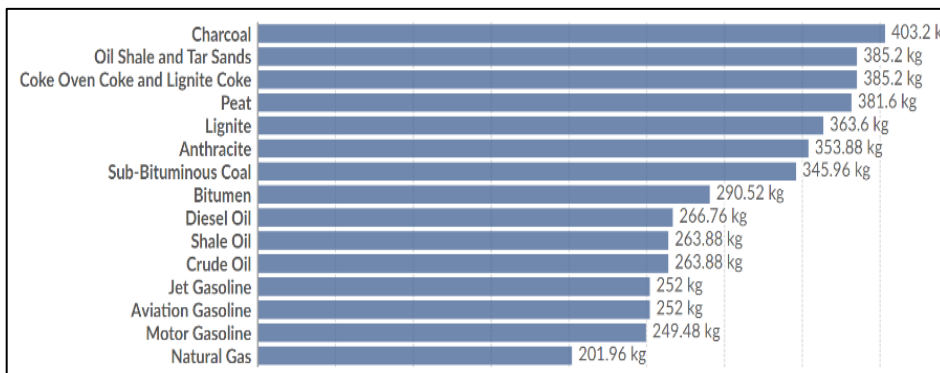


Fig. 2-14 SFC en kg/MWh de varios combustibles fósiles (Fuente: IPCC, 2023. Lic. *OurWorldinData Creative Commons*).

proponiendo una específica subdivisión sectorial de actividades. Los gráficos que presentamos a continuación son sólo una parte de aquellos que pueden encontrarse en el sitio de *OurWorldinData*⁶⁶, al cual reenviamos para ulteriores consultas.

La Fig. 2-15⁶⁷ reporta los datos de emisiones (en Gt) del período 1990-2020, según sector de actividad, mientras que la Fig. 2-16 se refiere únicamente al año 2020 y muestra los porcentajes de CO₂ emitidos por cada sector.

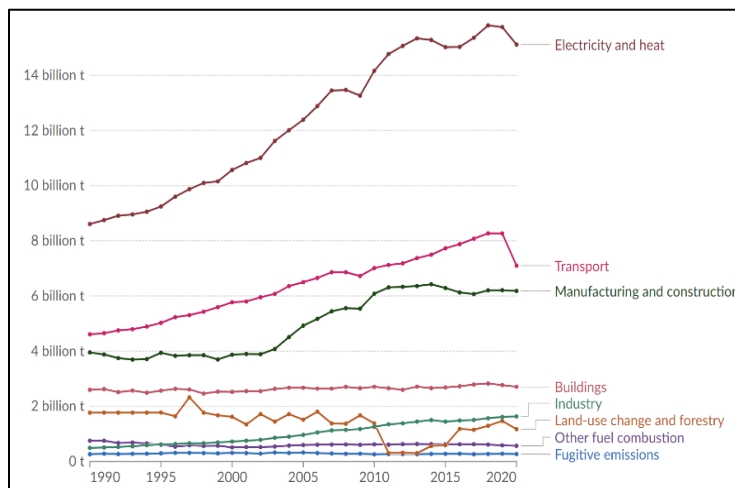


Fig. 2-15 Emisiones de CO₂ por sector de actividad. (Fuente: *Climate Watch*, 2023. Lic. *OurWorldinData Creative Commons*)

⁶⁵ <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-dioxide-emissions-factor>

⁶⁶ <https://ourworldindata.org/>

⁶⁷ <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

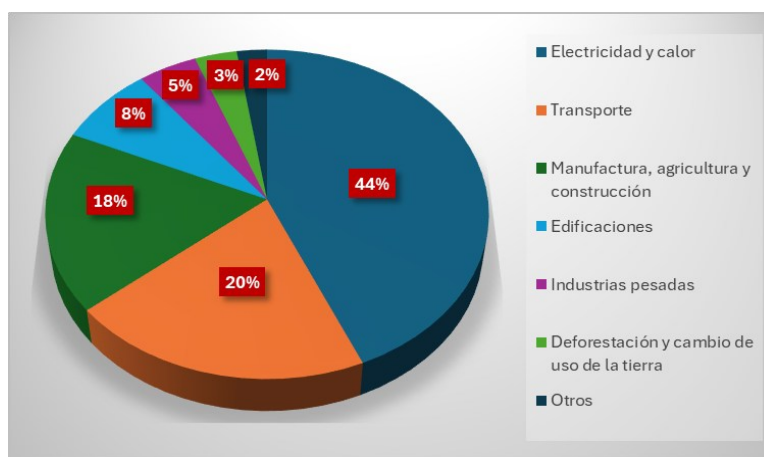


Fig. 2-16 Porcentaje de emisiones de CO₂ por sector de actividad. (Fuente: Producción propia, 2024. Datos tomados de: *Climate Watch, 2023. Lic. OurWorldinData Creative Commons*)

Los sectores especificados en los gráficos de la Fig. 2-15 y Fig. 2-16 son descritos brevemente a continuación:

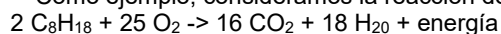
- El **transporte** de pasajeros, mercancías, combustibles y otros bienes, efectuado por vehículos terrestres, marítimos y aéreos que utilizan carburantes de origen fósil (gasolina, gasóleo, gas, jet fuel) es uno de los sectores de mayor contribución a las emisiones de CO₂, aportando globalmente un 20 % del total. Como ejemplo de fuente de emisión en este ámbito, tomaremos los motores térmicos propios de los vehículos terrestres. ¿Cuánto dióxido de carbono produce la combustión de 1 l de combustible en un motor térmico? El valor depende de la mezcla de hidrocarburos y del motor, pero no difiere significativamente del valor teórico. En la Tabla 2-1 se muestran los kg de CO₂ emitidos por la combustión de 1 kg o de 1 l de varios combustibles de uso común en el transporte terrestre, calculados a partir del balance de masa de la reacción química.

Tabla 2-1 Cantidad de CO₂ emitida por la combustión de 1 kg o 1 l de combustible en un motor térmico⁶⁸.

	Gasolina (C ₈ H ₁₈)	Gasóleo (C ₁₂ H ₂₃)	GPL (C ₃ H ₈)	Etanol (C ₂ H ₅ OH)	Biodiesel (C ₁₉ H ₃₄ O ₂)
	kg de CO₂ emitidos				
1 kg	3,09	3,16	3,00	1,91	2,84
1 l	2,22	2,63		1,51	2,52

- Las **edificaciones** emiten directamente CO₂ hacia el ambiente principalmente durante el proceso de calefacción, mediante la quema in situ de gas natural o gasóleo en calderas y quemadores, o la combustión de biomasa (madera, carbón, pellets) en estufas y braseros. En ámbito doméstico y comercial se emplea gas natural también para la preparación de alimentos. Hay que tomar en cuenta además las plantas portátiles de gasolina y gasóleo que se utilizan para producir electricidad en lugares remotos o en casos de emergencias. Las edificaciones son responsables también de emisiones indirectas por el uso intensivo que hacen de la electricidad, sin embargo, estas se contabilizan en el renglón de producción de energía eléctrica. El porcentaje de

⁶⁸ Como ejemplo, consideramos la reacción de combustión de la gasolina:



La masa molar de la gasolina C₈H₁₈ es de 114 g/mol, mientras que la masa molar del CO₂ es igual a 44 g/mol, así que 2 moles de C₈H₁₈ corresponden a 114 x 2 = 228 g, los cuales producen 16 x 44 = 704 g de dióxido de carbono. Con una simple relación lineal se obtiene que 1 kg de gasolina produce 704/228 = 3,09 kg de CO₂. Considerando además que la densidad de la gasolina con respecto al agua es igual a 0,719, se obtiene que el CO₂ producido por 1 litro de gasolina equivale a 3,09 x 0,719 = 2,22 kg de CO₂.

incidencia aportado por las edificaciones sobre el total de las emisiones antrópicas es del 8%.

- Las plantas de energía eléctrica y térmica. Las plantas de generación de energía consumen gas, petróleo, carbón o biomasa, en un caso para producir electricidad de empleo universal y en otro para generar vapor a presión o agua caliente que se utilizarán para diversos propósitos, como por ejemplo la calefacción de hogares y locales comerciales. Este sector es el mayor generador de dióxido de carbono, contribuyendo en un 44 % del total.
- Las **industrias manufactureras, agrícolas y de la construcción**. En estos establecimientos se precisa el uso de motores térmicos para impulsar bombas, molinos, turbinas, maquinaria de construcción y otros dispositivos hidráulicos y mecánicos. En la agricultura se utilizan tractores y otras maquinarias especializadas (sembradoras, cosechadoras, segadoras, etc.). El sector contribuye en un 18 % a las emisiones.
- Las **industrias pesadas**. La mayoría de las industrias utilizan electricidad para su funcionamiento, pero aquí queremos contabilizar las emisiones de aquellos procesos industriales independientes, total o parcialmente, del empleo de electricidad. Este sector produce el 5 % de las emisiones. Los principales procesamientos del sector son los siguientes:
 - La producción de cemento es una de las mayores fuentes de emisiones de CO₂ industriales. En el proceso de calcinación, la piedra caliza (carbonato de calcio) se calienta a altas temperaturas para producir cal (óxido de calcio), liberando CO₂ como subproducto. Además, la combustión de combustibles fósiles en los hornos de cemento también contribuye a las emisiones.
 - La producción de acero utiliza altos hornos que queman coque (un derivado del carbón) para reducir el mineral de hierro a hierro metálico. Este proceso libera una cantidad significativa de CO₂.
 - La fabricación de productos químicos, como amoníaco y metanol, a menudo involucra procesos que consumen grandes cantidades de gas natural y liberan CO₂ como subproducto.
 - Las refinerías procesan petróleo crudo para producir diversos productos como gasolina, diésel y otros derivados del petróleo. Este proceso implica la combustión de combustibles fósiles y la liberación de CO₂.
 - La producción de papel y pulpa implica el uso de biomasa y, a menudo, la combustión de combustibles fósiles en calderas y hornos, lo que genera emisiones de CO₂.
 - La fabricación de vidrio requiere calentar arena y otros materiales a temperaturas muy altas, generalmente mediante la combustión de gas natural, lo que genera emisiones de CO₂.
- La **deforestación y el cambio de uso del suelo**. La conversión de bosques y otros ecosistemas naturales en tierras agrícolas libera dióxido de carbono almacenado en la vegetación y el suelo, con una contribución del 3 % al total.

En la Fig. 2-17⁶⁹ se muestran las emisiones de CO₂ desde el comienzo de la época industrial hasta 2022 producidas por algunos de los mayores países industrializados.

2.5.3 SUMIDEROS ARTIFICIALES

En los últimos tiempos se han diseñado y construido **sumideros artificiales** para la captura del dióxido de carbono directamente de la atmósfera o en el sitio de origen de las emisiones (Herzog, 2018). Los sumideros artificiales son en realidad sistemas o procesos que permiten:

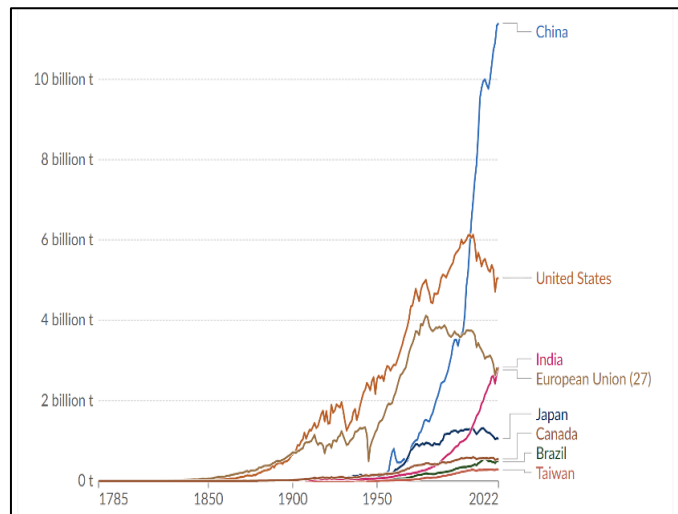


Fig. 2-17 Emisiones de CO₂ por país. (Fuente: Presupuesto Global de Carbono, 2023. Lic. OurWorldinData Creative Commons)

- **La captura directa de carbono** presente en el aire (DAC: *Direct Air Capture*). Estos sistemas están constituidos por grandes ventiladores que aspiran el aire atmosférico y la hacen circular por filtros impregnados de materiales químicos. Estos reaccionan al paso del aire y separan de ella el CO₂. El dióxido de carbono es extraído de los filtros para permitir su reutilización y posteriormente es comprimido hasta alcanzar su forma líquida, para luego ser transportado hacia sitios de almacenamiento, donde se conservará para su uso posterior. La energía necesaria para el proceso es generada preferiblemente por fuentes renovables a fin de minimizar el impacto sobre el ambiente.
- **La captura de emisiones industriales** (PSC: *Point Source Capture*). Son sistemas muy similares a los DAC. A diferencia de estos, los filtros reactores deben colocarse en columna en las vías de escape de los gases industriales. Cambian también los materiales químicos empleados en los reactores y aquellos utilizados para su limpieza y reciclaje.
- **La mineralización acelerada del CO₂**. La mineralización acelerada del CO₂ implica un proceso mediante el cual el CO₂ capturado reacciona químicamente con minerales para formar carbonatos estables, que son sólidos y pueden almacenarse de forma segura durante largos períodos. Este proceso se puede realizar in situ (directamente en formaciones geológicas) o ex situ (en instalaciones específicas).
- **La alcalinización oceánica**. Este proceso se basa en la adición y dispersión de minerales alcalinos (CO, MgO, carbonatos, silicatos) en el océano, para neutralizar la acidez del agua y aumentar así su capacidad de captura del CO₂.
- **La utilización de materiales de construcción absorbentes**. Son materiales que tienen la capacidad de absorber y almacenar CO₂, como por ejemplo concretos avanzados, morteros especiales y otros materiales basados en carbonatos. Estos materiales deben ser previamente curados en atmósferas ricas en CO₂ para acelerar el proceso de absorción. Otra técnica consiste en la impregnación mediante CO₂: se trata de introducir CO₂ en los materiales durante su fabricación o instalación.

Aunque los sumideros artificiales ofrecen una solución potencialmente efectiva para la mitigación del cambio climático, en la actualidad su implementación presenta desafíos significativos, como por ejemplo: costos elevados de diseño y mantenimiento, gran consumo de

⁶⁹ <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

energía, especialmente en el caso de los DACs y los PSCs, capacidad limitada y dificultades para un escalamiento que produzca efectos sustanciales. En definitiva, la tecnología de los sumideros artificiales requiere aún de innovaciones importantes para poder ser considerada una alternativa válida y viable en la lucha contra el calentamiento global.



70

⁷⁰ Imagen de cierre capítulo: “Campo de trigo con cipreses”(Autor: Vincent Van Gogh, 1889. Fuente: Sailko, 2014. Lic. *Creative Commons Share Alike 3.0 Unported*).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vincent_van_gogh,_campo_di_grano_con_cipressi,_1889,_02.JPG

3



Para los análisis estadísticos relacionados con el cambio climático, es necesario disponer de indicadores que permitan cuantificar y hacer seguimiento de los efectos producidos por los gases de efecto invernadero (GEI) sobre el calentamiento global. El indicador más utilizado y conocido en este sentido es la Huella de Carbono. Los siguientes párrafos introducen el concepto de Huella de Carbono y proporcionan detalles sobre cómo se mide. El capítulo continúa con la descripción y el método de cálculo de la Huella Ecológica. Se ha considerado pertinente incluir en este trabajo el concepto de Huella Ecológica, ya que, además de estar parcialmente vinculada con la Huella de Carbono, ofrece una perspectiva más amplia y holística desde la cual analizar diversos factores que afectan la biosfera⁷².

3.1 LA HUELLA DE CARBONO

La creciente preocupación por el calentamiento global, atribuida principalmente al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (GEI, por sus siglas en español, o GHG, por sus siglas en inglés), ha generado la necesidad de desarrollar un indicador que cuantifique las emisiones anuales de estos gases. La **Huella de Carbono** es una medida que refleja la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos en un determinado período de tiempo por las actividades humanas, expresada en términos de cantidad de dióxido de carbono equivalente⁷³ CO_{2eq} (Fundación Reforestamos, 2021) (Fundación Aquae, 2024). La unidad de medida de la Huella de Carbono es la masa de CO₂ equivalente por año, la cual puede expresarse en kilogramos por año (kg CO_{2eq}/año) o en toneladas por año (t CO_{2eq}/año), según la magnitud de las emisiones.

Este indicador puede contabilizar las emisiones de GEI de un individuo, un producto, una organización, o incluso de países y regiones enteras.

La Huella de Carbono de un individuo depende de su estilo de vida (Fig. 3-1)⁷⁴. El empleo del transporte público en lugar del privado, la adopción de medios de tracción impulsados por

⁷¹ Imagen del título: "Locomotora 41 018 de la DRG" (Autor: Chianti, 2026. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*) https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora_de_vapor#/media/Archivo:41018_Schiefe_Ebene_Nov_5_2016.png

⁷² Vea los videos (8), (9) y (10) en la sección "Animaciones y videos"

⁷³ Para la definición del CO_{2eq}, vea el Capítulo I, Sección 1.1.3. En las metodologías de cálculo de la Huella de Carbono es usual utilizar el Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP-100) de los gases GHG.

⁷⁴ https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Baldwin_60000#/media/File:Kyle-cassidy-steampunk.jpg



Fig. 3-1 *Steampunks* frente a la locomotora de vapor Baldwin 60000 (Autor: KyleCassidy, 2009. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*).

energías no contaminantes (bicicletas, motores eléctricos, híbridos o de hidrógeno, etc.), la disminución de la frecuencia de los viajes terrestres, aéreos y marítimos, son hábitos que habría que adoptar para incidir en la reducción de la huella personal. Otros factores importantes en este sentido son las prácticas de ahorro de electricidad, de reducción de la temperatura de calefacción, la disposición adecuada de los desechos, entre otros.

El procedimiento de cálculo de la Huella de Carbono de una organización, un proceso o un producto es más complejo. En el caso de una organización que elabora productos u ofrece un servicio, público o privado, es necesario en primera instancia analizar su organigrama, ya que existe una gran variedad de estructuras organizacionales que pueden ser muy extensas y complejas. De hecho, según sus estatutos, la entidad puede tener la forma de empresa unipersonal, corporación, *holding*, subsidiaria de una casa matriz, institución estatal, fundación, sociedad civil, etc.

Una vez hecho esto, se procederá a definir el perímetro organizacional de estudio y a identificar las unidades funcionales encargadas de las operaciones. Será necesario entonces calcular y agregar las emisiones de cada una de las unidades funcionales para obtener la huella global de la entidad.

En el caso de un producto, el análisis debe abarcar todo su ciclo de vida, desde su concepción y lanzamiento al mercado, pasando por su uso, hasta su disposición final. Es decir, no debemos centrarnos únicamente en los procedimientos realizados en el sitio de producción, sino también en la cadena "aguas arriba" y "aguas abajo" de la producción. Aguas arriba, se deben considerar las emisiones causadas por la extracción, el procesamiento inicial de la materia prima y su transporte al sitio final de transformación. Aguas abajo, se deben tener en cuenta las emisiones producidas por las operaciones de distribución y venta. Una vez que el producto es introducido en el mercado, se deben estimar las emisiones generadas por su utilización durante todo su ciclo de vida, y finalmente, contemplar los GEI generados durante el proceso de desecho.

El cálculo de la Huella de Carbono se ha simplificado notablemente con la aparición en la red de numerosas calculadoras, algunas de ellas de acceso libre. Entre estas podemos citar la calculadora de la ONU⁷⁵, MITECO⁷⁶, *Carbon Footprint*⁷⁷, EPA⁷⁸, entre otras.

3.1.1 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

A continuación haremos un ejemplo de cálculo de la Huella de Carbono (HC) de una pequeña organización, utilizando en forma simplificada la metodología sugerida por el *World Resources Institute* (WRI) y el *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), desarrollada en el documento *GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard*⁷⁹. Para este ejemplo, seguiremos el procedimiento utilizado por Awanthi & Navaratne (2018), quienes han

⁷⁵ <https://offset.climateutralnow.org/footprintcalc>

⁷⁶ <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.html#ancla0>

⁷⁷ <https://calculator.carbonfootprint.com/calculator.aspx?lang=es>

⁷⁸ <https://www3.epa.gov/carbon-footprint-calculator/>

⁷⁹ <https://ghgprotocol.org/standards-guidance#:~:text=The%20GHG%20Protocol%20Corporate%20Accounting,corporate%2Dlevel%20GHG%20emissions%20inventory.>

calculado la Huella de Carbono de una compañía de servicios ubicada en el sur de Sri Lanka, la *Thihagoda Divisional Secretariat*.

Los pasos principales a seguir son esencialmente cinco:

- **Establecimiento del año base o de referencia.** El año base se utiliza como referencia para medir y evaluar los cambios en las emisiones a lo largo del tiempo. Seleccionar un año base adecuado es crucial para realizar un seguimiento preciso de los progresos hacia la reducción de emisiones y para establecer metas y estrategias de mitigación.
- **Establecimiento del perímetro organizacional.** Por la preocupación que despiertan las operaciones empresariales en cuanto a generación de emisiones, se decidió mostrar aquí el cálculo de la Huella de Carbono de una corporación (HCC), la *Thihagoda*, y se circunscribió el inventario de emisiones a las unidades administrativa, de desarrollo, de servicio y de personal, tal como se muestra en la Fig. 3-2. Dado que todas las operaciones son responsabilidad de la corporación, no ha sido necesario definir y estandarizar un enfoque común para el cálculo, lo cual por el contrario es indispensable cuando se analizan *holdings* o corporaciones con subsidiarias.

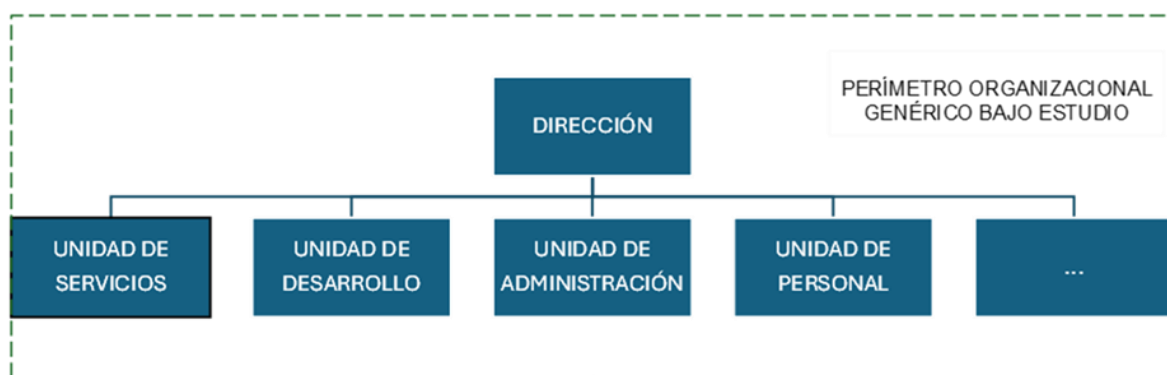


Fig. 3-2 Perímetro organizacional de la empresa *Thihagoda* (Fuente: producción propia).

- **Establecimiento del perímetro operativo.** Tras la evaluación del límite organizacional, se debe establecer el límite operativo (Fig. 3-3). Lo anterior implica identificar las emisiones asociadas con las operaciones de las unidades, categorizándolas según emisiones directas e indirectas. Siguiendo el estándar definido en *GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard*, las emisiones de GEI provenientes de las diferentes operaciones se enmarcaron en tres ÁMBITOS o ALCANCES: Alcance 1, Alcance 2 y Alcance 3 (o SCOPES en inglés: Scope 1, Scope 2 y Scope 3), lo anterior con la finalidad de ayudar a identificar las fuentes de emisiones directas e indirectas, mejorar la transparencia y facilitar la aplicación a diferentes tipos de organizaciones y distintos tipos de políticas climáticas y objetivos empresariales.

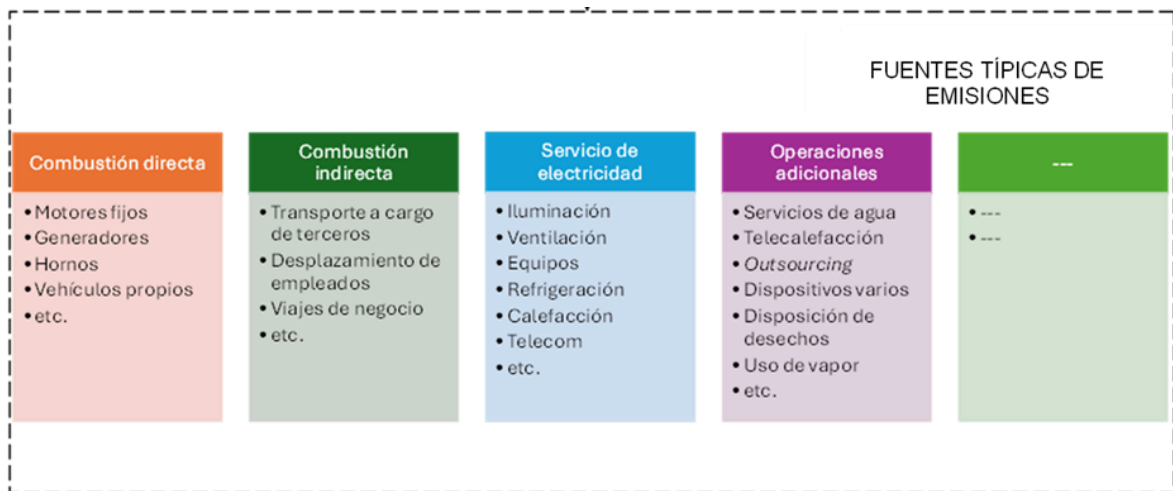


Fig. 3-3 Perímetro operativo de la empresa *Thihagoda* (Fuente: producción propia).

El Alcance 1 incluye las emisiones directas de GEI que se producen desde fuentes que son propiedad de la empresa o que están controladas por esta. El Alcance 2 contabiliza las emisiones de GEI provenientes de la generación de electricidad adquirida y consumida por la organización. Las emisiones del Alcance 3 son consecuencia de las actividades de la empresa, pero provienen de fuentes que no son propiedad de la misma ni están controladas por esta (Fig. 3-4).

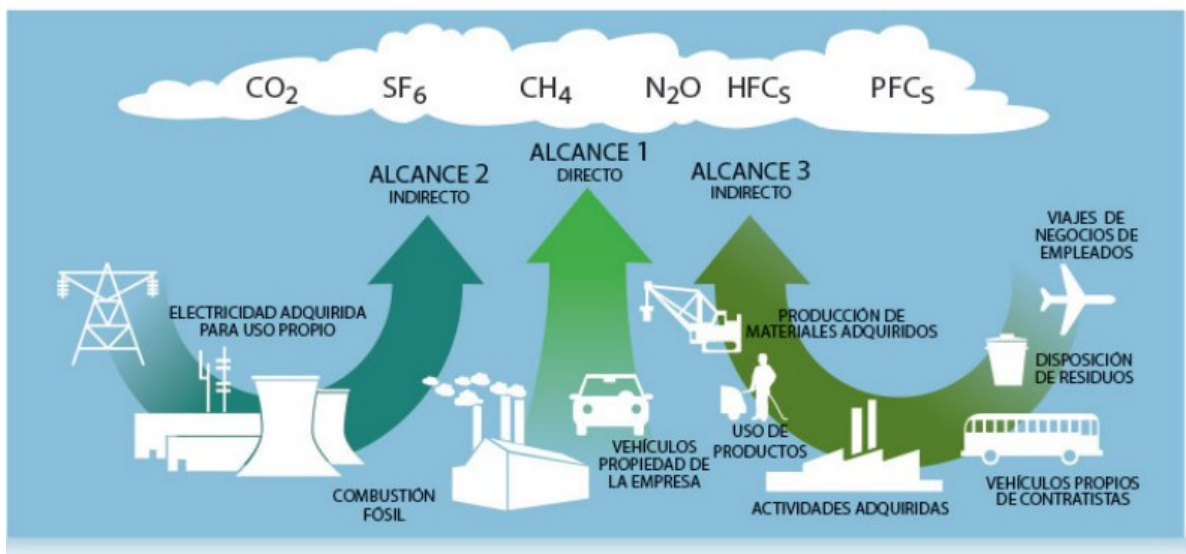


Fig. 3-4 Tipo de emisiones y alcances para el cálculo de la huella de carbono de una corporación (Fuente: *GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard*, WRI & WBCSD, 2024).

- **Recolección de datos.** Se deben recopilar dos tipos de datos, a saber: Datos de Actividad (DA) y Factores de Emisión (FE). Los Datos de Actividad se deben recolectar durante un período de un año dentro de los límites operacionales establecidos. En la Tabla 3-1 se presentan los parámetros a considerar para algunas actividades típicas, así como los instrumentos a utilizar para la recolección.

Tabla 3-1 Parámetros y fuentes de datos de actividad de la empresa *Thihagoda* (Adaptada de: Awanthi & Navaratne, 2018).

Fuentes de emisiones	Parámetros de actividad	Instrumento
Alcance 1		
Generadores de electricidad	Consumo de electricidad anual (kWh/a)	Registro uso
Combustión de gas	Consumo anual de gas (kg/a)	Registro uso
Motores fijos	Consumo de combustible anual (l/a)	Registro uso
Transporte (vehículos propios)	Consumo de combustible anual (l/a)	Registro uso
	Distancia recorrida (km/a)	Registro uso
	Eficiencia media de combustible de los vehículos	Reporte
	Tipo de vehículo	Registro uso
Alcance 2		
Electricidad (adquirida)	Consumo de electricidad anual (kWh/a)	Facturas
Alcance 3		
Desplazamiento del personal y transporte	Distancia recorrida anual (km/a)	Cuestionario
	Eficiencia media de combustible de los vehículos	Cuestionario
	Tipo de vehículo	Cuestionario
	Número de días por semana viajados	Cuestionario
	Número de semanas por año trabajadas en la oficina	Cuestionario
	Tipo de combustible	Cuestionario
	Número promedio de personas por vehículo	Cuestionario
Eliminación de residuos (servicio público)	Cantidad de residuos anual (kg/a)	Facturas
Uso de agua	Consumo de agua anual (m³/a)	Facturas

Los Factores de Emisión (FE) apropiados se pueden obtener con el uso de las directrices del IPCC (2006) para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (Tabla 3-2).

Tabla 3-2 Factores de emisión. (Adaptada de: Awanthi & Navaratne, 2018).

Fuentes	Factores de Emisión (FE)
<i>Gasolina</i>	2.243,50 g CO _{2eq} / l
<i>Kerosene</i>	2.615,40 g CO _{2eq} / l
<i>Gas/Diesel</i>	2.738,50 g CO _{2eq} / l
<i>LPG</i>	2.987,80 g CO _{2eq} / kg
<i>Electricidad</i>	436,80 g CO _{2eq} / kWh
<i>Uso de Agua</i>	187,10 g CO _{2eq} / m³
<i>Disposición de Residuos</i>	770,00 g CO _{2eq} / kg / año

- Cálculo final de la Huella de Carbono Corporativa (HCC).** La HCC de cada alcance y de cada una de las fuentes de emisiones de las unidades empresariales se calcula multiplicando los datos de consumo por el correspondiente Factor de Emisión (FE). En este caso, debido a las pequeñas dimensiones de la empresa, se utiliza como unidad de medida el kg de CO_{2eq} por año. Finalmente, la HCC total de la empresa se obtiene consolidando los 3 alcances, como se reporta en la Tabla 3-3. Por ejemplo, los datos de consumo de electricidad adquirida (Alcance 2) en el año 2023 se obtienen de las facturas emitidas por la compañía proveedora del servicio eléctrico (Tabla 3-1). Estas arrojan un consumo total de 14,59 MWh. Si multiplicamos este valor por el FE correspondiente a la electricidad (Tabla 3-2), es decir 436,8 g · CO_{2eq} / kWh, obtenemos E_e , las emisiones de CO_{2eq} del año 2023 causadas por el servicio eléctrico contratado:

$$E_e = 14,59 \cdot 10^3 \cdot 436,80 \cdot 10^{-3} \cong 6.372,91 \text{ kg CO}_{2eq}$$

Como se observa en la Tabla 3-3, *Thihagoda* en el año 2023 produjo aproximadamente 36 toneladas de CO_{2eq}, cifra consistente con sus reducidas dimensiones organizacionales y notablemente inferior a las emisiones de las grandes corporaciones transnacionales. Por ejemplo, Unilever reportó en 2021 unas emisiones de 61,72 millones de toneladas de CO_{2eq}, mientras que IKEA reportó para el año fiscal 2021 una huella de aproximadamente 26,15 millones de toneladas de CO_{2eq}.

Tabla 3-3 Datos consolidados de emisiones de la empresa *Thihagoda* para el año 2023 (Adaptada de: Awanthi & Navaratne, 2018).

Alcance	Actividad	HCC (kg CO _{2eq})	HCC (%)
Alcance 1 (Emis. Directas)	Transporte-vehículos propios	6.893,62	19,10
	Consumo LPG	486,30	1,35
	Disposición de desechos alimentarios (práctica propia)	1.601,60	4,44
	Generadores de respaldo	147,06	0,41
	Subtotal	9.128,58	
Alcance 2 (Emis. Indirectas)	Electricidad (adquirida)	6.372,91	17,66
	Subtotal	6.372,91	
Alcance 3 (Emis. Indirectas)	Desplazamientos empleados	20.477,56	56,73
	Uso de agua	115,82	0,32
	Subtotal	20.593,38	
Total		36.094,87	

3.2 LA HUELLA ECOLÓGICA

La **Huella Ecológica** es un indicador que cuantifica la extensión de superficie terrestre o marina bioproductora que se necesita para generar los recursos que sustentan las actividades humanas durante un período determinado de tiempo, o bien para la disposición de los desechos (principalmente dióxido de carbono) producidos en ese mismo lapso (Fig. 3-5)⁸⁰ (Schaefer et al., 2006) (Kitzes et al., 2007).

Este indicador se aplica esencialmente a unidades territoriales geopolíticas, como ciudades, países, regiones, incluso a la totalidad del planeta. Es posible, aunque no es una práctica muy común, aplicarlo también a individuos y corporaciones. Para este fin se han desarrollado en red numerosas calculadoras, algunas de libre acceso y sencillas de utilizar⁸¹.

Los datos para determinar la Huella Ecológica se toman con frecuencia anual de instituciones nacionales o internacionales multilaterales, como la ONU, la FAO, la OCDE, la UE, entre otras. Existe también una red mundial dedicada a



Fig. 3-5 Agricultura en la Edad Media (Autor: Gilles de Rome, 1279. Lic. Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International).

⁸⁰ <https://britishfoodhistory.com/2017/07/13/mediaeval-feast-mediaeval-famine/>

⁸¹ <https://www.footprintnetwork.org/resources/footprint-calculator/>

calcular y mantener actualizado este indicador, denominada Red Global de la Huella Ecológica (*Global Footprint Network*)⁸². Esta red proporciona datos, análisis y recomendaciones políticas que ayudan a gobiernos, empresas y a la sociedad civil a tomar decisiones informadas para vivir dentro de los límites ecológicos del planeta. Su trabajo es fundamental para sensibilizar sobre el uso sostenible de los recursos naturales y para promover políticas y prácticas que conduzcan a un futuro más sostenible.

Aunque el concepto a la base de este indicador es sencillo de entender, su cálculo reviste cierta complejidad, ya que intenta consolidar en un único valor numérico variables que no son directamente integrables entre sí debido a las diferencias en el potencial de producción o disposición de biomasa. En efecto, la heterogeneidad de las superficies de producción de recursos biológicos, como los terrenos agrícolas, los pastizales o las plataformas marinas continentales, comporta rendimientos diferentes según la naturaleza del recurso. Además, los rendimientos de generación de un mismo recurso pueden variar dependiendo de la región o país de producción. Como se puede apreciar en la Fig. 3-6⁸³, la eficiencia en la producción de cereales, evaluada en

kg por hectárea, varía significativamente entre Irlanda y Bolivia, posiblemente debido a factores como la fertilidad del suelo, el clima, y la tecnología utilizada, entre otros. Como consecuencia de esta disparidad en los rendimientos, no es posible sumar directamente las áreas productoras de diferentes especies biológicas o de diferentes territorios. Es necesario primero realizar una serie de simplificaciones y normalizaciones para definir una métrica que permita equiparar las productividades de las áreas terrestres o marinas dedicadas a la generación de biomasa y poder consolidarlas usando valores consistentes entre sí.

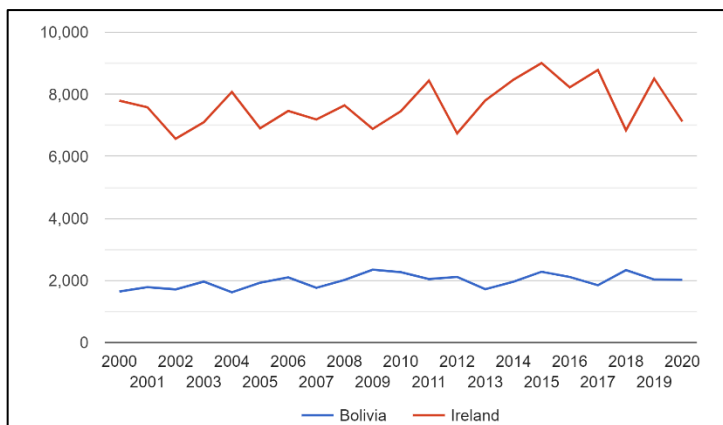


Fig. 3-6 Rendimiento en kg/ha de los terrenos de producción de cereales de Irlanda y Bolivia (Fuente: FAO, 2020-2022 in *TheGlobalEconomy.com*).

3.2.1 CONCEPTOS

En la metodología desarrollada por el *Global Footprint Network*, podemos identificar cuatro tipos de Huellas Ecológicas, a saber:

- Huella de Consumo (HE_C)
- Huella de Producción (HE_P)
- Huella de Exportación (HE_E)
- Huella de Importación (HE_I)

¿Por qué cuatro Huellas? Esto se entiende fácilmente si nos remontamos a la definición de Huella Ecológica. Sintéticamente, esta huella cuantifica los recursos utilizados, es decir consumidos por el hombre, en términos de extensión de áreas bioproductoras. Los recursos consumidos o son producidos en la entidad territorial de interés o bien importados. También se da el caso de que una parte de estos recursos no son consumidos en la entidad porque son exportados. Pasan entonces a ser recursos importados en la entidad de destino y contabilizados como recursos consumidos en esta otra entidad. Una ecuación conceptual que refleja lo anterior es la siguiente:

⁸² <https://www.footprintnetwork.org/>

⁸³ <https://www.theglobaleconomy.com/compare-countries/>

$$HE_C = (HE_P - HE_E) + HE_I \quad (3-1)$$

De manera que para el cálculo de la Huella Ecológica principal HE_C es necesario determinar el valor de las tres huellas que la componen, y esto debe hacerse por cada uno de los productos biológicos consumidos durante el año en la entidad territorial bajo estudio. Por ejemplo, si queremos determinar la huella de la producción agrícola, se debe empezar con determinar la HE_P correspondiente a la producción anual de la entidad, lo cual implica calcular la huella de producción del trigo, del sorgo, del maíz y demás recursos generados. De la misma manera se debe calcular la huella de los recursos agrícolas importados y exportados. El valor total de la HE_C resultará entonces de la suma de las tres huellas componentes y éstas a su vez de la suma de los productos individuales correspondientes⁸⁴.

3.2.2 FACTORES DE EQUIVALENCIA Y NORMALIZACIÓN

Para obtener el valor consolidado de los tres tipos de huella, es imprescindible normalizar las diferentes categorías de superficie bioproductora, considerando las disparidades de productividad entre ellas. Por lo tanto, se requiere transformar las áreas efectivas de producción, es decir, las hectáreas reales, en **áreas equivalentes** mediante el establecimiento de una unidad de medida común y universal, aplicable a todas las categorías y localidades: la denominada "**hectárea global**".

Para el procedimiento de cálculo, es necesario disponer de algunos datos, por ejemplo, si se quiere evaluar **la Huella de Producción**, es necesario conocer la **producción nacional** (en t) y la **productividad mundial** (en t/ha) de los varios recursos biológicos de interés. El procedimiento para el cálculo de las Huellas de Exportación y de Importación sigue exactamente los mismos pasos, simplemente es necesario sustituir la producción nacional por las cantidades exportadas e importadas de los recursos en juego, como se muestra en la

Tabla 3-6 más adelante.

Antes de continuar, es necesario aclarar que, en el procedimiento que ilustraremos a continuación para el cálculo de la Huella Ecológica, utilizaremos indistintamente el índice i para identificar un tipo específico de superficie o bien el recurso biológico que esta produce.

Para comenzar, se debe realizar una primera simplificación que consiste en subdividir la superficie bioproductora del planeta en seis categorías (ver Tabla 3-4) y seguidamente establecer para cada una de ellas un **Factor de Equivalencia** EQF que las equipare. El factor EQF permite comparar y sumar las diferentes áreas de demanda ecológica a pesar de sus distintas productividades y características. Se ha construido dividiendo la productividad mundial anual Y_{mi} de un recurso específico (donde el subíndice m indica "mundial" y i se refiere al tipo de recurso) por el valor de referencia Y_m , que corresponde a la productividad mundial anual total de todos los recursos biológicos (productos agrícolas, pecuarios, ícticos, madera, etc.).

Expresando lo anterior en términos matemáticos, tenemos que Y_{mi} es iguala a:

$$Y_{mi} = P_{mi} / S_{mi} \quad (3-2)$$

Donde:

- P_{mi} es la producción mundial del recurso específico i en un determinado año. Su unidad de medida es la tonelada (t).

⁸⁴ Por ejemplo, para el cálculo de la Huella de Producción HE_P , suponiendo que se identifican con el índice i las categorías de bioproducción, con el índice y los productos individuales y con he_{piy} la huella de producción de cada uno de los productos, tendremos que:

$$HE_P = \sum_{ij} he_{piy}$$

- S_{mi} es la totalidad de la superficie mundial que en un determinado año se ha destinado a la producción del recurso i . Se mide en ha . Estadísticamente, podemos afirmar que una hectárea de este tipo produce la cantidad promedio, calculada a nivel mundial, del recurso específico i .
- Las unidades de Y_{mi} son t/ha .

Para Y_m tenemos:

$$Y_m = P_m/S_m \quad (3-3)$$

Donde:

- P_m es la producción mundial de todos los recursos biológicos en un determinado año, medida en toneladas (t).
- S_m es la superficie destinada mundialmente a la producción de todos los recursos biológicos en un año en particular. Se mide en ha . Una hectárea de este tipo produce la cantidad promedio, calculada a nivel mundial, de toda la biomasa generada en el planeta. El área de las superficies bioproductoras con diferentes rendimientos se medirán en forma relativa, tomando como referencia precisamente la hectárea que produce el promedio mundial de toda la biomasa, o “hectárea global”.
- Las unidades de Y_m son t/ha .

De las dos anteriores ecuaciones se obtiene el Factor de Equivalencia EQF_i para una determinada categoría de superficie asociada al recurso i , de las seis especificadas en la Tabla 3-4: El Factor de Equivalencia es un número adimensional.

$$EQF_i = Y_{mi}/Y_m \quad (3-4)$$

En la Tabla 3-4 se presentan las seis categorías de superficies bioproductoras junto con sus correspondientes Factores de Equivalencia EQF para el año 2019⁸⁵. De estos datos se deduce, por ejemplo, que la productividad promedio de los terrenos agrícolas es 2,56 veces mayor que la productividad promedio mundial de toda la biomasa. En otras palabras, para equiparar las hectáreas reales de los terrenos agrícolas con las “hectáreas globales”, es necesario dividirlos por 2,56. Esto implica que, debido a su mayor productividad, se requieren menos hectáreas reales de terrenos agrícolas para igualar el promedio mundial de producción.

Tabla 3-4 Factores de Equivalencia (Adaptada de Lin, et al., 2019, *National Footprint and Biocapacity Accounts*. Lic. Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0).

Tipo de uso de superficie i	Factor de Equivalencia EQF
Áreas de captura de carbono	1,26
Terrenos agrícolas	2,56
Tierras de pastoreo y cría	0,46
Terrenos forestales	1,26
Terrenos urbanizados	2,51
Zonas de pesca	0,37

A continuación se presenta una breve descripción de estas áreas:

⁸⁵ Estos valores pueden variar ligeramente según la fuente y el año de cálculo.

- **Áreas de captura de CO₂.** Es la cantidad de tierra forestal requerida para absorber las emisiones de CO₂ provenientes de la quema de combustibles fósiles (sólidos, líquidos, gaseosos). Es de hacer notar que aquí se consideran sólo las áreas terrestres de captura de CO₂, fundamentalmente bosques y forestas, de manera que para el cálculo de estas extensiones se excluye la cantidad de carbono absorbida anualmente por las superficies oceánicas y marinas.
- **Terrenos agrícolas.** Es tierra arable (campos, jardines, etc.) utilizada para producir alimentos y productos no alimentarios de origen agrícola (por ejemplo, algodón, yute, tabaco).
- **Tierras de pastoreo y cría.** Es tierra utilizada para la ganadería, principalmente pastizales, la producción de carne, productos lácteos, huevos, lana y, en general, todos los productos de la ganadería.
- **Terrenos forestales.** Son áreas dedicadas a la producción de madera (pulpa, leña), principalmente forestas naturales o plantaciones. Además, los terrenos forestales se pueden considerar en términos de su capacidad para absorber CO₂, contribuyendo así al balance global del carbono.
- **Terrenos urbanizados.** Se refiere a las áreas utilizadas para la construcción de infraestructuras, como viviendas, zonas de manufactura, áreas de servicios, rutas de comunicación, entre otros. Dado que estos terrenos ocupan tierras potencialmente fértiles, se equiparán a los terrenos agrícolas.
- **Zonas de pesca.** Son áreas de océanos y mares, en especial pertenecientes a las plataformas continentales, destinadas a la obtención de recursos pesqueros. En algunas metodologías se incluyen en esta categoría también los cuerpos de aguas continentales.

En este punto es necesario efectuar una segunda equivalencia, esta vez entre superficies bioproductoras del mismo tipo. Esto es necesario para tomar en consideración las diferencias de productividad entre entidades territoriales diversas, fundamentalmente entre países.

El **Factor de Productividad** (*YF: Yield Factor*) se utiliza para equiparar el rendimiento promedio de los distintos tipos de superficie bioproductoras dentro de un país específico, con relación al promedio mundial de rendimiento de ese mismo tipo de superficie. Cada país, en cada año, posee su propio conjunto de Factores de Productividad (Tabla 3-5).

El Factor de Productividad YF_{ij} de un país o entidad (donde i representa el recurso y j la entidad o país) se determina dividiendo el rendimiento Y_{ij} del recurso i producido en la entidad o país j por el rendimiento Y_{mi} del mismo recurso a nivel mundial. Este cálculo da como resultado un factor adimensional:

$$Y_{ij} = P_{ij} / S_{ij} \quad (3-5)$$

Donde:

- P_{ij} es la producción de la entidad o país j del recurso categorizado con i . Su unidad de medida son las toneladas (t).
- S_{ij} es la superficie real dedicada a la producción del recurso i dentro de la entidad o país j . Se mide en hectáreas (ha).

$$YF_{ij} = Y_{ij} / Y_{mi} \quad (3-6)$$

Tabla 3-5 Factor de Productividad de algunos países para el año 2019 (Adaptada de: Lin, et al., 2019, Lic. *Creative Commons ShareAlike 4.0*).

Factor de Productividad YF						
País	Terrenos agrícolas	Tierras de pastoreo y cría	Terrenos forestales	Zonas de pesca	Terrenos urbanizados	Áreas de captura carbono
Estados Unidos	2,5	0,5	1,1	0,8	1,0	1,2
Alemania	2,1	0,4	1,0	0,7	1,0	1,1
Brasil	2,8	0,6	1,3	0,9	1,0	1,3
China	2,3	0,5	1,1	0,8	1,0	1,2
India	2,0	0,3	1,0	0,6	1,0	1,1
Italia	0,6	1,9	1,7	0,9	0,6	1,7

La Tabla 3-5 muestra, por ejemplo, que una hectárea de terreno agrícola en Estados Unidos tiene en promedio una productividad 2,5 veces mayor que una hectárea de ese mismo tipo de terreno a nivel mundial. Para equiparar las hectáreas reales de los terrenos agrícolas de Estados Unidos con las “hectáreas globales”, es necesario entonces dividirlos por 2,5 puesto que se necesitan más hectáreas globales para producir la misma cantidad de recurso.

3.2.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA HUELLA ECOLÓGICA

Una vez definidos los factores de equivalencia, podemos empezar a calcular la Huella Ecológica. El procedimiento arranca de la expresión del rendimiento Y_{ij} definido en la ecuación (3-5). De la ecuación (3-5) despejamos S_{ij} para obtener las hectáreas **efectivas** o **reales** de la entidad o país j comprometidas con la bioproducción del recurso i (o con la captura de CO₂).

$$S_{ij} = P_{ij} / Y_{ij} \quad (3-7)$$

La superficie real debe **normalizarse** en función del tipo de superficie y de la entidad o país bioprodutor, multiplicándola por el Factor de Equivalencia EQF_i (Tabla 3-4) y por el Factor de Productividad YF_{ij} (Tabla 3-5).

$$Seq_{ij} = P_{ij} / Y_{ij} \cdot EQF_i \cdot YF_{ij} \quad (3-8)$$

Al efectuar la anterior multiplicación, se altera el valor numérico de la superficie bioprodutora, con lo cual el resultado de esta ya no representa la superficie real de producción sino una **superficie equivalente** Seq_{ij} , resultante de la normalización efectuada con respecto a la productividad del tipo de superficie y de su ubicación geopolítica.

Simplificando la ecuación (3-8), se obtiene:

$$Seq_{ij} = P_{ij} / Y_{mi} \cdot EQF_i \quad (3-9)$$

Para obtener el valor de la Huella Ecológica es necesario efectuar un último ajuste a la anterior ecuación, pesándola por un parámetro denominado **Factor Intertemporal**.

El Factor Intertemporal IYF_{ij} es un coeficiente que ajusta las cantidades de recursos consumidos y residuos generados para reflejar cambios en el tiempo. Este factor tiene en cuenta variaciones en la productividad de los ecosistemas y en la eficiencia del uso de recursos a lo largo

del tiempo. Básicamente, se utiliza para ajustar las medidas de la Huella Ecológica histórica a un año base específico, permitiendo comparaciones consistentes a través de diferentes períodos. Estos cambios se deben principalmente a las siguientes variables:

- **La productividad ecológica:** Los ecosistemas pueden variar en su capacidad de producir recursos biológicos y absorber residuos, debido a factores como el cambio climático, la degradación del suelo y otros impactos ambientales. El Factor Intertemporal ajusta estas variaciones.
- **La eficiencia tecnológica:** La tecnología y las prácticas de uso de recursos pueden cambiar con el tiempo, lo que afecta la cantidad de recursos necesarios para producir bienes y servicios. El Factor Intertemporal también ajusta estos cambios de eficiencia.

Finalmente, la expresión de la Huella Ecológica HE_{ij} de un recurso i producido en un país o entidad territorial j , se obtiene multiplicando la superficie equivalente Seq_{ij} obtenida mediante la ecuación (3-9) por el Factor Intertemporal IYF_{ij} :

$$\begin{aligned} HE_{ij} &= \frac{P_{ij}}{Y_{ij}} \cdot IYF_{ij} \cdot EQF_i \cdot YF_{ij} = & (3-10) \\ &= \frac{P_{ij}}{Y_{mi}} \cdot IYF_{ij} \cdot EQF_i \end{aligned}$$

Donde:

- HE_{ij} es la Huella Ecológica del producto i en la entidad o país j , expresado en hectáreas globales (ha_g).

Observe que el valor de la Huella Ecológica no representa, como ya afirmamos anteriormente, hectáreas reales sino hectáreas equivalentes debido a las normalizaciones efectuadas. A estas hectáreas equivalentes se les ha dado el nombre de Hectáreas Globales y se expresan como ha_g para enfatizar la diferencia con respecto a la ha , la unidad de medida de superficie del sistema SI.

Para terminar de aclarar el significado de las hectáreas globales, evaluamos numéricamente la Huella Ecológica de la producción de trigo en un país no especificado, del cual sin embargo conocemos el Factor de Productividad del trigo: $YF = 1,5$. En ese país, en un año en particular, se han producido $2 Mt$ de trigo, utilizando una superficie efectiva de $1,2 Mha$. A sabiendas que el Factor de Equivalencia de los terrenos agrícolas es de $2,56$ y suponiendo un Factor Intertemporal igual a 1 , la aplicación de la ecuación (3-10) sin simplificar arroja:

$$HE_{tr} = \frac{2 \cdot 10^6}{1,667} \cdot 1 \cdot 2,56 \cdot 1,5 = 4,61 Mha_g \quad (3-11)$$

Es decir, la producción de las 2×10^6 toneladas de trigo ha requerido $4,61 \times 10^6$ hectáreas globales en lugar de las $1,2 \times 10^6$ hectáreas efectivamente empleadas.

3.2.4 EJEMPLO DE CÁLCULO

Podemos adoptar ahora la metodología usada por Lin, et al. (2019) para obtener el valor consolidado de la Huella Ecológica de una determinada entidad geopolítica para un año específico. El cálculo procede de lo particular a lo general, es decir:

- Se calculan primero las huellas de los productos biológicos individuales pertenecientes a una de las seis categorías de superficie especificadas en la Tabla 3-4 y a uno de los tres renglones principales de huellas, tipificados en la ecuación (3-1), o sea: Huella de Producción, de Exportación y de Importación.

- Se consolidan los valores obtenidos de los productos individuales por categoría de superficie y por tipología de huella principal.
- Una vez obtenidas las Huellas Principales, aplicamos la ecuación (3-1) para obtener la Huella de Consumo, que en definitiva es la Huella Ecológica buscada.

Como ya declarado, para realizar estos cálculos es necesario conocer los datos de producción, importación y exportación anual de los recursos biológicos (o de la disposición de los desechos) de la entidad de interés. De igual manera, es necesario conocer la productividad mundial de los recursos que se quieren contabilizar, además de los factores de equivalencia e intertemporal. Estos datos deben ser completos y confiables para así obtener resultados significativos. Lo más recomendable es obtenerlos de la organización *Global Footprint Network* o directamente de organizaciones gubernamentales y multilaterales, como la FAO, la ONU, la UE, etc.

Debido a la gran cantidad de cálculos específicos que es necesario realizar, es recomendable utilizar para ello hojas de cálculo, organizadas de lo particular a lo general. A continuación, se muestra la

Tabla 3-6 que presenta en forma parcial la aplicación del procedimiento descrito con anterioridad a un país ficticio. Las muestras incluidas son:

- Huellas de Producción, Importación y Exportación de productos agrícolas en el 2019
- Huellas de Producción, Importación, Exportación y Consumo en el 2019
- Huella Ecológica en el 2019

Tabla 3-6 Muestra de cálculo de las Huellas de Producción, Importación y Exportación de los Terrenos Agrícolas (ta) para un país ficticio, año 2019 (Adaptada de: Lin, et al., 2019. Lic. *Creative Commons ShareAlike 4.0*)

Huella de Producción $\left(\frac{P}{Y_m}\right) \cdot IYF \cdot EQF_{ta} = HE_P$						
Producto	Cod. FAO	Producción nacional P (t)	Productividad mundial Y_m (t/ha)	IYF	EQF_{ta}	Huella de Producción $(ha)_g$
Alfaalfa	641	3.462.590	34,59	0,99	2,56	253.957
Almendras	221	161	1,47	0,99	2,56	278
Anís	711	2.396	0,71	0,99	2,56	8.613
Manzanas	515	568.600	14,15	0,99	2,56	101.958
Albaricoques	526	26.761	7,27	0,99	2,56	9.334
Huella de Importación $\left(\frac{I}{Y_m}\right) \cdot YFP_{ta} \cdot EQF_{ta} = HE_I$						
Producto	Cod. FAO	Importación I (t)	Productividad mundial Y_m (t/ha)	YFP_{ta}	EQF_{ta}	Huella de Importación $(ha)_g$
Grano	15	22.005	2,51	0,99	2,56	22.219
Harina de trigo	16	31.285	2,27	0,99	2,56	34.891
Salvado de trigo	17	0	4,85	0,99	2,56	0
Pasta	18	10.273	2,27	0,99	2,56	11.457
Pan	20	6.826	2,62	0,99	2,56	6.620
Continúa...						
Huella de Exportación $\left(\frac{E}{Y_m}\right) \cdot YFP_{ta} \cdot EQF_{ta} = HE_E$						
Producto	Cod. FAO	Exportación E (t)	Productividad mundial Y_m (t/ha)	YFP_{ta}	EQF_{ta}	Huella de Exportación $(ha)_g$
Grano	15	2.112.600	2,51	0,99	2,56	2.133.158
Harina de trigo	16	128.055	2,27	0,99	2,56	142.813
Salvado de trigo	17	70.126	4,85	0,99	2,56	36.700
Pasta	18	873	2,27	0,99	2,56	974
Pan	20	134	2,62	0,99	2,56	130
---	---	---	---	---	---	---

Tabla 3-7 Huella de Consumo para la categoría Terrenos Agrícolas (ta), para un país ficticio, año 2019 (Adaptada de: Lin, et al., 2019. Lic. *Creative Commons ShareAlike 4.0*)

$HE_P + HE_I - HE_E = HE_{cta}$				
Huella de Consumo				
Terrenos Agrícolas (ta)	Huella de Producción (ha) _g	Huella de Importación (ha) _g	Huella de Exportación (ha) _g	Huella Terrenos Agrícolas (ha) _g
	18.539.259	2.587.871	9.652.599	11.474.532

Se repite el procedimiento realizado para encontrar las Huellas de cada una de las restantes cinco categorías de superficie y se consolidan los resultados en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Huellas consolidadas de Producción, Importación, Exportación, Consumo y Huella Ecológica de un país ficticio, 2019 (Adaptada de: Lin, et al., 2019. Lic. *Creative Commons ShareAlike 4.0*)

$HE_P + HE_I - HE_E = HE_C$				
Categoría de Superficie	Huella de Producción (ha)	Huella de Importación (ha)	Huella de Exportación (ha)	Huella de Consumo (ha)
Terrenos agrícolas	18.539.259	2.587.871	9.652.599	11.474.532
Tierras de pastoreo y cría	236.673	701.216	324.112	613.776
Terrenos forestales	2.891.020	3.336.679	1.581.903	4.645.796
Zonas de pesca	21.457	172.762	28.371	165.847
Terrenos urbanizados	1.864.292	-	-	1.864.292
Captura de carbono	13.581.789	14.055.787	11.816.940	15.820.636
TOTAL	37.134.489	20.854.314	23.403.925	34.584.878

De la Tabla 3-8 vemos que la Huella Ecológica del país ficticio tomado como ejemplo ha sido de 34.584.878 hectáreas globales en 2019, comparable con la **Huella de Hungría** que para ese mismo año fue de aproximadamente 39 millones de hectáreas globales⁸⁶.

¿Qué significado tiene este número? ¿Es grande o pequeño? Para tener una referencia al respecto y poder apreciar si es un valor adecuado o más bien dañino para el ecosistema del país, debemos compararlo con el potencial de producción biológica, o **Biocapacidad**.

3.3 BIOCAPACIDAD

La **Biocapacidad** es la disponibilidad de recursos biológicos dentro de un país o una determinada entidad territorial en un determinado período de tiempo (Schaefer et al., 2006) (Lin, et al., 2019) (Kitzes et al., 2007).

La disponibilidad de recursos biológicos está íntimamente ligada con la capacidad de la biosfera de regenerar estos recursos dentro de los límites de la entidad (Fig. 3-7)⁸⁷. Se mide en hectáreas globales ha_g , de manera que es posible comparar los recursos utilizados por la entidad, o Huella Ecológica, con el potencial disponible en el periodo seleccionado, usualmente un año.

Si la Huella es mayor que la Biocapacidad, se ha producido una sobreexplotación del territorio y se habla de **déficit** ecológico, por el contrario si la Huella es menor que la Biocapacidad, se habla de **reserva** ecológica de la entidad.

El cálculo de la Biocapacidad procede de manera muy similar al de la Huella Ecológica, empezando con la subdivisión de las superficies biológicamente productivas en cinco categorías,

⁸⁶ https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.136075570.2077193116.1723902524-2025916780.1719412202#/

⁸⁷ https://es.wikipedia.org/wiki/Tierra_de_Campos#/media/Archivo:Moforlogiaagr%C3%A1ria.jpg

las mismas que se han utilizado para el cálculo de la Huella, con la excepción del área de absorción de carbono, que se excluye de esta contabilidad. La razón de lo anterior radica en el hecho que en la guía de la NFA (Lin, et al., 2019) se asume que todo el carbono producido (una vez restado el disuelto en los sumideros oceánicos) es absorbido por los territorios forestales. Por lo tanto, incluir la biocapacidad de captura del dióxido de carbono en adición a la biocapacidad de las tierras forestales llevaría a un doble conteo. Las superficies terrestres y marinas para el cálculo de la Biocapacidad son entonces las siguientes:

- Terrenos agrícolas.
- Tierras de pastoreo y cría.
- Terrenos forestales.
- Terrenos urbanizados.
- Zonas de pesca.



Fig. 3-7 Llanura de la provincia de Valladolid, España (Autor: Andrecp, 2008. Lic. Dominio Público).

La fórmula para el cálculo de la Biocapacidad BC_{ij} es la siguiente:

$$BC_{ij} = A_{ij} \cdot EQF_i \cdot YF_{ij} \cdot IYF_{ij} \quad (3-12)$$

Donde:

- A_{ij} identifica el área efectiva disponible en la entidad territorial j para el uso específico i (ha)
- EQF_i es el factor de equivalencia para el área de uso específico i
- YF_{ij} es el Factor de Productividad de la entidad en cuestión para el tipo de uso i
- IYF_{ij} es el factor de intertemporalidad

En la Tabla 3-9 se muestra la Biocapacidad del país ficticio a partir de la integración de las biocapacidades parciales de las cinco categorías de áreas bioproductoras.

Tabla 3-9 Biocapacidad de un país ficticio para el año 2019 (Adaptada de: Lin, et al., 2019, *National Footprint and Biocapacity Accounts*. Lic. Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0).

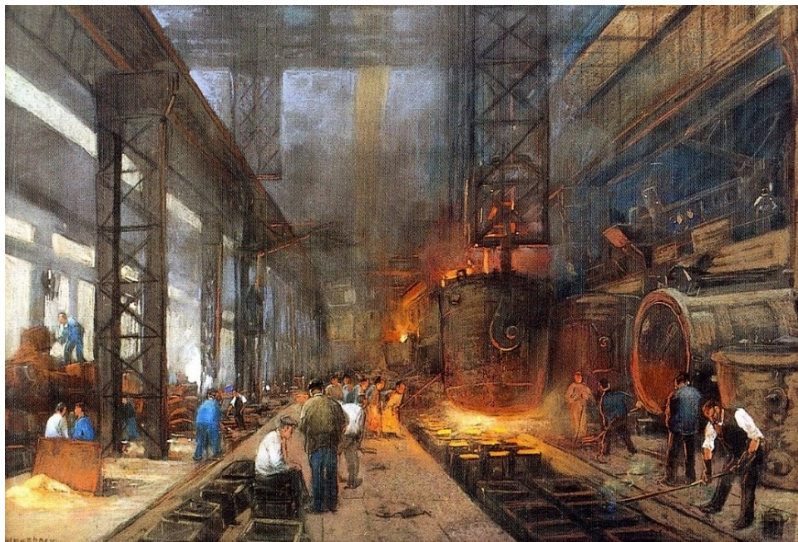
Biocapacidad		$A \cdot YF \cdot IYF \cdot EQF = BC$			
Categoría de Superficie	Área Bioproductora (<i>ha</i>)	Factor de Productividad	Factor Intertemporal	Factor de Equivalencia	Biocapacidad ⁸⁸ (<i>ha</i>) _g
Terrenos agrícolas	5.324.431	1,36	1,00	2,56	18.539.259
Tierras de pastoreo	665.178	2,40	1,00	0,46	732.926
Terrenos forestales	2.097.050	2,47	1,00	1,29	6.668.513
Zonas de pesca	165.286	1	1,00	0,37	61.156
Terrenos urbanizados	548.808	1,33	1,00	2,56	1.864.292
TOTAL	8.800.753				27.866.146

En este ejemplo, la Biocapacidad del país ficticio para el año 2019 fue de 27.866.146 *ha_g*, inferior a la Huella Ecológica, que fue de 34.584.878 *ha_g* (Tabla 3-8 y Tabla 3-9). De manera que el país ha sufrido un déficit ecológico de 6.718.732 *ha_g*, lo cual en principio es perjudicial para la sostenibilidad de su ecosistema y de su régimen de vida.

En el caso de **Hungría**, la Biocapacidad para el año 2019 ha sido de 25.406.680 *ha_g*, registrándose un déficit ecológico de 13.680.520 *ha_g*⁸⁹.

⁸⁸ Los datos de superficie A y Factor de Productividad YF mostrados en la tabla pueden variar ligeramente según la fuente y el año consultados. El valor de la última columna varía según los decimales utilizados.

⁸⁹ https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.136075570.2077193116.1723902524-2025916780.1719412202#/



90

⁹⁰ Imagen de cierre capítulo: “La fundición del hierro” (Autor: Herman Heijenbrock, 1890. Lic. Dominio Público)
https://ast.wikipedia.org/wiki/Segunda_Revoluci%C3%B3n_Industrial#/media/Ficheru:1890heyenbrock.jpg

AMENAZAS E IMPACTOS DE LOS EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS

4



91

Atribuir la ocurrencia de un fenómeno meteorológico específico al cambio climático es complejo, debido a la multiplicidad de variables que pueden influir en su manifestación. En la mayoría de los casos, la atribución a una causa concreta resulta prácticamente imposible. No obstante, estudios estadísticos indican que, en paralelo con el incremento progresivo de la temperatura media global (Fig. 4-1), se ha observado un aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. Este aumento de eventos extremos ha intensificado las amenazas y los riesgos de desastres para las poblaciones, la economía y los territorios.

Como consecuencia, es imperativo adoptar medidas orientadas a la reducción de estos riesgos, abarcando un amplio espectro de acciones, desde políticas globales hasta cambios en los comportamientos individuales. Entre las políticas promovidas por organismos multilaterales y adoptadas por numerosos Estados, destacan la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo. Asimismo, se han implementado iniciativas a diferentes niveles con el objetivo de incrementar la resiliencia de territorios y comunidades frente a las pérdidas humanas y a los daños económicos, estructurales y ambientales causados por desastres de origen natural o antropogénico.

En este capítulo, abordaremos en primer lugar la conceptualización de los términos evento extremo, amenaza, vulnerabilidad, exposición, resiliencia, riesgo, mitigación y adaptación, construyendo un glosario *ad hoc*. De seguida, analizaremos los principales fenómenos meteorológicos que representan peligros para el hábitat humano. Finalmente, describiremos de manera general los aspectos más relevantes de las políticas de mitigación, adaptación y desarrollo de resiliencia.

⁹¹ Imagen del título: "Rough Sea at Naruto in Awa Province" (Autor: Utagawa Hiroshige, 1855. Lic. Dominio Público). https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Hiroshige_Wild_sea_breaking_on_the_rocks.jpg

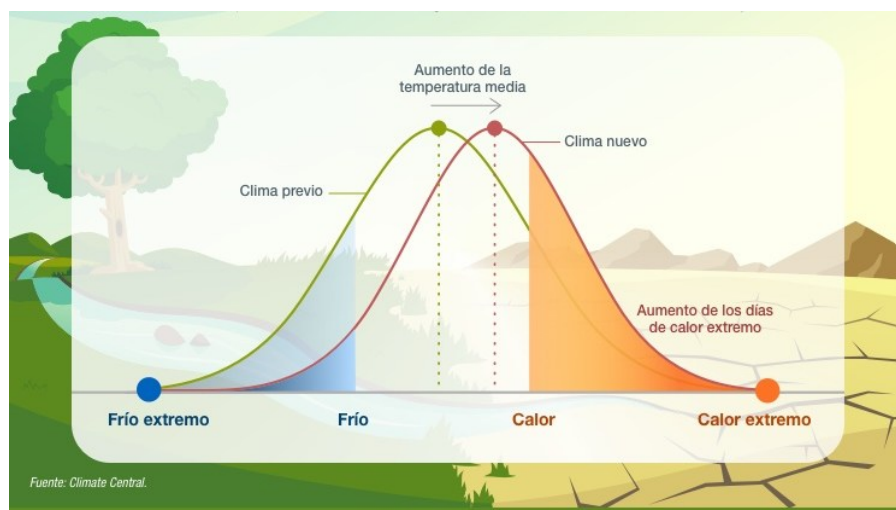


Fig. 4-1 Desplazamiento de la distribución probabilística de la temperatura mundial hacia valores más elevados (Fuente: *Climate Central*, en Iberdrola, 2024)⁹².

4.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS TÉRMINOS UTILIZADOS

Para una adecuada interpretación de los conceptos que se expondrán en este capítulo, es fundamental definir con precisión el significado de los términos que se emplearán, a saber:

EVENTO EXTREMO

Un fenómeno meteorológico se caracteriza mediante un indicador específico, como los milímetros de lluvia caída en una hora, la velocidad del viento, o las temperaturas máximas y mínimas diarias, entre otros. Se clasifica como un **'fenómeno extremo'** cuando dicho indicador presenta valores que superan el límite superior o bien se sitúan por debajo del límite inferior del rango de valores históricamente observados en una región y durante un período específico del año (WMO, 2024).

AMENAZA

Un fenómeno meteorológico extremo constituye una **amenaza** debido a su capacidad potencial para generar desastres que afectan a las personas, el territorio, las infraestructuras y la economía de una entidad geopolítica. En otras palabras, su ocurrencia representa un **peligro** latente para el normal desarrollo de la vida en dicha zona (IPCC, 2019).

VULNERABILIDAD

Es el grado de **propensión** de un sistema, comunidad, persona o infraestructura a ser afectado por una amenaza. Un alto nivel de vulnerabilidad implica una mayor probabilidad de sufrir daños severos ante un desastre, debido a la falta de recursos, preparación, infraestructura adecuada, políticas o desarrollo social (IPCC, 2019).

EXPOSICIÓN

Se refiere a la **densidad de presencia o concentración** de personas, bienes, infraestructuras, servicios y sistemas en áreas que podrían ser afectadas por una amenaza. Cuanto mayor es la exposición de estos elementos a una amenaza, mayor es el potencial de que se produzcan daños. La exposición es independiente de la vulnerabilidad; una zona puede estar altamente expuesta a un fenómeno sin ser necesariamente vulnerable, si tiene una alta capacidad de resistencia (UNDRR, 2024-b).

RESILIENCIA

⁹² <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/fenomenos-meteorologicos-extremos>

Es la capacidad de un sistema, comunidad o individuo para **resistir, adaptarse y recuperarse** rápidamente de los impactos de una amenaza. La resiliencia implica la habilidad no solo de resistir los daños, sino también de recuperarse y, en algunos casos, mejorar la capacidad de respuesta futura. Un sistema resiliente puede soportar eventos adversos y continuar funcionando o volver a su estado original (o a uno mejorado) tras el impacto. Una mayor resiliencia suele estar asociada a una menor vulnerabilidad (UNDRR, 2024-c).

RIESGO DE DESASTRE

Es la **probabilidad** de que una amenaza potencial se convierta en un evento que genere consecuencias adversas para una población, un territorio o un sistema. El riesgo no solo depende de la magnitud o la frecuencia de la amenaza, sino también de la vulnerabilidad del área expuesta y su capacidad de respuesta. En este sentido, el riesgo es una combinación de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno peligroso y el nivel de impacto que podría causar (UNDRR, 2024-a).

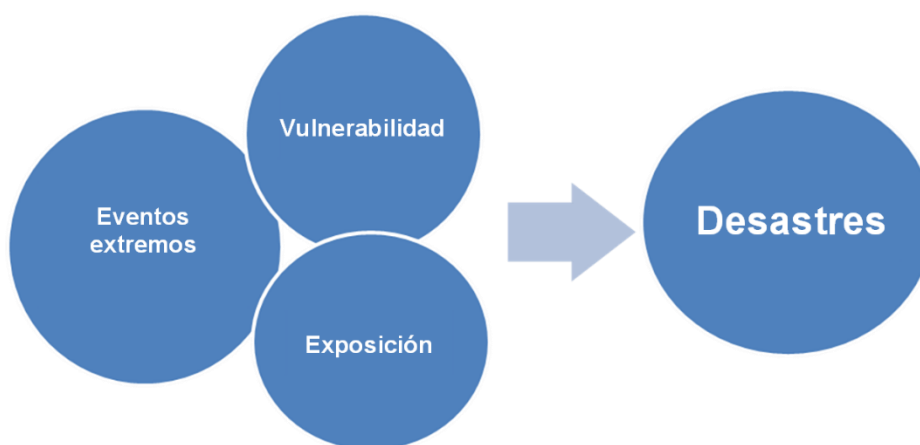


Fig. 4-2 La cadena perversa de eventos y situaciones que conduce al desastre
(Fuente: IPCC, 2011. *Special Report on Extremes Events*).

MITIGACIÓN

Con mitigación de los efectos del cambio climático nos referimos a las **acciones y estrategias diseñadas para reducir o limitar** las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros factores que contribuyen al calentamiento global, así como para disminuir su impacto en los sistemas naturales y humanos. El objetivo principal de la mitigación es ralentizar el ritmo del cambio climático y minimizar los efectos adversos en el medio ambiente, la salud humana, y las economías (IPCC, 2019) (UNFCCC, 2024-a).

ADAPTACIÓN

Con adaptación al cambio climático nos referimos a las acciones y estrategias implementadas para ajustar y modificar los sistemas, prácticas y comportamientos humanos de manera que se reduzcan los impactos negativos del cambio climático (IPCC, 2019) (UNFCCC, 2024-b).

4.2 EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS

Como se ha señalado previamente, estos eventos no pueden atribuirse de manera directa al cambio climático en curso. Sin embargo, su frecuencia, duración e intensidad han mostrado un aumento concomitante con el incremento de la temperatura global. En la Fig. 4-3 se muestra el aumento de los eventos meteorológicos extremos en Europa en el período 2021 – 2024.

En este contexto, es crucial realizar un seguimiento riguroso de estos fenómenos, ya que representan una amenaza para las comunidades, infraestructuras y territorios expuestos. El riesgo de desastre se incrementa si, además de estar expuestas, estas entidades son vulnerables y carecen de resiliencia. En la Fig. 4-4 se presenta la incidencia porcentual de cada tipo de evento extremo sobre el total de desastres ocurridos en Europa durante el período 2001-2020.

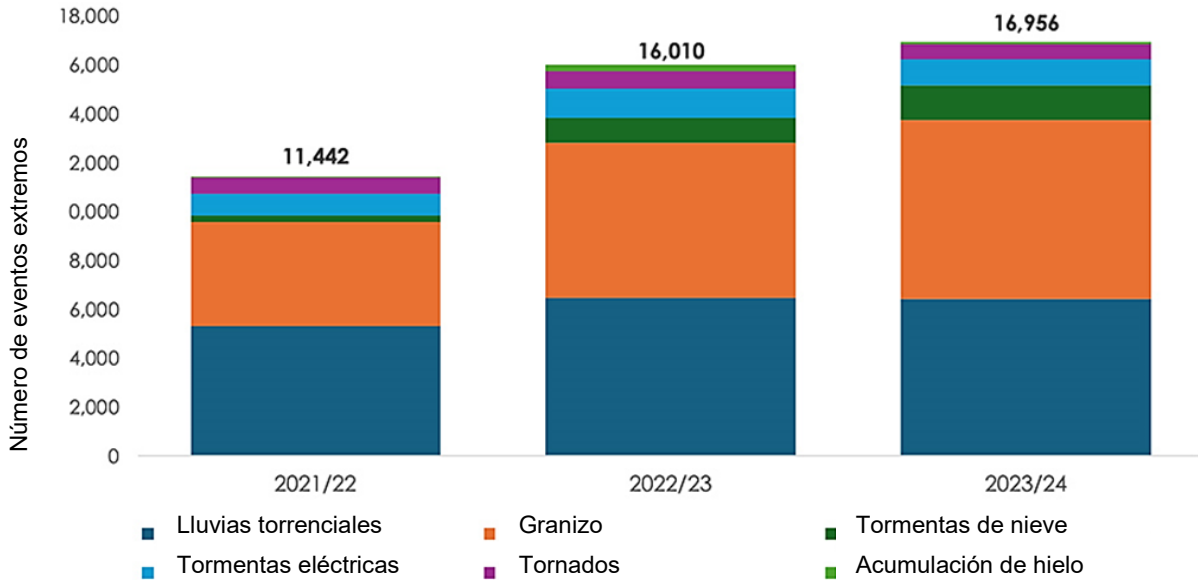


Fig. 4-3 Aumento de eventos meteorológicos extremos en Europa en el período 2021/2024 (Fuente: Inverto in Consultancy.uk, 2024)⁹³.

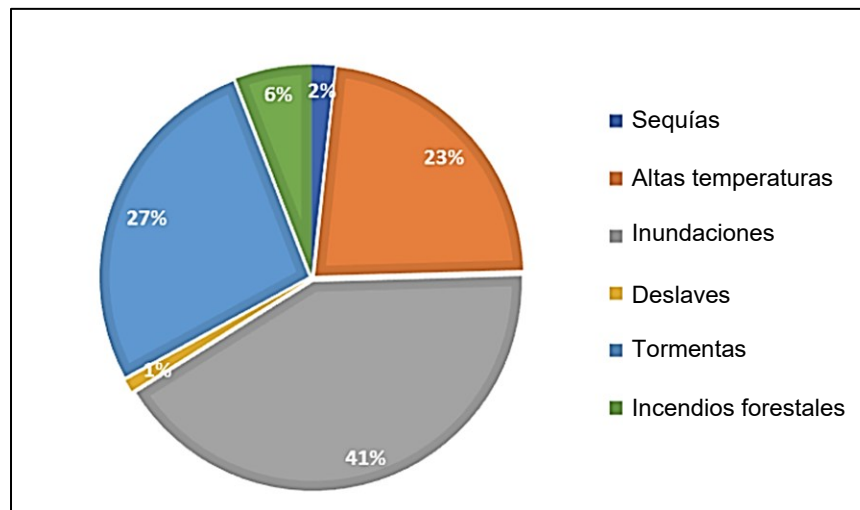


Fig. 4-4 Ocurrencia de desastres provocados por fenómenos meteorológicos en Europa según tipo, 2011-2020 (Fuente: "The OFDA/CRED International Disaster Database" Analysis & Writing by Regina Below and Joris van Loenhout Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), IRSS, UCLouvain)⁹⁴.

Los principales eventos meteorológicos observados durante la era industrial que pueden adquirir características extremas son las olas de calor y frío, las lluvias intensas, las sequías, los huracanes y los tornados.

⁹³ <https://www.consultancy.uk/news/37441/extreme-weather-events-in-europe-to-hit-food-supply-chains>

⁹⁴ <https://www.preventionweb.net/media/74027/download?startDownload=20240930>

Las olas de calor y frío extremos son fenómenos meteorológicos que afectan con especial intensidad a las regiones de clima templado, situadas en las latitudes medias del planeta. Estos eventos se caracterizan por una desviación significativa de las temperaturas respecto a los valores normales de la estación, y pueden tener graves consecuencias para la salud humana, los ecosistemas y la infraestructura.

4.2.1 OLAS DE CALOR INTENSO

Las olas de calor son causadas por la expansión de masas de aire caliente que produce el desplazamiento de grandes volúmenes de aire desde su zona de origen tropical hacia latitudes subtropicales y templadas, donde permanecen estacionarias durante varios días o semanas. En estas condiciones, el aire se calienta y se seca, lo que contribuye a la persistencia de temperaturas elevadas. La Fig. 4-5 muestra la ola de calor que afectó Europa en julio 2022⁹⁵.

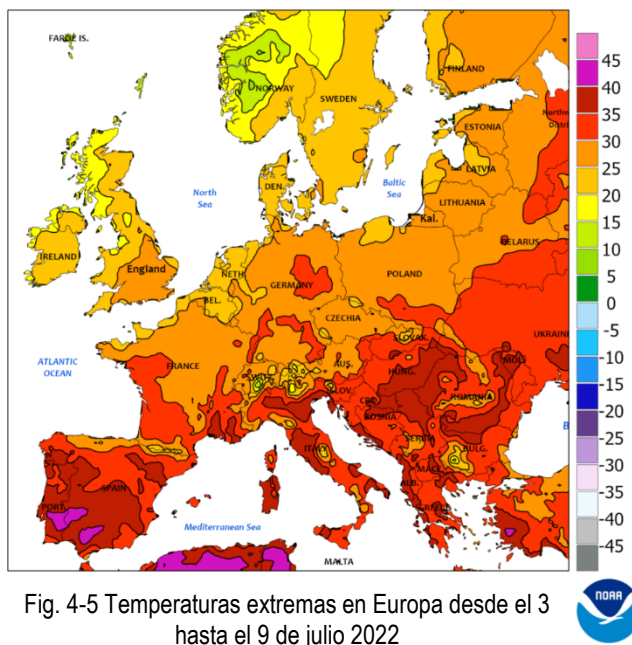


Fig. 4-5 Temperaturas extremas en Europa desde el 3 hasta el 9 de julio 2022

(Fuente: NOAA, 2022. Lic. Dominio Público)

Un ejemplo claro de estas alteraciones climáticas extremas es el registrado en julio de 2021, cuando se alcanzaron temperaturas inusualmente altas en el noroeste de América del Norte: 42 °C en Vancouver (Canadá), 42 °C en Seattle y 44 °C en Portland (EE.UU.). Estas temperaturas son inusuales para esas regiones, tradicionalmente más templadas, y demuestran la intensificación y expansión geográfica de las olas de calor.

De hecho, en los Estados Unidos, la frecuencia de las olas de calor ha aumentado tres veces en comparación con las registradas en la década de 1960. Además, la extensión geográfica afectada por estas olas ha crecido en un 25%, lo que refleja una mayor exposición de las áreas continentales a estas anomalías térmicas.

En Europa, el año 2023 fue un claro ejemplo de un "verano extendido" que se prolongó desde junio hasta septiembre. Durante este periodo, se presentaron fenómenos climáticos contrastantes, como olas de calor severas, que generaron elevados niveles de "estrés térmico" en gran parte del continente. En particular, en julio de 2023, el 41% de las regiones del sur de Europa se vieron afectadas por temperaturas extremas, lo que exacerbó los riesgos para la salud pública, la infraestructura y los ecosistemas.

4.2.2 OLAS DE FRÍO INTENSO

Las olas de frío, por otro lado, son el resultado de la incursión de masas de aire frío desde las regiones polares, impulsadas por anomalías en las corrientes en chorro (*jet streams*), que permiten el desplazamiento de aire frío hacia latitudes más bajas.

⁹⁵ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:July_2022_European_heat_wave_week_1.png

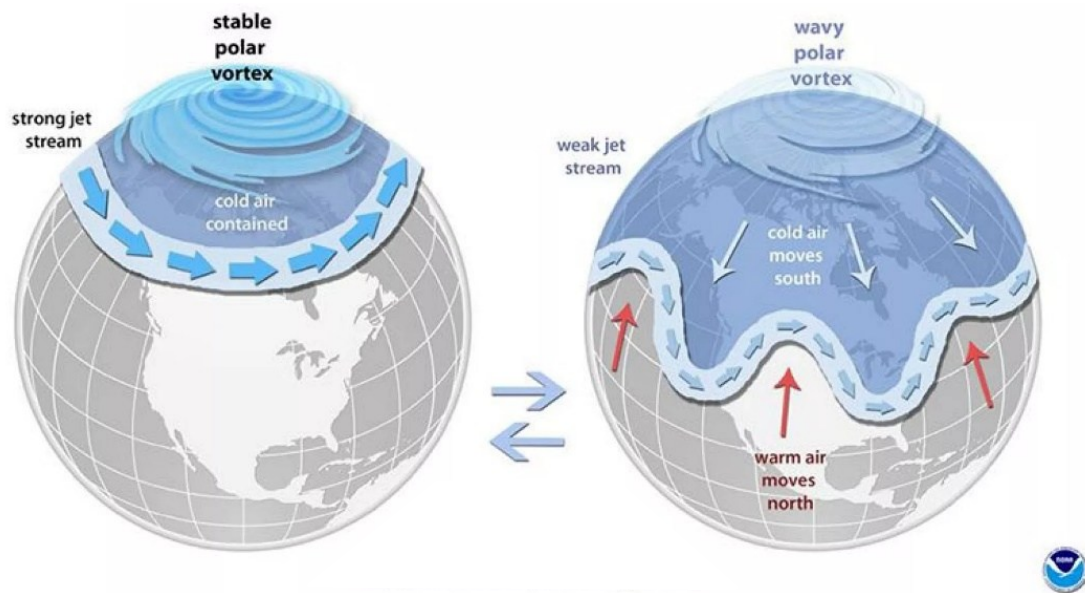


Fig. 4-6 El vórtice polar es un área extensa de bajas presiones y aire frío que rodea los polos Sur y Norte de la Tierra. El término *vortex* se refiere al flujo, opuesto al de las agujas del reloj, que mantiene el aire frío más cerca de los polos (izquierda). A menudo en invierno en el hemisferio norte el vórtice polar se vuelve más inestable y se expande, mandando aire ártico frío sobre las regiones templadas con la corriente de chorro (derecha)
(Fuente: NOAA, 2019. Lic. Dominio Público)⁹⁶.

En años recientes, estas olas de frío extremo impactaron diversas regiones del mundo. A continuación, se mencionan algunos de estos episodios:

- **Norteamérica en febrero de 2021.** Esta ola de frío, conocida como la “Tormenta de Invierno Uri”, causó un descenso abrupto de las temperaturas en gran parte de los Estados Unidos y México. En Texas, se registraron temperaturas de hasta $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$, las más frías en más de 30 años, lo que provocó apagones masivos y serios problemas de infraestructura. En Canadá, algunas partes como Saskatchewan alcanzaron temperaturas tan bajas como $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$, una de las más frías en cuatro años (INFOBAE, 2021).
- **Norteamérica en diciembre de 2022.** Este evento, conocido como una "bomba ciclónica", trajo temperaturas extremadamente bajas a diversas partes de los Estados Unidos. En Montana, las temperaturas descendieron hasta $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en Wyoming se registraron hasta $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este fenómeno afectó especialmente a los estados del norte, provocando cortes de energía y bloqueos en las carreteras debido a las fuertes nevadas (DW, 2022).
- **Olas de frío en China (2020-2021).** Durante el invierno de 2020-2021, tres grandes olas de frío azotaron el norte y este de China, causando temperaturas récord, con vientos fuertes y nevadas que afectaron regiones agrícolas clave como Xinjiang y Mongolia Interior. Las temperaturas en algunas áreas cayeron hasta $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zhang, 2021).

⁹⁶ <https://es.euronews.com/2019/01/31/la-historica-ola-de-frio-en-eeuu-consecuencia-del-calentamiento-global>

- **Olas de frío notables en Europa en los últimos años.**

Un ejemplo reciente y destacado fue la conocida como la "Bestia del Este" (*Beast from the East*) en 2018, que afectó gravemente al Reino Unido y Europa occidental (Fig. 4-7)⁹⁷. Este fenómeno meteorológico fue causado por una masa de aire polar continental proveniente de Siberia, que interactuó con la tormenta Emma. Las temperaturas cayeron hasta -10°C en algunos puntos del Reino Unido, con vientos gélidos que acentuaron la sensación térmica. En Escocia, por ejemplo, las nevadas alcanzaron hasta 50 cm de altura, causando graves interrupciones en el transporte y la vida diaria. Además, esta ola de frío fue acompañada por tormentas de nieve, afectando severamente a Irlanda, Escocia y gran parte de Inglaterra. Se reportaron vientos de hasta 110 km/h y temperaturas bajo cero durante varios días. La ola de frío también provocó cancelaciones de eventos deportivos y paralización del transporte (Wikipedia, 2024).



Fig. 4-7 Nevadas en *Regent's Park*, Londres durante la ola de frío *Beast from the East* en 2018

(Autor: Irid Escent, 2018. Lic. *Creative Commons BY-SA 2.0*)

Las olas de calor y frío extremas han ido aumentando progresivamente en las últimas décadas, lo que ha afectado significativamente el desarrollo climático de las regiones con estaciones bien definidas. Este cambio se manifiesta en inviernos más breves, el inicio anticipado de la primavera y veranos más prolongados e intensos, fenómeno conocido como **alteración de las estaciones** (o más precisamente, **adelantamiento o retraso de las estaciones**)⁹⁸. La alteración del ciclo estacional no solo impacta los ecosistemas, sino también la agricultura, la disponibilidad de agua y la salud humana.

Las olas de calor y frío, ya sea por sus efectos directos o por las alteraciones que provocan en los patrones estacionales, representan una amenaza significativa tanto para los ecosistemas como para la humanidad. El aumento en la frecuencia, intensidad y duración de estos eventos extremos vinculados al cambio climático incrementa considerablemente el riesgo de desastres naturales, especialmente en comunidades vulnerables y regiones expuestas.

En efecto, estas fluctuaciones térmicas severas pueden generar impactos profundos en la salud humana, como el aumento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias y hasta provocar la muerte de sujetos frágiles, según lo demuestran van Daalen et al. (2023) (Fig. 4-8). Además, la productividad agrícola, la disponibilidad de recursos hídricos y la biodiversidad pueden resultar seriamente afectadas.

El estrés térmico derivado de las olas de calor prolongadas puede también provocar la muerte masiva de especies, alterar la polinización, los ciclos reproductivos y migratorios de la fauna, contribuir a la desertificación de los suelos y exacerbar los incendios forestales y las sequías. Esto plantea desafíos críticos en términos de mitigación y adaptación, requiriendo una gestión ambiental robusta y estrategias de resiliencia para reducir la vulnerabilidad y proteger tanto a las poblaciones humanas como a los ecosistemas.

⁹⁷[https://es.wikipedia.org/wiki/Ola_de_fr%C3%ADo_en_Gran_Breta%C3%B1a_e_Irlanda_de_2018#/media/Archivo:Regent's_Park_in_the_%22Beast_from_the_East%22_snowstorm_\(25825404487\).jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Ola_de_fr%C3%ADo_en_Gran_Breta%C3%B1a_e_Irlanda_de_2018#/media/Archivo:Regent's_Park_in_the_%22Beast_from_the_East%22_snowstorm_(25825404487).jpg)

⁹⁸ https://es.wikipedia.org/wiki/Alteraci%C3%B3n_de_las_estaciones

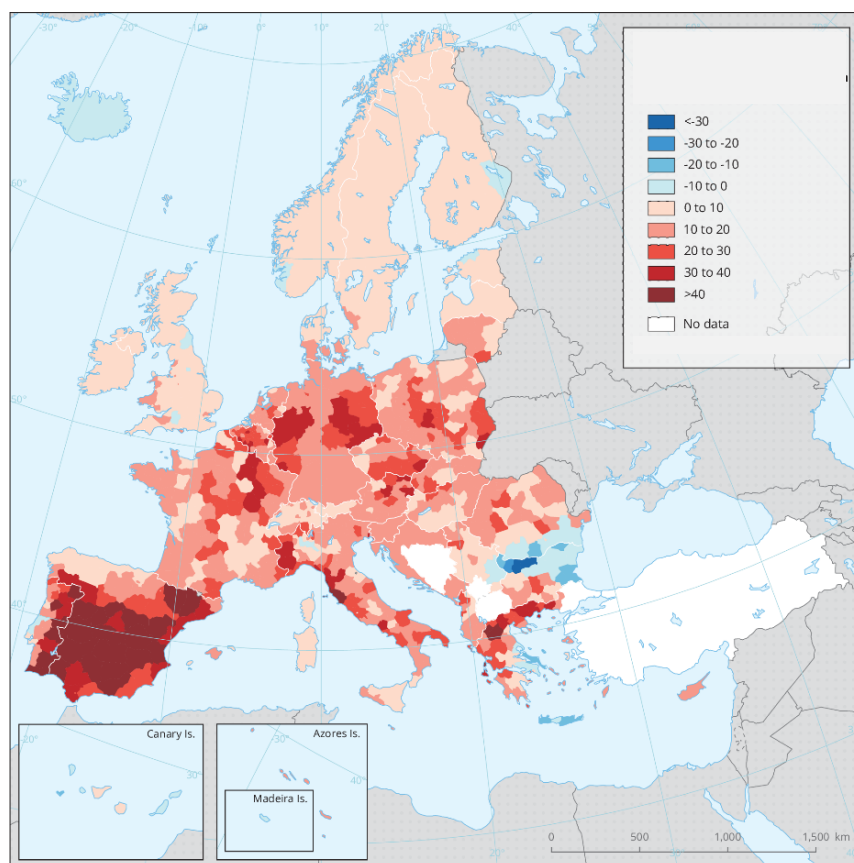


Fig. 4-8 Tendencias en la tasa de mortalidad atribuible a olas de calor en Europa en el período 2000-2020, calculada como promedio anual por cada millón de habitantes a lo largo de una década (Fuente: EEA, 2023)⁹⁹

4.2.3 LLUVIAS INTENSAS

Lluvias extremadamente intensas se definen como aquellas precipitaciones en las que la cantidad de agua caída es significativamente superior al promedio local. Estas lluvias suelen presentarse de manera continua, con una duración relativamente prolongada, y pueden abarcar áreas geográficas extensas. De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), una lluvia extremadamente intensa se caracteriza por tasas de precipitación que oscilan entre 8 y 50 mm/h.

Por su parte, las lluvias torrenciales son fenómenos meteorológicos de corta duración pero de alta violencia, donde la tasa de precipitación excede los 50 mm/h. Estas lluvias, descritas como verdaderos "estallidos" de agua, pueden estar acompañadas de fuertes vientos, adquiriendo connotaciones de tormentas.

Las causas de las lluvias extremas pueden atribuirse a diversos fenómenos atmosféricos, los cuales convergen en un mismo mecanismo fundamental: el ascenso de aire caliente y húmedo hacia zonas más frías y de menor presión en la atmósfera. Este ascenso se debe principalmente a la convección, un proceso mediante el cual el aire cálido, menos denso, se eleva por encima de capas de aire más frías y densas. A medida que el aire asciende, se enfría y el vapor de agua que contiene se condensa, formando nubes de gran desarrollo vertical, como los cumulonimbos, que son responsables de precipitaciones intensas.

⁹⁹ <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2023/articulos/las-olas-de-calor-y>

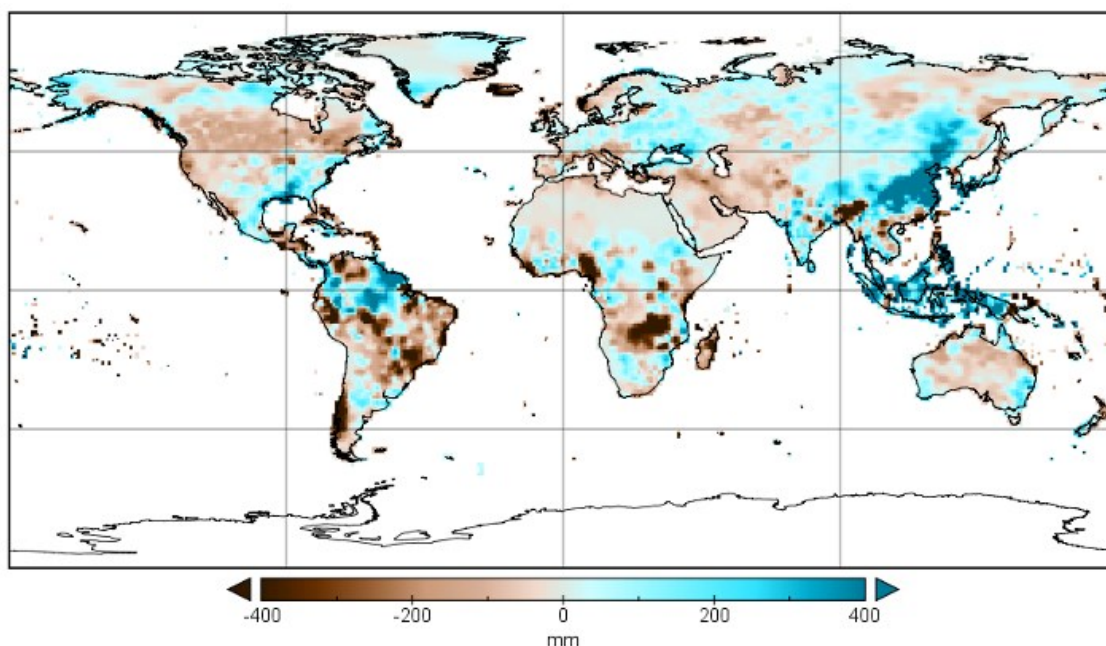


Fig. 4-9 Anomalías de precipitación total en el período de enero a septiembre de 2021 con respecto al período de referencia 1951-2000. El color azul indica precipitaciones superiores a la media y el color marrón precipitaciones inferiores a la media (Fuente: Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones, *Deutscher Wetterdienst*, Alemania)¹⁰⁰.

El calentamiento global contribuye significativamente al desarrollo de precipitaciones extremas. El aumento de la temperatura media global incrementa la evaporación desde el suelo, las plantas, los océanos y las aguas continentales, lo que eleva la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. Según la *American Association for the Advancement of Science (SciLine)*¹⁰¹, por cada aumento de 1 °C en la temperatura atmosférica, la concentración de vapor de agua se incrementa entre un 6 % y un 7 %. Esta mayor cantidad de vapor acumulado en la atmósfera se condensa y se libera en forma de tormentas, ya sea de lluvia o de nieve.

Las precipitaciones intensas y las tormentas representan una seria amenaza para la humanidad y su entorno, ya que pueden generar efectos extremadamente perjudiciales tanto de forma directa como indirecta, al ser causa de inundaciones. En un informe de 2021, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) señala, basándose en un análisis de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que entre 1970 y 2019 los desastres relacionados con el agua representaron el 50 % de todas las catástrofes globales. En ese período, las tormentas causaron la muerte de 577.232 personas, mientras que las inundaciones provocaron 58.700 fallecimientos (ONU-HABITAT, 2021).

Para citar solo algunos ejemplos recientes y significativos, en Europa, se ha observado un incremento en los desbordamientos fluviales, tanto en ríos de gran magnitud, como el Danubio (que experimentó una de sus peores inundaciones en más de cinco siglos en junio de 2013, tras intensas lluvias), como en pequeños cursos de agua. En Italia, por ejemplo, durante mayo de 2023, lluvias torrenciales en la región de Emilia-Romaña generaron inundaciones devastadoras, afectando comunidades enteras y causando graves pérdidas económicas. Estos eventos han sido provocados por precipitaciones que, en cuestión de horas, superan las acumulaciones normales de varios meses.

En América del Sur, un caso emblemático es el desastre del estado Vargas, en Venezuela (ocurrido entre el 15 y el 16 de diciembre de 1999). Durante una vaguada que se prolongó por más de una semana, los arroyos montañosos del estado se desbordaron, desencadenando deslaves

¹⁰⁰ <https://wmo.int/es/news/media-centre/estado-del-clima-en-2021-los-fenomenos-extremos-y-sus-principales-repercusiones>

¹⁰¹ <https://www.sciline.org/es/climate/cambio-climatico/lluvias-torrenciales-inundaciones-y-cambio-climatico/>

que arrastraron enormes volúmenes de rocas y lodo hacia el mar. Las consecuencias fueron catastróficas, destruyendo comunidades enteras y dejando miles de muertos y desaparecidos.

En América del Norte, el más reciente desbordamiento significativo del río Misisipi, registrado en abril de 2019, dejó a su paso graves consecuencias. Las inundaciones afectaron múltiples estados, incluidos Iowa, Missouri y Illinois, devastando tierras agrícolas, desplazando comunidades y ocasionando pérdidas económicas millonarias.

En Asia, India enfrenta anualmente importantes inundaciones, especialmente en su región noreste, como Assam. Estas son causadas principalmente por el desbordamiento de los ríos Brahmaputra y Ganges. En junio de 2022, por ejemplo, las inundaciones en Assam resultaron en más de 100 muertes y el desplazamiento de millones de personas, subrayando la vulnerabilidad de la región a este tipo de fenómenos climáticos recurrentes.

Al analizar en detalle los desastres que pueden provocar los episodios de lluvia extrema, podemos citar los siguientes:

- **Inundaciones:** Causadas por el desbordamiento de ríos y las mareas altas en zonas costeras.
- **Deslizamientos de tierra:** En terrenos montañosos o con pendientes pronunciadas, la saturación del suelo por agua o la disolución del permafrost puede desencadenar deslizamientos de rocas y avalanchas de lodo.
- **Interrupción de servicios públicos:** Los servicios de electricidad y agua son particularmente vulnerables, al igual que el transporte terrestre, marítimo y aéreo.
- **Pérdida de cultivos:** El anegamiento de terrenos agrícolas, junto con las lluvias torrenciales, vientos violentos y granizo, puede dañar gravemente los cultivos, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria.

Estos desastres no solo provocan pérdidas humanas y daños materiales a infraestructuras, viviendas, edificios, vehículos y carreteras, sino que también dañan cultivos, erosionan el suelo, contaminan las vías fluviales y sobrecargan la red de represas hidroeléctricas, resultando en un enorme coste económico y ambiental (Portillo, 2023) (SciLine, 2024).

La misión *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) y posteriormente la *Global Precipitation Measurement* (GPM) de la NASA han recolectado datos de lluvia y nieve desde el espacio durante más de dos décadas, y en 2019 los científicos pudieron acceder al registro completo de la información obtenida como un conjunto de datos unificado. GPM es una red internacional de satélites (Fig. 4-10) que proporciona observaciones globales de nueva generación sobre la lluvia y la nieve¹⁰².

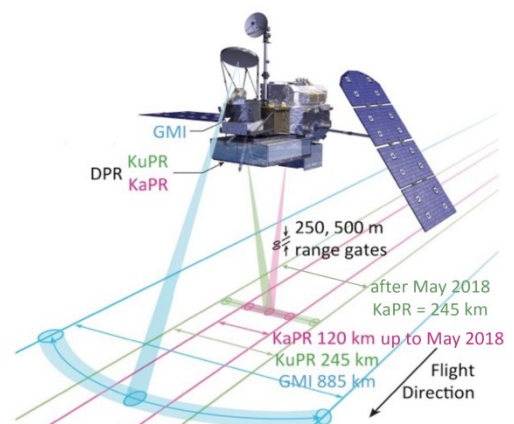


Fig. 4-10 Instrumentos del Observatorio Central de GPM: el radar de precipitaciones de doble frecuencia (DPR) y el sensor de imágenes de microondas (GMI) (Fuente: NASA, 2024).

4.2.4 SEQUÍAS

Con respecto a las **sequías**, se puede afirmar que el aumento de la temperatura global, junto con las alteraciones en los patrones de precipitación, promueve una mayor tasa de evaporación, lo que conduce a la disminución de la humedad en los suelos, provocando aridez de los suelos. Esto también incrementa la absorción de agua por parte de las plantas, incluso en regiones que anteriormente no se veían afectadas por estas condiciones. A medida que el clima

¹⁰² <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM>

se ha vuelto más cálido y los ciclos hídricos más irregulares, las sequías han ido extendiéndose en duración y frecuencia.

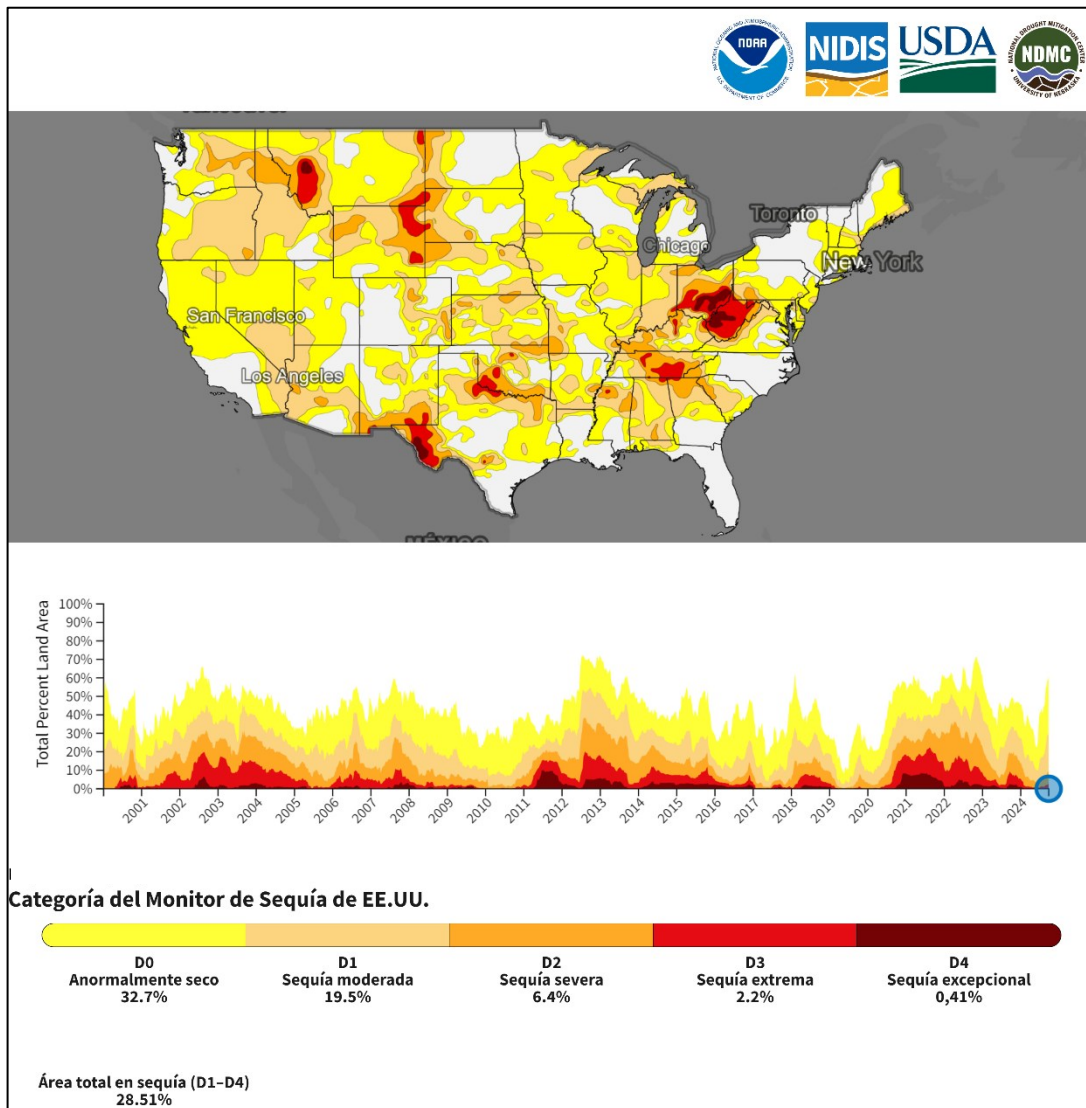


Fig. 4-11 Monitor de sequías de Estados Unidos (2000-presente)
(Fuente: NOAA, USDA, Centro Nacional de Mitigación de Sequías, 2024)¹⁰³.

Entre los ejemplos más destacados, se encuentra la sequía en la cuenca superior del río Missouri, la más extensa de los Estados Unidos, que experimentó un periodo de aridez prolongado entre 2000 y 2010. Durante este tiempo, las altas temperaturas desempeñaron un papel crucial en la persistencia de la sequía, la cual se prolongó durante una década. De manera similar, en Europa, la isla de Sicilia declaró en 2023 un "estado de catástrofe natural" debido a la drástica reducción del nivel de agua en sus embalses. Según las autoridades locales, enero fue el quinto mes consecutivo con precipitaciones por debajo del promedio histórico, y la isla enfrentó cerca de ocho meses de aridez casi total, lo que fue calificado por el Observatorio ANBI de Recursos Hídricos como el semestre más seco de los últimos 100 años.

De igual manera, la disminución del manto de nieve en varias regiones del mundo ha exacerbado el riesgo de sequía. Muchas de estas áreas dependen del deshielo estacional como una fuente vital de agua. Eventos como las olas de calor en primavera, que provocaron un deshielo sin precedentes en el oeste de los Estados Unidos en 2021, pueden acelerar este proceso,

¹⁰³ <https://www.drought.gov/historical-information?dataset=0&selectedDateUSDM=20240924>

intensificando las sequías subsiguientes. El aire seco, característico de las olas de calor, también aumenta la sublimación, un proceso en el cual el agua pasa directamente de estado sólido a vapor sin pasar por el líquido, lo que reduce la cantidad de escorrentía incluso en años con mantos de nieve normales.

Este fenómeno climático multifactorial está profundamente influido por la interacción entre la temperatura, los patrones de precipitación, y los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos como el deshielo, resultando en una intensificación de las condiciones de sequía en muchas partes del mundo.

Las amenazas que derivan de las sequías son de tipo económico, social y ambiental, algunas de las cuales se citan a continuación.

4.2.4.1 Daños económicos causados a la agricultura y ganadería

Estas ramas de la economía son las primeras y la más expuestas a los daños de la sequía. Los efectos económicos adversos, incluyen la disminución de ingresos para los agricultores y el aumento de precios de los alimentos. La industria alimentaria se ve directamente afectada, ya que gran parte de sus materias primas provienen de la agricultura, que puede sufrir contracciones e inestabilidad en la producción durante una sequía. Esto impacta negativamente a diversos sectores de servicios relacionados y puede contribuir a la inseguridad alimentaria en regiones ya vulnerables. Una serie de factores pueden ser el origen de los daños económicos a la agricultura y ganadería. A saber:

- **Perdidas de cosechas** anuales y perennes, así como la disminución de su calidad (Fig. 4-12)¹⁰⁴.

- **Reducción de la producción:** La escasez de agua limita la disponibilidad de humedad en el suelo, lo que conduce a una disminución en la productividad de los cultivos. Los rendimientos de cultivos esenciales como el maíz, el trigo, la soja, las frutas y hortalizas pueden verse severamente afectados, lo que resulta en cosechas menores.

Además, los países afectados se ven obligados a importar más alimentos, lo que incrementa los costos, tanto para los consumidores como para el país en general.

- **Estrés hídrico** en las plantas: La falta de agua genera estrés hídrico en las plantas, lo que puede llevar a un retraso en el crecimiento, un aumento en la susceptibilidad a plagas y enfermedades, los daños causados por la fauna salvaje a las cosechas y en última instancia, a la muerte de las plantas. Esto también puede afectar la calidad de los productos agrícolas.
- **Aumento de costos:** Los agricultores a menudo recurren a soluciones costosas, como la irrigación artificial, para mitigar los efectos de la sequía. Esto no solo incrementa los



Fig. 4-12 Cultivo de maíz afectado por la sequía en Texas en 2013
(Autor: Bob Nichols – USDA, 2013. Lic. Dominio Público).

¹⁰⁴ <https://www.usda.gov/media/blog/2014/02/11/southern-plains-climate-hub-seeks-address-tres-huge-problems>

costos operativos, sino que también puede llevar a un uso insostenible de los recursos hídricos.

- **Impacto en la ganadería:** La sequía afecta la disponibilidad de forrajes y agua para el ganado, lo que puede resultar en una disminución en la salud animal, una reducción en la producción de leche y carne, y en la mortalidad del ganado. Esto también puede aumentar los costos de alimentación, ya que los agricultores deben buscar fuentes alternativas.
- **Silvicultura:** Las sequías producen disminución en la producción de madera, además de otros y significativos daños ecológicos. A esto se suman efectos como el crecimiento más lento y la pérdida directa de árboles, particularmente los ejemplares jóvenes, lo cual agrava la situación, ya que son estos los que asegurarían la regeneración futura del bosque y la sostenibilidad de la producción.
- **Piscicultura:** La disminución de la disponibilidad de agua en los estanques o áreas de producción produce enfermedades y mortandad de los peces cultivados.

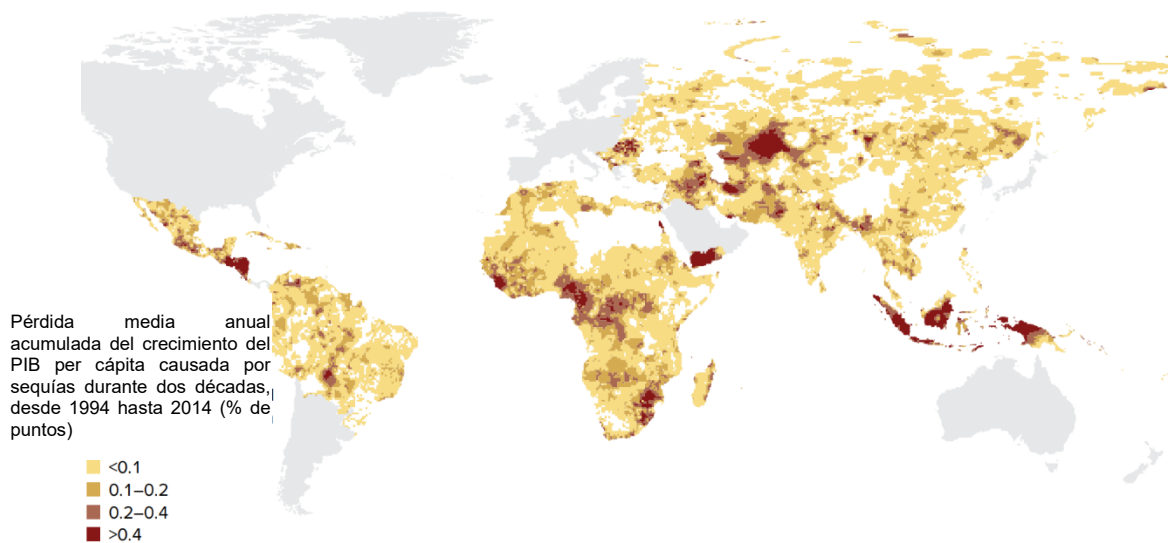


Fig. 4-13 Mapa del costo económico causado por las sequías, 1994-2014
(Fuente: *World Bank*)¹⁰⁵.

4.2.4.2 Daños económicos indirectos causados a la industria y a los servicios

La producción industrial y la generación de servicios también pueden verse perjudicados por las sequías prolongadas (Fig. 4-13). Entre los factores que pueden incidir en este sentido citaremos:

- **Energía:** La reducción en el suministro energético es común durante las sequías debido a las restricciones en la producción, particularmente en centrales hidroeléctricas, que dependen del agua. Esto obliga a sustituir fuentes energéticas por combustibles más caros, lo que incrementa los costos de producción y distribución de energía.
- **Suministro de agua:** La sequía eleva los costos asociados al suministro de agua. Los gastos aumentan debido al transporte del recurso a las áreas afectadas y al desarrollo de nuevos recursos hídricos o soluciones suplementarias, como plantas de desalinización o embalses, para garantizar el abastecimiento.

¹⁰⁵<https://documents1.worldbank.org/curated/en/099640306142317412/pdf/IDU03b9849a60d86404b600bc480bef6082a760a.pdf>

- **Turismo:** La sequía puede tener un impacto considerable en la actividad turística. La escasez de agua y la degradación del paisaje natural disminuyen la atracción de los destinos, lo que reduce el turismo tanto a nivel nacional como internacional. Esta caída en el turismo se traduce en pérdidas económicas significativas, especialmente en países cuya economía depende en gran medida de este sector.
- **Comercio:** La disminución en la producción de materias primas, como los alimentos, afecta negativamente el comercio, en particular en las exportaciones. Los países afectados deben compensar la pérdida de producción interna aumentando las importaciones, lo que genera un gasto adicional, particularmente en productos alimentarios.
- **Finanzas:** El sector financiero también sufre los efectos de la sequía, ya que la reducción en la producción agrícola y el aumento en los precios de alimentos y energía impulsan la inflación. Este entorno financiero desfavorable puede llevar a la quiebra de agricultores y productores, retiradas de inversiones, y la suspensión de mejoras en las condiciones de producción. Estos efectos pueden desestabilizar gravemente la economía nacional, dependiendo de la magnitud de la sequía y sus impactos.

4.2.4.3 Impactos ambientales

- **Escasez de agua:** La escasez de agua afecta los recursos hídricos y complica su abastecimiento, por lo que es esencial medirlos y calcular su balance en diversas condiciones. Además, en tiempos de sequía, la calidad del agua se vuelve crítica, especialmente en embalses y lagos, lo que requiere una evaluación detallada. La disminución de los flujos de agua produce también daños al hábitat de los peces, con consecuente pérdida de cardúmenes y otros organismos acuáticos (Fig. 4-14)¹⁰⁶.



Fig. 4-14 Embalse de Barrios de Luna, España, durante la sequía de 2017
(Autor: Pablox. Lic. *Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International*)

- **Degradación del suelo:** Las sequías pueden provocar la degradación del suelo, incluyendo la erosión y la pérdida de nutrientes. La falta de vegetación debido a la falta de agua expone el suelo a la erosión eólica e hídrica, lo que reduce su capacidad para retener agua en el futuro.
- **Incendios forestales:** La reducción de la humedad en los suelos, la vegetación y la atmósfera crea un ambiente altamente inflamable, ya que las plantas se secan, el material vegetal muerto se acumula y el contenido de agua en los árboles y arbustos disminuye. Como resultado, cualquier fuente de ignición, ya sea natural (como rayos) o humana, puede iniciar un incendio más fácilmente.

¹⁰⁶ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ValleGrandeLunaPuente.jpg>

- **Daño a las especies animales:** Este es un fenómeno que afecta gravemente la estabilidad de los ecosistemas. Uno de los principales impactos es la reducción y degradación del hábitat de la fauna terrestre y acuática, que limita el espacio y los recursos disponibles para su supervivencia. Esta alteración ambiental obliga a muchas especies a migrar hacia nuevas áreas en busca de condiciones más favorables, lo que provoca la concentración de la fauna en determinados lugares, lo que a su vez genera presión sobre esos ecosistemas y recursos limitados. Finalmente, estas dinámicas contribuyen a una pérdida significativa de biodiversidad, ya que algunas especies no logran adaptarse a los cambios, lo que incrementa su vulnerabilidad y riesgo de extinción.
- **Impactos sobre las plantaciones forestales:** La sequía es el principal factor abiótico que afecta negativamente a las especies forestales, aunque sus efectos no son tan visibles para el público en comparación con los daños a la agricultura. Los bosques, fundamentales para la ecología global, son esenciales tanto para las regiones locales como para el mundo. Un déficit prolongado de agua puede causar graves impactos en los ecosistemas forestales, como la defoliación, el deterioro de las copas, la reducción en el grosor de los anillos de crecimiento y una menor producción de madera. Además, los árboles debilitados por la sequía son más vulnerables a plagas e infecciones de insectos y hongos. Cuando los bosques son cultivados
- **Alteración de los ciclos agrícolas:** Las sequías pueden forzar a los agricultores a modificar sus prácticas agrícolas, incluyendo la selección de cultivos más resistentes a la sequía y el ajuste de las fechas de siembra y cosecha. Esto puede llevar a una pérdida de biodiversidad agrícola y a un cambio en los ecosistemas locales.

4.2.4.4 Consecuencias sociales

Los impactos sociales de la sequía son amplios y afectan profundamente a las comunidades, aunque a menudo no se consideran en toda su magnitud. Las sequías exacerban los conflictos, tanto entre los usuarios de los recursos hídricos como en el ámbito político y de gestión de los recursos. Otros conflictos sociales pueden surgir a medida que las tensiones aumentan. Las sequías provocan un empeoramiento general en la calidad de vida, con un incremento de la pobreza, migraciones masivas, pérdida de valores estéticos y una disminución de actividades recreativas, lo que afecta el estilo de vida de las personas. Estos impactos pueden observarse en la salud pública, el empleo, la política y las relaciones internacionales.

- **Salud pública:** Durante las sequías, se incrementan las enfermedades cardiovasculares, alergias e infecciones respiratorias debido al aumento de la contaminación del aire por el polvo. La tasa de mortalidad en las regiones afectadas aumenta durante las sequías.
- **Aspectos socioeconómicos:** La capacidad socioeconómica de una región disminuye, lo que puede llevar al desempleo y a la reducción del nivel de vida, especialmente en áreas desfavorecidas.
- **Política:** La sequía también puede generar inestabilidad política, especialmente en regiones fronterizas, lo que podría derivar en conflictos internacionales. Además, el deterioro de la seguridad pública, la calidad de vida y las desigualdades en la distribución de ayuda humanitaria son preocupaciones importantes.
- **Migraciones:** Un aspecto crítico es la migración, que se produce cuando la población busca alimentos y agua. Las áreas rurales pierden recursos humanos valiosos para su desarrollo, mientras que las zonas urbanas reciben un flujo de migrantes que presiona la infraestructura social, incrementando la pobreza y el malestar social.

- **Hambrunas:** Estas son causas de malnutrición y mortalidad, creando a veces crisis humanitarias de enormes proporciones.

Para finalizar esta reseña sobre los impactos de las sequías, se destaca que este fenómeno ha sido el principal causante de mortalidad a nivel mundial entre 1970 y 2019, con un total de 650,000 muertes registradas (ONU-HABITAT, 2021). En cuanto a las pérdidas económicas en los Estados Unidos, se estima que las sequías generan un costo anual de entre 6 y 8 mil millones de dólares. El período más severo en términos económicos se produjo entre 1987 y 1989, cuando las pérdidas alcanzaron los 39 mil millones de dólares, convirtiéndose en el desastre natural más costoso en la historia del país, solo superado por los daños ocasionados por el huracán Katrina en 2005 (Gallardo Ballat, 2020).

4.2.5 HURACANES

Los huracanes son entre los fenómenos meteorológicos más violentos conocidos por el ser humano, quizás igualados en fuerza destructiva por los tornados. El término “huracán”¹⁰⁷ se refiere a un ciclón tropical cuyos vientos han alcanzado velocidades sostenidas superiores a los 74 km/h y que en algunos casos extremos han alcanzado velocidades de 250 km/h y más. Estos vientos giran en forma de espiral alrededor de un centro de baja presión conocido como el “ojo” del huracán. Este ojo es una región de relativa calma, caracterizada por vientos moderados y poca nubosidad. Sin embargo, alrededor del ojo se encuentra la “pared del ojo”, donde se concentran los vientos más fuertes, las tormentas eléctricas y las precipitaciones más intensas (**Error! Reference source not found.**)¹⁰⁸.

En el hemisferio norte, los vientos de un huracán giran en sentido antihorario, mientras que en el hemisferio sur giran en sentido horario, debido al efecto de la fuerza de Coriolis. Este fenómeno provoca que el sistema adquiera una estructura a espiral¹⁰⁹.

Los huracanes se desplazan a velocidades que varían en función de la latitud: en general, a mayor latitud, mayor es la velocidad de traslación. Estadísticamente, las velocidades de desplazamiento más comunes oscilan entre los 25 y los 55 km/h. No obstante, se han registrado casos excepcionales, como el huracán Emily en 1987, cuyo desplazamiento alcanzó los 110,48 km/h. Las velocidades de desplazamiento bajas en los huracanes suelen ser particularmente perjudiciales, ya que las condiciones extremas de vientos, relámpagos y precipitaciones intensas persisten durante más tiempo sobre una misma área. Esto incrementa el tiempo de exposición de la región afectada a fuerzas destructivas, lo que aumenta significativamente el riesgo de daños severos en infraestructuras, inundaciones y otros efectos adversos. A mayor duración del huracán en una zona, mayor es la cantidad de energía destructiva que se libera sobre el territorio, amplificando las consecuencias del evento meteorológico.

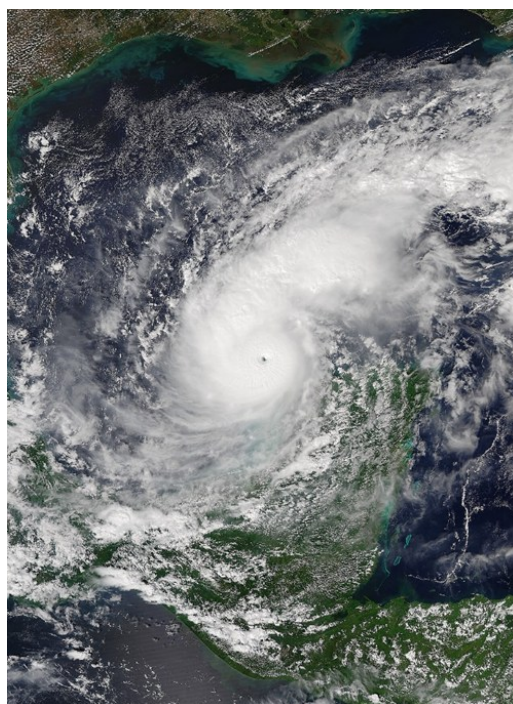


Fig. 4-15 El Huracán Milton (Fuente: VIIRS imagery NOAA-21 Satellite - EOSDIS Worldview, 2024. Lic. Dominio Público)

¹⁰⁷ El término “huracán” se utiliza para referirse a los ciclones tropicales que se desarrollan en el Atlántico Norte, el noreste del Pacífico y el sur del Pacífico. En cambio, el término “tifón” se emplea para los que se forman en el noroeste del Océano Pacífico. Aunque reciben nombres diferentes según la región, ambos términos describen el mismo fenómeno meteorológico.

¹⁰⁸ https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Milton_2024-10-07_1920Z.jpg

¹⁰⁹ Para aquellos interesados en profundizar en la Fuerza de Coriolis, les recomendamos visitar el siguiente sitio: <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/cinematica/sabiasrot2.htm>

Los huracanes son sistemas meteorológicos intensos que se forman sobre océanos tropicales cuando se combinan ciertas condiciones atmosféricas y oceánicas. El proceso de formación de un huracán, conocido como **ciclogénesis tropical**, sigue estos pasos clave:

- **Agua oceánica caliente:** Los huracanes se desarrollan sobre aguas oceánicas cálidas, generalmente por encima de los 26.5 °C. El calor del océano y la humedad que se evapora proporcionan la energía para el desarrollo del huracán.
- **Aire ascendente:** El aire sobre el océano se calienta y sube. A medida que el aire húmedo asciende, se enfría y el vapor de agua se condensa, liberando calor latente, que calienta aún más el aire y permite que suba más rápidamente, reforzando el proceso.
- **Formación de nubes:** El aire ascendente y la condensación del vapor forman grandes cúmulos de nubes. A medida que más aire sube desde la superficie, el área de baja presión debajo de estas nubes se intensifica.
- **Vientos convergentes:** La baja presión creada en la superficie atrae aire de las áreas circundantes. A medida que los vientos convergen hacia el centro de la baja presión, comienzan a girar debido al efecto Coriolis. Este giro produce el movimiento ciclónico característico.
- **Fortalecimiento:** A medida que el aire húmedo y cálido continúa ascendiendo y se libera más calor, el sistema se organiza y se intensifica. Si las condiciones son favorables (como estabilidad del viento y humedad adecuada), el huracán continúa fortaleciéndose mientras se mantenga sobre aguas cálidas y no encuentre factores inhibidores, hasta desarrollar el típico ojo.

Una vez que el huracán se mueve sobre tierra o sobre aguas más frías, el suministro de energía se interrumpe, y el huracán comienza a debilitarse.

Haciendo referencia a la Fig. 4-16, se observa el proceso de formación y desarrollo de un huracán característico del Océano Atlántico. Su formación inicia como una “Perturbación Tropical” en el área de las Islas Azores, siendo esta guiada hacia el oeste por una vasta zona de alta presión conocida como el “Anticiclón Subtropical del Atlántico”. A medida que el ciclón se desplaza sobre el océano, se fortalece progresivamente, convirtiéndose primero en una “Depresión Tropical”, luego en una “Tormenta Tropical” y, finalmente, adquiere la intensidad de Huracán antes de impactar las islas antillanas y las Bermudas.



Fig. 4-16 El Sistema de Alta Presión del Atlántico (*Subtropical Ridge* = Anticiclón Subtropical) guía con un gran 'río' de aire o vientos a los ciclones tropicales hacia el oeste y noroeste (Fuente: NOAA en EcoExploratorio, Museo de Ciencias de Puerto Rico, 2024)¹¹⁰.

¹¹⁰ <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/huracanes/que-son-los-huracanes/>

Con relación a los términos utilizados en el párrafo anterior, se puede clasificar un ciclón tropical cómo:

- **Depresión tropical** - Un sistema organizado de nubes, tormentas eléctricas y vientos sostenidos con un máximo de 38 mph o menos.
- **Tormenta tropical** - Un sistema organizado de fuertes tormentas y vientos sostenidos de entre 39 y 73 mph.
- **Huracán** - Un intenso sistema meteorológico tropical de fuertes vientos sostenidos de 74 mph o superior.

A su vez, los huracanes se categorizan mediante la Escala Saffir-Simpson reproducida en la Tabla 4-1, la cual describe también el posible impacto del huracán según su categoría.

Tabla 4-1 Escala Saffir-Simpson¹¹¹
(Fuente: NOAA)¹¹².

Categoría	Vientos sostenidos	Tipos de daños causados por los vientos de un huracán
1	119-153 km/h (74-95 mph, 64-82 kt)	Vientos muy peligrosos causarán algunos daños: Las viviendas bien construidas podrían sufrir daños en los techos, tejas, revestimientos de vinilo y canaletas. Grandes ramas de los árboles se romperán y los árboles con raíces poco profundas podrían ser derribados. Es probable que haya daños extensos en líneas y postes eléctricos, lo que podría resultar en cortes de electricidad que duren de unos días a varias jornadas.
2	154-177 km/h (96-110 mph, 83-95 kt)	Vientos extremadamente peligrosos causarán daños considerables: Las viviendas bien construidas podrían sufrir daños importantes en los techos y revestimientos. Muchos árboles con raíces poco profundas se romperán o serán arrancados de raíz, bloqueando numerosas carreteras. Se espera la pérdida casi total del suministro eléctrico, con apagones que podrían durar desde varios días hasta semanas.
3 (mayor)	178-208 km/h (111-129 mph, 96-112 kt)	Se producirán daños devastadores: Las viviendas bien construidas pueden sufrir daños importantes o pérdida de la cubierta del techo y los extremos de las fachadas. Muchos árboles serán derribados, bloqueando numerosas vías. La electricidad y el suministro de agua no estarán disponibles durante varios días o semanas tras el paso de la tormenta.
4 (mayor)	209-251 km/h (130-156 mph, 113-136 kt)	Se producirán daños catastróficos: Las viviendas bien construidas pueden sufrir graves daños, con la pérdida de la mayor parte de la estructura del techo y/o de algunas paredes exteriores. La mayoría de los árboles serán derribados y los postes eléctricos caerán. Los árboles y postes caídos aislarán áreas residenciales. Los cortes de electricidad durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte del área no será habitable durante semanas o meses.
5 (mayor)	252 km/h o más (157 mph o más, 137 kt o más)	Se producirán daños catastróficos: Un alto porcentaje de viviendas quedará destruido, con el colapso total del techo y las paredes. Los árboles caídos y los postes eléctricos aislarán áreas residenciales. Los cortes de electricidad durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte del área no será habitable durante semanas o meses.

¹¹¹ Vea el video (1) en la sección "Animaciones y videos"

¹¹² <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>

4.2.6 TORNADOS¹¹³

Un tornado es una columna de aire en rotación que genera vientos con velocidades que típicamente oscilan entre los 100 y 300 km/h, aunque se han registrado casos excepcionales donde los vientos superan los 450 km/h (Fig. 4-17)¹¹⁴. Un ejemplo notable ocurrió en Oklahoma, EE. UU., en 1999, donde se alcanzaron velocidades de hasta 512 km/h. Su característica forma de "embudo" se extiende desde la base de una nube de tormenta, generalmente un cumulonimbo, hasta la superficie terrestre o marina (en cuyo caso se denomina tromba marina).



Fig. 4-17 Tornado EF5 acercándose a Elie Manitoba (Autor: Justin Hobson, 2007. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*).

La rotación del tornado está influenciada por la fuerza de Coriolis, lo que determina su sentido: antihorario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur (Fig. 4-18).

La parte ancha del embudo del tornado es su parte superior, con diámetros que varían desde unos pocos metros hasta los 2 o 3 kilómetros, mientras que su parte inferior, que usualmente toca el suelo, deja una estela de destrucción durante su desplazamiento sobre una estrecha franja de territorio. La trayectoria del tornado es errática, y su velocidad de desplazamiento varía entre los 16 y los 48 km/h, con picos documentados de hasta 112 km/h. Aunque de corta duración en comparación con otros fenómenos atmosféricos intensos, como los huracanes, los tornados son extremadamente violentos. Usualmente duran entre 5 y 30 minutos, aunque en casos excepcionales pueden persistir durante varias horas (Meteopedia, 2024).

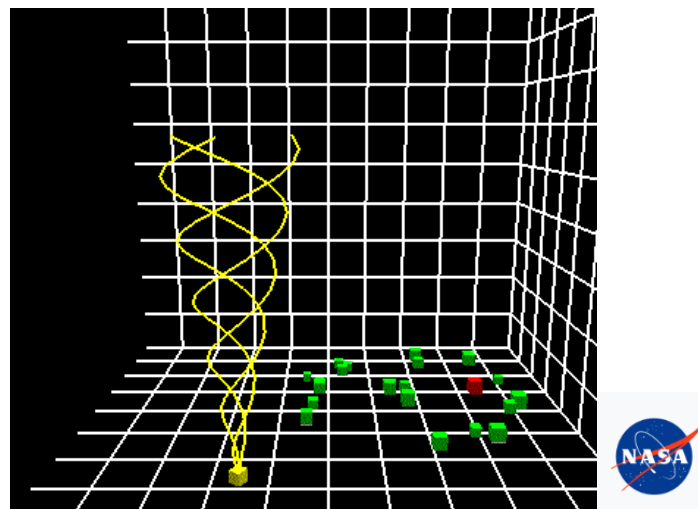


Fig. 4-18 CAGE simulación de un tornado (Fuente: NASA, 2006. Lic. *Public Domain*)

¹¹³ Vea el video (12) en la sección "Animaciones y videos"

¹¹⁴ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5943918>

Los tornados pueden ocurrir en casi todos los continentes, con excepción de la Antártida, donde históricamente no ha habido registros de este tipo de evento. Se observan principalmente en latitudes comprendidas entre los 20 y los 50 grados, a ambos lados del ecuador terrestre.

Los Estados Unidos se ven particularmente afectados por este tipo de fenómeno adverso, con un promedio anual de 1.200 eventos registrados entre 1999 y 2023¹¹⁵. Las zonas más interesadas incluyen el estado de Florida y la región conocida como "Corredor de los Tornados" (*Tornado Alley*), que abarca varios estados en el centro y sur del país. Esta área es propicia para la formación de tornados debido a las condiciones atmosféricas particulares, incluyendo la interacción entre masas de aire cálido y húmedo del Golfo de México y aire frío procedente del norte.

En Europa se ha registrado entre 2011 y 2023 un promedio de 256 tornados por año, mientras que en Canadá se estima una ocurrencia de aproximadamente 100 tornados por año, aunque estos datos podrían subestimar la frecuencia real debido a la probable formación de tornados no detectados en sus vastas zonas despobladas.

En Suramérica, se producen principalmente en el llamado "Pasillo de los Tornados", que comprende una vasta región comprendida entre Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. En términos de intensidad y frecuencia de tornados, el "Pasillo de los Tornados" de América del Sur es considerado el segundo más activo del mundo, después del "*Tornado Alley*" en Estados Unidos, aunque con una menor densidad de tornados en comparación con el norteamericano. Sin embargo, la disponibilidad de datos estadísticos precisos sobre la frecuencia anual de tornados en América del Sur sigue siendo limitada, lo que dificulta una comprensión completa de la magnitud de estos fenómenos en la región (Chinchar, 2022) (Chinchar, 2023). La gran mayoría de los tornados se forma sobre tierra firme y en las zonas costeras, a diferencia de los huracanes, que se desarrollan sobre los océanos. Eventualmente, algunos tornados pueden desplazarse desde tierra hacia el mar, pero son relativamente raros los casos en que un tornado se origina directamente sobre el agua. Cuando esto ocurre, el fenómeno se denomina "tromba marina".

La formación de un tornado requiere la combinación de múltiples variables atmosféricas, lo que hace que este evento tenga una baja probabilidad de ocurrencia en términos absolutos. Sin embargo, existen factores comunes en la génesis de los tornados más intensos, como la presencia de una "supercelda" de tormenta en un cumulonimbo (Fig. 4-20)¹¹⁶.

Los tornados que se generan a partir de estas estructuras son conocidos como "tornados de supercelda", y serán el objeto de este análisis.

Una supercelda está constituida por una nube de tipo cumulonimbo, dentro de la cual se forma una columna de aire cálido y húmedo que asciende en espiral; este sistema rotacional es conocido como

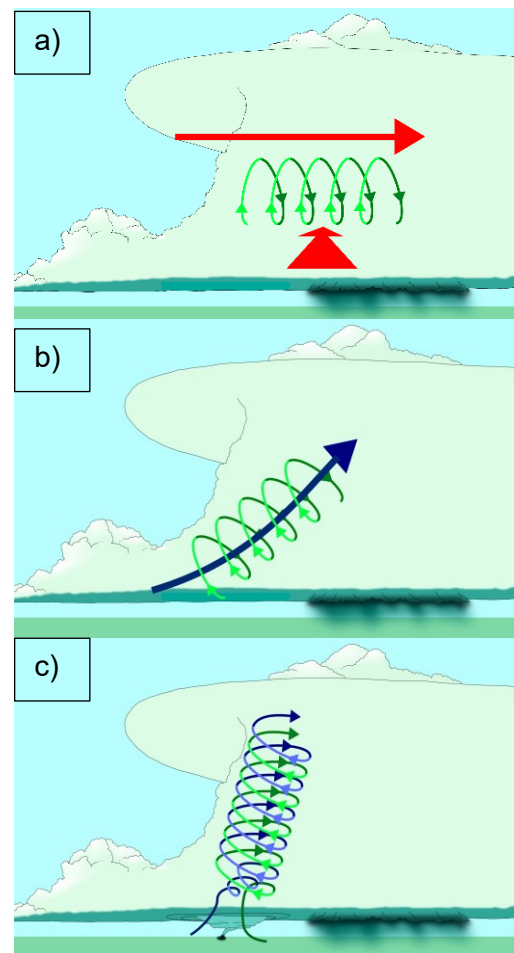


Fig. 4-19 Formación de un mesociclón. a) La cizalladura del viento produce la rotación horizontal del aire. b) La corriente ascendente cambia la inclinación de rotación. c) Formación del vórtice. (Autor: Vanessa Ezekowitz, 2008. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*).

¹¹⁵ https://www.spc.noaa.gov/wcm/permonth_by_state/

¹¹⁶ https://es.wikipedia.org/wiki/Supercelda#/media/Archivo:Supercell_side_view_es.png

“mesociclón” y su presencia es detectada mediante radares meteorológicos, en particular con radares Doppler.

El mesociclón se desarrolla cuando una masa de aire cálido y húmedo se encuentra en la parte baja de la nube cumulonimbo, mientras que una masa de aire frío y seco se ubica en las capas superiores. Esta configuración genera inestabilidad atmosférica debido a un fuerte gradiente de temperatura y presión, lo que activa movimientos convectivos ascendentes y descendentes. Además, la presencia de “cizalladura del viento” (vientos que cambian de dirección y/o velocidad con la altura) es clave para inducir la rotación del mesociclón (Fig. 4-19)¹¹⁷.

La corriente descendente de aire frío que proviene de la supercelda se debe a la rarefacción del aire en los niveles inferiores, causada por el ascenso del mesociclón. Esta corriente descendente suele estar acompañada por fuertes precipitaciones, granizo, tormentas eléctricas y vientos divergentes que se esparcen en múltiples direcciones al momento en que la columna de aire toca tierra.

Es importante señalar que no todas las superceldas producen tornados. Para que se genere un tornado, la corriente ascendente de aire cálido debe seguir siendo alimentada de manera constante y rápida, pudiendo alcanzar velocidades verticales de hasta 160 km/h.

Esta constante y rápida provisión de aire caliente al vórtice ascendente incrementa la densidad de aire en el entorno del mesociclón, forzándolo a “estirarse”, es decir, a extenderse en altura, impulsado tanto por la corriente ascendente como por las menores presiones presentes en los estratos atmosféricos superiores. Este proceso continúa hasta que el flujo de aire alcanza el límite superior del cumulonimbo, en la tropopausa¹¹⁸. Al no poder ascender más, el aire se expande lateralmente, formando la característica silueta de “yunque” en la parte superior de la nube (Fig. 4-21)¹¹⁹.

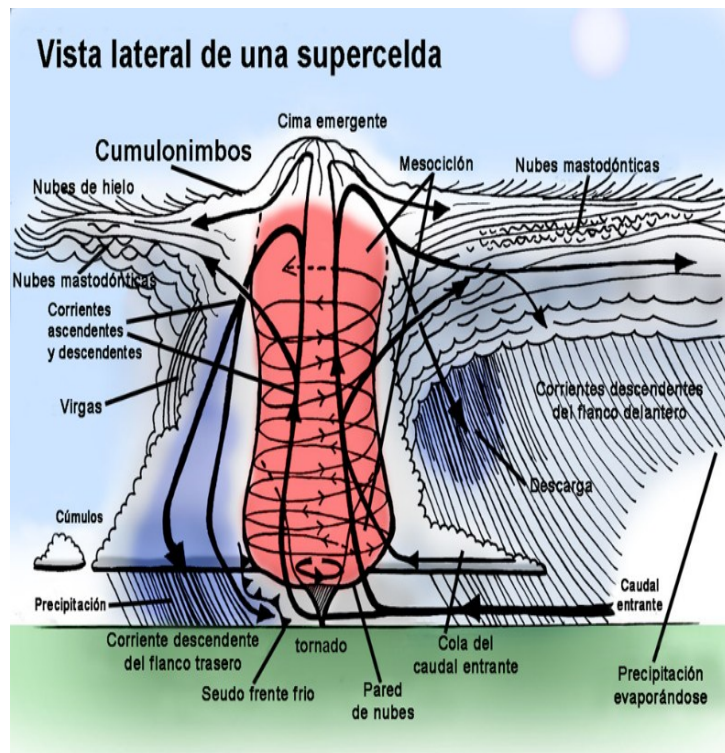


Fig. 4-20 Supercelda
(Autor: Michael Graf, 2010. Lic. Creative Commons BY-SA 3.0)

¹¹⁷ ¹¹⁷ <https://es.wikipedia.org/wiki/Mesocicl%C3%B3n>

¹¹⁸ Un cumulonimbo no asciende más allá de la tropopausa (zona de transición entre la troposfera y la estratosfera) debido a las propiedades físicas y térmicas de la estratosfera. Mientras que en la troposfera la temperatura generalmente disminuye con la altitud, lo que permite que el aire cálido y húmedo de las tormentas ascienda por convección, en la tropopausa el gradiente térmico empieza a variar hasta invertirse en la estratosfera, donde la temperatura generalmente aumenta con la altitud. Esto inhibe el ascenso del cumulonimbo, lo que provoca que se extienda horizontalmente en lugar de seguir ascendiendo. También es la razón de la característica forma de “yunque” que a menudo presenta su parte superior (Ahrens, 2021).

¹¹⁹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cumulonimbus_capillatus_incus_with_strong_updraft_in_Romania.jpg



Fig. 4-21 Cumulonimbo
(Autor: Florian Radu, 2016. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*)

frío se condensa, dándole al fenómeno su característico color oscuro debido al aumento de la densidad. En este momento, se forma el embudo en la base de la nube, que se extiende hacia el suelo mientras se estrecha en su extremo inferior conforme desciende. Si el flujo de aire cálido sigue alimentando al mesociclón, el tornado continúa incrementando su velocidad rotatoria hasta que toca tierra, momento en el que alcanza su madurez y su máxima capacidad destructiva (Fundación Aquae, 2021) (Meteopedia, 2024).

Se pueden clasificar los tornados según su estructura y características de formación. En cuanto a su origen, podemos diferenciar entre

- **tornados supercelulares** y
- **tornados no supercelulares**, también denominados **trombas terrestres**.

Los primeros son los que se han descrito en los párrafos anteriores, cuya formación procede de una tormenta supercelular, donde el mesociclón es el factor clave para su desarrollo. En cambio, los tornados no supercelulares se forman a partir de tormentas sin la presencia de un mesociclón. Este tipo de tornado se caracteriza por tener una vida más corta y presentar una intensidad mucho menor

Según su estructura podemos clasificar los tornados de la siguiente manera:

- **Tornado de vórtice múltiple:** es un tipo de tornado que presenta dos o más vórtices alrededor de un centro común. Pueden estar asociados a cualquier tipo de tormenta, pero son más probables en estructuras supercelulares (Fig. 4-22).
- **Tornado satélite:** en este caso se trata de un tornado que “orbita” como un satélite alrededor de otro de mayor tamaño. Cuando se forman dos tornados muy cerca entre sí, el más intenso induce un movimiento giratorio en el más débil.
- **Tromba marina:** es un tipo de tornado que se desarrolla entre la base de una nube cumulonimbus y una superficie de agua. Se diferencian dos clases:
 - Tromba marina tornádica: Son tornados mesociclónicos que se forman sobre el agua, o bien son tornados terrestres que llegan al agua. Se forman en tormentas supercelulares, y son las más intensas y duraderas.
 - Tromba marina no tornádica: Es un tipo de tromba no supercelular, sin mesociclón. Al igual que las trombas terrestres, las trombas marinas no tornádicas son menos fuertes pero mucho más comunes (Meteopedia, 2024).



Fig. 4-22 Tornado de vórtices múltiples
(Autor: Jason Weingart, 2016. Lic.: Obra de libre utilización)¹²⁰.

Los tornados pueden clasificarse por su intensidad. Para esto se utilizan diferentes escalas que los agrupan en categorías, según la fuerza del viento y los daños en superficie.

La escala *Fujita* mejorada, o escala EF (*Enhanced Fujita*), es la más usada. Comenzó a utilizarse en 2007 y reemplazó a la escala *Fujita-Pearson* de 1971, tras mejorar la correlación entre los daños producidos y la magnitud del viento. Esta escala agrupa a los tornados en 7 clases:

- **EFU**: No hay daños visibles. El tornado se desplazó por una zona sin indicadores de daño, o la zona dañada es inaccesible.
- **EF0**: Vientos entre 105 y 137 km/h. Los daños son visibles pero muy leves, como algunas rejas caídas, pequeñas piezas de tejados arrancadas, canaletas torcidas y ramas de los árboles rotas.
- **EF1**: Vientos entre 138 y 178 km/h. Los daños se consideran moderados, como tejados despedazados, casas rodantes volcadas, y puertas o ventanas exteriores arrancadas.
- **EF2**: Vientos entre 179 y 218 km/h. Los daños son considerables. Tejados de casas sólidas destruidos, casas rodantes muy dañadas, árboles arrancados, automóviles levantados del suelo.
- **EF3**: Vientos entre 219 y 266 km/h. Los daños son graves. Pisos enteros destruidos, edificios grandes muy dañados, trenes volcados, árboles descortezados, vehículos pesados levantados del suelo y arrojados a distancia.
- **EF4**: Vientos entre 267 y 322 km/h. Los daños son devastadores. Las casas de hormigón y ladrillo pueden quedar completamente destruidas, y los automóviles pueden ser lanzados como proyectiles.
- **EF5**: Vientos mayores a los 322 km/h. Los daños se consideran increíbles. Las casas más fuertes pueden ser arrasadas hasta los cimientos, y las estructuras de hormigón pueden resultar muy dañadas. Además, los edificios pueden sufrir graves deformaciones estructurales (Meteopedia, 2024).

Además de la escala Enhanced Fujita, en Europa, en 2023, el Laboratorio Europeo de Tormentas Severas (ESSL) creó un sistema de clasificación similar llamado Escala Fujita

¹²⁰ https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Evolution_of_a_Tornado.jpg

Internacional (Escala IF). Este nuevo sistema clasifica la intensidad de los tornados desde IF0, la categoría más débil, hasta IF5, la más fuerte. La mayor diferencia entre la Escala EF y la Escala IF es que la Escala IF incluye pasos intermedios desde IF0 hasta IF3.

Canadá y Japón también tienen sus propias escalas (CEF y JEF, respectivamente). Por su parte, la Organización de Investigación de Tormentas y Tornados (TORRO) del Reino Unido desarrolló la Escala de Intensidad de Tornados (Escala T). A diferencia de muchas otras, la Escala T está estrechamente vinculada con la escala de Beaufort. Esta escala va de T0 a T11 y es distinta de las demás porque se basa exclusivamente en la velocidad del viento, en lugar de en los daños causados, como sucede con las escalas EF o IF. Al tener más clasificaciones, resulta más útil para describir tornados de menor intensidad (Chinchar, 2023).



121

¹²¹ Imagen de cierre capítulo: "Feria de Hielo en el Río Támesis" (Autor: Thomas Wyke, 1683. Lic. Dominio Público).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thomas_Wyke-_Thames_frost_fair.JPG

Vargas 1999: un fenómeno extremo que generó un desastre¹²²

5



123

En la noche del 15 al 16 de diciembre de 1999, ocurrió en Venezuela, en el Estado Vargas (hoy Estado La Guaira) un terrible desastre causado por lluvias extremas que generaron crecidas de riachuelos, arrastre de vegetación, sedimentos y rocas, y flujos torrenciales de barro que en distintos casos alcanzaron altas densidades, con gravísimas consecuencias, muertes, damnificados y destrucción de infraestructuras.

Las lluvias de 1999 encontraron una población desprevenida y poco preparada para enfrentar un desastre de esa magnitud. Ni los organismos del gobierno ni las organizaciones de la sociedad civil tenían las fortalezas institucionales ni los recursos suficientes para encarar la atención de la población después del desastre. Sin embargo, las tareas de atención de la emergencia y de planificación de la reconstrucción se emprendieron con gran impulso. Una gran parte de la población del país, instituciones y empresas, tanto del sector público como del privado, dieron muestras de solidaridad y colaboraron masiva en estas tareas desde los primeros días.

En 1999 el Estado Vargas, estaba caracterizado por la falta de planificación urbanística, carencias en las redes de servicios públicos de agua, electricidad, saneamiento, vialidad, grandes problemas ambientales, gran porcentaje de la población ocupando barriadas de viviendas autoconstruidas, playas contaminadas, bajo nivel educativo de la población, altas tasas de delincuencia, debilidades institucionales, en fin, una situación de gran vulnerabilidad social. Lamentablemente, esta situación, hasta el día de hoy, no ha mejorado de manera significativa.

Este capítulo trata sobre la tragedia de Vargas de 1999, sus antecedentes y consecuencias. Se describen los fenómenos ocurridos: los deslaves, el transporte de sedimentos, los mecanismos destructivos de los torrentes; se presentan las estimaciones de intensidad y del período de retorno de las lluvias, y se cuantifican sus consecuencias.

En el libro titulado "Vargas: desastre, proyecto y realidad" (Genatios y Lafuente, 2020) se aborda este tema de manera más amplia y se describe un extenso y complejo proyecto de reconstrucción y desarrollo para el Estado Vargas, que lamentablemente nunca fue completado. En el mismo libro se comenta la creación de la Autoridad Única del Estado Vargas (AUAEV) y sus

¹²² Las ilustraciones de este capítulo, sin específica mención, son tomadas del libro "Vargas: Desastre, Proyecto y Realidad", 2020, cuyos autores son Genatios C. y Lafuente M.

¹²³ Imagen del título: "Inundación en la Aldea" (Autor: Arseny Meshchersky, 1872. Lic. *Public Domain*). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arseny_Meshchersky_-_Flood_in_the_Village.jpg

objetivos; se resumen distintos aspectos de la planificación urbana de las zonas afectadas y se presentan brevemente los proyectos de desarrollo en distintas cuencas, incluyendo la discusión de los proyectos de protección hidráulica y control de torrentes. Solo una porción de los proyectos preparados por la AUAEV fue desarrollada, por lo que el Estado Vargas, hoy La Guaira, sigue siendo una zona vulnerable.

5.1 LA ZONA AFECTADA

El Estado Vargas limita por el norte con el mar Caribe y por el sur con la línea divisoria de cuencas de la Cordillera de la Costa (Fig. 5-1). Las montañas de este sistema llegan a los 2765m en su punto más alto, que es el Pico Naiguatá. El estado es una estrecha franja ubicada entre el mar y las montañas, con un ancho no superior a los 10 km, lo cual indica que las pendientes de los ríos son pronunciadas (en ocasiones llegan a 90% en las partes altas), por lo que se considera que tienen un fuerte potencial destructor (Fig. 5-2).

El Estado tiene 1.496,5 kms², 4,5 km de costas, 32 playas y albergaba una población aproximada de 350,000 personas para el momento de la ocurrencia del desastre, cifra que se estima no ha variado mucho en los últimos años.

Muchos de los habitantes del Estado trabajan en la Región Capital, pero su población crece significativamente en temporadas turísticas y en fines de semanas, ya que el turismo y la recreación forman parte de sus principales actividades económicas.

Las otras actividades económicas más importantes del Estado son el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar, de Maiquetía (el principal del país), y el puerto de La Guaira. Hay actividad agrícola en la parte alta del Estado Vargas, en la zona occidental de Carayaca. También se realiza actividad pesquera, especialmente en los pueblos ubicados al este del estado (de Osma a Chuspa), y en la zona del centro del estado (Maiquetía). El Estado cuenta con una rica historia y una arraigada tradición cultural.

El núcleo poblacional más importante está en la zona de Catia la Mar, con unos 100.000 habitantes, la cual fue afectada en una medida mucho menor que la zona comprendida entre Macuto y Naiguatá por el desastre de 1999. La Guaira, capital del Estado, tiene unos 25.000 habitantes, y Maiquetía, unos 70.000. La población del Estado habita principalmente en una estrecha franja no mayor a 2 km, ubicada entre las montañas y el mar, que comprende zonas planas cercanas al borde de la costa y también la parte baja de las laderas de las montañas. Estas zonas relativamente planas son, en principio, atractivas para el desarrollo urbano, para la construcción de vialidad e infraestructuras. Sin embargo, geológicamente, estas zonas hoy habitadas, se han ido conformando con el depósito progresivo de sedimentos, producto de fenómenos similares al ocurrido en Vargas en 1999; es evidente que son sitios vulnerables, ya que estos fenómenos pueden repetirse en el futuro, por lo que la población está bajo esa amenaza.

La situación urbana del Estado Vargas, en los momentos previos a la ocurrencia del desastre, era ya bastante precaria (Fig. 5-3):

- Red vial congestionada, discontinua e insuficiente.
- Desarrollos urbanos desordenados.
- Ausencia de planificación urbana y de planes de protección ambiental ante la eventualidad de ocurrencia de deslaves
- Inexistencia de obras hidráulicas para control de torrentes.
- Servicios públicos insuficientes y deteriorados.
- Invasión ilegal del Parque Nacional El Ávila (hoy Guaraira Repano).
- Construcciones informales en terrenos con alto riesgo de deslizamiento.
- Desarrollos urbanos y ubicación de sectores informales en cauces de ríos, presentando alto riesgo de inundaciones y destrucción por lluvias.

- Alto porcentaje de la población ubicada en viviendas de mampostería altamente vulnerables ante la amenaza sísmica de la zona.
- Cascos históricos deteriorados.
- Ríos y playas contaminados (insuficiencia de tratamiento de aguas servidas y de control de desechos sólidos).
- Ausencia de planificación ante emergencias.
- Sistema de suministro de agua potable dependiente del sistema de Caracas. Suministro de agua insuficiente.
- Insuficiencia del sistema de recolección de aguas servidas. La planta de tratamiento de aguas servidas de Punta Gorda (Maiquetía) no ha sido concluida.
- Las aguas servidas son enviadas al mar sin tratamiento previo y buena parte de las tuberías para su transporte, presentan corrosión y pérdidas, con lo que se incrementa la contaminación de las playas.
- Insuficiencia del sistema de recolección y disposición de desechos sólidos, siendo la disposición final un botadero a cielo abierto.

Los programas de recuperación del Estado Vargas, después de la tragedia, no podían tener como objetivo restituir las características urbanas previas al desastre, ya que su nivel de calidad de vida y características sociales y ambientales, dejaban mucho que desear. Las propuestas de desarrollo para un nuevo Vargas concebían un Estado que aprovechaba sus potencialidades y sus recursos para generar actividades productivas y dar un mejor nivel de calidad de vida a todos sus habitantes y visitantes.



Fig. 5-1 Situación del Estado Vargas (Fuente: TUBS, 2011. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*)¹²⁴.

¹²⁴ [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vargas_in_Venezuela_\(%2Bclaimed\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vargas_in_Venezuela_(%2Bclaimed).svg)



Fig. 5-2 La población de Vargas está ubicada en una estrecha franja entre la montaña y el mar.



Fig. 5-3 Situación del estado Vargas previa a la tragedia.

5.2 LAS LLUVIAS EXTREMAS DE 1999

Si se observan las características geológicas de las zonas costeras habitadas, se puede apreciar que sus suelos y morfología son producto del continuo flujo de los ríos y quebradas, que erosionan el relieve y depositan sedimentos según la mayor o menor importancia de las precipitaciones anuales en la zona. Menos frecuentes son las precipitaciones extremas, similares a las lluvias de 1999, que se han repetido a lo largo de los siglos y han modificado el perfil costero de manera importante y rápida, con sucesivos procesos de deslaves y transporte de sedimentos.

El flujo de los ríos arrastra sedimentos desde el sistema montañoso y los deposita a lo largo del cauce, en sus zonas de desembocadura y los arrastra hasta el mar. En los casos de lluvias excepcionales, el proceso de transporte se inicia con el arrastre de sedimentos de pequeño tamaño y se va incrementando progresivamente hasta arrastrar grandes sedimentos. Con el inicio de una lluvia de varios días, la acumulación del agua en el suelo en las partes altas de las cuencas va produciendo saturación del terreno, con lo que disminuye la capacidad de sujeción de la capa vegetal hasta que ésta se desprende y es arrastrada por el flujo. Al perderse la capa vegetal, se desarrolla la erosión; el flujo arrastra primero pequeños sedimentos (arcillas, arenas finas), con lo cual disminuye la capacidad de sustentación del suelo y se producen derrumbes y

desprendimientos de las laderas en las partes altas de las cuencas. Este proceso incorpora al flujo más sedimentos con tamaños cada vez mayores. El incremento de la proporción de sedimentos mezclados en el flujo aumenta su densidad, llegando en ciertos casos, a constituir flujos torrenciales (“*debris flow*”). Las densidades de estos flujos torrenciales llegan a superar las 2 T/m^3 , con lo que la capacidad de arrastre y flotación de grandes rocas se hace posible. La Fig. 5-4 a) hasta e) muestra un esquema del proceso asociado al deslave. Las Fig. 5-5, Fig. 5-6 Fig. 5-7 muestran la erosión con desprendimientos de vegetación y de partes de las montañas producidos por las grandes lluvias, lo cual aporta sedimentos a los flujos que los transportan al mar. Las Fig. 5-9 y Fig. 5-9 muestran flujos de agua y lodo.

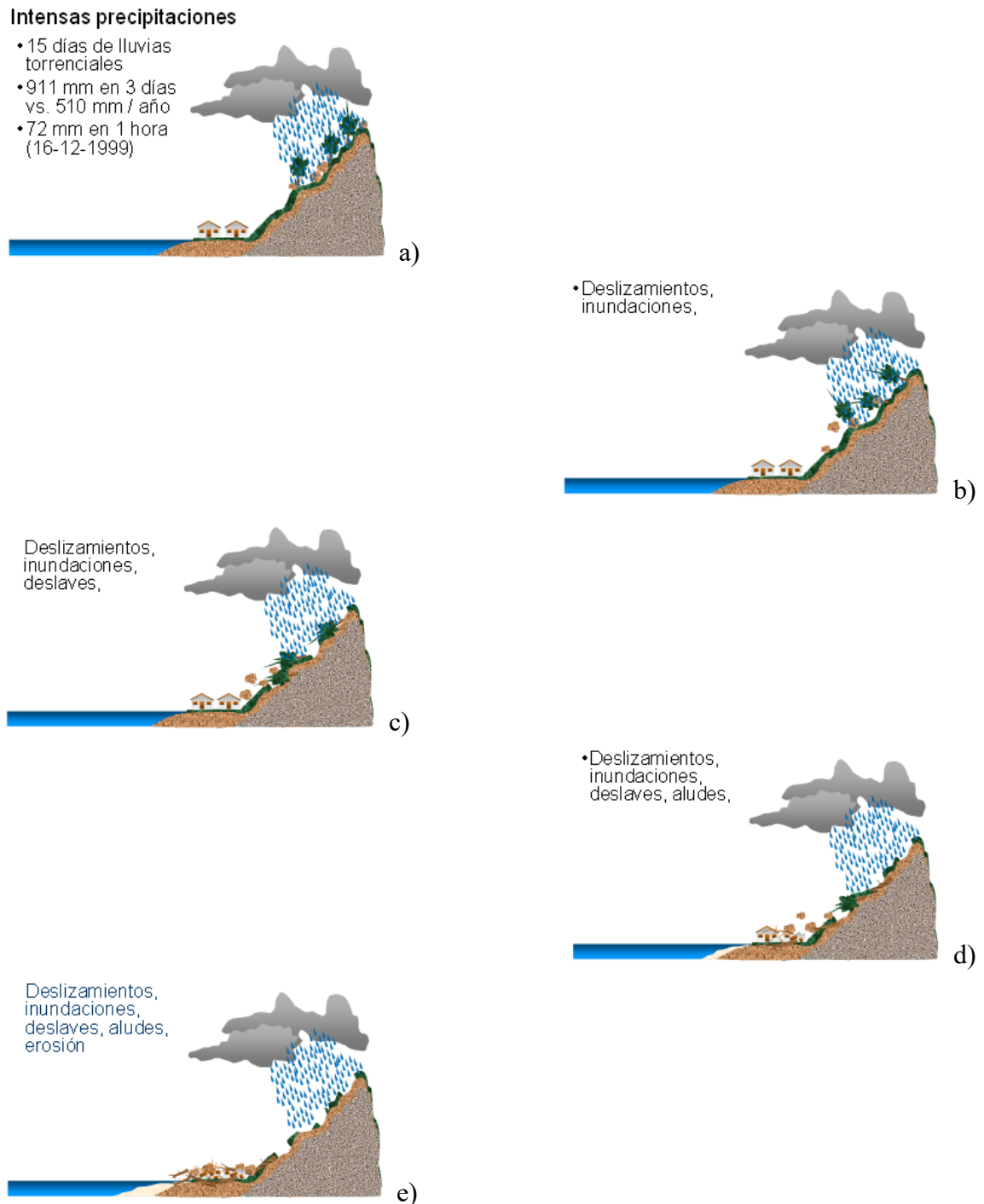


Fig. 5-4 a) b) c) d) e) Cómo se generó el deslave en Vargas, diciembre 2010.



Fig. 5-5 Erosión en las montañas.



Fig. 5-6 Erosión en las montañas.



Fig. 5-7 Erosión en las montañas y arrastre de sedimentos al mar.



Fig. 5-8 Flujos de agua y lodo (Los Corales).



Fig. 5-9 Flujo de agua y lodo retoma su cauce original en Carmen de Uria.

Ese tipo de deslaves y flujos de barro de alta densidad ocurrieron en Vargas durante las lluvias de 1999. Se movilizaron rocas con pesos superiores a 20 toneladas (hay indicios de rocas desplazadas de más de 100 toneladas), las cuales destruyeron edificaciones que encontraron en su camino, en particular en Los Corales y en la cuenca de San Julián (Fig. 5-10 a Fig. 5-13) y en Carmen de Uria (Fig. 5-14 a Fig. 5-16). Los derrumbes y desprendimientos de las distintas cuencas afectadas ocurrieron en la noche del 15 de diciembre y la madrugada del 16, en un lapso de pocas horas.



Fig. 5-10 Rocas desplazadas en Los Corales.
(Foto IMF/UCV)



Fig. 5-11 Los Corales (Río San Julián).



Fig. 5-12 Sedimentos y rocas transportados por el río San Julián (Los Corales).



Fig. 5-13 Destrucción de edificaciones en Los Corales por arrastre de rocas.



Fig. 5-14 Destrucción y sedimentación en Carmen de Uria.



Fig. 5-15 Viviendas de mampostería destruidas en Carmen de Uria.



Fig. 5-16 Viviendas de mampostería destruidas en Carmen de Uria.



Fig. 5-17 transporte de sedimentos en el Cono de deyección de Los Corales.

Tanto los pequeños como los grandes sedimentos producidos por el evento de diciembre de 1999 se depositaron en distintas zonas a lo largo del cauce. Quedaron en algunos lugares, depósitos de más de 8 m de altura. Los sedimentos también modificaron la línea costera (Fig. 5-17 a Fig. 5-19), y ocasionaron grandes daños a la población (Fig. 5-20 a Fig. 5-22). Se estimó que el volumen de sedimentos depositados fue de más de 20 millones de m³.

Tanto los grandes deslaves que ocurren poco frecuentemente en el litoral de Vargas, como las lluvias muy frecuentes de baja intensidad, van acumulando sedimentos en las partes bajas de las cuencas. Estos sedimentos han conformado la plataforma geológica de las zonas mayormente ocupadas por la población en Vargas.

En el caso de las lluvias de diciembre 1999, la deposición de sedimentos fue de magnitud importante. Produjo la modificación del frente costero y la aparición de nuevos “conos de deyección”, extensas zonas de sedimentos depositados en la desembocadura de los ríos en el mar.

Los eventos de gran magnitud, a pesar de ser poco frecuentes, constituyen una amenaza importante para la población, dada la alta vulnerabilidad de los desarrollos urbanos, mayormente ubicados en las zonas de mayor potencial de inundación: el riesgo de ocurrencia de un desastre y que se produzca una gran destrucción, es alto.

La fuerte amenaza no fue tomada en cuenta a la hora de ubicar las zonas habitadas, básicamente por el desconocimiento y por la falta de planificación. Para disminuir el riesgo y garantizar la seguridad de la población, es necesario proyectar y construir un sistema integral de protección ambiental, lo cual incluye obras de control de torrentes (represas de distintos tipos) en las partes altas y medias de la cuenca, y canalizaciones que faciliten el libre tránsito del agua de lluvia al mar.



Fig. 5-18 Modificación del frente costero en Camuri Chico.



Fig. 5-19 Modificación del frente costero y cambio de cauce en Carmen de Uria.



Fig. 5-20 Vivienda destruida en La Veguita, Macuto.



Fig. 5-21 Efectos del deslave en Los Corales.



Fig. 5-22 Efectos del deslave en Macuto.

5.3 LA MAGNITUD DEL EVENTO DE 1999

Las lluvias ocurrieron en la zona comprendida entre Maiquetía y Anare. Afectaron unas 50 quebradas, con una concentración de daños mayores en la zona entre Macuto y Camurí Grande, aunque se extendieron al este hasta Anare y en el oeste hasta Las Salinas. En las zonas más importantes se ubican al menos unas 23 quebradas que requieren de trabajos de control de torrentes.

El promedio de precipitaciones anuales de los 40 años previos a 1999, en Vargas, es de 510 mm, estimado a partir de datos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Maiquetía. Lamentablemente, sólo existían dos estaciones operativas para el momento de la tragedia: las del Aeropuerto de Maiquetía y Mamo. Las lluvias ocurridas en las primeras dos semanas del mes de diciembre de 1999, y registradas en las distintas estaciones ubicadas en la costa del país (fuera del estado Vargas) superan los máximos históricos, con lo que se muestra el carácter excepcional del evento de diciembre 1999. Ejemplos de esto se encuentran en Grases et al. (2000):

“En Tacarigua (Nueva Esparta), el registro acumulado de 449 mm es el más alto en 50 años; en varias estaciones del estado Falcón, se obtuvieron registros elevados: en La Negrita, cerca de la represa El Isidro, el valor acumulado fue de 251,4 mm, el más alto en 35 años de registro; en la costa, estación Tocopero, el acumulado es de 456,6 mm, segundo valor más alto en 42 años, y en Tocuyo de la Costa el acumulado es de 549,6 mm, cercano al mayor en 32 años (que alcanza a 629,3 mm). Situaciones similares se presentaron en áreas del Estado Vargas. En las regiones costeras de los tres Estados citados los valores promedio se encuentran entre el doble y el triple de los valores promedio anuales. Sólo se dispone de información limitada sobre los estados Miranda y Vargas” (Grases et al., 2000)

Debe resaltarse que, si bien el promedio anual de lluvias en Maiquetía es de 510 mm, el promedio correspondiente a las zonas altas de las montañas es de unos 1000 mm, con lo que se podría aplicar un factor de corrección de 2 a los valores pluviométricos que se utilizan como referencia para estudiar el fenómeno ocurrido en Diciembre de 1999 (Genatios, 2000) (López et al., 2000) (Fig. 5-23 y Fig. 5-24).

El mes de Diciembre se incluye normalmente dentro del período de sequía, en el cual las lluvias son escasas. En 1999 se presentó un fenómeno poco usual para la época del año, al mantenerse, por un lapso de unos veinte días, una zona de altas presiones en el Atlántico, que alcanzó el sur del Caribe, lo que ocasionó una vaguada en el frente de la cordillera de la Costa que produjo las lluvias excepcionales de mediados de Diciembre. A continuación, se incluye una cita explicativa:

“Las vaguadas son flujos de los vientos en la altura con sentido de desplazamiento oeste-este y se asocian a la generación de extensos campos nubosos e intensas precipitaciones que se mantienen por aproximadamente 5 días, aunque su influencia puede sentirse por mayores lapsos de tiempo, manifestándose su acción en Venezuela durante el final e inicio de la época lluviosa. Procesos meteorológicos se combinaron para hacer más complejo el desarrollo del evento, (...) las condiciones de inestabilidad se mantuvieron debido a la presencia de un ciclón extra-tropical en el Atlántico Norte, del cual se desprendió un resto de frente frío, y además por la presencia de la zona de alta presión del Atlántico Norte, lo que contribuyó a bloquear la circulación en la altura, con lo cual la persistencia y desarrollo de la nubosidad en la región costera se acentuó. (...) A mediados de Diciembre la actividad de la vaguada se acentúa, cubriendo el frente nuboso una superficie de 20.000km², abarcando varios estados en la zona norte-costera del país en una extensión aproximada de 900km.” (López et al., 2000)



Fig. 5-23 Pico Naiguatá: Mar Caribe y Litoral Central a la derecha (norte) y Caracas a la izquierda (sur).
(Autor: Matthew Burwick, 2014. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*)¹²⁵

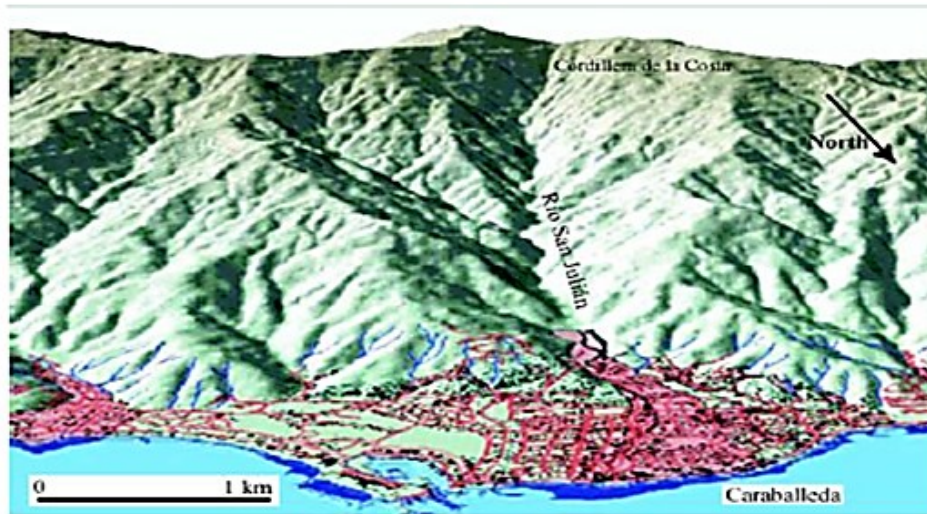


Fig. 5-24 Fuertes pendientes del río San Julián en la zona montañosa, Los Corales.

Las precipitaciones asociadas al deslave de 1999 alcanzaron 1210 mm en 15 días de lluvias ininterrumpidas, que comenzaron a finales de noviembre (Genatios, 2000). En los últimos 3 días de ese período, las lluvias alcanzaron a producir 911 mm (todos estos valores obtenidos en Maiquetía). Los riachuelos se transformaron en ríos de caudal importante, con pendientes mayores en algunos casos a los 30°. Las crecidas de los ríos generaron erosión, desprendimiento de capa vegetal, arrastre de sedimentos y en ocasiones, flujos de lodo de alta densidad que desplazaron rocas de gran magnitud. Los flujos fueron de densidades y características muy variadas, desde flujos de agua similares a los de ocurrencia anual, hasta flujos hiperconcentrados, muy poco frecuentes (Urbani et al., 2000). Estos flujos destruyeron edificaciones e infraestructura, alteraron historias locales, modificaron el frente costero y depositaron unos 20 millones de m³ de sedimentos. El aporte de sedimentos modificó la línea costera y generó un área ganada al mar de unas 140Ha (Genatios, 2000).

En comparación con el fenómeno de 1951, también con arrastre de sedimentos, el de 1999 tuvo mucho mayor poder destructivo (Urbani et al., 2000).

5.4 PERÍODO DE RETORNO Y ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA PARA EL DISEÑO INGENIERIL

Algunos especialistas estiman que, en relación con el evento de 1999, “el período de retorno para las lluvias máximas de 24 horas lo ubica en el orden de 500 años”, un evento

¹²⁵https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atardecer_desde_el_pico_Naiguata.jpg

excepcional (J.L. López y D. Pérez H., 2010) (Singer et al., 2010). Durante el mes de enero de 2000, La AUAEV recibió la visita de un profesor, geólogo del Instituto Tecnológico de Lausanne, quien opinó que el fenómeno ocurrido tenía un período de retorno de 5000 años; su aseveración la sustentó en las características de desgaste y el tamaño de las rocas presentes en las partes bajas de las cuencas, que fueron arrastradas por las lluvias.

Profesores del Instituto de Mecánica de los Fluidos de la Universidad Central de Venezuela (MF/UCV) estimaron el período de retorno: “utilizando datos históricos de lluvia de otras estaciones cercanas ubicadas aproximadamente a la misma elevación de la estación de Maiquetía (a nivel medio del mar), con períodos de registro en el orden de 50 años, se puede hacer un primer estimado del período de retorno del evento hidrometeorológico. Los valores máximos de precipitación en 24 horas de las estaciones Osma, Los Caracas, Macuto y Naguayatá, son iguales a 252 mm, 273,6 mm, 153,6 mm y 180 mm respectivamente, correspondientes a un período de 50 años. El promedio de estos valores es de 214.8 mm el cual es casi la mitad del valor máximo observado en Maiquetía, igual a 410 mm el día 16/12/1999. De acuerdo con una distribución de frecuencia Pearson Tipo III, este factor de 1,9 indicaría que el período de retorno del evento está en el orden de los 500 años” (López, J.L. et al, 2000). En un artículo posterior de J.L. López y D. Pérez H. (2010), comentan: “A partir de observaciones y mediciones en campo, se han estimado los máximos flujos y los volúmenes de las acumulaciones sedimentarias en algunas de las cuencas afectadas por los deslaves. Los resultados indican que los caudales picos generados por los flujos torrenciales pueden ser, en algunos casos, hasta 4 o 5 veces mayores que los caudales líquidos correspondientes al evento de 500 años de período de retorno”.

Singer et al (2010) apoyan la estimación de un período de retorno de 500 años para los eventos principales ocurridos en Vargas en diciembre de 1999, y los comparan con importantes eventos ocurridos en el valle de Caracas.

En el estudio ya citado de Grases et al. (2000), se presenta una estimación aproximada del período de retorno de 1000 años. La referencia menciona: “Sardi (1959) evaluó los caudales en los ríos y quebradas del Litoral Central. Se dan allí los valores de diseño. En el estudio hidrológico de Ayala (1978), realizado con el fin de determinar los parámetros hidrológicos necesarios para establecer la viabilidad técnica de obras de ingeniería hidráulica fluvial, se estudiaron las lluvias de muchas estaciones en las cuencas del Litoral. Resultan interesantes los valores que para 100 años de período de retorno se le asignaron a las lluvias diarias en Maiquetía y en Mamo y en otras estaciones que actualmente no están en operación, pero que se encuentran dentro de las cuencas afectadas por las recientes lluvias. Del diagrama de Gumbel, que presenta el informe de Ayala (1978), resultaría que 300mm de lluvia de un día en Maiquetía tendrían una probabilidad anual de ocurrir de 0.0001; es decir, un período de retorno de más de 1000 años”. (Grases, J. et al., 2000)

Otra perspectiva que destaca la significativa magnitud de las lluvias ocurridas, son los valores de las precipitaciones en la estación de Maiquetía y su comparación con las medias; en Octubre 1999 la precipitación fue de 122 mm, contra una media de 56 mm; para noviembre de 1999 el valor fue de 290 mm, contra una media de 54 mm, y para Diciembre 1999, 1204 mm, contra una media de 54 mm. (Grases, J. et al., 2000). Esto destaca la presencia permanente de la humedad en el suelo, lo cual lo colocaba en situación de saturación antes de la ocurrencia de las lluvias del 15 y 16 de Diciembre.

En un estudio realizado por el profesor Luis Hidalgo (2000), se analiza la magnitud de las precipitaciones ocurridas en Diciembre 1999, y se determinan los potenciales máximos de lluvias probables en la zona del Litoral, al mismo tiempo que se comparan estas magnitudes con fenómenos de clase mundial (Hidalgo, L., 2000). El resultado de este estudio indica que los valores de precipitaciones obtenidos en diciembre de 1999, en un período de 72 h, correspondiente a 911 mm, es muy inferior al valor máximo probable que pudiera obtenerse bajo condiciones similares en el Litoral, el cual es de 2.502 mm. Ambos valores son a su vez inferiores al récord mundial de grandes lluvias para 72 h, que es de 3.215 mm.

Al revisar el estudio de Hidalgo, y si se acepta la corrección de los valores de precipitación obtenidos en Maiquetía mediante la multiplicación por un factor de 2, podría suponerse que las

lluvias en las partes altas de la Cordillera de la Costa han podido ser de unos 1820 mm para un lapso de 72h, lo cual se aproxima más a los 2.502 mm generados por el estudio de Hidalgo.

Muchas de estas incertidumbres relacionadas con las magnitudes de lluvia habrían podido ser disipadas, si se hubiera contado con una red pluviométrica operativa en la parte alta de las cuencas, lo que lamentablemente no ocurrió, ya que toda la red estaba desmantelada en el momento de la ocurrencia de las lluvias en Diciembre 1999.

Por último, se menciona una cita referida a la peligrosidad, presentada por el ingeniero Daniel Salcedo (2000):

“Finalmente es importante mencionar un factor que debería ser considerado en la etapa de ingeniería de la reconstrucción. De acuerdo con el autor de este trabajo, existen claras evidencias de campo de que el evento de Diciembre de 1999 no fue el evento más grande que ha ocurrido en el área. Una de estas evidencias puede ser observada en los cortes que resultaron por la erosión en los lechos y terrazas de los ríos y en los conos de deyección, donde existen bloques de rocas metaígneas del Complejo el Ávila, los cuales pertenecen a unidades litológicas que solamente afloran en las cuencas medias y altas. También tenemos que tomar en cuenta que muchas otras áreas de Venezuela son vulnerables y pueden ser afectadas en el futuro por flujos torrenciales; en particular debe ser mencionada la zona Norte de la ciudad de Caracas al pie del Cerro El Ávila, donde muchas urbanizaciones han sido construidas sobre conos de deyección con evidencias de flujos torrenciales prehistóricos”. (Salcedo, 2000)

La determinación del período de retorno de las precipitaciones es un elemento fundamental, requerido para la evaluación de los parámetros de diseño de las obras de control de torrentes, a fines de minimizar los riesgos de la población y los efectos devastadores sobre la sociedad y sobre su infraestructura.

Para el año 1999, en la ingeniería sísmica, los procedimientos seguidos a fin de controlar riesgos seguían una metodología de cálculo que establecía un sismo de diseño con un período de retorno aproximado de 500 años, el cual se corresponde con un sismo de probabilidad de excedencia de 10% en 50 años de vida útil de las estructuras. Este criterio es todavía aceptado internacionalmente como válido y económicamente adecuado para estructuras ordinarias. Para estructuras especiales, tales como hospitales y estaciones de bomberos, se utilizan requerimientos de diseño más exigentes, se prevén sismos con mayores períodos de retorno y probabilidades de excedencia de 5% o menos en 50 años.

La práctica usual de la ingeniería hidráulica establece el criterio de diseñar las obras para una crecida de 100 años. Durante el proceso de análisis y diseño de obras de protección de torrentes y de canalizaciones, hicimos un gran esfuerzo desde la Autoridad Única de Área para el Estado Vargas (AUAEV) por mantener el criterio de la crecida de 500 años, el cual impone condiciones de minimización de riesgos y seguridad más rigurosas que las tradicionalmente utilizadas por la práctica de la ingeniería hidráulica. Esto, por supuesto, generó resistencias en algunos ingenieros, pero fue un criterio necesario, tomando también en cuenta las incertidumbres asociadas a la determinación de las magnitudes de las precipitaciones.

Al haber incluido estos criterios de reducción de riesgos, la AUAEV dio un paso importante para la protección de la población, así como para proteger el litoral central. Estos criterios se van haciendo cada vez más necesarios, al comprobarse los efectos del cambio climático a nivel global. Después de algunos meses de haberse creado la AUAEV y de contarse con los proyectos para proceder a su construcción e implementación, se creó la institución de Corpovargas, cuyo objetivo principal era llevar adelante estos proyectos, además de resguardar los criterios de seguridad implantados por la AUAEV. Pero, desafortunadamente, y como se explica en la referencia ya comentada (Genatios, C., 2000), Corpovargas abandonó estos criterios. Lamentablemente, no se tomaron en cuenta los criterios de riesgo establecidos inicialmente en los diseños, y se alteraron los proyectos de la AUAEV. En muchos casos se disminuyeron las dimensiones y otras características de las obras, así como sus parámetros de seguridad. Es de temer que con las obras construidas de esta manera se haya incrementado el riesgo en que se encuentra actualmente la

población Esta gravísima situación no puede dejar de ser denunciada repetidamente hasta que se tomen los correctivos necesarios para disminuir el riesgo de desastres de deslaves.

Muchos errores importantes se han cometido en el proceso de reconstrucción y posterior desarrollo del Estado Vargas. Lamentablemente, la ignorancia, la corrupción y la improvisación han privado sobre los proyectos con criterios técnicos y la racionalidad de los especialistas, lo cual ha ido en desmedro de la calidad de vida de la población.

5.5 FENÓMENOS SIMILARES OCURRIDOS EN EL PASADO

Fenómenos extremos como el de 1999 han ocurrido en otras oportunidades en Vargas, y se repetirán, por lo que es fundamental que se tomen las previsiones necesarias para que los asentamientos urbanos sean menos vulnerables. Adicionalmente, es necesario realizar un sostenido esfuerzo para que se desarrollen tanto el conocimiento como las capacidades científicas y tecnológicas que permitan dar sustento a los proyectos y obras, y se impulsen con una adecuada planificación y eficiencia.

Uno de los eventos de este tipo ocurridos en la historia del país, es citado por Humboldt, quien así describe la inundación ocurrida en La Guaira en 1789:

“el desbordamiento del río La Guaira. Este torrente, que por lo general no tiene 10 pulgadas de hondo, tuvo, después de sesenta horas de lluvia en las montañas, una creciente tan extraordinaria, que arrastró troncos de árboles y masas de rocas de un volumen considerable. El agua medía, durante la crecida, de 30 a 40 pies de anchura por 8 a 10 pies de profundidad... Varias casas fueron arrebatadas por el torrente y la inundación se hizo tanto más peligrosa para los almacenes, cuando la puerta de la ciudad, que únicamente podía dar salida a las aguas, se había cerrado accidentalmente... Más de tres personas perecieron y los perjuicios fueron evaluados en medio millón de pesos...” (Humboldt, 1991).

Salcedo (2000) hace un breve recuento de los principales eventos desastrosos, originados por lluvias extraordinarias, ocurridos en Vargas:

- **febrero 1798.** “inundaciones en La Guaira. Evento descrito por Rohl como un formidable diluvio seguido de una inundación de caracteres destructivos. (...) el Domingo 11 del corriente a las 11 de la mañana empezó a llover sin cesar hasta la mañana del martes, hizo alguna pausa la lluvia, pero a poco rato volvió con más violencia, hasta llegar el caso de que a la una y media de la tarde fue tal la avenida de piedras, árboles y tierra por el río, que llenó todo el cauce llevándose antes el puente nuevo de la Pólvara, que es de madera, el de la Caja de Agua que es de madera y mampostería, el nuevo de San Juan de Dios, el de la Trinchera, que es de mampostería, y el de la Boca del Río, que es de madera; de modo que no quedó puente alguno ni más comunicación entre las dos partes del pueblo que la muralla, cuyo arco se vio cimbrar varias veces y está cuarteado.”
- **agosto 1912.** “Grandes precipitaciones, siendo afectadas las poblaciones de Anare, Caruao, Los Caracas y Todasana.”
- **14 de enero de 1914.** “Descrito como una gigantesca tromba de agua meteórica midiéndose más de 1200mm, y el fenómeno duró 5 a 6 horas. (...) Una desproporcional crecida de los ríos en una cuenca ubicada a 45 km al este de La Guaira. El volumen de agua arrasó con todas las plantaciones de cacao que ocupaban las partes bajas de la hacienda del Dr. Alfredo Jahn, así como enormes deslizamientos y derrumbes de los cerros contiguos. Muchas viviendas fueron destruidas y arrastradas por las tumultuosas masas de agua, pereciendo más de veinte personas”

- **25 de noviembre de 1938.** “Inundaciones en Maiquetía, innumerables viviendas destruidas, construidas imprevisivamente (sic) cerca de los cauces, ocasionando además muchas víctimas...”
- **9 de mayo de 1944.** “Impetuosa tormenta de duración de dos horas y una altura de agua medida de 250mm”
- **15 de noviembre de 1944.** “Gran crecida del río Mamo. Los estragos fueron de gran calamidad y la carretera principal quedó totalmente destruida, así como muchos ranchos y todas las cementeras (sic) de la región. El caudal máximo registrado por la C.A. Electricidad de Caracas en sus pluviómetros, reveló un valor de 405.8mm en Planta de Caoma”.
- **4 de agosto de 1948.** “Inundación en Maiquetía, Macuto y alrededores. Esta tormenta duró cerca de 3,5 horas y su radio abarcó las hoyas de los ríos Piedra Azul, Osorio, Punta de Mulatos, Río Escondido o Macuto, El Cojo y Camurí Chiquito. En Punta de Mulatos y El Cojo señalan enormes y violentas masas de agua que destruyeron y arrasaron un sin número de casas, puentes, cementeras, animales de cría, etc. y pérdida de muchas vidas entre los moradores de las bajas tierras. La precipitación estimada por observaciones durante ese día fue de 455mm., a una altura de 1618m (Rohl 1949). En Las Quince Letras un pluviómetro registró 34mm y en Maiquetía 67mm. (,,,) el aguacero se desató en las alturas superiores de la Cordillera de la Costa, pero más bien hacia las partes medianas de sus vertientes.”
- **15 y 16 de febrero de 1951.** “gran catástrofe que inundó todo el Litoral. Antes de la catástrofe se habían producido dos semanas continuas de lluvias. El río Guaire recibió mucha precipitación, habiéndose registrado de oeste a este las siguientes precipitaciones. Alto Ño León; 149mm, Topo Los Espejos: 109mm, Sabaneta, 181mm, Oficina INOS: 72mm, Chacaíto: 188mm y Fila Maestra: 105mm. El centro registrado de la tormenta fue el Topo el Infiernito (Cota 1750m), con una precipitación de 529mm.”

También se incluyen dos citas presentadas por la historiadora Fierro (2007), relativas a eventos similares, ocurridos en el país:

“1180 d. C.: Hacia este año, una serie de lluvias excepcionales cae sobre la cordillera de la costa central [actuales serranías del Ávila y Silla de Caracas] y causa un torrencial flujo de barro y rocas que se deposita formando colinas que descienden en forma de abanico [actuales zonas de El Pedregal, Altamira, Los Chorros, Boleíta]”. (Fierro, Ed., 2007)

También menciona la historiadora:

“Grandes derrumbes como éste se repetirán hasta el año 1.500 en otras partes de dicha cordillera, aportando un volumen total de sedimentos estimado en el presente en 30 millones de m³. Un evento semejante tuvo lugar el 18 de febrero de 1951 en La Guaira, y en 1985, en El Limón, Maracay. Los grandes deslaves ocurridos en el Estado Vargas en 1999 corresponden a este tipo de fenómeno natural”. (Fierro, Ed., 2007)

5.6 CONSECUENCIAS

Las consecuencias inmediatas del deslave se resumen a continuación:

- Unas 240.000 personas afectadas, de las cuales 100.000 fueron evacuadas. Es de notar que la población del Estado Vargas era en ese momento, de unos 350.000 habitantes.
- 10% de las viviendas fueron destruidas (unas 8.000).
- 5 hospitales y ambulatorios dañados.

- Sistemas de aguas negras y blancas colapsados.
- 85% de la vialidad troncal destruida.
- Paralización del puerto, sedimentación en parte de las zonas de atracado de los barcos, afectación de los espacios de almacenamiento, liberación de químicos que estaban almacenados en recipientes que permanecían sin control en la zona de los *containers*
- Aeropuerto: el aeropuerto fue inmediatamente destinado a atender la emergencia, por lo que se alteraron los vuelos.
- Suspensión de la actividad recreacional, la cual, conjuntamente con el puerto y el aeropuerto, constituyen las más importantes fuentes de trabajo del estado.
- 30% de la infraestructura educativa fue afectada.
- Se estimó que el monto de los gastos materiales producidos inmediatamente fue de unos 5.000 MM\$ (Genatios, 2000 y también Grases et al., 2000).
- El número de personas fallecidas nunca fue determinado con precisión. En los primeros momentos, oficiales de la Cruz Roja, impresionados por lo ocurrido, comentaron que pensaban que el número de víctimas podía llegar a 50.000. Afortunadamente no fue así; la cifra utilizada como referencia fue la de 5.000 personas fallecidas o desaparecidas, pero eso nunca pudo ser corroborado.

La tragedia nos obligó a entender, de una manera brutal, que un desastre no es sólo el producto de un fenómeno natural, sino, sobre todo, de la intervención humana, del bajo nivel de desarrollo social, de la falta de planificación, y de la debilidad institucional.

Las Fig. 5-25 a Fig. 5-32 muestran parte de los daños ocurridos en el estado Vargas, como consecuencia de las lluvias torrenciales.



Fig. 5-25 El puerto de La Guaira luego de ocurrido el deslave.



Fig. 5-26 Daños en La Guaira.



Fig. 5-27 Daños en el casco histórico de La Guaira.



Fig. 5-28 Vista aérea de los sedimentos en Los Corales.



Fig. 5-29 Vista de sedimentos en Los Corales.



Fig. 5-30. Vista de daños y sedimentos en Los Corales.



Fig. 5-31. Daños en zona urbana de La Guaira.



Fig. 5-32. Destrucción del Museo Reverón, en El Cojo.



126

¹²⁶ Imagen de cierre del capítulo : "Apocalíptico I" (Autor: Mauricio García Vega, 2013. Lic. *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported*).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:016Apocal%C3%ADptico_I.jpg

ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS CLIMÁTICOS

6



127

El incremento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos asociados al cambio climático constituye un desafío sin precedentes para la humanidad. La acentuación de las amenazas inherentes a estos eventos ha hecho que el nivel de riesgo haya aumentado significativamente, entendiéndose como riesgo la **probabilidad de ocurrencia de desastres con consecuencias trágicas para los seres humanos y el medio ambiente**.

En este contexto, **la Gestión del Riesgo** ha adquirido un papel prioritario como herramienta clave para mitigar los impactos de dichos sucesos. Es una metodología que consiste en la identificación de los riesgos, la evaluación de su impacto, la implementación de medidas de control y la monitorización continua. Su desarrollo y aplicación han evolucionado hacia una disciplina científica que, desde hace ya varias décadas, se implementa de manera transversal y a diferentes niveles de gobernanza. Esto responde a la naturaleza multidimensional de los riesgos climáticos, los cuales afectan los más diversos aspectos de las actividades humanas y de los ecosistemas¹²⁸.

Entre los impactos más perjudiciales se encuentran la pérdida de vidas humanas, el aumento de enfermedades, la disminución de la biodiversidad, la destrucción de infraestructuras, la disrupción de los sistemas de transporte, los daños a la agricultura y al territorio, y las repercusiones económicas negativas, entre otros.

Las iniciativas emprendidas para reducir los riesgos asociados al cambio climático pueden agruparse bajo dos categorías: **mitigación** y **adaptación**¹²⁹. La mitigación se centra en reducir las **causas** del cambio climático, particularmente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros factores que contribuyen al calentamiento global. La adaptación se enfoca en **ajustar** los sistemas humanos y naturales para reducir los daños causados por los impactos actuales y futuros del cambio climático.

Ambas estrategias, mitigación y adaptación, son esenciales en la lucha contra el cambio climático y se complementan mutuamente. La mitigación, cuyo impacto se manifiesta a largo plazo, requiere que, mientras tanto, los sistemas humanos y ambientales se adapten para resistir los

¹²⁷ Imagen del título: "Calle de París en un Día Lluvioso" (Autor: Gustave Caillebotte, 1877. Lic. Dominio Público). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gustave_Caillebotte_-_Paris_Street;_Rainy_Day_-_Google_Art_Project.jpg

¹²⁸ Vea el video (13) en la sección "Animaciones y videos"

¹²⁹ Vea el video (14) en la sección "Animaciones y videos"

efectos de eventos climáticos extremos. Sin embargo, los esfuerzos de adaptación carecen de sostenibilidad si no están acompañados de políticas de mitigación, ya que podrían verse rápidamente desbordados por el incremento en la intensidad y frecuencia de fenómenos climáticos destructivos.

Las políticas de mitigación y adaptación, como se ha señalado, difieren en cuanto a sus escalas de proyección y aplicación. A nivel global, estas políticas suelen ser impulsadas por organismos multilaterales y se centran, especialmente, en metas de mitigación cuantificadas y declaradas en acuerdos que poseen un carácter vinculante para los estados signatarios. Un hito importante en este ámbito fue la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en 1992, donde se estableció la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Este tratado internacional creó un marco global para abordar el cambio climático, al que actualmente se adhieren 197 estados. En este marco, los países negocian y acuerdan medidas específicas que se materializan en protocolos y acuerdos, tales como el Protocolo de Kioto (1997) y el Acuerdo de París (2015). Estos tratados constituyen pilares fundamentales en las políticas globales contra el cambio climático, particularmente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

A nivel local, el enfoque suele centrarse en estrategias de adaptación como mecanismo para enfrentar las posibles consecuencias de eventos climáticos catastróficos. Las intervenciones en este nivel incluyen, entre otras, el análisis histórico de eventos extremos y sus proyecciones futuras, la recolección continua de datos, la supervisión experta para el análisis del territorio y de las infraestructuras, la determinación del grado de **vulnerabilidad** y **exposición** de la entidad socioeconómica interesada, y la consulta activa a las comunidades afectadas. Estas herramientas permiten identificar vulnerabilidades específicas y diseñar acciones concretas para aminorarlas, lo que reduce los riesgos y fortalece la **resiliencia** de los sistemas humanos, territoriales y económicos (consulte la Sección 4.1 para las definiciones de los términos utilizados).

Por último, las prácticas de mitigación y adaptación también pueden implementarse a nivel individual. Esto se logra mediante la adopción de estilos de vida orientados a la reducción de emisiones de carbono y al fortalecimiento de la resiliencia del entorno inmediato de subsistencia. De esta manera, las personas se convierten en agentes activos en la lucha contra el cambio climático, integrando estas estrategias globales en su vida cotidiana (IPCC, 2012) (World Weather Attribution, 2021) (Proyecto Resisto, 2022) (Constantino y Dávila, 2021) (Herring et al., 2021).

6.1 POLÍTICAS DE MITIGACIÓN

En síntesis, las principales estrategias de mitigación pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Reducción de emisiones:** Implementación de la transición hacia fuentes de energía renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles (Fig. 6-1).
- **Eficiencia energética:** Optimización del uso de la energía en sectores clave, como edificios, transporte e industrias, a través de tecnologías avanzadas y mejores prácticas.
- **Captura y almacenamiento de carbono (CAC):** Desarrollo e implementación de tecnologías diseñadas para atrapar y almacenar el dióxido de carbono antes de que sea liberado a la atmósfera, reduciendo su impacto ambiental.
- **Protección y restauración de ecosistemas naturales:** Conservación de bosques, humedales y océanos, que actúan como importantes sumideros de carbono, contribuyendo a la estabilización del clima.
- **Promoción de transporte sostenible:** Fomento del uso de vehículos eléctricos, sistemas de transporte público eficientes y modos de transporte no motorizados, como bicicletas, para reducir la huella de carbono del sector transporte.



Fig. 6-1 Políticas de mitigación: adopción de fuentes renovables de energía (Adaptación digital de: Ol-B-i.fernandez02, 2010. Lic. Creative Commons Atribución 2.0 Genérica)¹³⁰.

Los organismos que implementan políticas de mitigación están vinculados a diversos niveles de gobernanza y sectores, ya que las acciones de mitigación buscan reducir en todos los niveles los impactos negativos de actividades humanas sobre el medio ambiente, especialmente en el contexto de la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Los organismos multilaterales han asumido un papel rector en la lucha contra el cambio climático, liderando el establecimiento de políticas de cooperación, la definición de marcos legales de acción y la aprobación de acuerdos y protocolos internacionales orientados hacia un esquema de desarrollo global más sostenible. El objetivo central de estas políticas es la promoción de la transición energética, mediante la sustitución de fuentes fósiles por energías renovables y la eliminación de sustancias nocivas para la salud humana y el medio ambiente. En el marco de estos compromisos, se han establecido metas cuantificables para limitar el incremento global de la temperatura. Además, se han definido cuotas de financiamiento destinadas a apoyar a los países en desarrollo durante su proceso de transición, así como directrices que imponen cambios tecnológicos significativos, como la prohibición en la Unión Europea de motores de combustión interna en vehículos nuevos a partir de 2035, entre otras medidas adoptadas (IPCC, 2022) (Rojeli, 2018) (Stern, 2007) (Grubb, 2014) .

6.1.1 ORGANISMOS LIDERES EN LA LUCHA CONTRA EL CALENTAMIENTO GLOBAL

A continuación, se reseñan algunos de los principales organismos que lideran los procesos de diseño e implementación de políticas ambientales:

- **Organismos Internacionales:**
 - Naciones Unidas (ONU) (Fig. 6-2), que impulsan iniciativas como: a) El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Proporciona evaluaciones científicas para apoyar políticas climáticas. b) El Programa de las Naciones Unidas

¹³⁰ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiaberriztagarriak.jpg?uselang=es>

para el Medio Ambiente (PNUMA): Coordina acciones globales en temas ambientales. c) La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): Promueve acuerdos como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París.

- Banco Mundial y Fondo Monetario Internacional (FMI): Apoyan proyectos de mitigación en países en desarrollo, como transición energética y reducción de emisiones.
- Organización Mundial de la Salud (OMS): Implementa políticas relacionadas con la salud y el cambio climático.



Fig. 6-2 Sede de la ONU en Nueva York (Autor: <https://www.flickr.com/people/flickr4jazz/>, 2008. Licencia: Creative Commons Attribution 2.0 Generic)¹³¹

- **Organismos Regionales:**

- Unión Europea (UE): A través del Pacto Verde Europeo y sistemas como el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (ETS).
- Organización de Estados Americanos (OEA): Desarrolla estrategias ambientales y de desarrollo sostenible.
- Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (ASEAN): Coordina acciones regionales para mitigar el impacto ambiental.

- **Gobiernos Nacionales:**

- Implementan planes y estrategias de mitigación mediante ministerios de medio ambiente, energía y desarrollo sostenible.
- Ejemplo: Estados Unidos: Agencia de Protección Ambiental (EPA).

¹³¹ [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UN_HQ_2724390955_bfc562c6a9_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UN_HQ_2724390955_bfc562c6a9_(cropped).jpg)

- Ejemplo: México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- **Gobiernos Locales y Municipales:**
 - Diseñan políticas urbanas como la promoción de transporte público, uso de energías renovables y gestión de residuos. Ejemplo: Ciudades que son parte del C40 (*Cities Climate Leadership Group*).
- **Sector Privado:**
 - Empresas adoptan iniciativas de responsabilidad social corporativa, como reducir su huella de carbono, implementar economía circular y usar energías renovables.
- **Organizaciones No Gubernamentales (ONGs):**
 - *Greenpeace*, *WWF*, *The Nature Conservancy*, entre otras, trabajan en proyectos de conservación, educación y mitigación climática.
- **Instituciones Académicas y Científicas:**
 - Desarrollan investigaciones y tecnologías para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y promover prácticas sostenibles.
- **Comunidades Locales e Indígenas:**
 - Implementan soluciones basadas en la naturaleza y prácticas tradicionales para preservar los ecosistemas y mitigar impactos ambientales.

6.1.2 PRINCIPALES ACUERDOS DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL

La construcción de la cooperación internacional alrededor de las medidas a tomar para combatir el Calentamiento Global ha sido y continúa siendo un proceso complejo y controvertido; sin embargo, no ha sufrido interrupciones en su evolución ni cambios en su sentido y filosofía. Se ha logrado la adhesión de nuevos países y se han alcanzado logros significativos, aunque parciales. Pasamos a reseñar los hitos internacionales más importantes que han signado este proceso:

- **Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo, 1972)**
 - Primer encuentro internacional sobre cuestiones ambientales.
 - Se creó el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), marcando el inicio de la cooperación global en temas medioambientales.
- **Protocolo de Montreal (1987)**
 - Acuerdo internacional para la eliminación gradual de sustancias que agotan la capa de ozono, como los clorofluorocarbonos (CFC).
 - Aunque enfocado en el ozono, contribuyó indirectamente a la mitigación del cambio climático, ya que muchos CFC también son gases de efecto invernadero.
- **Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, 1992)**
 - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC):
 - Estableció un marco para la cooperación internacional.
 - Reconoció la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Protocolo de Kioto (1997)**
 - Primer acuerdo vinculante bajo la CMNUCC:

- Estableció metas específicas de reducción de emisiones para países desarrollados.
- Introdujo mecanismos como el comercio de emisiones y los mecanismos de desarrollo limpio.
- En vigor desde 2005 hasta 2020.
- **Acuerdo de París (2015)**
 - Marco internacional para limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C, con esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C.
 - Incluye: Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs). Cada país establece metas de reducción de emisiones.
 - Revisiones quinquenales de los compromisos.
 - Enfoque en financiamiento climático para países en desarrollo.
- **Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015). Objetivo 13: Acción por el clima.**
 - Refuerza los compromisos globales con el cambio climático, integrándolos en un marco más amplio de desarrollo sostenible.
- **Pacto Climático de Glasgow (COP26, 2021).** Se alcanzaron compromisos para:
 - Reducir gradualmente el uso de carbón.
 - Incrementar el financiamiento climático para países en desarrollo.
 - Avanzar en la reducción de emisiones de metano.
- **COP27 (Sharm El-Sheikh, 2022)**
 - Creación de un fondo de pérdidas y daños para ayudar a los países vulnerables frente a los impactos del cambio climático.
 - Se reconoció la necesidad de aumentar la ambición en las metas de reducción de emisiones.
- **COP29 (Bakú, 2024)**
 - Financiación climática: se acordó aumentar la financiación a los países en desarrollo de 100.000 a 300.000 millones de dólares anuales para 2035. El objetivo es que los países desarrollados, los mayores emisores históricos de gases de efecto invernadero, contribuyan a que los países más vulnerables puedan adaptarse a la crisis climática.

Estos hitos reflejan un esfuerzo sostenido hacia una acción climática más inclusiva y ambiciosa. Sin embargo, a pesar de los avances en los compromisos internacionales, persisten desafíos significativos en su implementación, financiamiento y alcance, lo que hace imprescindible una mayor cooperación global para lograr los objetivos establecidos. Contrariamente a esta dinámica global, bajo la administración del presidente Donald Trump, Estados Unidos se retiró del Acuerdo de París (primero de forma efectiva en noviembre de 2020 y nuevamente en enero de 2025), así como de varios mecanismos esenciales de financiación climática. Estas decisiones constituyeron un serio revés para la gobernanza climática mundial y debilitaron los esfuerzos de mitigación y adaptación en los países más vulnerables.

6.2 METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE RIESGOS MEDIANTE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

Cómo anticipado en la parte introductoria del capítulo, el análisis y gestión de riesgos debe efectuarse tomando en cuenta las especificidades del sector y del particular caso que se requiere estudiar. Existen riesgos en el sector financiero y comercial, en el informático y energético, en el agrícola e industrial, en suma, podríamos decir que en todas las manifestaciones de la vida humana. En el caso de los riesgos climáticos, es necesario tener en cuenta las especificidades propias de las comunidades y del territorio interesado e identificar los eventos que con mayor probabilidad lo afectan. A pesar de lo especializado que puedan resultar los estudios de caso y sus soluciones, se pueden sin embargo definir algunas líneas generales aplicables a la mayoría de las situaciones. Las técnicas generales para la gestión de los riesgos climáticos han sido sistematizadas, evolucionando hacia una metodología bien definida y fácilmente transmisible. Sus principales etapas se detallan a continuación (*U.S. Department of Agriculture, 2024*) (*U.S. Army Corps of Engineers, 2024*) (*Sánchez & Reyess, 2015*) (*Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020*):

- **Evaluación de riesgos locales**
 - Analizar datos históricos y proyecciones futuras sobre eventos meteorológicos extremos
 - Evaluar la vulnerabilidad de infraestructuras críticas
 - Considerar impactos potenciales en la salud pública, economía local y ecosistemas
- **Planificación participativa**
 - Involucrar activamente a los miembros de la comunidad en el proceso de toma de decisiones:
 - Organizar reuniones públicas y talleres
 - Crear grupos de trabajo con representantes de diferentes sectores
 - Recoger aportaciones de grupos vulnerables como ancianos, discapacitados y minorías
- **Desarrollo de estrategias de adaptación**
 - Elaborar planes de acción específicos para abordar los riesgos identificados:
 - Mejorar sistemas de alerta temprana
 - Actualizar códigos de edificación para aumentar la resiliencia de los edificios
 - Implementar soluciones basadas en la naturaleza, como áreas verdes urbanas para mitigar las olas de calor
- **Fortalecimiento de las capacidades locales**
 - Potenciar los recursos y las competencias de la comunidad:
 - Formar voluntarios para la gestión de emergencias
 - Educar a los residentes sobre prácticas sostenibles y preparación ante desastres
 - Colaborar con instituciones académicas para investigación e innovación
- **Integración en las políticas locales**
 - Incorporar la gestión del riesgo climático en todos los aspectos de la gobernanza local:

- Actualizar planes urbanísticos considerando zonas de riesgo
- Revisar políticas de gestión de recursos hídricos
- Integrar consideraciones climáticas en los presupuestos municipales
- **Colaboración interinstitucional**
 - Establecer alianzas con otras comunidades y niveles de gobierno:
 - Compartir mejores prácticas con comunidades similares
 - Coordinarse con autoridades regionales para proyectos de adaptación a gran escala
 - Acceder a financiación y apoyo técnico de entidades nacionales e internacionales
- **Monitoreo y evaluación continua**
 - Implementar un sistema de revisión periódica:
 - Establecer indicadores de desempeño para medir la eficacia de las acciones emprendidas
 - Actualizar regularmente las evaluaciones de riesgos en base a nuevos datos climáticos
 - Adaptar estrategias en respuesta a cambios en las condiciones locales o nueva información científica
- **Comunicación y sensibilización**
 - Mantener a la comunidad informada e involucrada:
 - Desarrollar campañas de sensibilización sobre riesgos climáticos locales
 - Proporcionar actualizaciones regulares sobre las acciones de adaptación en curso
 - Celebrar éxitos y progresos para mantener el compromiso de la comunidad.

En el marco programático anterior de gestión de riesgos, resulta fundamental atender ciertos aspectos clave, siendo el primero la identificación y priorización de los riesgos. Es importante reconocer que no todos los territorios están expuestos a los mismos riesgos climáticos ni con igual probabilidad. Por ejemplo, una región situada en el denominado "Corredor de los Tornados" en Estados Unidos presenta un riesgo significativamente elevado de tornados, mientras que una isla como Puerto Rico, ubicada en la trayectoria de los huracanes atlánticos, enfrenta una alta probabilidad de desastres relacionados con huracanes.

En este ámbito, es indispensable llevar a cabo un análisis detallado de la situación geográfica, considerando la secuencia histórica de eventos ocurridos en una zona determinada y sus proyecciones futuras. Este análisis permite priorizar los riesgos y diseñar estrategias de adaptación adecuadas a cada realidad territorial.

El paso siguiente consiste en determinar el grado de exposición y vulnerabilidad (véase Sección 4.1) de un contexto socioeconómico y ambiental específico, así como evaluar el impacto potencial de un fenómeno extremo sobre dicho contexto. En este sentido, es necesario cuantificar tanto los efectos directos como los indirectos de un evento específico. Esta cuantificación debe abarcar múltiples dimensiones, entre las que se incluyen: el número estimado de fatalidades y personas heridas, la monetización de las pérdidas económicas, los daños a infraestructuras críticas, las pérdidas en cosechas y terrenos agrícolas, y la disminución de la biodiversidad, así como otros impactos ambientales relevantes.

Un aspecto crucial para el éxito de las políticas de adaptación es la participación activa de las comunidades expuestas a situaciones de riesgo. El compromiso comunitario es de vital importancia para la adopción de medidas de adaptación eficaces. Este proceso no solo permite sensibilizar y preparar mejor a las comunidades ante la posibilidad de enfrentar un desastre, sino

que también facilita el aprovechamiento de su conocimiento local sobre las vulnerabilidades del territorio, los servicios de emergencia disponibles y las rutas de evacuación más seguras (Fig. 6-3).

Este enfoque participativo contribuye al diseño de sistemas de prevención, alerta temprana y respuestas más resilientes, adaptados a las necesidades y características específicas de cada región. Además, fomenta una mayor cohesión social y un sentido compartido de responsabilidad en la gestión del riesgo climático.

Entre las medidas clave se incluyen la búsqueda de financiamiento para proyectos por parte de las autoridades en diferentes niveles de gobierno, la ejecución de proyectos de ingeniería destinados a reducir las vulnerabilidades físicas, la reubicación de complejos productivos y asentamientos humanos particularmente expuestos, así como la implementación de planes de sensibilización y participación comunitaria (Bartels & Suárez, 2021).



Fig. 6-3 Acciones de Adaptación (Fuente: Blog Impacto, Banco Interamericano de Desarrollo, 2021. En: (Bartels & Suárez, 2021)).

Las acciones de carácter general que usualmente se toman están dirigidas a:

Las acciones de carácter general que usualmente se toman están dirigidas a:

- **Construcción de infraestructuras resilientes:** obras civiles e instalaciones capaces de resistir fenómenos extremos (inundaciones, huracanes, olas de calor).
- **Gestión del agua:** Construcción de presas, sistemas de drenaje, y reutilización de agua para enfrentar sequías o inundaciones.
- **Cambio en las prácticas agrícolas:** Uso de cultivos más resistentes a la sequía o al aumento de temperaturas.
- **Planes de emergencia:** Sistemas de alerta temprana para desastres naturales.
- **Protección de comunidades costeras:** Construcción de barreras contra inundaciones y planes de reubicación para zonas vulnerables.

En definitiva, el fin último de todas las acciones de adaptación es incrementar la **resiliencia** de un territorio socioeconómico en particular. Estas acciones deben ser específicas para cada tipo de evento calamitoso, por lo que resulta indispensable diseñar estrategias adaptadas a las particularidades de cada evento y de cada zona.

Para continuar con este capítulo, vamos a examinar algunos ejemplos de carácter general.

6.2.1 INUNDACIONES Y DESLAVES

Tal como se analizó en el capítulo anterior, el evento extremo de 1999 en Vargas evidenció la magnitud de los daños que pueden ocasionar lluvias torrenciales en zonas vulnerables. A partir de experiencias como esta, la gestión del riesgo frente a inundaciones y deslaves requiere estrategias integrales que incluyen la construcción de infraestructuras hidráulicas (diques, canales de desvío y sistemas de drenaje eficientes), entre otras medidas preventivas. Al mismo tiempo deben prohibirse las construcciones en áreas inundables para reducir el impacto de las crecidas. Asimismo, es fundamental la reforestación de áreas ribereñas para disminuir la erosión del suelo y mejorar la capacidad de infiltración de agua.

También deben implementarse sistemas de monitoreo hidrometeorológico que permitan una alerta temprana a la población. Además, es crucial desarrollar planes y rutas de evacuación bien definidos y llevar a cabo simulacros periódicos con la participación activa de las comunidades. Por otro lado, la reubicación de viviendas y empresas ubicadas en zonas de alto riesgo podría ser necesaria, siempre considerando mecanismos justos de compensación y reasentamiento para los afectados.

En años recientes, se ha observado un incremento preocupante tanto en la frecuencia como en la severidad de los fenómenos de inundaciones asociados al desbordamiento de aguas continentales. Por ello, resulta fundamental señalar algunas medidas clave para prevenir el desbordamiento de ríos y embalses. Además de la limpieza periódica de los cauces fluviales, existen diversas estrategias técnicas y de gestión territorial que contribuyen significativamente a la prevención del desbordamiento de los ríos. Estas medidas incluyen (*U.S. Geological Survey, 2022*) (*Congressional Budget Office, 2024*) (*U.S. Department of the Interior, 2024*) (Genatios y Lafuente, 2020):

- **Construcción de infraestructuras de control**

- Presas y represas:
- Infraestructuras diseñadas para regular el flujo y almacenamiento de agua, reduciendo la presión sobre los cauces en periodos de lluvias intensas (Fig. 6-4).
- Diques y muros de contención:
- Estructuras que mantienen el agua dentro del cauce, evitando su desbordamiento.
- Túneles y estructuras de desviación:
Soluciones que redirigen el excedente de agua hacia áreas de menor impacto (Fig. 6-5).

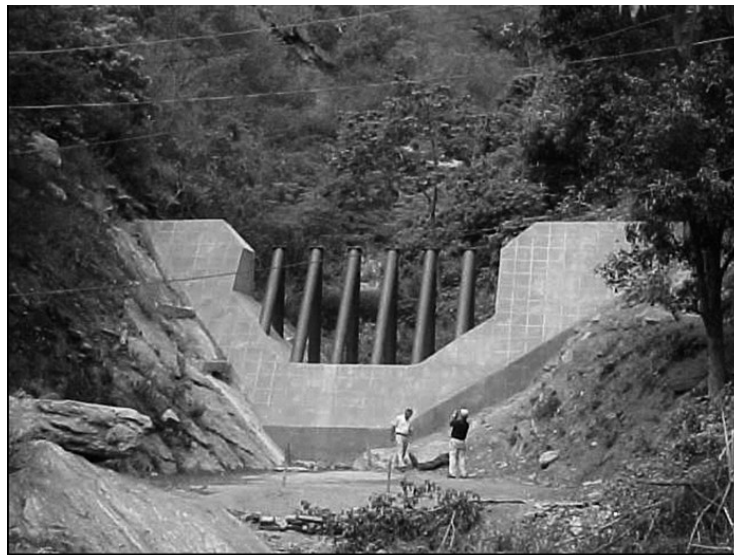


Fig. 6-4 Presa de rastrillo de Tacagua, Edo. Vargas, Venezuela (Foto: Mario Mengual. En: Genatios, C. y Lafuente, M.: "Vargas: Desastre, Proyecto y Realidad", 2020).

- **Gestión del territorio**

- Regulación urbanística: Establecimiento de ordenanzas que limiten la construcción en zonas inundables.
- Preservación de llanuras aluviales: Conservación de estas áreas como zonas naturales de amortiguación frente a inundaciones.

- Reforestación y conservación forestal: Prevención de la deforestación y promoción de la reforestación en las cuencas hidrográficas para reducir la escorrentía superficial y aumentar la retención de agua.
- **Optimización de los sistemas de drenaje**
 - Sistemas de drenaje urbano: Implementación de tecnologías modernas para mejorar la evacuación del agua pluvial.
 - Técnicas de desarrollo de bajo impacto (LID): Soluciones que promueven la infiltración del agua en el suelo, como pavimentos permeables y jardines de lluvia.
- **Medidas de protección local**
 - Barreras temporales: Uso de sacos de tierra o arena para proteger zonas vulnerables durante emergencias.
 - Refuerzo estructural: Fortalecimiento de techos y edificaciones en áreas propensas a inundaciones.
- **Sistemas de alerta y preparación**
 - Alertas tempranas: Implementación de sistemas de monitoreo y alerta para detectar riesgos de inundaciones de forma anticipada.
 - Planes de emergencia: Desarrollo de estrategias de evacuación y protocolos de respuesta ante eventos extremos.
- **Restauración de ecosistemas**
 - Renaturalización de ríos: Restauración de arroyos y cauces fluviales a condiciones más próximas a su estado natural, mejorando su capacidad para contener agua durante lluvias extremas.
 - Parques de aguas pluviales o áreas de laminación: Creación de espacios verdes diseñados para captar y almacenar el agua excedente de forma temporal.



Fig. 6-5 Presa Derivadora El Cercado. Proyecto Río Ranchería, La Guajira, Colombia (Autor: Alejandrorestrepouribe, 2013. Lic. *Creative Commons BY-SA 4.0*)^{132 133}.

¹³² https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Presa_Derivadora_Presa_-_Presa_El_Cercado_-_Proyecto_R%C3%ADo_Rancher%C3%ADa_%28_La_Guajira_-_Colombia%29.JPG

¹³³ El 28 de febrero de 2024 en Italia se han producido graves inundaciones que han afectado principalmente a la ciudad de Vicenza, Italia, por el desbordamiento del río Bacchiglione, aunque sus dos depósitos de laminación han ayudado a contener su crecida (Newsroom Infobae, 2024).

Con relación a la protección de las comunidades costeras, se pueden implementar acciones contra el aumento progresivo del nivel del mar y las fuertes marejadas (*U.S. Army Corps of Engineers, 2024*) (*European Environment Agency, 2024*):

- **Medidas contra las marejadas y la elevación del nivel del mar**

- Muros de inundación: Evitan que el agua ascendente llegue a tierra firme, protegiendo a las personas y propiedades.
- Paseos marítimos elevados: Como el Paseo marítimo de Rockaway en Nueva York, que integra la protección costera como característica.
- Restauración de hábitats costeros: Los pantanos y humedales protegen la costa de tormentas y olas, además de proporcionar hábitat para diversas especies.
- Costas vivas: Utilización de vegetación nativa como pastos de pantano, pastos marinos y sistemas de arrecifes para estabilizar la costa y mantener funciones biológicas.
- Pavimento permeable: Absorbe el agua como una esponja, evitando inundaciones y ayudando a mantener la ciudad fresca.
- Parques elevados: En Manhattan, se está diseñando un parque elevado que incluirá un muro contra inundaciones.
- Códigos de construcción actualizados: Nueva York ha implementado nuevos requisitos de elevación para futuras estructuras en zonas de riesgo.
- Zonificación especial: Limitación de la densidad en áreas de mayor riesgo mediante "distritos costeros especiales de riesgo".
- Combinación de infraestructura verde y gris: Diseños innovadores que incorporan vegetación natural con estructuras más duras como alféizares de roca o escalones de concreto (Fig. 6-6).



Fig. 6-6 Proyecto de paseo marítimo en el Tigrillo-Naiguatá (Autores: IERU/USB. En: Genatios, C. y Lafuente, M.: "Vargas: Desastre, Proyecto y Realidad", 2020).

La implementación integral de estas medidas, en conjunto con la limpieza regular de los cauces fluviales, representa una estrategia eficaz para reducir el riesgo de desbordamientos y mitigar los efectos adversos de las inundaciones sobre las comunidades y el medio ambiente.

6.2.2 SEQUÍAS

En el caso de las **sequías**, las medidas de adaptación pueden centrarse en la gestión eficiente de los recursos hídricos. Esto incluye la construcción y mantenimiento de infraestructura

de almacenamiento de agua, como presas, reservorios y cisternas comunitarias, que permitan acumular agua durante períodos de lluvia para su uso en épocas de escasez.

Además, es fundamental promover prácticas agrícolas resilientes, como el uso de sistemas de riego tecnificados y métodos de cultivo que requieran menos agua, incluyendo variedades de cultivos resistentes a la sequía. También es recomendable fomentar técnicas de conservación del suelo, como la siembra directa o el uso de cobertura vegetal, para reducir la evaporación y mejorar la retención de humedad en el suelo.

En términos de gestión comunitaria, podrían establecerse programas de educación sobre el uso eficiente del agua, orientados tanto a las actividades domésticas como productivas. Paralelamente, sería beneficioso implementar políticas de reforestación y manejo sostenible de cuencas hidrográficas para garantizar la disponibilidad de agua a largo plazo (U.S. Department of Agriculture, Jan. 2025).

6.2.3 HURACANES

En el caso de las zonas expuestas a **huracanes**, las medidas de adaptación deben enfocarse en reducir los impactos asociados a los fuertes vientos, lluvias intensas y marejadas ciclónicas. Una acción fundamental es el fortalecimiento de la infraestructura crítica, como hospitales, escuelas y redes eléctricas, mediante normas de construcción resistentes a vientos extremos (Fig. 6-7). Adicionalmente, la implementación de sistemas de drenaje urbano eficientes puede prevenir inundaciones provocadas por lluvias torrenciales.

La reubicación de asentamientos ubicados en áreas costeras vulnerables a marejadas ciclónicas constituye otra medida clave. Este proceso debe incluir estrategias de planificación urbana que promuevan el desarrollo en zonas más seguras y ofrezcan alternativas habitacionales viables para las comunidades afectadas.

Los sistemas de alerta temprana y planes de evacuación son esenciales para proteger vidas humanas. Estos deben complementarse con simulacros regulares que involucren a toda la comunidad y con campañas de sensibilización que eduquen sobre las medidas de autoprotección. Finalmente, es necesario promover la restauración de ecosistemas costeros, como manglares y arrecifes de coral, que actúan como barreras naturales frente a las marejadas ciclónicas.



Fig. 6-7 Edificios con Diseño Adaptativo: En Taiwán, el *Agora Garden* combina diseño sostenible con resistencia estructural para enfrentar vientos extremos y sismos, usando amortiguadores de masa líquida. Esta tecnología es efectiva contra huracanes y temblores (Autor: [Yu tptw](#), 2023. Lic. *Creative Commons BY-SA 4.0*)¹³⁴.

¹³⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Tao_Zhu_Yin_Yuan#/media/File:Agora_Tower_20230309.jpg

A continuación, se detallan algunas de las estrategias mencionadas (*U.S. Army Corps of Engineers, 2024*) (R., 2024) (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024*):

- **Medidas de Protección Física**

- Protección de Ventanas y Estructuras: Utilizar contraventanas permanentes o paneles de madera contrachapada para proteger ventanas es crucial para minimizar daños por vientos fuertes. Además, reforzar puertas, paredes y techos puede reducir el riesgo de daños estructurales.
- Impermeabilización y Elevación: En áreas propensas a inundaciones, impermeabilizar sótanos y elevar servicios críticos como paneles eléctricos puede prevenir daños por agua. Considerar la elevación de toda la estructura en zonas de alto riesgo.
- Limpieza y Mantenimiento: Podar árboles para eliminar ramas muertas o débiles y asegurar que los desagües estén despejados ayuda a prevenir daños adicionales durante una tormenta.

- **Planificación y Preparación**

- Rutas de Evacuación: Es esencial familiarizarse con las rutas de evacuación seguras y los refugios cercanos antes de la temporada de huracanes. Tener un plan claro para evacuar puede salvar vidas.
- Suministros de Emergencia: Mantener un kit con linternas, radios portátiles, alimentos no perecederos, agua, medicamentos esenciales y ropa abrigadora es fundamental para afrontar los días posteriores a un huracán.
- Planes de Comunicación: Desarrollar un plan de comunicación para reunirse con la familia en caso de separación durante un desastre. Designar a un contacto fuera del estado puede facilitar la comunicación después del evento.

- **Gestión del Riesgo**

- Seguro contra Inundaciones: Adquirir un seguro que cubra daños por inundaciones proporciona una protección financiera importante para las reparaciones necesarias tras un huracán.
- Evaluación de Vulnerabilidades: Conocer la vulnerabilidad específica del área a vientos e inundaciones permite tomar medidas preventivas más efectivas y personalizadas.

6.2.4 TORNADOS

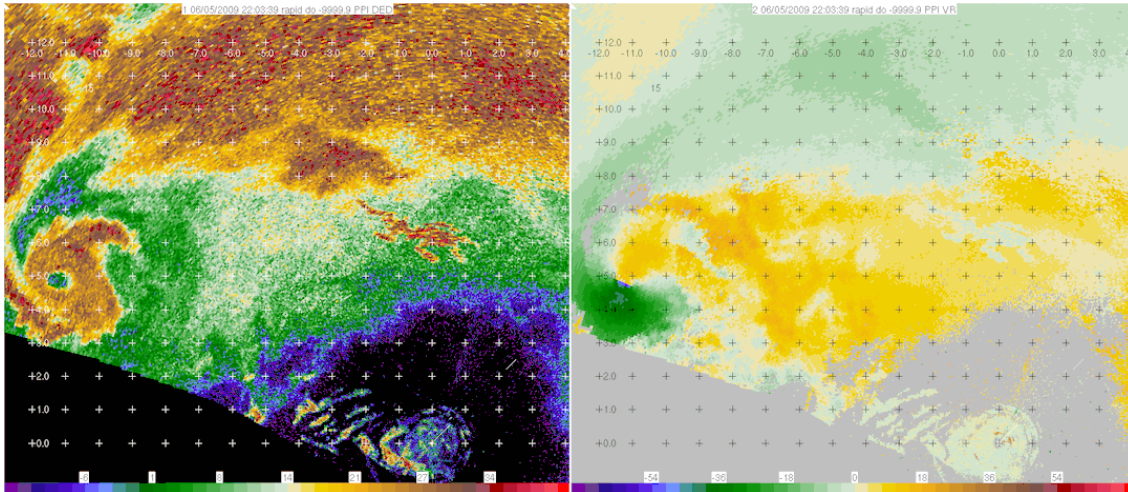


Fig. 6-8 Una secuencia de radar de *Doppler on Wheels* de un eco en cadena y un mesociclón asociado en el condado de Goshen, Wyoming, 5 de junio de 2009 (Autor: Joshua Wurman - <http://vortex2.org/dowloops/>, 2009. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*)¹³⁵.

En las zonas propensas a **tornados** (Fig. 6-8), las acciones de adaptación deben centrarse en minimizar los daños causados por los vientos extremadamente fuertes. Una medida crucial es la construcción de refugios subterráneos o estructuras resistentes al viento en viviendas, escuelas y otros edificios públicos (Fig. 6-9). Además, las normativas de construcción deben incluir estándares estrictos para garantizar la estabilidad de las edificaciones.

El establecimiento de sistemas de monitoreo y alerta temprana, como radares meteorológicos avanzados, permite informar a las comunidades con suficiente antelación, reduciendo así el riesgo de pérdida de vidas. Estas herramientas deben ir acompañadas de campañas educativas que enseñen a la población cómo actuar rápidamente durante una emergencia, lo que incluye identificar zonas seguras en sus hogares o comunidades.

Otra estrategia importante es el desarrollo de mapas de riesgo que identifiquen las áreas más vulnerables y guíen la planificación urbana y las decisiones de ubicación de infraestructura crítica. A nivel comunitario, la reforestación puede desempeñar un papel en la reducción de los escombros que los tornados suelen levantar, mientras que la planificación territorial puede minimizar la exposición directa de viviendas y actividades productivas a estos eventos.

A continuación, los detalles de las medidas técnicas mencionadas, las cuales son similares a las utilizadas para huracanes, pero con algunas consideraciones específicas (Mártinez-López, 2024) (*Texas Department of Insurance*, 2025) (Soto et al., 2017):

- **Protección Estructural**

- Refuerzo de Edificaciones: asegurar puertas, ventanas, paredes y techos para resistir vientos fuertes.
- Espacios Seguros: identificar o crear un lugar seguro en el nivel más bajo de la estructura, como un sótano, un cuarto interior pequeño o un pasillo alejado de ventanas.
- Contraventanas: instalar contraventanas permanentes o tener paneles de madera contrachapada listos para proteger las ventanas.

¹³⁵ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8454891>



Fig. 6-9 Refugio contra tornados, Des Moines, IOWA USA (Autor: Tom Hurd, 2004. FEMA *Photo Library*. Lic. Dominio Público)¹³⁶.

- **Preparación y Planificación**

- Simulacros: realizar prácticas de simulacro de tornado con tu familia al menos una vez al año.
- Kit de Emergencia: preparar un botiquín de primeros auxilios y suministros de supervivencia, incluyendo alimentos no perecederos, agua, linterna, baterías y medicamentos.
- Documentación: guardar documentos importantes en una caja resistente al fuego o caja fuerte.

- **Sistemas de Alerta**

- Reconocimiento de Señales: aprender a identificar las señales de advertencia de un tornado, como cielo oscuro o verde, nubes en forma de embudo y granizo de gran tamaño.
- Medios de Comunicación: mantener una radio de baterías para recibir información actualizada sobre emergencias.

- **Acciones Durante un Tornado**

- Refugio: buscar refugio en una estructura sólida, evitando casas móviles o vehículos.
- Posición de Seguridad: colocarse debajo de algo resistente como una mesa pesada y cubre tu cuerpo con una frazada o colchón.
- Evitar Áreas Peligrosas: alejarse de ventanas y evitar pasillos que puedan funcionar como "túneles" de viento.

Estas medidas, combinadas con un plan de evacuación bien definido y el conocimiento de los números de emergencia locales, pueden ayudar significativamente a reducir el impacto de los tornados en las comunidades.

¹³⁶ https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Tornado_shelters#/media/File:FEMA_-_13476_-_Photograph_by_Tom_Hurd_taken_on_07-24-2004_in_Iowa.jpg



137

¹³⁷ Imagen de cierre capítulo: "1770s firefighters" (Fuente: U.S. government files, 2007. Lic. Public Domain).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Old_firefighters.jpg

Resiliencia de ciudades costeras: los casos de Rotterdam y Singapur

7



138

El programa 100 Ciudades Resilientes¹³⁹ definió la resiliencia urbana como: “La capacidad de las personas, comunidades, instituciones, empresas y sistemas dentro de una ciudad para sobrevivir, adaptarse y crecer sin importar qué tipo de estrés crónico y crisis aguda experimenten”¹⁴⁰.

Las siete cualidades de resiliencia que deben orientar las acciones son:

- **REFLEXIÓN:** (Reflective) Aprender y aprovechar las experiencias pasadas para orientar las decisiones futuras
- **RECURSOS:** Reconocer formas alternativas e innovadoras de usar los recursos disponibles.
- **ROBUSTEZ:** Sistemas bien concebidos, contruidos y gestionados
- **REDUNDANCIA:** Capacidad de reserva de los sistemas. Existencia de múltiples alternativas de respuesta para adaptarse a las contingencias e interrupciones.
- **FLEXIBILIDAD:** adoptar y cambiar estrategias con suficiente rapidez en respuesta a condiciones variables.
- **INCLUSIÓN:** priorizar una amplia consulta para crear un sentido de propiedad y una visión compartida en la toma de decisiones
- **INTEGRACIÓN:** reunir una variedad de sistemas, instituciones, iniciativas distintas y orientarlas según objetivos comunes.

Los casos exitosos de estrategias de adaptación al cambio climático corresponden a comunidades que han integrado sus iniciativas de adaptación en una visión global de un futuro resiliente para la ciudad y sus habitantes. Las medidas de adaptación y de resiliencia muchas veces exigen la construcción de nuevas infraestructuras y la transformación del espacio urbano.

¹³⁸ Imagen del título: “El puerto de Rotterdam” (Autor: Paul Signac, 1907. Lic. *Public Domain*).

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paul_Signac_-_The_Port_of_Rotterdam_-_Google_Art_Project.jpg

¹³⁹ Programa de la Fundación Rockefeller que funcionó entre 2013 y 2019.

¹⁴⁰ <https://resilientcitiesnetwork.org/>

En los casos exitosos estudiados, se aprovechan estas transformaciones para mejorar las ciudades. Adecuadamente concebidas, dentro de un marco de planificación a largo plazo y con una visión integral de un futuro sostenible para la ciudad, las nuevas infraestructuras y espacios urbanos, pueden otorgar valor agregado a las ciudades y contribuir con mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Una consideración importante en la planificación es que, sin duda, los costos financieros asociados con la incorporación de medidas tempranas de prevención frente al cambio climático resultarán menores que responder reactivamente, después de ocurridos los impactos del cambio climático y los daños derivados de eventos extremos (Shalaby y Aboelnaga, 2017).

La planificación urbana es una herramienta de más en más importante para implementar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Los riesgos de inundaciones sólo pueden reducirse de manera efectiva si, además de las medidas de adaptación técnicas, se realiza una planificación espacial y urbana adecuada. La planificación urbana sostenible se basa en incentivar la construcción de edificaciones en áreas seguras, fuera del área propensa a inundaciones frecuentes; controlar el uso de la tierra para impedir construcciones en áreas inseguras; y desarrollar ordenanzas de zonificación y códigos de construcción apropiados para reducir los daños por inundaciones. Un buen uso de la tierra permite utilizar las áreas inundables para fines tales como parques, áreas naturales o reservas ecológicas. Eso resulta menos costoso que tratar de garantizar que el desarrollo futuro de construcciones y urbanismos en esas áreas peligrosas, sea a prueba de inundaciones.

En este capítulo se presentan dos casos de ciudades costeras muy vulnerables frente al cambio climático, que han sabido implementar estrategias adaptativas integrales exitosas, enmarcadas en visiones de un futuro resiliente y sostenible para sus habitantes.

7.1 ROTTERDAM, HOLANDA

Casi el 80% de la ciudad de Rotterdam se encuentra bajo el nivel del mar (Fig. 7-1). Rotterdam está situada a unos 40 km (24,9 millas) tierra adentro, en el río "Nuevo Mosa" (*Nieuwe Maas*), uno de los canales en el delta del Mar del Norte formado por los ríos Rin y Mosa.



Fig. 7-1 Mapa topográfico de Rotterdam (Fuente: Janwillemvanaalst, 2014. Licencia: *Creative Commons BY-SA 3.0*) ¹⁴¹.

¹⁴¹ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam-plaats-OpenTopo.jpg>

Rotterdam alberga uno de los puertos más grandes del mundo y tiene una larga historia de experiencias de adaptación y resiliencia. Con una población de unos 630.000 habitantes y 319 km² (78,827 acres) de extensión, Rotterdam forma parte de la red de ciudades resilientes¹⁴², *C40 cities*¹⁴³ y *Connecting Delta Cities* (CDC)¹⁴⁴. Es, hoy por hoy, una de las ciudades referentes en el mundo en materia de sostenibilidad (Molenaar y Gebraad, 2014).

Varios acontecimientos del siglo XX ilustran la vulnerabilidad de Rotterdam a las inundaciones. La "marejada ciclónica del Mar del Norte" de 1953 provocó 1835 muertes e inundó 165.000 hectáreas de tierra en los Países Bajos. El desastre condujo al establecimiento de la comisión Delta y al proyecto de ingeniería de Delta Works. La ciudad no tuvo grandes daños durante las inundaciones del río Mosa de 1993, que causaron más de 100 millones de euros de daños río arriba en los Países Bajos. Sin embargo, en agosto de 2006, fuertes inundaciones y daños generalizados ocurrieron en la ciudad. El problema de las inundaciones en Rotterdam está aumentando con la elevación progresiva del nivel del mar. A lo largo del siglo XX, el nivel del Mar del Norte se elevó unos 200 mm (7.9 pulgadas); la tasa de aumento del nivel del mar entre 1993 y 2004 fue de 3 mm (0.12 pulgadas) por año.

Los rápidos cambios del clima ponen en riesgo el sistema de protección que ha funcionado por muchos años en la ciudad. En efecto, se considera que Rotterdam tiene un robusto sistema de diques, presas y barreras contra inundaciones para proteger tanto a la ciudad como al puerto. El sistema de drenaje de aguas y alcantarillado, con canales, estanques y bombas, es un ejemplo de ingeniería en el mundo y mantiene a la ciudad segura, a pesar de que su altura promedio es de dos metros bajo el nivel del mar, y algunas zonas se ubican bajo los seis metros (Fig. 7-2) (*Rotterdam Climate Initiative*, 2013) (Dolman y Verlinde, 2024)¹⁴⁵.

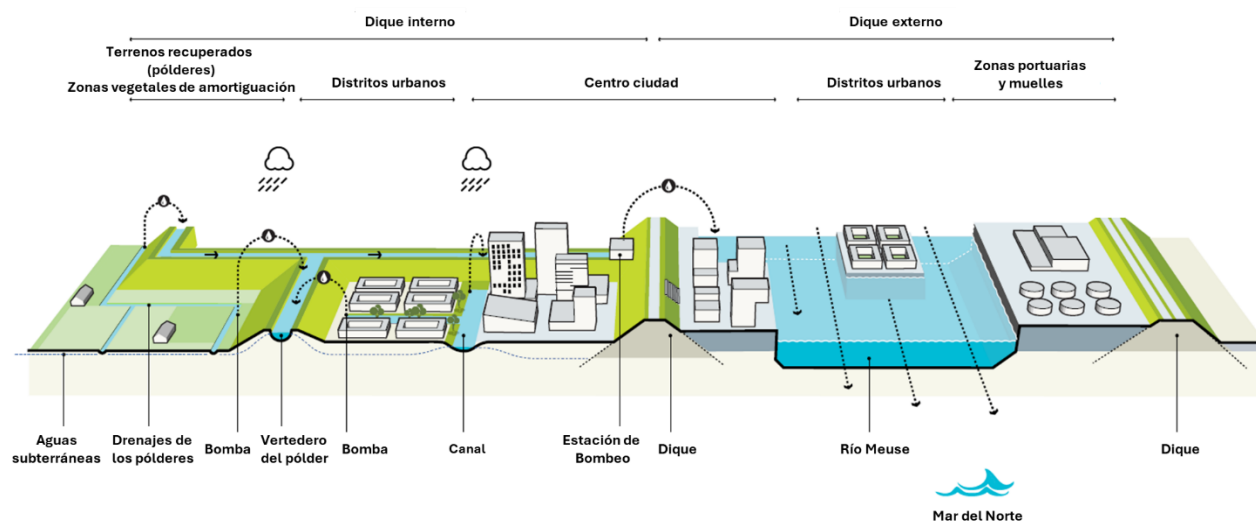


Fig. 7-2 Sistema contra inundaciones y de drenaje de aguas pluviales en Rotterdam (Imagen adaptada de: De Urbanisten¹⁴⁶ y tomada de *Rotterdam Climate Initiative*, 2013)¹⁴⁷.

Sin embargo, el sistema existente es complejo y poco flexible. Si algo sale mal, los daños a personas y propiedades en las zonas más bajas y densamente pobladas de la ciudad serían catastróficos. Por ello, frente a los riesgos crecientes del cambio climático, la ciudad ha

¹⁴² <https://resilientcitiesnetwork.org/networks/rotterdam/>

¹⁴³ C40 es una red de megaciudades del mundo comprometidas con abordar el cambio climático. Integra 97 de las ciudades más grandes de mundo <https://www.c40.org/>

¹⁴⁴ Red de ciudades ubicadas en deltas fluviales, activas en el campo del desarrollo espacial relacionado con el cambio climático, la gestión del agua y la adaptación.

¹⁴⁵ El artículo de Dolman y Verlinde (2024) es una nueva versión del documento *Rotterdam Climate Initiative* (ver bibliografía).

¹⁴⁶ <https://www.urbanisten.nl/work/rotterdam-adaptation-strategy>

¹⁴⁷ Figura tomada de la pp. 15 versión del documento *Rotterdam Climate Initiative*, 2013.

desarrollado desde el año 2008 una estrategia de adaptación. El objetivo es hacer de Rotterdam una ciudad “*climate-proof*” para 2025. Entre los retos a enfrentar, compartidos por muchas regiones costeras a lo largo del mundo, están las inundaciones causadas por el aumento del nivel del mar en combinación con el aumento del nivel de agua en los ríos; las precipitaciones extremas; las sequías (que provocan la reducción del agua subterránea); cambios en las mareas que favorecen la intrusión de agua salada en el sistema de agua urbana y las olas de calor.

Las estrategias de adaptación climática de la ciudad se comprenden dentro de una visión integral de construcción de resiliencia, enmarcada dentro de la *Rotterdam Climate Initiative*, una alianza entre la ciudad de Rotterdam, el puerto, la DCMR *Environmental Protection Agency Rijnmond* y *Deltalinqs*. Esta iniciativa fue lanzada en 2006, con el objetivo global de reducir las emisiones de CO₂ de la ciudad en un 50% para 2025 y de hacerla más resiliente¹⁴⁸. Con esta iniciativa la ciudad ha desarrollado una visión integrada para una “Rotterdam resiliente” en 2030, con siete objetivos definidos de resiliencia y 68 acciones concretas planificadas. Los siete objetivos de resiliencia planteados son:

1. Rotterdam: una sociedad equilibrada (*a balanced society*);
2. Ciudad portuaria global, construida con energía limpia y confiable (*World Port City built on clean and reliable energy*);
3. Ciudad portuaria cibernética (*Rotterdam Cyber Port City*);
4. Ciudad adaptada al clima a un nuevo nivel (*Climate Adaptive city to a new level*);
5. Infraestructura preparada para el siglo XXI (*Infrastructure ready for the 21st century*);
6. Red de Rotterdam: verdaderamente nuestra ciudad (*Rotterdam network – Truly our city*);
7. Anclar resiliencia en la ciudad (*Anchoring resilience in the city*)¹⁴⁹;

Muchas de las acciones previstas en el plan integran iniciativas previas, otras ya en marcha y algunas mejoras en la infraestructura ya existente. Se comentan algunas de estas acciones a continuación. La Fig. 7-3 muestra una idealización de ciudad verde y resiliente.

La ciudad ha instalado 219.000 m² (261.921 yardas cuadradas) de techos verdes. Por ejemplo, puede citarse el conocido *Roof Farm* (DakAkker)¹⁵⁰. Los techos verdes contribuyen con la reducción de emisiones y regulan un estimado de 3,300 m³ (726.000 galones) de agua; permiten reducir la carga para el sistema existente de alcantarillado y favorecen la refrigeración de los edificios en momentos de olas de calor.

Las primeras plazas de agua (“*water squares*”) del mundo se construyeron en Rotterdam y el plan urbano contempla su replicación (Fig. 7-4). Son plazas públicas que cumplen funciones múltiples: sirven como estructuras de retención y almacenamiento de agua de lluvia y también como parques, zonas de recreación, etc. Otras estructuras con funciones de almacenamiento de agua de lluvia son el *Museumpark o Kruisplein* (Moraci et al., 2017)¹⁵¹.

La primera plaza de agua fue la *Waterplein Benthemplein* (completada en 2013). La instalación (normalmente una cancha deportiva que se transforma en reservorio de agua durante

¹⁴⁸ https://resiliencitiesnetwork.org/downloadable_resources/Network/Rotterdam-Resilience-Strategy-English.pdf

¹⁴⁹ https://foretica.org/Casos_de_exito_nacionales_e_internacionales_en_la_adaptacion_de_las_ciudades_al_CC.pdf

¹⁵⁰ El DakAkker es una granja en un techo de 1000 m², en el tope del Schieblock en Rotterdam en los Países Bajos. Se cultivan verduras, flores y frutas comestibles y se crían abejas. DakAkker es la granja de techo al aire libre más grande de los Países Bajos y una de las más grandes de Europa. El Smartroof es un sitio de prueba para el almacenamiento y la gestión inteligente del agua. <https://dakakker.nl/site/?lang=en>

¹⁵¹ https://www.researchgate.net/publication/345693645_Making_Less_Vulnerable_City_Resilience_as_a_New_Paradigm_of_Smart_Planning

las tormentas) actuó como un proyecto catalizador, un acelerador del desarrollo y transformación de la zona de Zoho (*Zomerhofkwartier*). Anteriormente se trataba de un urbanismo gris, con numerosos espacios comerciales vacíos, y hoy se ha convertido en un pujante distrito de oficinas que ha sido tomado como ejemplo en el mundo, de soluciones verdes y creativas para la retención de aguas de lluvia. Es un desarrollo que integra proyectos de diseño urbano, paisajismo, arte y comunidades. El distrito es actualmente más resistente a las inundaciones, más autosuficiente y sirve a una comunidad mejor integrada y comunicada.



Fig. 7-3 Visión futura de nuevas áreas residenciales y verdes en *Rotterdam Inner City* (Dibujada por Freepick, 2025)¹⁵².

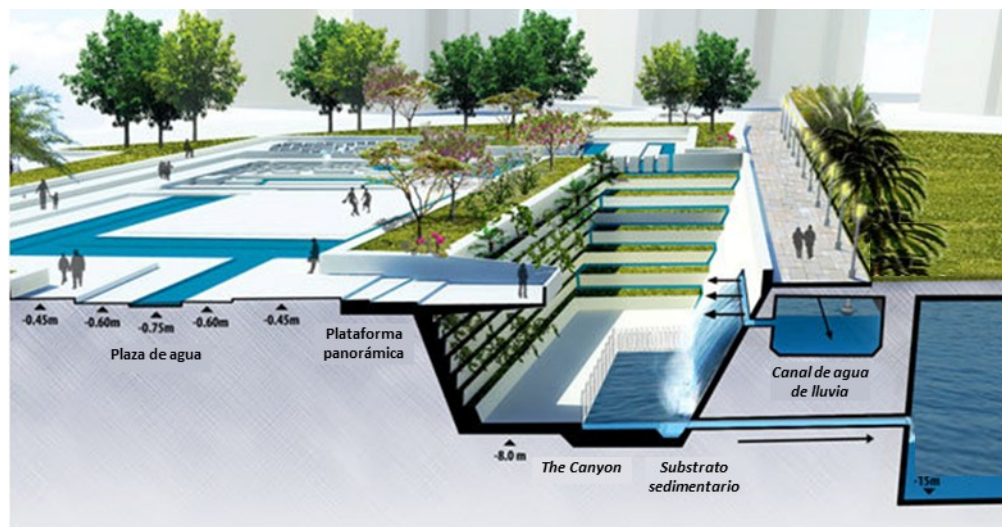


Fig. 7-4 Plaza de agua XL en Róterdam. Diseño urbano resiliente (Fuente: De Urbanisten, 2013 y tomada de Moraci et al., 2017. Licencia: *Creative Commons Attribution 4.0 International*)¹⁵³.

¹⁵² https://www.freepik.com/free-ai-image/futuristic-city-with-high-tech-mobility-social-welfare_94172366.htm

¹⁵³

https://www.researchgate.net/publication/345693645_Making_Less_Vulnerable_City_Resilience_as_a_New_Paradigm_of_Smart_Planning

Entre otras acciones, también se están construyendo estructuras flotantes (ver Fig. 7-5). El pabellón flotante fue la primera estructura de este tipo. A esto le siguieron casas flotantes en el puerto de Nassau (*Nassau Harbour*), el muelle acuático de la zona experimental (*Zone Aqua Dock*) y diseños innovadores para una granja flotante y para instalaciones de tratamiento de aguas.

Adicionalmente se emprendió el desarrollo de un corredor azul, una ruta navegable de recreación que proporciona agua limpia, actúa como infraestructura de almacenamiento de agua y sirve de conexión entre diferentes áreas naturales. En 2012 se iniciaron las obras de construcción de este *Blue Corridor*, un enlace azul-verde entre el *Zuiderpark* en Rotterdam, el futuro parque paisajístico *Buijtenland* en *Rhoon* y *Zuidpolder* en *Barendrecht*. El proyecto completo tardará 10 años en completarse y se divide en seis subproyectos.



Fig. 7-5 Casas flotantes (Fuente: *Municipality of Rotterdam*, 2025. Licencia: *Public Domain Architecten*)¹⁵⁴.

La adaptación climática requiere un enfoque específico para las distintas áreas urbanas. En el plan de adaptación se esbozan perspectivas integrales para seis zonas de la ciudad, que muestran de qué manera las medidas de adaptación climática contribuirán a construir una ciudad más atractiva, e incluso a mejorar los espacios sociales, la economía y la ecología: el puerto (*the port*), *Stadshavens*, los distritos externos al dique (*the outer-dike urban districts*), el centro (*the compact city centre*), los distritos urbanos internos al dique (*the inner-dike urban districts*) y los suburbios de post-guerra con sus parques y jardines (*and the post-war suburbs with their parks and gardens*).

En el área exterior al dique de Rotterdam (*outer-dike Rotterdam*, ver Fig. 7-7), se trabaja con un enfoque de varias capas de protección contra inundaciones (*multi-layered flood protection*) que se basa en diseño y construcción adaptativa. Esto incluye edificios a prueba de inundaciones, construcción de áreas públicas seguras en caso de inundaciones, estructuras flotantes y espacios para construir con la naturaleza (**Error! Reference source not found.**)¹⁵⁵. Atención particular se presta al puerto y a las infraestructuras esenciales y estratégicas, que deben estar especialmente protegidas de las inundaciones.

¹⁵⁴ <https://rotterdammakeithappen.nl/en/showcases/sustainable-floating-homes/>

¹⁵⁵ https://stockcake.com/i/urban-green-path_839139_213353

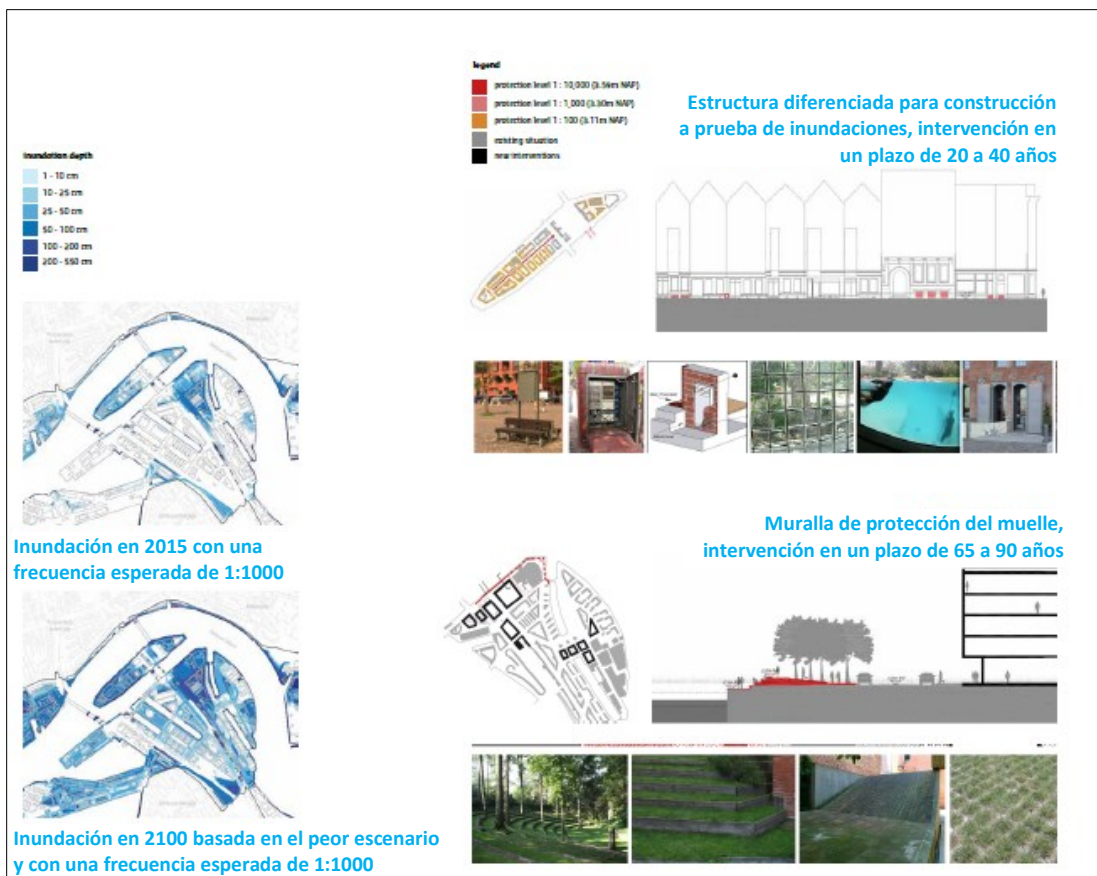


Fig. 7-7 Estrategia adaptativa en *Outer Dike Rotterdam* (Imagen adaptada de *Doepel Strijkers Architects* y tomada de *Rotterdam Climate Initiative*, 2013)¹⁵⁶.

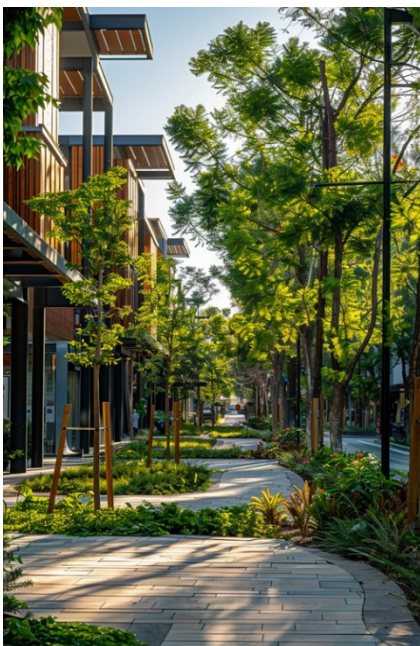


Fig. 7-6 Construyendo hábitat con la naturaleza (Fuente: StockCake, 2025. Imagen generada mediante IA. Licencia: Dominio Público).

El enfoque para el área interior de Rotterdam (*inner-dike Rotterdam*) se centra en cambio en la prevención (**Error! Reference source not found.**). Se optimizarán las barreras existentes contra las oleadas por tormentas, se reforzarán los diques y donde sea necesario, se crearán nuevos diques multifuncionales que serán incorporados a la ciudad, por ejemplo, previendo rutas recreativas, terraplenes naturales o combinando con nuevas zonas de desarrollo urbano.

En las zonas entre los diques, la "función de esponja" de la ciudad se restaurará mediante la implementación de medidas para capturar y almacenar el agua de lluvia, y para retrasar el drenaje. Las medidas incluyen, por ejemplo, cubiertas y fachadas verdes; menos pavimentación y más flora y vegetación en las calles y barrios públicos; plazas de agua y zonas de infiltración previstas como parte de la infraestructura, entre otras. Estas medidas serán especialmente efectivas en áreas muy pobladas y urbanizadas con poco espacio abierto.

¹⁵⁶ Figura tomada de la pp 73 del documento *Rotterdam Climate Initiative*, 2013.

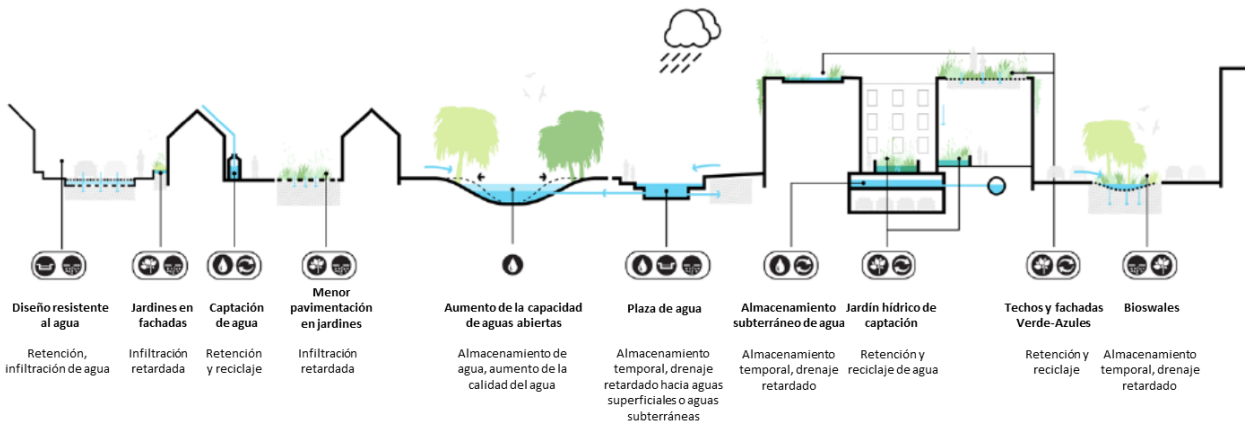


Fig. 7-8 Estrategias adaptativas *Inner-dike Rotterdam* ((Imagen adaptada de: De Urbanisten y tomada de *Rotterdam Climate Initiative*, 2013)¹⁵⁷

En aquellas partes de la ciudad donde hay más espacio, se implementarán medidas robustas como aumentar la capacidad de almacenamiento de agua de canales y lagos; la construcción de corredores Azul-Verde¹⁵⁸ o *bioswales*¹⁵⁹ robustos¹⁶⁰, entre otras. La (Fig. 7-9) muestra una foto del área del puerto de Rotterdam de 2016.



Fig. 7-9 Puerto de Rotterdam (Autor: Joshua Stevens - NASA Earth Observatory, 2016. Licencia: *Public Domain*)¹⁶¹.

En 2014, con el establecimiento del Programa Nacional del Delta, se iniciaron varios proyectos “piloto” enmarcados en la estrategia general de adaptación de Rotterdam, pero apuntando a objetivos más amplios de construir resiliencia: *Pilot Noordereiland*, *Pilot Botlek*, *Pilot Feijenoord*, *Pilot Crisis Management and Flooding*. El resultado de estos proyectos será replicado en otras áreas de la ciudad¹⁶².

Rotterdam es ejemplo de un proceso de aprendizaje continuo de experiencias y aplicación del conocimiento para la adaptación y construcción de resiliencia progresiva y planificada frente al cambio climático. La ciudad transformó totalmente su propia visión de la gestión del agua: desde un punto de vista inicial tradicionalmente sectorial (2001), pasó a formular un plan hídrico integrado

¹⁵⁷ Figura tomada de la pp. 80 del documento *Rotterdam Climate Initiative*, 2013.

¹⁵⁸ La Infraestructura Azul-Verde (IAV) o Blue-Green Infrastructure (BGI), son redes interconectadas planificadas de áreas naturales y seminaturales, los cuales incluyen cuerpos de agua y espacios abiertos verdes, que proveen diferentes servicios ecosistémicos. Definición basada en la de la Comisión de Europa (2013).

¹⁵⁹ canales diseñados para concentrar y transportar la escorrentía de aguas pluviales al mismo tiempo que eliminan residuos y contaminación. Los *bioswales* suelen tener vegetación, mantillo o xeriscap. .

¹⁶⁰ <http://www.urbanisten.nl/wp>

¹⁶¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Port_of_Rotterdam_Landsat_8_Photo_8_May_2016.jpg

¹⁶² https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable_resources/Network/Rotterdam-Resilience-Strategy-English.pdf

(2006), seguido de una estrategia holística de adaptación (2013). Los logros se han hecho posibles por la combinación de una estructura de gobierno sólido y eficiente, liderazgo político, empleados comprometidos a nivel local, y la participación del sector público y privado, de los vecinos y comunidades, que son factores claves para el éxito. El gobierno de la ciudad de Rotterdam anima iniciativas de ecoinnovación institucional de todos los sectores, actuando como plataforma de coordinación y comunicación, y también proporcionando incentivos.

Rotterdam ha servido de ejemplo para la implementación de planes de adaptación en otras ciudades del mundo. Por ejemplo, Nueva Orleans (NOLA) y Rotterdam han estado colaborando desde 2008, específicamente en relación con la gestión del agua. Después del huracán Katrina, los expertos holandeses ayudaron a NOLA a organizar los “Diálogos holandeses”. Estos diálogos contribuyeron con el desarrollo del Plan de Gestión Integrada del Agua de NOLA. Ahora NOLA participa en la red Conectando Ciudades Delta y participó en el programa 100 Ciudades Resilientes. Las dos ciudades se han beneficiado del intercambio de conocimientos y están comprometidas con una mayor colaboración en el futuro. Los esfuerzos futuros se orientan a la resiliencia climática, la resiliencia social y al desarrollo de negocios y conocimiento.

7.2 SINGAPUR

Singapur es particularmente vulnerable a los impactos del cambio climático, ya que se trata de una isla-estado de tierras bajas, densamente poblada. Está situada al sur del Estado de Johor en la península de Malasia y al norte de las islas Riau de Indonesia. El estrecho de Singapur separa Singapur de las islas de Indonesia. Con 697 km² (172.233 acres), es el país más pequeño del Sudeste Asiático. Su territorio ha crecido constantemente con tierras ganadas al mar. Tiene 6.166.472 habitantes (censo de 2017), y una densidad poblacional de 7.720 hab/km² (casi 20.000 habitantes por milla cuadrada)

Gran parte de la isla se encuentra a menos de 15 metros (49 pies) sobre el nivel del mar y menos del 30% de ella se eleva sobre los 5 metros (16,4 pies) del nivel del mar. Cuenta con unos 193 km (120 millas) de costa, mayormente plana. Singapur mantiene un clima de temperatura uniforme relativamente alta a lo largo del año, en una región de abundantes lluvias. Está situado en una zona en la que las enfermedades transmisibles, como el dengue, son endémicas (N3C, 2008).

Según los pronósticos, en Singapur las temperaturas medias diarias aumentarán en 1,4°C a 4,6°C (34,52 a 40,28°F) hacia el final de este siglo (2070 a 2099), y el nivel de mar se elevará entre 0,25 m y 0,76 m (0,82 y 2,49 pies), comparado con el período de referencia de 1980 hasta 2009 (MEWR; MND, 2016).

Los impactos potenciales del cambio climático en Singapur incluyen:

- Aumento de las inundaciones
- Pérdida de tierras costeras
- Escasez de recursos hídricos
- Impacto en la salud pública por el resurgimiento de enfermedades endémicas
- Estrés por calor
- Mayor demanda de energía
- Impactos sobre la biodiversidad

Eventos anteriores ponen en evidencia la vulnerabilidad de Singapur: récords de sequía de 2014 que pusieron en riesgo el suministro de agua potable; muertes en masa de peces causadas por el aumento de plancton debido a las altas temperaturas en 2015; y severas inundaciones por precipitaciones extremas en 2010, 2011 y 2013.

A continuación, se resumen algunas estrategias de adaptación y resiliencia de Singapur,

7.2.1 INUNDACIONES

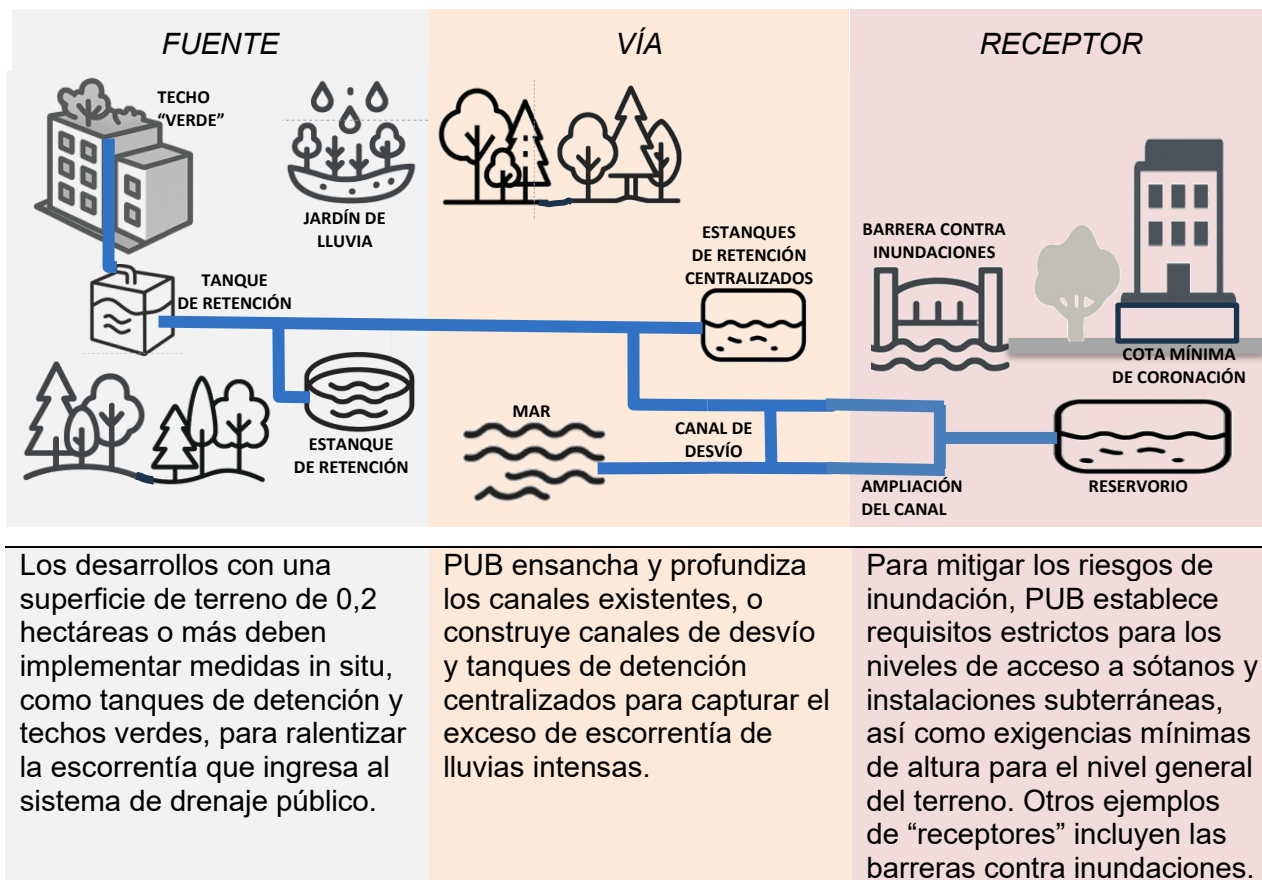


Fig. 7-10 El enfoque "Fuente-Vía-Receptor" (*Source-Pathway-Receptor*), contra inundaciones y para el aprovechamiento del agua (Elaboración propia con información tomada de MEWR; MND, 2016).

Ya desde 1991, la Junta de Servicios Públicos (*Public Utilities Board, PUB*) requería que se construyeran los nuevos proyectos de recuperación de tierras (*reclamation projects*) a un nivel de 125 cm (4,1 pies) por encima del nivel de marea más alto registrado. Progresivamente los niveles de elevación requeridos fueron aumentando para enfrentar el aumento del nivel del mar previsto según los peores escenarios del IPCC para finales del siglo XXI.

El desarrollo de la infraestructura de drenaje en Singapur redujo las áreas inundables, que eran unas 3.200 hectáreas (7.904 acres) en la década de los 70, hasta solo 124 Ha. en 2008 (306 acres) y menos de 66 (163 acres) en 2011. Desde entonces se desarrollaron y mejoraron las infraestructuras, a partir del ensanchamiento y profundización de los canales y drenajes, la construcción del Dique Marina (*The Marina Barrage*) y otros proyectos contra inundaciones (ver Fig. 7-10).

En Singapur, donde la tierra es escasa, otra posible forma de almacenar el exceso de agua de lluvia es capturarla y almacenarla bajo tierra. PUB actualmente estudia la viabilidad de un innovador sistema de drenaje subterráneo, donde los túneles conducirán el exceso de aguas pluviales a cavernas subterráneas para almacenamiento. Este sistema tiene el potencial de reducir los riesgos de inundación y asegurar nuevas fuentes de agua dulce.

El PUB ha implementado igualmente una política de aumentar el nivel de altura de las áreas urbanas bajas y de planificación para cambiar las pautas de uso de la tierra y del desarrollo urbano de las áreas bajas.

7.2.2 PÉRDIDAS DE TIERRAS COSTERAS

El aumento del nivel del mar puede provocar problemas de erosión costera y pérdida de tierras en Singapur. Actualmente, más del 70% de la costa de Singapur está protegida con muros marinos o escollones de rocas.

Desde 2011 se requiere que las tierras nuevas, recuperadas del mar, se eleven al menos 4m (13,12 pies) sobre el nivel del mar. Las carreteras en áreas costeras incluyendo un tramo de *Changi Coast Road* y *Nicoll Drive*, también fueron elevadas.



Fig. 7-11 Reforzamiento de las defensas naturales en Playa Siloso, Isla Sentosa, Singapur (Adaptación de *dronepicr*, 2017. Lic. Creative Commons Attribution 2.0 Generic)¹⁶³.

El resto del borde marino son áreas naturales como playas y manglares. El aumento de la erosión podría afectar las áreas recreativas en las costas, como *East Coast Park*, *Sungei Buloh*, *Pasir Ris Park*, *West Coast Park* y *Sentosa*. Se han reforzado las defensas existentes y las áreas naturales se han protegido con nuevas defensas (Fig. 7-11).

7.2.3 ESCASEZ DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE

La intrusión de agua salada en los reservorios de Singapur es un riesgo poco probable, ya que las represas están ubicadas a suficiente altura con respecto a los escenarios previstos de aumento del nivel del mar. Sin embargo, las incertidumbres existentes acerca de las variaciones en las precipitaciones pueden causar problemas futuros de escasez del agua disponible.

Singapur ha implementado programas para el reciclaje de agua (*NEWater Singapore*) y plantas desalinizadoras a fin de afrontar la amenaza del cambio climático y avanzar en un sistema de suministro de agua sostenible, resiliente e independiente de la variación de las precipitaciones.

¹⁶³ [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Siloso_Beach_Sentosa_island_Singapore_\(35950677093\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Siloso_Beach_Sentosa_island_Singapore_(35950677093).jpg)

En la ciudad, se ha convertido el agua de mar en agua potable utilizando tecnología avanzada de membranas, y se ha aumentado la inversión en investigación y desarrollo tecnológico, en la búsqueda de formas más eficientes de desalinización del agua de mar. Actualmente, Singapur cuenta con tres plantas desalinizadoras y se espera que para fines de 2020 tengan dos más en funcionamiento¹⁶⁴.

El proceso *NEWater* consiste en reciclar el agua usada. El agua recuperada es de alta calidad y ultra limpia. En la actualidad, hay cinco plantas *NEWater* que abastecen hasta el 40% de las necesidades actuales de agua de Singapur. Para el 2060, se espera que *NEWater* cubra hasta el 55% de la demanda futura de agua¹⁶⁵.

7.2.4 ESTRÉS POR CALOR (*HEAT STRESS*) Y DEMANDA DE ENERGÍA

Para contrarrestar los efectos del aumento de la temperatura (que ocasiona mayores gastos de energía en sistemas de aire acondicionado y climatización, con el consecuente incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero), Singapur ha implementado medidas para extender las superficies verdes en la ciudad, con parques, jardines, techos verdes, paredes verdes, etc. También ha modificado los patrones de construcción y los materiales para obtener edificios más verdes y resilientes frente al cambio climático.

La Autoridad de Reurbanización Urbana (URA) y el *Nacional Park Board* (NParks) colaboran para planificar y extender la vegetación en toda la isla, proporcionar parques y espacios verdes abiertos, y plantar a lo largo de carreteras y alrededor de urbanizaciones. URA y NParks también han promovido la vegetación vertical en los muros y sobre las azoteas de edificios residenciales y comerciales, mediante directrices de planificación e incentivos. El *Housing Development Board* (HDB) está en el proceso de introducir vegetación en azoteas para aparcamientos de varios pisos y edificios residenciales cuando es factible.

Se han implementado, además, medidas para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones y estándares “verdes” de obligatorio cumplimiento desde 2008.

7.2.5 MANGLARES Y BIODIVERSIDAD MARINA.

La Junta de Parques Nacionales (*NParks*) está investigando el papel de las reservas naturales de manglares y corales en el secuestro de carbono y en limitar el daño y la erosión producto de las tormentas.

Se ha establecido un vivero de coral frente a *Palau Semakau* para mejorar proactivamente los hábitats marinos existentes y apoyar la supervivencia de corales naturales.

Para proteger la biodiversidad marina de Singapur, *NParks* estableció el primer parque marino en las islas *Sisters* en 2014 (Fig. 7-12). El parque marino es un ecosistema habitado por animales marinos raros y en peligro de extinción. Otras medidas para proteger la biodiversidad de Singapur incluyen la restauración de áreas de manglares.

¹⁶⁴ <https://www.pub.gov.sg/Public/WaterLoop/OurWaterStory/DesalinatedWater>

¹⁶⁵ <https://www.pub.gov.sg/Public/WaterLoop/OurWaterStory>



Fig. 7-12 Parque Marino de las Islas Hermanas de Singapur (Autor: Thaejas, 2010. Lic. *Creative Commons Attribution 3.0*)¹⁶⁶

7.2.6 EL DIQUE MARINA (MARINA BARRAGE)

Es un ejemplo de proyecto multifuncional de adaptación al cambio climático que ha añadido valor urbano a la ciudad (Fig. 7-13). El proyecto ha servido para aumentar el suministro de agua de Singapur, constituye una protección contra inundaciones y es un área pública de entretenimiento y atracción turística en el corazón de la ciudad¹⁶⁷.

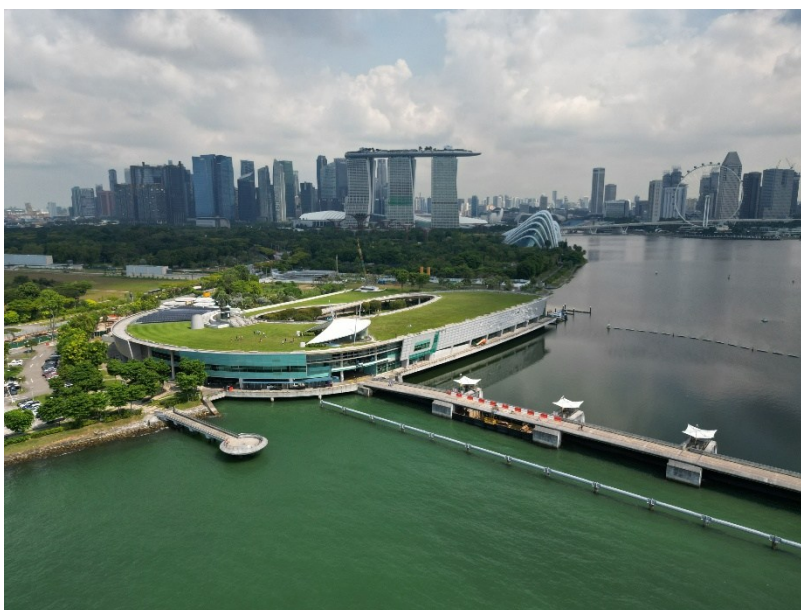


Fig. 7-13 Vista del Dique Marina en Singapur (Autor: Bob Tan, 2022. Lic. *Creative Commons BY-SA 4.0*).¹⁶⁸

El proyecto, de 226 millones de US\$ se completó en 2008. Se trata de un dique construido en la desembocadura del Canal Marina, de 350 m de ancho. Separa el agua salada del mar de un área de captación de agua dulce de 10.000 Ha. (24.700 acres), el área de captación más grande y urbanizada de la isla. El Proyecto ganó un *Superior Achievement Award* de la *American Academy of Environmental Engineers* in 2009.

El Dique Marina actúa como una barrera contra las mareas para mantener el agua de mar fuera, ayudando a aliviar las inundaciones en áreas bajas de la ciudad como *Chinatown*, *Jalan Besar* y *Geylang*. Cuando llueve mucho durante la marea baja, las compuertas se bajan para liberar

¹⁶⁶ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sisters_Islands.JPG

¹⁶⁷ <https://www.pub.gov.sg/public/places-of-interest/marina-barrage>

¹⁶⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Marina_Barrage#/media/File:Marina_Barrage_Closeup_300522.jpg

el exceso de agua del embalse costero al mar. Si llueve mucho durante la marea alta, las compuertas de la cresta permanecen cerradas y las bombas de drenaje gigantes (fabricadas por *Nijhuis Pumps, Winterswijk* en los Países Bajos) se activan para bombear el exceso de agua hacia el mar (Fig. 7-14) (Fig. 7-15). Como el nivel del agua se mantiene constante, el lugar es ideal para todo tipo de actividades recreativas como paseos en bote, *windsurf*, *kayak*, competencias deportivas y otros.



Fig. 7-14 Dique Marina, con la Casa de Bombas al fondo que alberga siete bombas de gran caudal (Autor: TimLee90, 2008. Lic. Creative Commons BY-SA 3.0)¹⁶⁹.

Singapur es la economía más competitiva del mundo (IMD, 2019), así como la más avanzada y estable, tanto política como financieramente, en el sudeste asiático. Ocupa el segundo lugar en el mundo por potencial de inversión y el tercero en apertura al comercio internacional¹⁷⁰.

La inversión pública y la legislación de Singapur se orientan a transformarla en la primera nación inteligente, así como en la ciudad más verde del mundo. En el 2019 fue ya declarada la ciudad más inteligente según el IMD *index* (“*Smart city*”)¹⁷¹ y en 2020 han asignado 19 mil millones de dólares a actividades de I+D, para seguir avanzando en sus objetivos.

Han implementado igualmente leyes obligatorias de construcción sostenible para todos los desarrollos públicos y privados, desde 2008. En ese sentido, Singapur pretende conseguir que el 80% de sus edificios sean certificados como sostenibles bajo su esquema *Green Mark* para el año 2030.

Para ello, el Gobierno cuenta con una red de organismos como la *Urban Redevelopment Authority* (URA), encargada de la planificación territorial; la *House Development Board* (HDB), que desarrolla más del 80% de todas las viviendas en el país; la *National Environmental Agency* (NEA) y la plataforma *Smart Nation*, entre otros.

Tienen además el objetivo de alcanzar más de 700 km (434 millas) de carriles para dispositivos de movilidad personal en 2025 y avanzan en la construcción de una “infraestructura inteligente” de transporte que incluye sensores interconectados y tecnologías de análisis innovadoras. El plan *Smart Mobility 2030* tiene como objetivo que el 75% de los trayectos en hora punta sean realizados en transporte público.

Singapur es un ejemplo modelo de ciudad con una planificación de largo plazo hacia un futuro sostenible. Sus políticas reflejan un compromiso con estrategias innovadoras para elevar los estándares de calidad de vida. Han profundizado acciones y soluciones en áreas como seguridad pública y transporte inteligente, energía e infraestructura resiliente, participación ciudadana y

¹⁶⁹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marina_Barrage_Pump_House.jpg

¹⁷⁰ <https://www.smartcityprojects.asia/es/por-que-singapur/>

¹⁷¹ <https://www.onlinecitizenasia.com/2019/10/03/imd-smart-cities-index-2019-singapore-tops-new-citizen-centric-global-smart-city-index>

planificación y administración sostenible. Uno de los factores de éxito de Singapur, es que su visión de desarrollo, adaptación y resiliencia frente al cambio climático se inserta en las políticas, planes y acciones de todos los sectores de la acción pública y privada.



Fig. 7-15 El Puente Marina, que contiene las compuertas de presión que forman la barrera del Dique Marina en Singapur (Autor: TimLee90, 2008. Lic. *Creative Commons BY-SA*)¹⁷².

7.3 COMENTARIOS FINALES

El Cambio climático es una realidad que afecta la vida del hombre sobre la tierra. Todos los escenarios indican que el nivel del mar continuará elevándose y las temperaturas seguirán aumentando. Los eventos extremos aumentarán en frecuencia e intensidad.

Los retos a enfrentar son numerosos y requieren acciones inmediatas de parte de los gobiernos. Las políticas de mitigación para la reducción de emisiones de gases de efectos invernadero son cruciales para incidir en que los escenarios futuros del cambio climático sean menos críticos.

Las regiones costeras son especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático. Entre los retos a enfrentar, están las inundaciones causadas por el aumento del nivel del mar en combinación con el aumento del nivel de agua en los ríos; las precipitaciones extremas; la erosión y pérdida de tierras en las costas; las sequías (que provocan la reducción del agua subterránea e inciden en la escasez de recursos hídricos); cambios en las mareas que favorecen la intrusión de agua salada en los sistema de agua urbana; impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas; y las olas de calor.

Los casos exitosos de estrategias de adaptación al cambio climático corresponden a comunidades que han integrado sus iniciativas de adaptación en una visión global de un futuro resiliente para la ciudad y sus habitantes. Las medidas de adaptación y de resiliencia exigen la construcción de nuevas infraestructuras y la transformación del espacio urbano. En los casos exitosos estudiados, se aprovechan estas transformaciones para mejorar las ciudades. Adecuadamente concebidas, dentro de un marco de planificación a largo plazo y con una visión integral de un futuro sostenible para la ciudad, las nuevas infraestructuras y espacios urbanos,

¹⁷² https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Marina_Barrage_Bridge.jpg

pueden otorgar valor agregado a las ciudades y contribuir con mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Las medidas de adaptación climática contribuyen a construir una ciudad más atractiva, e incluso a mejorar los espacios públicos, la economía y la ecología.

La planificación urbana es una herramienta de más en más importante para implementar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Los riesgos de inundaciones sólo pueden reducirse de manera efectiva si, además de las medidas de adaptación técnicas, se realiza una planificación espacial y urbana adecuada. La planificación urbana sostenible se basa en incentivar la construcción de edificaciones en áreas seguras, fuera del área propensa a inundaciones frecuentes; controlar el uso de la tierra para impedir construcciones en áreas inseguras; y desarrollar ordenanzas de zonificación y códigos de construcción apropiados para reducir los daños por inundaciones. Un buen uso de la tierra permite utilizar las áreas inundables para fines tales como parques, áreas naturales o reservas ecológicas. Eso resulta menos costoso que tratar de garantizar que el desarrollo futuro de construcciones y urbanismos en esas áreas peligrosas, sea a prueba de inundaciones.

Algunos casos revisados reflejan experiencias innovadoras y provechosas que pueden también ser replicadas. Por ejemplo, uno de los grandes desafíos es el suministro de agua potable. Las estructuras para el control de inundaciones pueden ser aprovechadas como estructuras de captación y almacenamiento que pueden convertirse en fuentes adicionales de suministro de agua potable.

Para un mejor aprovechamiento del sistema de drenaje de agua de lluvia, medidas como techos y fachadas verdes; menos pavimentación y más flora y vegetación en las calles y barrios públicos; plazas de agua y zonas de infiltración previstas como parte de la infraestructura, entre otras, han probado ser exitosas, además de contribuir con los objetivos de mitigación y sostenibilidad.

El marco legal y los incentivos de distinta índole son imprescindibles para el éxito de los planes de adaptación. Por ejemplo, leyes de construcción sostenible para los desarrollos públicos y privados, podrían ser implementadas, con certificaciones de sostenibilidad o de construcción verde de obligatorio cumplimiento.

Lo deseable es que una visión compartida e integral de desarrollo, adaptación y resiliencia frente al cambio climático, se inserte y dirija las políticas, planes y acciones de todos los sectores de la acción pública y privada. La participación de las comunidades, sociedad civil organizada, el sector privado y el sector académico, en coordinación con el sector público, es un factor clave para el éxito de las iniciativas que se implementen.



173

¹⁷³ Imagen de cierre del capítulo: “Bosque de Superárboles, *Gardens by the Bay* en Singapur”, 2012 (Autor: Khairul Nizam. Licencia: CC BY 2.0).
[https://it.wikivoyage.org/wiki/File:Supertree_Grove,_Gardens_by_the_Bay,_Singapore_-_20120704_\(banner\).jpg#/media/File:Supertree_Grove,_Gardens_by_the_Bay,_Singapore_-_20120704.jpg](https://it.wikivoyage.org/wiki/File:Supertree_Grove,_Gardens_by_the_Bay,_Singapore_-_20120704_(banner).jpg#/media/File:Supertree_Grove,_Gardens_by_the_Bay,_Singapore_-_20120704.jpg)

LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

8



La transición energética representa un proceso global de transformación en la producción, distribución y consumo de energía con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental de las actividades humanas. Este cambio, impulsado por la urgencia climática y los compromisos internacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ha sido acompañado por un auge en las tecnologías de generación de energías renovables, la eficiencia energética y la electrificación de diversos sectores industriales y de transporte.

Sin embargo, más allá de los beneficios ambientales y el desarrollo de nuevas tecnologías, la transición energética enfrenta desafíos significativos que dificultan su implementación global. Entre estos se encuentran las limitaciones tecnológicas, como la intermitencia de las fuentes renovables, la capacidad de almacenamiento energético y la necesidad de modernizar redes eléctricas para garantizar estabilidad y resiliencia en los sistemas energéticos. Asimismo, la producción y reciclaje de materiales críticos, como el litio y las tierras raras, plantean retos logísticos y ambientales que no pueden ser ignorados.

Desde el punto de vista político y económico, la transición energética ha generado debates y tensiones entre países con diferentes estructuras económicas y niveles de desarrollo. Mientras que algunas naciones han avanzado con políticas agresivas de descarbonización y subsidios a la energía renovable, otras han mostrado resistencia debido a su fuerte dependencia de los hidrocarburos o a la falta de recursos para una transformación rápida. La competencia geopolítica por el control de tecnologías clave y recursos estratégicos ha exacerbado las diferencias en las estrategias nacionales, afectando la cooperación internacional en este ámbito.

Este capítulo explorará estos aspectos desde una perspectiva integral, analizando tanto los avances tecnológicos y los beneficios ambientales como los obstáculos que dificultan una transición equitativa y efectiva a nivel global.

¹⁷⁴ Imagen del título: "Viento en Popa (Un Viento Favorable)" (Autor: Winslow Homer, 1873. Lic. Dominio Público).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Winslow_Homer_-_Breezing_Up_%28A_Fair_Wind%29_-_Google_Art_Project.jpg

8.1 TIPOS DE ENERGÍA

Para comprender adecuadamente la situación actual del uso de energía por parte de la humanidad y las consecuencias que esto tiene en la producción de emisiones, es fundamental realizar una clasificación inicial de las fuentes de energía disponibles en nuestro planeta. Esta clasificación nos permitirá entender mejor la diversidad de fuentes energéticas existentes y su impacto ambiental, lo cual es esencial para abordar los desafíos energéticos actuales y futuros

Antes de avanzar, sin embargo, resulta necesario establecer una distinción conceptual entre los términos “energías primarias/secundarias” y “fuentes de energía primaria/secundaria”. Aunque ambos aparecen con frecuencia en la literatura especializada, no son equivalentes, ya que se refieren a conceptos diferentes desde el punto de vista científico. No obstante, es común encontrar su uso de manera indistinta o inapropiada, lo cual puede generar ambigüedad en la interpretación de textos académicos y técnicos. Procedemos entonces a definir los conceptos de **energías primarias y secundarias** (*European Environment Agency - EEA, s.f.*) (Smith M., 2024) (IEA, 2024):

- **La Energía Primaria** es la energía **contenida** en recursos naturales, en su estado original, que no ha sido sometida a ningún proceso de conversión o transformación humana, y que representa la máxima energía disponible para aprovechar. Ejemplos de energías primarias:
 - Energía química contenida en los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo crudo y el gas natural.
 - Energía geotérmica presente en el calor interno de la Tierra.
 - Energía potencial gravitatoria del agua almacenada en embalses, así como energía cinética generada por caídas en saltos o por el flujo de ríos y canales.
 - Energía cinética del viento debida al movimiento de masa de aire atmosférica.
 - Energía radiante solar, que puede aprovecharse directamente como calor o mediante conversión fotovoltaica.
 - Energía química de la biomasa, como la madera y los residuos orgánico
 - Energía nuclear almacenada en los átomos de los materiales fisionables, como el uranio y el torio.

Con respecto a la energía nuclear es necesario explicar más en detalle por qué se la considera una forma de energía primaria: Durante la fisión de materiales radioactivos, por ejemplo el uranio-235 o del plutonio-239, se liberan neutrones, los cuales chocan con otros núcleos atómicos, provocando nuevas reacciones en cadenas. Sin embargo, la fisión no ocasiona una conversión de energía, sino la liberación de la energía contenida en los núcleos atómicos, sin requerir una transformación desde otro tipo de energía (EIA, 2023).

En la literatura científica y técnica recientemente ha surgido un debate sobre la definición de energía primaria. En contraposición al enunciado clásico que hemos presentado haciendo referencia a la EEA, existe la siguiente tesis, sostenida por ejemplo por el Congreso de los Estados Unidos en el reporte de Morgan Smith (2024):

“La energía primaria se define como la primera energía utilizable producida a partir de una fuente de energía tras su extracción de la naturaleza; es decir, la cantidad de energía disponible inicialmente para su uso práctico. La energía primaria puede consistir en calor generado por la combustión de diversos combustibles (expresado en unidades térmicas británicas o BTU) o en electricidad generada a partir de algunas fuentes de energía renovable (ER) (expresada en kilovatios-hora o kWh)” (traducción de *Google Translate*).

Esta definición nace de la necesidad de tener una manera de cuantificar la energía, que no siempre es una tarea fácil.

En este libro, sin embargo, se adopta la definición clásica.

- **La Energía Secundaria** se define como la **forma de energía** resultante de la transformación de energía primaria mediante procesos físicos, químicos o termoquímicos, con el propósito de generar productos (**portadores o vectores energéticos**) más adecuados para su transporte, almacenamiento o utilización final. En síntesis, el concepto de energía secundaria se centra en la cantidad de energía contenida en dichos productos y disponible para realizar un trabajo útil. Como ejemplo de portadores derivados de la conversión de algún tipo de energía primaria, citaremos la electricidad, los derivados refinados del petróleo, el hidrógeno y el vapor a presión, entre otros.

Con relación a la electricidad, dependiendo de si se adopta la definición clásica o alternativa para la energía primaria, la electricidad se considera secundaria (postura clásica) o bien primaria si proviene de fuentes renovables (postura alternativa) (IEA, 2024) (Eurostat, 2022).

En este libro se considerará a la electricidad una energía secundaria.

Presentamos ahora la definición de **fuentes** de energía primaria y secundaria: (*International Energy Agency - IEA, 2020*) (*International Energy Agency - IEA, 2025*)

- **Las fuentes de energía primaria** se definen como aquellos recursos energéticos disponibles en la naturaleza y que pueden ser extraídos u obtenidos directamente sin haber sufrido transformaciones previas por intervención humana. Ejemplos representativos incluyen los yacimientos de carbón, los campos petrolíferos, las minas de uranio, los reservorios hídricos ubicados a una cierta altura sobre el nivel del mar, así como las fuentes renovables de carácter ambiental, tales como la radiación solar y la energía cinética del viento, entre otras. Las fuentes primarias de energía se dividen en dos clases fundamentales: **combustibles y flujos de energía**. La mayor parte de la energía primaria del mundo (~95%) proviene de combustibles. Una característica fundamental de los combustibles es que son de disponibilidad programable, es decir, la energía contenida en ellos puede ser liberada y utilizada exactamente en el momento en que se necesite. Un flujo de energía se diferencia de un combustible en cuanto no almacena energía, sino que consiste en un movimiento o transferencia de energía (energía cinética de un fluido o de un gas o bien energía radiante de una fuente luminosa). Mientras que un combustible actúa como un depósito energético que puede transformarse en calor o electricidad bajo demanda, un flujo simplemente transporta la energía disponible a un sitio de transformación para su uso final o una ulterior transformación.
- **Las fuentes de energía secundaria** son **productos derivados** de una fuente primaria (o secundaria) a través un proceso de transformación física o química, para obtener una forma de energía más adecuada para su transporte, almacenamiento o uso final. Desde un punto de vista funcional, estas fuentes actúan como **portadores o vectores energéticos**, ya que permiten transferir la energía originalmente contenida en los recursos primarios hacia aplicaciones útiles, facilitando su distribución y aprovechamiento final.

8.1.1 FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA

Las fuentes de energía primaria se pueden subdividir ulteriormente en dos categorías fundamentales: no renovables y renovables.

- **Las Fuentes No Renovables de Energía** son aquellas constituidas principalmente por yacimientos de combustibles fósiles y minerales radioactivos. Estos son recursos

naturales finitos, por lo tanto se agotan con su uso ya que no pueden **renovarse naturalmente a una velocidad comparable a su tasa de consumo** (*European Environmente Agency - EEA, s.f.*).

- Se denominan **fuentes renovables de energía** aquellas capaces de regenerarse en períodos comparables con la escala de vida humana o que, según la definición de IPBES (s.f.), presentan una tasa de consumo no superior a su tasa de regeneración. Estas fuentes provienen principalmente de **flujos de masas líquidas o gaseosas**, como los flujos hídricos y eólicos, así como de **flujos de fotones**, caso de la radiación solar, y de **flujos continuos de calor interno de la Tierra**. Una excepción es la **biomasa**, que, aunque es una fuente renovable, se clasifica como **combustible** y no como flujo de energía.

8.1.1.1 Ejemplos de Fuentes No Renovables de Energía (Combustibles)

Los **combustibles**, como fuentes no renovables de energía primaria, son principalmente de origen **fósil** (Kumar & Gupta, 2023) (Fig. 8-1), con la excepción de los combustibles radioactivos, que son **minerales** de origen geológico. Se caracterizan por almacenar energía (ya sea química o nuclear) en su estructura y liberarla de forma controlada mediante procesos de naturaleza química o física. A continuación, se presenta una reseña de las principales formas de energía almacenada en los combustibles más relevantes.



Fig. 8-1 Combustibles fósiles (Autor: Pixeltoo, 2023. Lic. *Creative Commons 4.0 International*).

- **El carbón, el petróleo y el gas natural** almacenan principalmente **energía química**, la cual se encuentra en forma de energía potencial en los enlaces moleculares de sus compuestos orgánicos. La energía química por lo general se libera al activar la reacción de combustión. Al quemar el carbón este se oxida, generando calor y gases como el dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O), además de otros productos secundarios contaminantes (EIA, 2023). También la combustión del petróleo¹⁷⁵ y de sus derivados es un proceso de oxidación química en el cual los hidrocarburos líquidos que componen el petróleo o sus derivados reaccionan con el oxígeno del aire, liberando energía térmica, gases y, en algunos casos, residuos sólidos (Turns, 2013) (Speight, 2020). La combustión del gas natural es una reacción de oxidación rápida y eficiente, en la que su componente principal, el metano (CH_4), reacciona con el oxígeno del aire produciendo dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y energía térmica. Esta reacción se caracteriza por su alta eficiencia, ya que el metano, debido a su estructura molecular simple, se oxida casi por completo. Como resultado, se genera una cantidad significativamente menor de contaminantes (como hollín, óxidos de azufre y partículas sólida) en comparación con la combustión del carbón o del petróleo (Turns, 2013). No resulta casual que la Unión Europea, en el marco de su Taxonomía de Finanzas Sostenibles, haya incluido al gas natural como fuente transitoria considerada ambientalmente sostenible (verde) bajo condiciones específicas (esta disposición fue formalmente adoptada mediante el *Complementary Climate Delegated Act*, aprobado en febrero de 2022 por la Comisión Europea).

¹⁷⁵ La combustión directa del petróleo crudo no es común en aplicaciones modernas por razones técnicas, ambientales y de eficiencia.

- **El uranio y otros materiales fisionables** son minerales que incorporan **energía nuclear**, la cual se considera una energía no renovable. El hecho fundamental para su clasificación es que deriva de yacimientos finitos de materiales que no se renuevan en escalas de tiempo humanas, como el uranio-235, plutonio-239 y torio-232. Estos elementos no pueden reponerse naturalmente a una velocidad comparable a su tasa de consumo, lo que la distingue de las energías renovables como la solar o la eólica. La energía nuclear es una forma de energía potencial resultante de la fuerza nuclear fuerte, responsable de mantener unidos a protones y neutrones, en otras palabras es responsable de la cohesión del núcleo atómico. La energía nuclear disponible en los núcleos se libera mediante dos mecanismos principales (Young y Freedman, 2019) (EIA, 2023) (Krane, 2019) (Stacey, 2018) (ITER Organization - a, 2023) (ITER Organization - b, 2023):



Fig. 8-2 Modelo de reactor nuclear, 2016. (Autor: BLS208. Lic. Creative Commons BY-SA 3.0).

- **La fisión nuclear**, donde elementos fisionables pesados como el uranio-235 o el plutonio-239 se dividen en átomos más ligeros mediante exposición a un flujo de neutrones térmicos (es decir, de baja energía) en el núcleo de un reactor (Fig. 8-2). Además de los isótopos ligeros generados (por ejemplo, bario-141 y criptón-92), la fisión produce neutrones libres y energía en forma de calor y radiación gamma.
- **En la fusión nuclear** dos núcleos ligeros (dos isótopos del hidrógeno, el deuterio y el tritio) se combinan para formar un núcleo más pesado y estable, liberando gran cantidad de energía. La fusión de deuterio y tritio es uno de los principales métodos para reproducir en la Tierra el proceso de generación de energía que se produce en el Sol. Se logra en laboratorios y reactores especializados y es un proceso aun ampliamente experimental¹⁷⁶. Para que los núcleos de deuterio (^2H) y tritio (^3H) se unan, deben superar la repulsión electrostática entre protones (barrera de Coulomb). En un reactor de fusión no se “aceleran” los isótopos individualmente como en un acelerador de partículas, pero sí es necesario aumentar enormemente su energía cinética para que puedan superar la barrera de Coulomb y fusionarse. Esto se logra calentando el combustible a temperaturas extremas, no mediante haces acelerados. Para esto, son necesarios:

¹⁷⁶ ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), Cadarache, Francia; JET (Joint European Torus), Culham, Reino Unido; NIF, Lawrence Livermore National Laboratory, EE.UU.

- Temperatura: del orden de 100 a 150 millones de °C, suficiente para ionizar el combustible (los isótopos ligeros) y formar un plasma¹⁷⁷ donde los núcleos colisionen con gran energía cinética.
- Presión y densidad: altas, para incrementar la probabilidad de colisiones.
- Confinamiento del plasma: El confinamiento del plasma en un reactor de fusión tiene como uno de sus objetivos principales evitar que el plasma extremadamente caliente entre en contacto con las paredes del reactor. Las razones de lo anterior son de fácil deducción: Ningún material sólido puede resistir temperaturas de 100–150 millones °C sin fundirse instantáneamente. Es necesario además evitar pérdidas de energía: Si el plasma toca las paredes, se enfría rápidamente, lo que impide mantener las condiciones necesarias para la fusión. Finalmente, el contacto directo del plasma con las paredes provoca erosión, liberación de impurezas y daños en los materiales internos del reactor, reduciendo su vida útil. ¿Cómo se evita el contacto? Las técnicas más usadas son: a) El confinamiento magnético, mediante el cual campos magnéticos potentes “suspenden” el plasma dentro de un volumen toroidal (ej., Tokamak), manteniéndolo separado de las paredes. b) El confinamiento inercial: En síntesis, este procedimiento consiste en disparar una serie de láseres o haces de iones sobre una pequeña cápsula de combustible (deuterio y tritio) en el centro de la cámara del reactor. Esto genera una implosión que comprime el material a densidades muy altas y temperaturas de millones de grados, lo cual produce la formación del plasma. El volumen del plasma es diminuto (micrómetros a milímetros), pero su densidad es cientos de veces la del sólido original. Aunque no hay campos magnéticos, la propia inercia del plasma comprimido evita que se expanda de inmediato. Este “momento de confinamiento” dura unos nanosegundos, suficiente para que muchos núcleos de deuterio y tritio se fusionen antes de que el material se desintegre y se disperse (*National Ignition Facility* - NIF, 2023).

Para concluir esta digresión, resaltamos el hecho de que la energía nuclear genera electricidad sin emitir gases de efecto invernadero durante su operación, tan es así que la Unión Europea ha reconocido oficialmente en el año 2022 a la energía nuclear como “combustible verde” dentro de su Taxonomía de Finanzas Sostenibles, clasificándola junto con el gas natural como una opción transicional válida para la mitigación del cambio climático. Además, las tecnologías emergentes prometen mejoras significativas en la seguridad de las plantas, reduciendo riesgos de accidentes. No obstante, persiste el desafío del manejo y almacenamiento seguro de los residuos radiactivos a largo plazo.



Fig. 8-3 Energía solar y eólica en red, 2016 (Autor: Kenueone. Lic. Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain)

¹⁷⁷ El plasma es el cuarto estado de la materia, formado cuando un gas se calienta tanto que sus átomos pierden electrones, creando una mezcla de iones positivos y electrones libres

8.1.1.2 Ejemplos de Fuentes Renovables de Energía

Las fuentes renovables de energía (Fig. 8-3)¹⁷⁸ son aquellas que se renuevan de manera natural en escalas de tiempo humanas, con tasa de consumo inferior a la tasa de regeneración (IPBES, s.f.). En la Tabla 8-1 se reseñan las principales fuentes renovables, incluyendo la forma de energía asociada (Grenn, 2021) (Smith J., 2022) (Johnson y Brown, 2015).

Tabla 8-1 Fuentes renovables de energía (Fuente: Producción propia)

Fuente	Forma de energía asociada	Aprovechamiento
Sol	Energía solar: energía radiante térmica, luminosa y ultravioleta (Fig. 8-3).	Las plantas fotovoltaicas convierten la radiación en electricidad, mientras que las plantas térmicas la convierten en calor para agua y calefacción.
Viento	Energía eólica: energía cinética debida al movimiento del aire generado por diferencias térmicas y de presión (Fig. 8-3).	Los aerogeneradores y los molinos de viento transforman la energía eólica en electricidad o trabajo mecánico, respectivamente, mientras que los barcos de vela la emplean para desplazarse.
Embalses y ríos	Energía hidráulica: energía potencial propias de los embalses ubicados sobre el nivel del mar y energía cinética causada por el fluir de los ríos (Fig. 8-4).	Las plantas hidroeléctricas convierten la energía hidráulica en electricidad mediante turbinas y alternadores. Los antiguos molinos hidráulicos usan las corrientes de ríos o canales para mover una rueda de paletas o cucharas para moler grano, serrar madera etc.
Agua marina en movimiento	Energía mareomotriz: energía cinética producida por mareas, olas o corrientes submarinas (Fig. 8-6).	Plantas que aprovechan la diferencia del nivel del agua entre marea alta y baja para generar electricidad utilizando un sistema de diques y turbogeneradores. Otros sistemas utilizan turbogeneradores submarinos para aprovechar el movimiento de las olas y de las corrientes.
Calor interno de la Tierra	Energía geotérmica: calor almacenado bajo la superficie terrestre. Este calor puede provenir de la descomposición de materiales radiactivos en el núcleo terrestre, el calor residual de la formación del planeta, actividad volcánica y movimientos tectónicos (Fig. 8-7).	Los sistemas de uso directo del calor permiten obtener aguas termales, calefacción, vapor para procesos industriales y agrícolas. Las centrales geotérmicas de generación (o de cogeneración) utilizan el vapor para producir electricidad (y calor).
Biomasa	Energía química: es un combustible constituido por materia orgánica acumulada, de origen vegetal o animal (Fig. 8-5).	Desde la prehistoria, la humanidad quemaba en fuego abierto madera y residuos vegetales para producir calor, alimentar hornos, cocinar y protegerse del frío. Las antorchas y las lámparas de aceite proveían iluminación. En la actualidad la quema de la biomasa es controlada y optimizada, con tecnologías que permiten generar calor, electricidad y combustibles en forma limpia y eficiente.

¹⁷⁸ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Renewable_Energy_on_the_Grid.jpg



Fig. 8-4 Energía hidráulica (Autor: Chalisa Jirutchok, 2016. Lic. *Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International*).



Fig. 8-5 Uso tradicional de la biomasa (Autor: Jon Sullivan, 2006. Lic. Dominio Público)



Fig. 8-7 Planta geotérmica Krafla en Islandia (Autor: Ásgeir Eggertsson, 2004. Lic. *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0*).

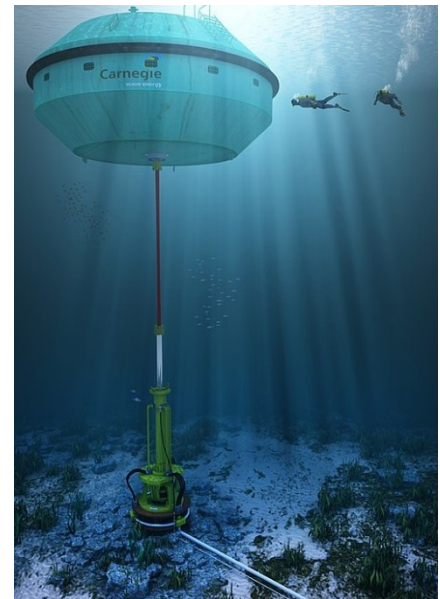


Fig. 8-6 CETO: Energía de las olas (Autor: Carnegie Wave Energy, 2014. Lic. *Creative Commons BY-SA 3.0*).

8.1.2 FUENTES DE ENERGÍA SECUNDARIA (DERIVADOS SECUNDARIOS O VECTORES ENERGÉTICOS)

Las fuentes de energía secundaria son aquellas que resultan de la transformación de fuentes de energías primarias en productos secundarios, denominados **derivados o vectores energéticos**. Estas transformaciones suelen ocurrir en centros de procesamiento, como centrales eléctricas o refinerías, donde las energías primarias se convierten en formas que faciliten su transporte, almacenamiento o uso final. (International Energy Agency - IEA, 2020) (International Energy Agency - IEA, 2025)

Ejemplos de fuentes de energía secundarias:

- **Electricidad:** La electricidad no existe en la naturaleza en cantidades utilizables directamente por el ser humano, por lo que es necesario generarla mediante un proceso de conversión de diversas fuentes primarias o secundarias, como carbón, gas natural, nuclear, solar, hidráulica o eólica. Es considerado un portador o vector de energía (*energy carrier*). Su versatilidad y facilidad de transporte la convierten en una de las formas de energía secundaria más utilizadas a nivel global.
- **Reservorios y portadores de calor:** El calor como energía secundaria puede producirse mediante la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo), la fisión nuclear o a partir de fuentes renovables, como la biomasa o las centrales geotérmicas. El calor producido puede ser almacenado en un reservorio, es decir en un sistema capaz de absorber, acumular y liberar calor en distintos momentos, actuando como almacén temporal de energía térmica (por ejemplo, un tanque de agua caliente de gran volumen). Otro tipo de transformación consiste en acondicionar un medio físico para su utilización como portador de calor hasta el punto de uso final, empleando para ello fluidos como vapor de agua, agua caliente, aceites térmicos o sales fundidas. Estos medios solo trasladan la energía, no la almacenan significativamente. Se utilizan principalmente en aplicaciones de calefacción residencial y comercial, así como en procesos industriales y agrícolas. En muchos sistemas energéticos, el calor también se genera como subproducto de la producción de electricidad (cogeneración), lo cual permite mejorar la eficiencia global del sistema.
- **Derivados del petróleo:** Incluyen productos como gasolina, diésel, queroseno, fueloil y gas licuado de petróleo (GLP), entre otros. Estos productos se obtienen a través del refinado del petróleo crudo, un proceso que implica destilación y otras transformaciones químicas. Aunque el petróleo es una fuente primaria de energía, sus derivados son considerados fuentes secundarias, ya que se obtienen mediante un proceso industrial de transformación. Son ampliamente utilizados en el transporte, la generación eléctrica y como insumos en la industria petroquímica.
- **Hidrógeno:** Aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, en la Tierra no se encuentra libre en cantidades significativas, sino combinado en compuestos como el agua (H₂O) y los hidrocarburos. Dado que su obtención requiere convertir energía a partir de una fuente primaria, el hidrógeno se clasifica como fuente de energía secundaria y, más específicamente, como vector energético que transporta energía química. Para generarlo se emplean procesos como la electrólisis del agua o la reformación de gas natural, los cuales demandan una cantidad de energía superior a la que eventualmente puede extraerse del hidrógeno producido, factor que dificulta su utilización comercial.

8.1.3 ESQUEMAS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA

La conversión de energía es un proceso fundamental para el funcionamiento de los sistemas energéticos modernos. A través de diversas tecnologías e infraestructuras industriales,

la energía contenida en los recursos naturales se transforma en formas utilizables, adaptadas a las necesidades del consumo final (Fig. 8-8). A continuación, se presentan ejemplos representativos de estas transformaciones:

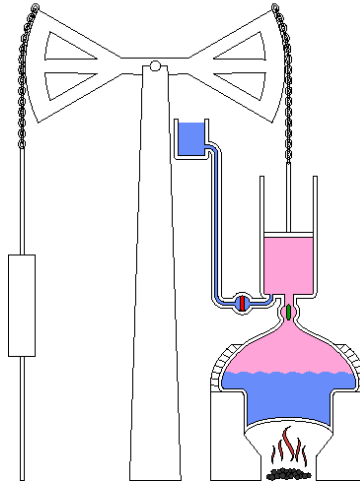


Fig. 8-8 Máquina atmosférica de Newcomen: del carbón al movimiento del balancín (Autor: Emoscopes, *Drawn using XaraX software. Lic. Creative Commons BY 2.5*)¹⁷⁹

- **El petróleo crudo** se somete a procesos de destilación fraccionada y refinación, generando derivados líquidos con distintas propiedades fisicoquímicas según su uso final, principalmente en el transporte y en maquinarias industriales.
- **El carbón**, a través de su combustión en centrales termoeléctricas, genera vapor que acciona turbinas acopladas a generadores eléctricos. Aunque es un recurso ampliamente disponible, su elevado impacto ambiental ha motivado una progresiva reducción en su uso.
- **La radiación solar** se convierte mediante tecnologías fotovoltaicas o térmicas. En el primer caso, se produce electricidad directamente a través de semiconductores; en el segundo, mediante el calentamiento de fluidos que generan vapor y mueven turbinas.
- **La fisión del átomo** de uranio u otro material radioactivo libera grandes cantidades de energía térmica, la cual se utiliza para producir vapor que impulsa generadores eléctricos en plantas nucleares.
- **La biomasa** puede utilizarse en plantas para la producción de calor y electricidad o transformarse en biocombustibles líquidos (como etanol o biodiésel) mediante procesos termoquímicos o bioquímicos. Estos productos se utilizan principalmente en el transporte o como sustitutos parciales de combustibles fósiles en mezclas.
- **El gas natural** se emplea en turbinas o ciclos combinados para la generación de electricidad o comprimirse como gas natural comprimido (GNC) para uso vehicular, especialmente en transporte urbano.
- **El hidrógeno**, una vez producido, puede utilizarse en pilas de combustible para generar electricidad con emisiones nulas, o puede ser quemado directamente en aplicaciones térmicas o en ingeniería de motores.

Descripciones como la anterior permiten comprender no solo el flujo de energía dentro de los sistemas energéticos contemporáneos, sino también la dependencia tecnológica que implica

¹⁷⁹ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=607235>

cada etapa de transformación. Además, pone en evidencia la eficiencia y las pérdidas asociadas a cada proceso, así como el potencial de descarbonización de la matriz energética global al sustituir fuentes primarias fósiles por renovables. Esta visión sistémica es clave para el diseño de políticas energéticas sostenibles y para la planificación de infraestructuras de conversión y distribución más eficientes (Fig. 8-9).

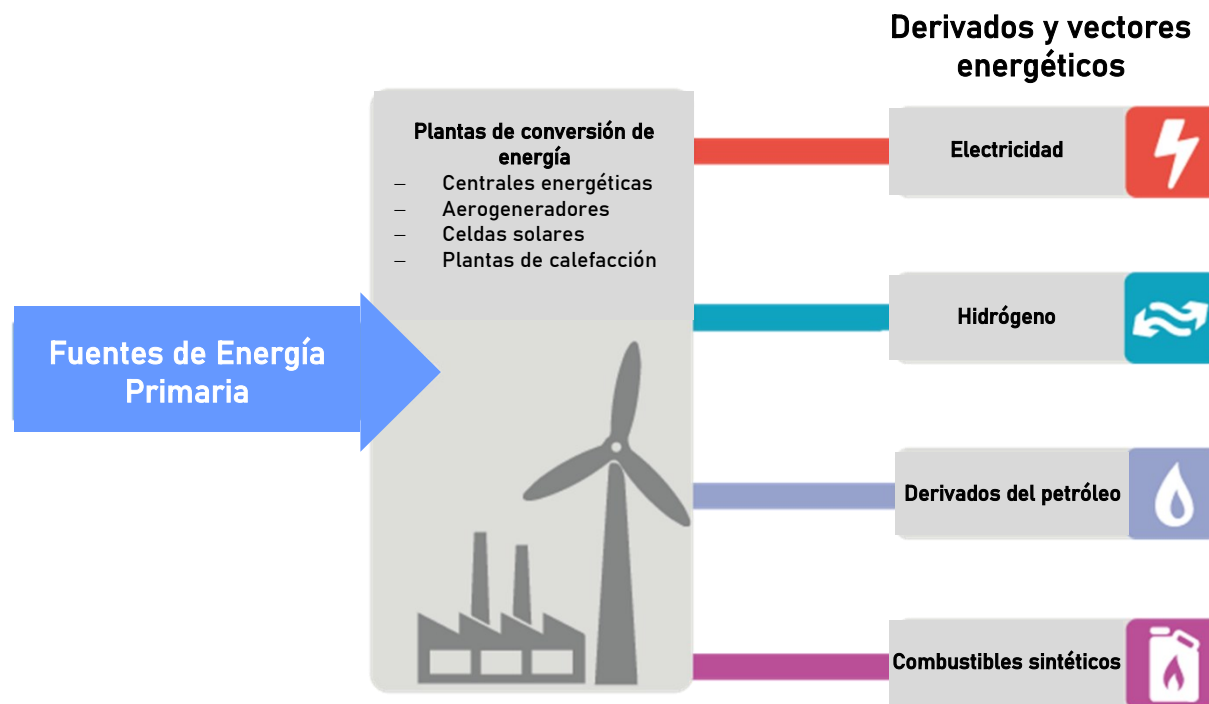


Fig. 8-9 Ejemplos de transformación de las energías primarias en secundarias (Fuente: C. Genatios, 2018. Curso “Cambio Climático” MDC)

8.2 DISTRIBUCIÓN DEL USO DE ENERGÍAS EN EL MUNDO.

El consumo mundial de energía en 2023 creció un 2,2%, superando la tasa promedio de crecimiento de 2010-2019 (1,5% anual). Este aumento fue impulsado principalmente por los países del Grupo BRICS (5,1%), que fueron responsables el 42% del consumo global. China tuvo un crecimiento del 6,6 %, el doble de su media histórica, mientras que India registró un aumento del 5,1%. En contraste, el consumo energético en la OCDE disminuyó un 1,5%, con caídas significativas en la UE (4,2%) y Japón (3,5%)¹⁸⁰.

Según el KPMG y el *Energy Institute* (EI), en el año 2023 el consumo mundial de energía se distribuyó aproximadamente de la siguiente manera (Energy Institute; KPMG; Kearney; Heriot Watt University, 2024):

- **Energías no renovables:** 80% (Petróleo 31%, Carbón 26%, Gas natural 23%, Nuclear 4%)
- **Energías renovables:** 20% (Hidráulica 7%, Eólica 5%, Solar 4%, Biomasa 3%, Geotérmica y otras 1%) (Fig. 8-10).

El análisis de la distribución del consumo mundial de energía en 2023 aun resalta un neto predominio de las energías no renovables (80 % del total) frente a las energías renovables, con un 20 % de participación,

¹⁸⁰ Enerdata: <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>

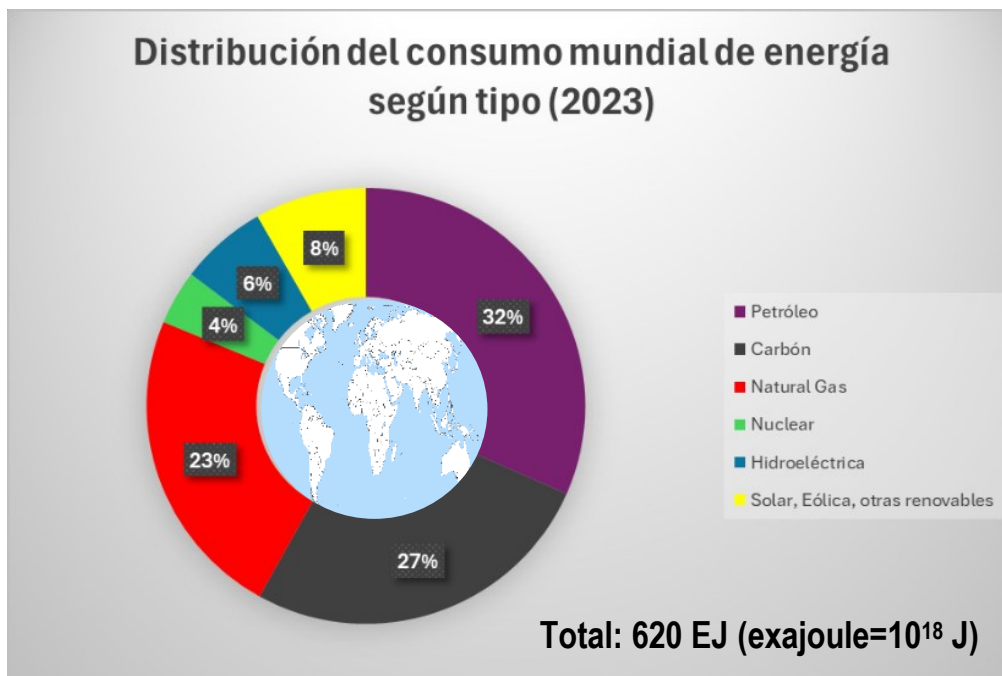


Fig. 8-10 Distribución del consumo mundial de energía según tipo (2023) (Fuente: KPMG, Energy Institute, 2024).

A pesar de los ingentes esfuerzos realizados, especialmente por los países europeos, el patrón de consumo energético global ha experimentado solo modificaciones marginales desde 2012. De hecho, según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA) (2023), en ese año 2012 la matriz energética mundial estaba compuesta aproximadamente por un 86,6 % de fuentes no renovables y un 13,4 % de fuentes renovables.

A continuación, se ofrece una comparación para el año 2023 entre las canastas energéticas de dos países europeos (Alemania y Francia) y dos en vía de desarrollo (Brasil e India) en el contexto de la transición energética. El análisis de estos datos pone en evidencia las diferencias estructurales, los grados de dependencia, y las implicaciones para la sostenibilidad y la resiliencia energética de los cuatro países antedichos.

8.2.1 DIVERSIFICACIÓN VS. DEPENDENCIA DE UNA FUENTE DOMINANTE

- **Alemania** se destaca por tener un *mix* energético diversificado, con una proporción significativa de renovables distribuidas entre eólica (33.3%), solar (12.1%) y biomasa (10%), además de una contribución aún relevante del carbón (26.9%) y gas natural (10.8%). Este enfoque responde a su política de transición energética (*Energiewende*), orientada a abandonar la energía nuclear (que ya está prácticamente eliminada) y reducir gradualmente los combustibles fósiles (Statista, 2023) (Fig. 8-11).
- **Francia**, en contraste, mantiene una altísima dependencia de la energía nuclear (62%), acompañada de algo de hidráulica y renovables intermitentes (solar y eólica). Esta dependencia refleja una política de seguridad energética iniciada en los años 70, pero hoy representa un desafío ante las exigencias de flexibilidad del sistema eléctrico y el envejecimiento de su parque nuclear (*International Energy Agency*, 2024) (Fig. 8-12).
- **Brasil** depende fuertemente de la energía hidroeléctrica (60.2%), una fuente renovable pero vulnerable a la variabilidad climática. Aunque el país ha incorporado nuevas fuentes como eólica, solar y biomasa, su red sigue muy condicionada a los regímenes

hidrológicos, lo que implica riesgos ante sequías prolongadas (Statista, 2023) (Fig. 8-11).

- **India** mantiene una fuerte dependencia del carbón (73%), lo cual responde a su disponibilidad interna y bajo costo relativo. Aunque el crecimiento de las renovables ha sido notable en los últimos años, aún no ha alcanzado una masa crítica suficiente para sustituir su matriz fósil dominante (*International Energy Agency, 2024*) (Fig. 8-12).

8.2.2 GRADO DE SOSTENIBILIDAD Y RESILIENCIA ENERGÉTICA

- **Alemania y Brasil** tienen sistemas más sostenibles desde el punto de vista ambiental, aunque Alemania todavía lucha con la herencia del carbón.
- **Francia**, si bien tiene bajas emisiones debido a la energía nuclear, enfrenta desafíos relacionados con la seguridad y gestión de residuos nucleares, además del alto costo de mantenimiento y modernización de su parque.
- **India**, con su gran uso de carbón, enfrenta serios retos en términos de contaminación atmosférica y cumplimiento de sus compromisos climáticos, aunque la tendencia apunta hacia una transición más rápida en las próximas décadas, empujada por presión internacional e innovación tecnológica.

8.2.3 LECCIONES ESTRATÉGICAS PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA GLOBAL

- No existe una única vía hacia la descarbonización. Alemania y Brasil han optado por una alta participación de renovables, pero desde estrategias muy diferentes (tecnología vs. recursos naturales). Francia apuesta por el átomo, e India aún prioriza la disponibilidad energética.
- La diversificación mejora la resiliencia. Los países con mayor equilibrio entre fuentes (Alemania, parcialmente Brasil) están en mejor posición para afrontar variabilidad climática, conflictos geopolíticos o cambios en la demanda.
- La infraestructura heredada condiciona las decisiones. Francia no puede abandonar fácilmente el nuclear, ni India el carbón, sin profundas inversiones o disrupciones sociales. Las decisiones energéticas no son solo técnicas, también son históricas y políticas.
- El acceso equitativo y la seguridad energética siguen siendo esenciales. India y Brasil enfrentan el doble desafío de expandir el acceso a la energía sin comprometer la sostenibilidad. Esto requiere no solo tecnología, sino gobernanza eficaz y financiamiento internacional.

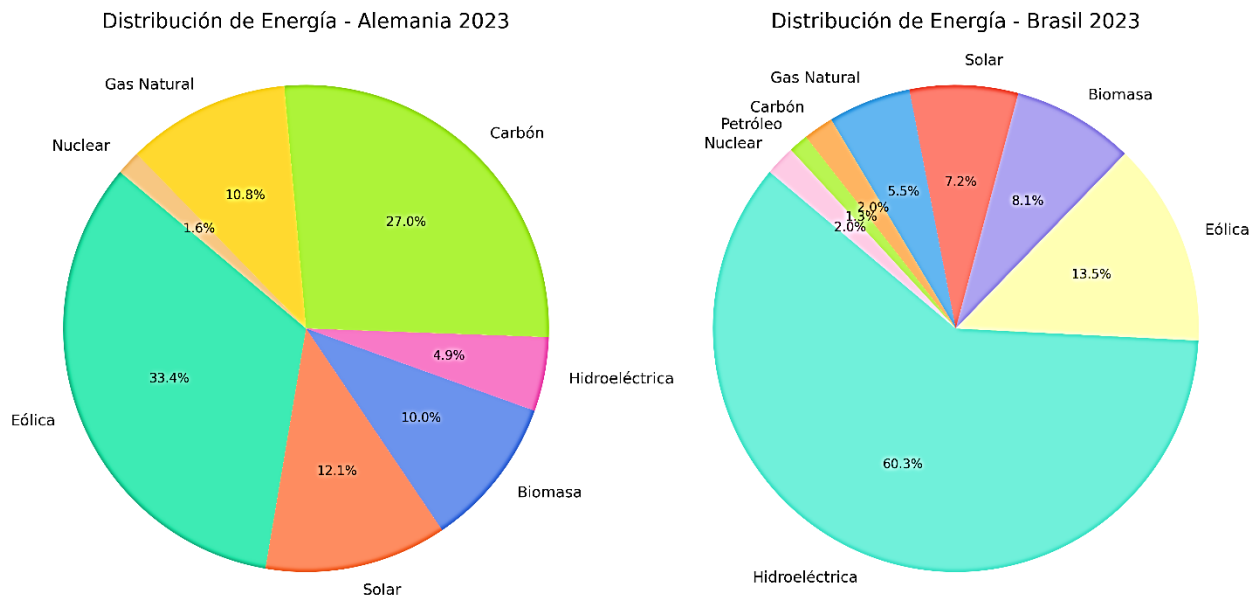


Fig. 8-11 Datos comparativos del *mix* energético de Alemania y Brasil – 2023 (Fuente: Statista, 2023 (Statista, 2023), (Statista, 2023))

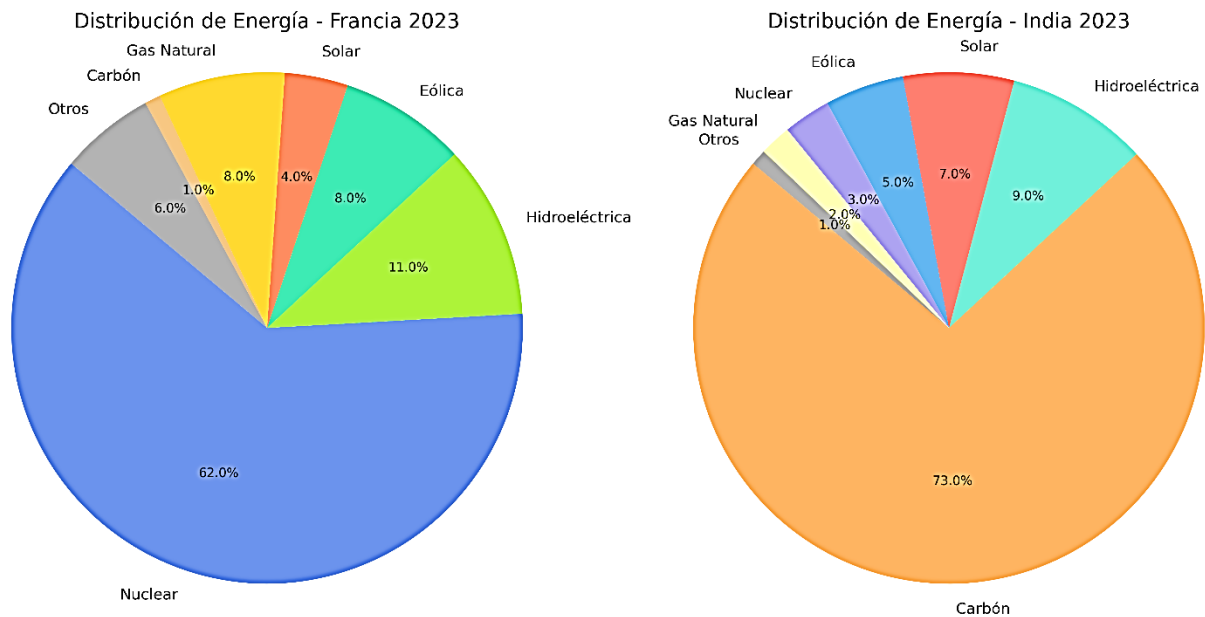


Fig. 8-12 Datos comparativos del *mix* energético de Francia e India – 2023 (Fuente: *International Energy Agency*, 2023 y 2024).

8.2.4 CONCLUSIÓN

La comparación entre estos cuatro países muestra que la transición energética es altamente contextual. Mientras que Alemania lidera con políticas activas hacia la diversificación renovable, Francia mantiene una base nuclear sólida; Brasil aprovecha su geografía hidrográfica, e India enfrenta el peso de su demografía y desarrollo industrial.

La clave está en combinar sostenibilidad ambiental, seguridad energética y equidad social, adaptando estrategias a las realidades nacionales, pero con una visión global compartida.

8.3 ESCENARIOS FUTUROS

El cambio climático constituye una amenaza sistémica sin precedentes para los sistemas ecológicos, económicos y sociales a escala global. Aunque el consenso científico sobre la influencia antropogénica en el calentamiento del planeta está sólidamente establecido, las acciones emprendidas hasta la fecha han sido ampliamente insuficientes para mitigar sus causas fundamentales. A pesar del incremento constante en la capacidad de generación renovable, de los avances tecnológicos en eficiencia energética y de la proliferación de políticas ambientales en múltiples jurisdicciones, las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) continúan en aumento, alcanzando nuevos máximos históricos en 2023 (*United Nations Environment Programme, 2023*).

El Acuerdo de París de 2015 representa el principal marco multilateral vigente en materia climática. En dicho acuerdo, los países signatarios se comprometieron a mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2 °C respecto a los niveles preindustriales, y a realizar esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C, reconociendo que este umbral es crítico para evitar impactos catastróficos e irreversibles sobre los sistemas naturales y humanos (*United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015*). Este límite no es arbitrario, sino que está fundamentado en una amplia base científica consolidada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que ha demostrado que incluso pequeñas diferencias en el calentamiento global pueden conllevar aumentos significativos en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, pérdida de biodiversidad y desplazamientos humanos masivos (IPCC, 2018).

No obstante, los compromisos actuales establecidos en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) son incompatibles con la trayectoria de 1,5 °C. La suma de estos compromisos apunta a un aumento de temperatura de entre 2,4 °C y 2,9 °C para finales de siglo, incluso si se implementan completamente (Climate Action Tracker, 2023). Esto evidencia una preocupante brecha entre los compromisos declarados y las acciones efectivas. Además, la aplicación de medidas de mitigación ha sido desigual: mientras la Unión Europea ha establecido un marco legislativo robusto con objetivos vinculantes, y Estados Unidos ha reactivado políticas climáticas ambiciosas bajo la administración actual, otras economías emergentes y países exportadores de combustibles fósiles han mostrado rezagos significativos, ya sea por restricciones estructurales, falta de financiación climática o dependencia económica de sectores intensivos en carbono (*Commission, 2023*).

El principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas (reafirmado en el Acuerdo de París) reconoce explícitamente que los países en vías de desarrollo no pueden ser obligados a asumir las mismas cargas que las naciones industrializadas. Sin embargo, esta diferenciación también ha sido utilizada, en ciertos contextos, como argumento para postergar compromisos concretos. Mientras tanto, el financiamiento climático comprometido por los países desarrollados (100.000 millones de dólares anuales para apoyar a las economías en desarrollo) sigue sin materializarse en su totalidad, lo que debilita la confianza en el sistema multilateral y limita la capacidad de acción de los países más vulnerables (OECD, 2023).

En este contexto de ambiciones divergentes, compromisos fragmentados y ejecución parcial, se torna imperativo explorar los posibles escenarios futuros del calentamiento global, considerando tanto las trayectorias actuales como la posibilidad de implementación efectiva de medidas correctivas. El presente análisis examina dichos escenarios con base en modelos climáticos contemporáneos y evidencia empírica proveniente de las principales agencias internacionales.

8.3.1 PROYECCIONES CLIMÁTICAS BASADAS EN ESCENARIOS

El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha desarrollado modelos de proyección climática que combinan trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (RCP, *Representative Concentration Pathways*) y narrativas socioeconómicas integradas (SSP,

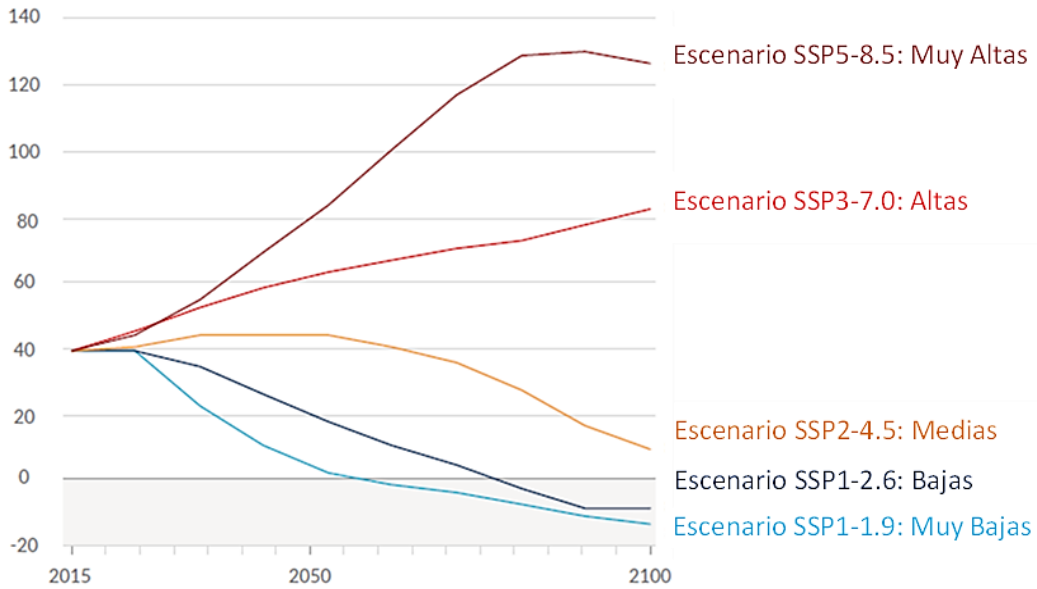
Shared Socioeconomic Pathways) con el objetivo de analizar posibles escenarios futuros del sistema climático global. Estas combinaciones permiten evaluar los impactos esperados, las necesidades de mitigación y las capacidades de adaptación según diferentes contextos de desarrollo y políticas.

- **SSP1-1.9 y SSP1-2.6** representan trayectorias optimistas, asociadas a un mundo cooperativo con elevada conciencia ambiental, crecimiento económico sostenible y tecnología de bajas emisiones. Estas vías exigen reducciones inmediatas y profundas de emisiones. Alcanzar el objetivo de limitar el calentamiento a 1,5 °C requiere que la reducción de emisiones globales de CO₂ alcance su pico antes de 2025, disminuyan en al menos un 43 % para 2030 y lleguen a cero hacia 2050 (IPCC, 2022), (Nyangon, Villarroel, & Alvarado, 2023). Estos escenarios son técnicamente viables, pero dependen de transformaciones sistémicas en sectores clave: energía, transporte, uso del suelo y procesos industriales.
- **SSP2-4.5 y SSP3-7.0** describen contextos más realistas bajo políticas actuales y compromisos nacionales no reforzados. SSP2-4.5 se vincula con una gobernanza moderada, mientras que SSP3-7.0 se asocia a un mundo fragmentado y nacionalista, con escasa cooperación internacional y lenta adopción tecnológica. En ambos casos, se proyecta un aumento de temperatura de entre 2,1 °C y 3,5 °C para finales de siglo (Smith J. e., 2024). Las consecuencias incluyen alteraciones en los patrones de lluvia, incremento en la frecuencia de fenómenos climáticos extremos y reducción de la productividad agrícola global.
- **SSP5-8.5** describe un mundo altamente dependiente de los combustibles fósiles, con crecimiento económico basado en el consumo intensivo de energía y escasa implementación de políticas climáticas. Es considerado el “escenario de referencia de altas emisiones” y proyecta un calentamiento global superior a 4 °C hacia 2100 (Johnson A. , 2025). Este nivel de calentamiento implicaría umbrales críticos como el colapso de ecosistemas, pérdida irreversible de glaciares y aumento del nivel del mar en más de un metro, además de impactos humanos extremos sobre salud, seguridad hídrica y migraciones climáticas masivas.

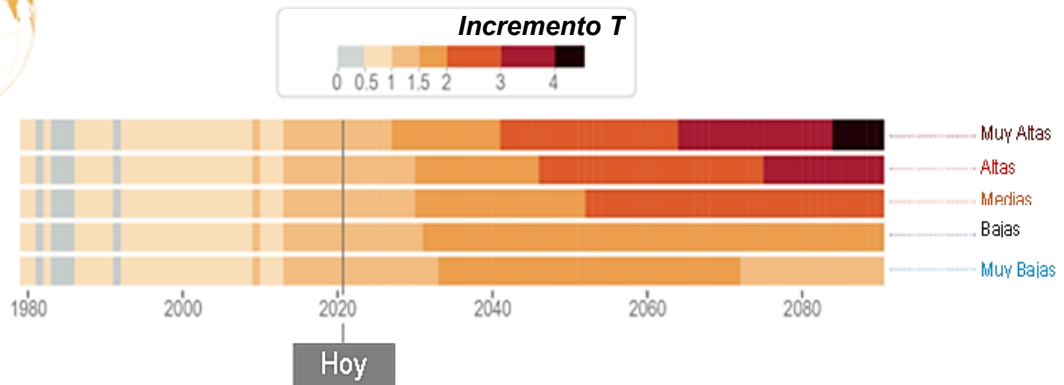
Los estudios más recientes coinciden en que, bajo las políticas actuales y sin reducciones drásticas de emisiones en la presente década, el límite de 1,5 °C podría superarse entre 2031 y 2034 (Harrison, 2024). Esto reafirma la urgencia de acelerar la acción climática a escala global.



a) Proyección de emisiones de dióxido de carbono (GtCO₂/y)

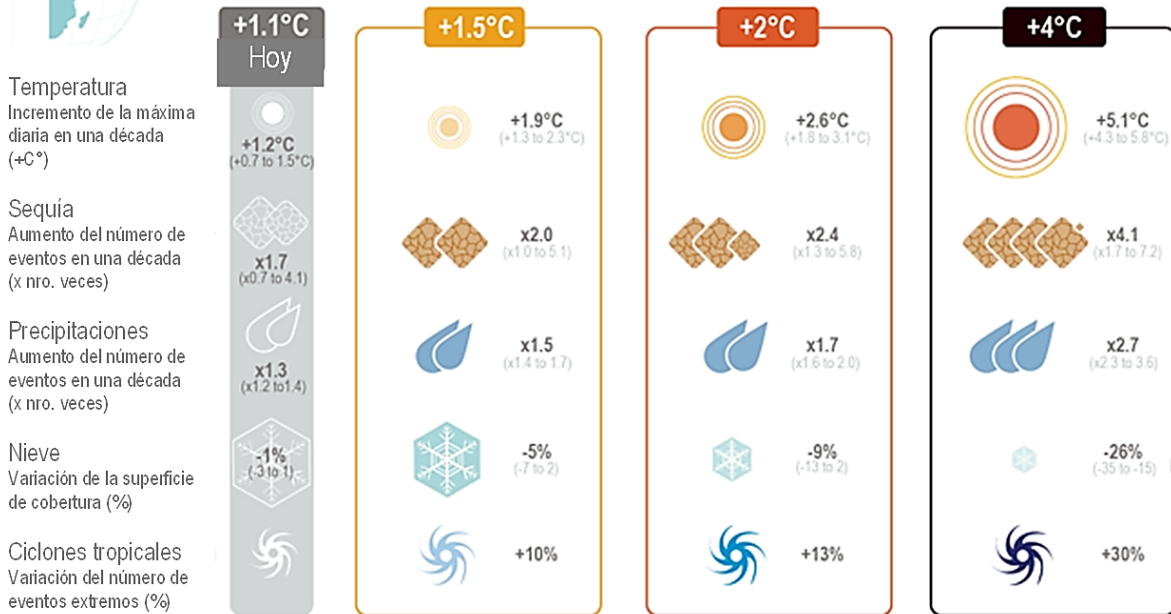


b) Incremento de la temperatura de la superficie, con referencia al período 1850-1900, según tipo de escenario





c) Respuesta de los sistemas climáticos al aumento de temperatura, con referencia al período 1850-1900



d) Aumento del nivel del mar (en metros)

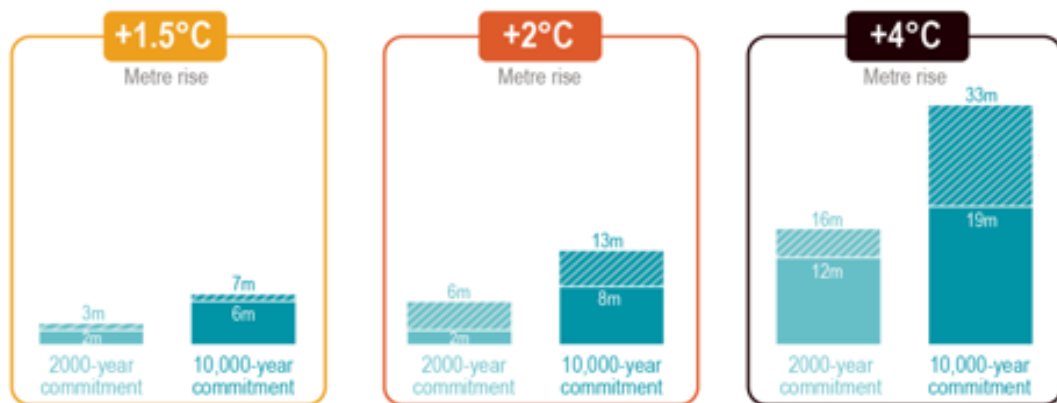


Fig. 8-13 Escenarios climáticos futuros: a) Emisiones de CO₂ b) Efectos sobre la temperatura de la superficie c) Efecto del aumento temperatura sobre los fenómenos climáticos y d) sobre el aumento del nivel del mar (Fuente: IPCC, 2021)¹⁸¹.

8.3.2 ANÁLISIS REGIONAL Y SECTORIAL DE IMPACTOS CLIMÁTICOS

El cambio climático no se manifiesta de forma homogénea: sus efectos varían significativamente según la **región geográfica** y el **sector socioeconómico**. Esta diferenciación es fundamental para el diseño de políticas climáticas eficaces y equitativas.

¹⁸¹ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/technical-summary/ts-infographics-figure-1>

8.3.2.1 Impactos regionales

- **África Subsahariana:** Es una de las regiones más vulnerables debido a su alta dependencia de la agricultura pluvial, bajos niveles de resiliencia institucional y escasa infraestructura. Se prevé una reducción del rendimiento agrícola de hasta **50 % para 2050** en algunas zonas, aumento de enfermedades transmitidas por vectores y desplazamientos humanos forzados (IPCC, 2022).
- **Asia Meridional y Sudoriental:** La región enfrenta una **combinación crítica** de aumento del nivel del mar, eventos extremos (ciclones, olas de calor) y presión demográfica. Las ciudades costeras como Mumbai, Yakarta o Manila se encuentran entre las más expuestas al riesgo de inundaciones y colapso de infraestructuras (Asian Development Bank, 2023).
- **América Latina y el Caribe:** Se anticipan alteraciones significativas en los patrones de lluvia, afectando la seguridad hídrica, la agricultura y los ecosistemas tropicales. La región también muestra alta sensibilidad socioeconómica ante desastres climáticos, especialmente en los Andes y la cuenca amazónica, donde hay un **riesgo elevado de pérdida de biodiversidad** y emisiones por deforestación (CEPAL, 2021).
- **Regiones polares:** El Ártico se está calentando aproximadamente **cuatro veces más rápido** que el promedio global. El deshielo del permafrost y la pérdida de hielo marino no solo contribuyen al aumento del nivel del mar, sino que también liberan metano, amplificando el efecto invernadero (NOAA, 2023).
- **Europa y América del Norte:** Aunque cuentan con mayor capacidad de adaptación, estas regiones también enfrentan desafíos importantes como olas de calor intensificadas, incendios forestales, sequías en el sur de Europa y tormentas invernales más severas en latitudes altas (European Environment Agency).

8.3.2.2 Impactos sectoriales

- **Agricultura y seguridad alimentaria:** Las zonas tropicales experimentarán las mayores pérdidas en productividad agrícola. Según estimaciones del IPCC, incluso con adaptaciones moderadas, se espera una disminución global del rendimiento del maíz y trigo del orden del 10–25 % hacia 2100 bajo escenarios de altas emisiones (IPCC, 2022).
- **Recursos hídricos:** El cambio climático altera la disponibilidad temporal y espacial del agua, reduciendo el caudal de ríos clave como el Amazonas, el Mekong y el Nilo. Se estima que más de 3.000 millones de personas podrían enfrentar escasez hídrica severa en 2050 (World Bank, 2022).
- **Energía:** Las fuentes hidroeléctricas son particularmente vulnerables a cambios en el régimen de lluvias. Además, la demanda de energía para refrigeración crecerá exponencialmente, exacerbando la presión sobre los sistemas eléctricos urbanos (IEA, 2023).
- **Salud pública:** Las olas de calor, la expansión de enfermedades como el dengue y la malaria, y el aumento de contaminación atmosférica están vinculados a un mayor riesgo de mortalidad prematura. El número de días con condiciones climáticas extremas que afectan a la salud se ha duplicado en los últimos 40 años (WHO, 2023).
- **Ecosistemas y biodiversidad:** Se proyecta que un aumento de 2 °C podría ocasionar la pérdida de hábitats para aproximadamente el 20–30 % de las especies evaluadas,

especialmente en regiones biodiversas como la Amazonía, Madagascar y los arrecifes de coral (WWF, 2022).

8.4 LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: AHORRO, EFICIENCIA Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES

La transición energética se encuentra actualmente en pleno desarrollo, impulsada por la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los efectos del cambio climático. Numerosas naciones han iniciado procesos estructurales de descarbonización de sus economías, sustituyendo progresivamente las centrales térmicas alimentadas con combustibles fósiles por fuentes de energía renovable. Entre estas, la solar fotovoltaica y la eólica han recibido una atención prioritaria, tanto en términos de inversión como de despliegue tecnológico. Sin embargo, estas tecnologías presentan una limitación estructural: su carácter intermitente, es decir, la dependencia de condiciones climáticas variables, lo que plantea desafíos significativos en términos de estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico.

Además, aunque han experimentado avances notables en las últimas décadas, las tecnologías solares y eólicas aún no pueden considerarse completamente maduras desde el punto de vista técnico, especialmente en lo que respecta al almacenamiento energético a gran escala y a la integración eficiente en redes eléctricas existentes. Como evidencia de lo anterior, mencionamos el evento ocurrido el 28 de abril de 2025, cuando España sufrió el apagón eléctrico más grave de su historia reciente, afectando prácticamente a toda la península ibérica y a parte del sur de Francia. Según expertos y operadores del sistema, una de las causas principales fue la repentina desaparición de 15 gigavatios de potencia, atribuida a la dificultad de integrar fuentes renovables como la solar y la eólica en la red eléctrica tradicional. Estas tecnologías, al carecer de inercia rotacional, no aportan estabilidad al sistema frente a fluctuaciones bruscas, lo que habría provocado la activación automática de los sistemas de protección y la necesidad de reiniciar la red para evitar daños mayores. Aunque aún se investigan los detalles técnicos, el incidente ha puesto en evidencia los desafíos de la transición energética y la necesidad de reforzar la infraestructura para garantizar la seguridad del suministro.

También otros sectores estratégicos para la transición enfrentan desafíos significativos, como la energía nuclear de nueva generación (que aún se encuentra limitada por barreras regulatorias, económicas y sociales) y la economía del hidrógeno, cuya infraestructura y viabilidad comercial permanecen en fases iniciales de desarrollo. (*International Renewable Energy Agency*, 2023).



Fig. 8-14 La pirámide energética (Fuente: C. Genatios, 2018. Curso "Cambio Climático" MDC)

En este contexto, resulta esencial que los esfuerzos globales de mitigación de emisiones se complementen, en esta fase de la transición, con políticas activas de adaptación. En el ámbito energético, esto implica la implementación de estrategias integradas que incluyan el ahorro de la energía mediante una reducción sostenida del consumo innecesario, el incremento de la eficiencia energética en todos los sectores productivos y residenciales, y la promoción de innovaciones tecnológicas orientadas a optimizar el uso y la gestión de la energía. Solo mediante un enfoque equilibrado entre mitigación, adaptación y desarrollo tecnológico podrá lograrse una transición energética robusta, resiliente y verdaderamente sostenible (Genatios C., Curso "Cambio Climático", 2018).

8.4.1 AHORRO DE ENERGÍA

El ahorro de energía constituye una de las estrategias fundamentales dentro de la transición energética, ya que permite reducir el consumo sin comprometer el desempeño de los servicios energéticos. A diferencia de la eficiencia energética, que se centra en obtener más rendimiento por unidad de energía consumida, el ahorro pone el énfasis en evitar el uso innecesario de energía, promoviendo cambios en comportamientos, tecnologías y estructuras de consumo (Fig. 8-15)¹⁸².

Los métodos para el ahorro de la energía pueden clasificarse en métodos directos e indirectos (Tabla 8-2) y en varios niveles de intervención (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2020).



Fig. 8-15 Apagado de luces no utilizadas
(Fuente: Sello postal de Azerbaijan, 2020. Lic. Dominio Público)

8.4.1.1 Métodos directos

- **Gestión de la demanda y cambio de hábitos.** Uno de los enfoques más inmediatos consiste en promover prácticas de consumo racional, tanto en sectores residenciales como comerciales. Esto incluye:
 - El apagado de equipos cuando no están en uso.
 - El uso de iluminación natural y ventilación cruzada.
 - Cambios en los patrones de consumo, como el desplazamiento del uso de energía hacia horas de menor demanda (*Load Shifting*).

¹⁸² <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=98449592>

Estas acciones, aunque individuales, pueden amplificarse mediante campañas de concientización y educación energética (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2019).

- **Diseño arquitectónico pasivo** En el sector de la edificación, el diseño arquitectónico pasivo desempeña un papel crucial en el ahorro de energía. Con pasivo se entiende un diseño que utiliza estrategias naturales y físicas para mejorar eficiencia energética y confort, sin aparatos ni sistemas mecánicos. Estrategias como:
 - Aislamiento térmico eficiente.
 - Orientación adecuada de los edificios.
 - Ventilación natural.
 - Uso de materiales con propiedades térmicas apropiadas.

permiten reducir la necesidad de calefacción, refrigeración e iluminación artificial, disminuyendo la carga energética sin intervención tecnológica activa (Ürge-Vorsatz et al., 2015).

- **Sistemas de control y automatización.** El uso de tecnologías inteligentes para la gestión energética en tiempo real ha demostrado ser eficaz en el ahorro. Entre ellas destacan:
 - Termostatos programables.
 - Sistemas de control de iluminación y climatización basados en ocupación.
 - Plataformas de gestión energética en tiempo real (BEMS, por sus siglas en inglés: *Building Energy Management Systems*).

Estos sistemas permiten optimizar el funcionamiento de equipos, evitando desperdicios por funcionamiento prolongado o inadecuado.

- **Mantenimiento y operación eficiente de instalaciones.** Un ahorro efectivo requiere que los sistemas energéticos operen en condiciones óptimas. Esto incluye:
 - Mantenimiento preventivo de maquinaria e instalaciones.
 - Revisión periódica de fugas térmicas o eléctricas.
 - Ajuste de cargas mecánicas en procesos industriales.

Estas acciones prolongan la vida útil de los equipos y previenen consumos excesivos.

- **Políticas de ahorro energético.** A nivel institucional y normativo, los gobiernos pueden fomentar el ahorro mediante:
 - Normativas de construcción sostenible.
 - Etiquetado energético de electrodomésticos.
 - Incentivos fiscales para prácticas de bajo consumo.
 - Auditorías energéticas obligatorias en grandes consumidores.

Estas políticas son clave para inducir cambios sistémicos en los patrones de consumo energético.

8.4.1.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos de ahorro energético actúan sobre las condiciones sistémicas, estructurales o tecnológicas que afectan el uso final de la energía. Aunque no representan medidas de ahorro inmediato en un equipo o instalación concreta, su impacto acumulativo puede ser sustancial, especialmente en escalas urbanas, industriales o nacionales (International Energy Agency, 2022).

- **Gestión inteligente de redes energéticas (*Smart Grids*)**. Las redes inteligentes permiten una coordinación dinámica entre generación, almacenamiento y consumo, optimizando la distribución y reduciendo pérdidas en la red. Mediante sensores, algoritmos de control y comunicación en tiempo real:
 - Se evitan sobrecargas y desequilibrios de tensión.
 - Se reduce la necesidad de sobredimensionamiento de la infraestructura.
 - Se facilita la integración de fuentes distribuidas y el autoconsumo, lo que disminuye pérdidas por transporte.
- **Planeamiento urbano y movilidad sostenible**. Un diseño urbano eficiente reduce la necesidad de desplazamientos largos y favorece modos de transporte de bajo consumo:
 - Zonas de uso mixto (residencial, comercial, educativo) reducen la dependencia del automóvil.
 - Sistemas de transporte público eficientes y electrificados evitan el uso masivo de vehículos privados.
 - Infraestructura para caminatas y bicicletas promueve modos de cero consumos energéticos directos.

Aunque estas medidas no afectan directamente el consumo de un electrodoméstico, sí disminuyen la energía total utilizada en el sistema urbano.

- **Economía circular y gestión de materiales**. Reducir, reutilizar y reciclar materiales puede implicar grandes ahorros energéticos en sectores industriales. Por ejemplo:
 - El reciclaje de aluminio requiere solo el 5% de la energía necesaria para producirlo desde el mineral.
 - La reutilización de componentes en construcción o manufactura evita procesos intensivos en calor y electricidad.
 - Estas acciones disminuyen la demanda de energía primaria asociada a procesos productivos.
- **Educación y políticas de incentivos**. Aunque no son técnicas, las políticas públicas y la educación energética constituyen métodos indirectos efectivos. Ejemplos incluyen:
 - Tarifas diferenciadas por horario para desplazar consumo hacia horas valle.
 - Programas de incentivos fiscales para mejoras en eficiencia o compra de equipos eficientes.
 - Normativas que exigen auditorías o certificaciones energéticas.

Estas medidas inducen cambios estructurales y comportamentales, multiplicando el efecto de otras acciones directas.

- **Digitalización y modelado energético.** El uso de tecnologías de la información para modelar, simular y optimizar procesos industriales o logísticos permite identificar y eliminar ineficiencias ocultas. Ejemplos:
 - Gemelos digitales de edificios o plantas industriales.
 - Optimización de rutas logísticas para reducir consumo de combustible.
 - Monitoreo predictivo para mantenimiento eficiente.

En conjunto, estos métodos indirectos de ahorro energético actúan como multiplicadores de eficiencia y racionalidad en el uso de recursos energéticos, y son fundamentales en una transición energética que sea no solo tecnológica, sino también estructural y cultural.

El ahorro de energía, por tanto, no solo representa una opción económicamente viable y de rápida implementación, sino que también constituye un pilar esencial para garantizar la sostenibilidad energética durante las fases intermedias y posteriores de la transición energética. Su implementación masiva permite reducir la presión sobre las redes eléctricas, minimizar las emisiones y acelerar el abandono de fuentes fósiles sin depender exclusivamente de tecnologías emergentes.

Tabla 8-2 Cuadro comparativo: Métodos de ahorro de energía directos e indirectos.

Criterio	Métodos Directos	Métodos Indirectos
Definición	Acciones que reducen directamente el consumo energético en el punto de uso.	Acciones que disminuyen el consumo total de energía de forma estructural o sistémica.
Ejemplos típicos	<ul style="list-style-type: none"> - Apagar luces y equipos no utilizados - Uso de aislamiento térmico - Termostatos programables - Electrodomésticos eficientes 	<ul style="list-style-type: none"> - Urbanismo sostenible - Redes eléctricas inteligentes (<i>Smart Grids</i>) - Reciclaje industrial - Educación energética - Tarifas dinámicas
Escala de aplicación	Individual, local, en equipos o instalaciones específicas.	Regional, sectorial o nacional; afecta la estructura del sistema energético.
Plazo de impacto	Corto plazo (efectos inmediatos).	Mediano a largo plazo (requiere implementación y maduración).
Tecnología requerida	Baja a media complejidad.	Media a alta complejidad (infraestructura, planificación, TICs, políticas).
Dependencia del comportamiento humano	Alta (requiere acción consciente del usuario).	Variable; puede inducir cambios mediante incentivos o diseño estructural.
Ejemplo comparativo	Reducir el uso del aire acondicionado mediante ventilación natural.	Diseñar viviendas bioclimáticas que minimicen la necesidad de climatización.

8.4.2 AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

En el contexto de la transición energética en acto, el aumento de la eficiencia adquiere un papel central, no solo como herramienta para reducir el consumo total de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también como mecanismo fundamental para optimizar el uso de infraestructuras existentes y facilitar la integración de fuentes renovables discontinuas (American Council for an Energy-Efficient Economy, 2020) (Fig. 8-16)¹⁸³.

A diferencia de las estrategias centradas exclusivamente en la sustitución de fuentes fósiles por renovables, el incremento de la eficiencia energética permite reducir la intensidad energética de la economía, entendida como **la cantidad de energía necesaria para generar una unidad de producto interno bruto (PIB)**. En otras palabras, mejora la relación entre actividad económica y consumo energético, lo que posibilita mantener o incluso aumentar el nivel de desarrollo

¹⁸³ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16068082>

económico sin que ello implique un crecimiento proporcional del uso de energía. Esta capacidad de “desacoplar” el crecimiento económico del consumo energético es esencial para transitar hacia un modelo de desarrollo sostenible, en el que se preserven los recursos y se reduzcan las emisiones, sin comprometer el bienestar ni la productividad

Esta mejora en la eficiencia no debe entenderse únicamente como una reducción del consumo final, sino también como una optimización integral de la cadena de conversión, transporte, almacenamiento y uso de la energía. En consecuencia, el desarrollo de tecnologías capaces de flexibilizar la demanda, almacenar excedentes de energía y gestionar de manera inteligente la distribución, como las centrales hidroeléctricas de bombeo, se convierte en un componente estratégico para lograr una transición energética técnicamente viable, económicamente eficiente y ambientalmente sostenible.

8.4.2.1 Métodos para aumentar la eficiencia energética

El incremento de la eficiencia energética puede abordarse desde múltiples escalas y sectores mediante estrategias tecnológicas, operativas y de gestión. Entre los métodos más relevantes se encuentran:

- Modernización de equipos y procesos industriales:** La sustitución de tecnologías obsoletas por sistemas de alta eficiencia, como motores eléctricos con control de velocidad variable, intercambiadores de calor optimizados y procesos de recuperación de energía residual, permite reducir significativamente el consumo específico de energía en sectores intensivos.
- Edificación sostenible y rehabilitación térmica:** La mejora del aislamiento térmico, el uso de ventanas de baja emisividad, la integración de sistemas pasivos de climatización y la adopción de iluminación eficiente (por ejemplo, LED) contribuyen a disminuir la demanda energética en el sector residencial y terciario (Fig. 8-17)¹⁸⁴.
- Gestión inteligente de la demanda de energía eléctrica:** La electrificación de usos finales tradicionalmente dominados por combustibles fósiles (como el transporte y la calefacción) combinada con redes inteligentes (*smart grids*), medidores avanzados y sistemas de gestión de la demanda, permite optimizar el uso de la energía y reducir las pérdidas asociadas.
- Mejora en la eficiencia de conversión y almacenamiento:** La adopción de tecnologías de generación con mayores coeficientes de rendimiento (por ejemplo, ciclos combinados o cogeneración) y el desarrollo de sistemas de almacenamiento eficientes, como las baterías de flujo o las centrales hidroeléctricas de bombeo (Fig. 8-18), permite atenuar las variaciones de carga y reducir la necesidad de generación de reserva.



Fig. 8-16 Semáforo con múltiples leds (Autor: Syafiqshahalam, 2009. Lic. Dominio público).

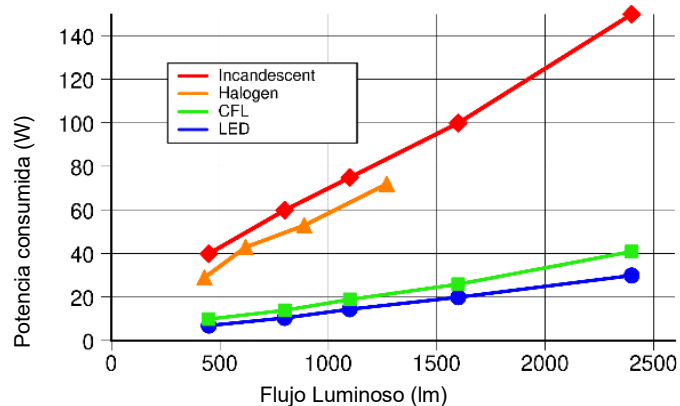


Fig. 8-17 Consumo de electricidad por tipo de lámpara (Autor: D. Esham “bdesham”, 2007. Lic. Dominio público).

¹⁸⁴ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3282102>. Datos tomados de (Wikipedia, 2007).

- **Digitalización y control avanzado:** La aplicación de herramientas digitales, algoritmos de optimización y sistemas de control en tiempo real permite un uso más preciso de la energía en infraestructuras complejas, desde fábricas hasta sistemas urbanos, facilitando la detección de ineficiencias y el ajuste dinámico de los flujos energéticos.

8.4.2.2 Ejemplo: Central hidroeléctrica de acumulación, también conocida como central de bombeo.

Es una instalación que genera energía eléctrica a partir de la energía potencial del agua almacenada en un embalse superior. El agua se bombea desde un embalse inferior hacia el superior durante periodos de baja demanda, y luego se libera para generar electricidad durante periodos de alta demanda (U.S. Department of Energy, 2021).

Funcionamiento detallado:

- **Acumulación:**
Durante periodos de baja demanda o exceso de generación eléctrica, se utiliza energía para bombear agua de un embalse inferior a un embalse superior.
- **Generación:**
Cuando se necesita energía, el agua del embalse superior se libera y fluye a través de turbinas, generando electricidad.
- **Almacenamiento:**
La energía se almacena como energía potencial gravitacional del agua elevada, y luego se convierte en energía cinética para generar electricidad cuando sea necesario.
- **Beneficios:**
 - Flexibilidad:
Permite equilibrar la oferta y la demanda de energía, especialmente útil con fuentes de energía intermitentes como la solar o la eólica.
 - Almacenamiento de energía:
Facilita el almacenamiento de energía a gran escala, lo que contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico.
 - Energía renovable:
Utiliza un recurso renovable (agua) para generar electricidad.
 - Centrales reversibles:
Algunas centrales de acumulación son reversibles, lo que significa que pueden funcionar tanto en modo de generación como en modo de bombeo, invirtiendo la rotación de la turbina.

En resumen: Las centrales hidroeléctricas de acumulación son una forma eficiente y flexible de almacenar y generar energía eléctrica, utilizando la energía potencial del agua almacenada en embalses. Una central hidroeléctrica de bombeo no ahorra energía, pero aumenta la eficiencia económica, operativa y ambiental del sistema eléctrico, al funcionar como un sistema de almacenamiento gestionable. Es una forma de "mover energía en el tiempo" desde periodos de baja demanda a periodos de alta demanda, y eso reduce la necesidad de generar electricidad con plantas menos eficientes o más contaminantes.

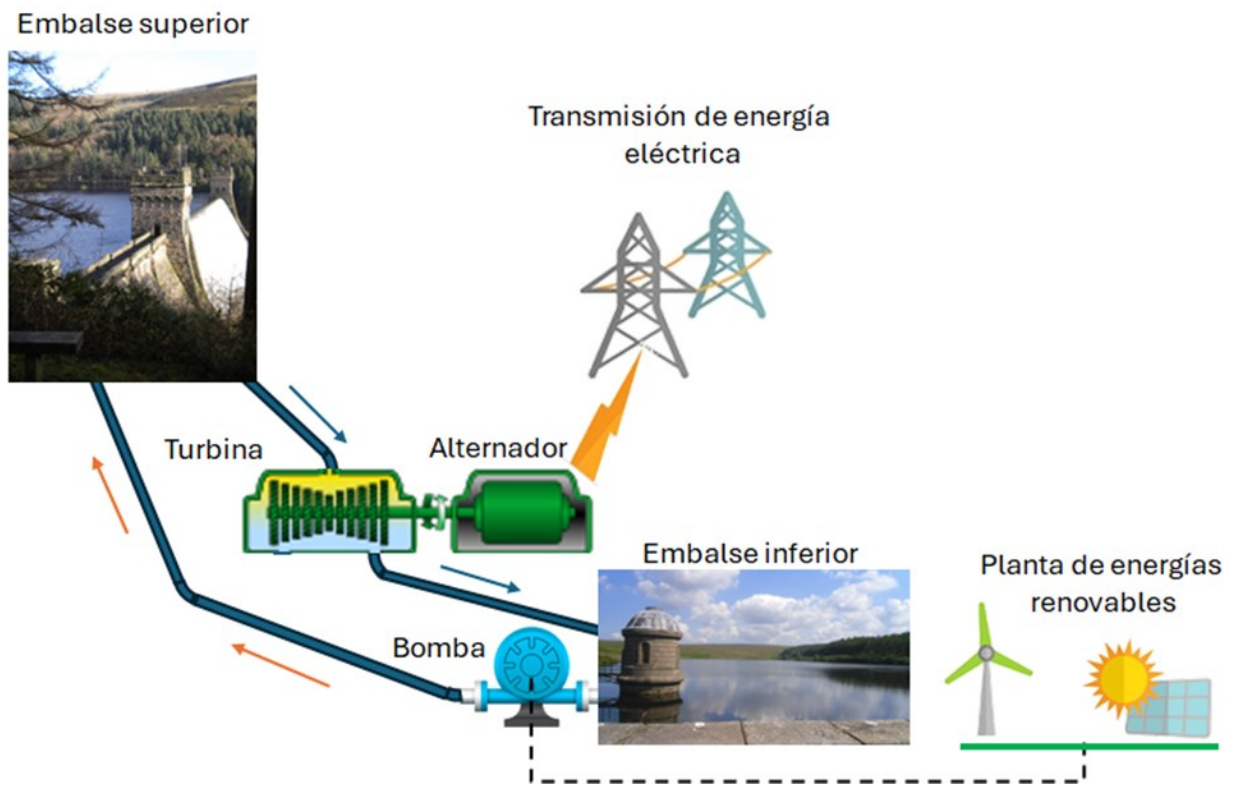


Fig. 8-18 Central hidroeléctrica de bombeo (Fuente: elaboración propia, 2025).



185

¹⁸⁵ Imagen de cierre capítulo: "Parque eólico en un campo de colza, Sandesneben (Alemania)" (Autor: Jürgen (Guerito), 2005. Lic. *Creative Commons Attribution 2.0 Generic*).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alternative_Energies.jpg

Tecnologías energéticas emergentes

186

9



La transición energética, entendida como el proceso de sustitución progresiva de fuentes de energía fósil por fuentes de energía limpia, requiere no solo el despliegue a gran escala de tecnologías renovables ya maduras (como la solar fotovoltaica y la eólica), sino también el impulso de soluciones tecnológicas emergentes que aborden las limitaciones actuales de intermitencia, almacenamiento, estabilidad y uso final.

Los sectores más promisorios para la sustitución de las energías fósiles son el transporte, uno de los más avanzados, con una rápida adopción de vehículos eléctricos (EV) y mejoras en la infraestructura de carga. **El transporte público** electrificado y las soluciones de micromovilidad urbana también contribuyen a una reducción significativa de las emisiones urbanas. **La industria**, especialmente en procesos térmicos de alta temperatura como la producción de acero, cemento o productos químicos, requiere vectores energéticos de alta densidad como el hidrógeno o calor nuclear. Por último, **el sector residencial y comercial** puede ser descarbonizado mediante la electrificación de la calefacción (bombas de calor) y la integración de microrredes y sistemas de almacenamiento distribuido (International Energy Agency, 2022).

El éxito de la transición energética dependerá de la combinación sinérgica de estas tecnologías emergentes con políticas públicas adecuadas, financiamiento innovador, marcos regulatorios dinámicos y la aceptación social de los cambios estructurales en el sistema energético.

Aunque las energías renovables han sido tratadas en capítulos anteriores, es esencial complementar esa discusión con un examen de algunas de las tecnologías de avanzada (hoy aun la etapa de investigación y desarrollo) para poder evaluar el potencial de descarbonización en el mediano y largo plazo.

9.1 REACTORES NUCLEARES MODULARES

Entre las tecnologías emergentes que se perfilan como facilitadoras de la transición energética destacan los mini reactores nucleares modulares (SMR, por su sigla en inglés: *Small Modular Reactors*). Estas unidades compactas, con potencias típicas entre 10 y 300 MWe (megavatios eléctricos), permiten una instalación más rápida, segura y flexible en comparación con

¹⁸⁶ Imagen del título: "Hyperloop Transportation Technologies - Proyecto de los Grandes Lagos" (Autor: Neuhausengroup, 2014. Lic. *Creative Commons Attribution 4.0 International*).
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Na19-Apr-Hyperloop.jpg>

las centrales nucleares tradicionales. Los SMR ofrecen una fuente de energía base libre de carbono y son especialmente adecuados para regiones remotas o para apoyar procesos industriales intensivos en energía.

Los SMR funcionan con el mismo principio que los reactores nucleares convencionales: la fisión de núcleos de uranio (o, en algunos diseños, del torio) libera una gran cantidad de calor, el cual se utiliza para generar vapor de agua. Este vapor acciona turbinas que producen electricidad. La diferencia fundamental radica en la escala y el diseño modular: los SMR son prefabricados en fábricas y ensamblados *in situ*, lo que reduce los costos, el tiempo de instalación y los riesgos de construcción.

Los SMR incorporan mecanismos de seguridad pasivos que no requieren intervención humana ni energía externa para activarse. Por ejemplo, muchos modelos utilizan convección natural para enfriar el reactor en caso de emergencia, eliminando la necesidad de bombas eléctricas. Además, al tener menos material fisible y operar a presiones y temperaturas más bajas, los SMR minimizan el riesgo de fusión del núcleo o liberación de material radiactivo.

Tradicionalmente, la mayoría de los reactores nucleares (incluidos muchos diseños de SMR) utilizaban agua ligera como refrigerante y moderador, lo que implica una dependencia crítica de fuentes hídricas para operar con seguridad y eficiencia. En algunos diseños de SMR avanzados de IV generación, como los reactores refrigerados por gas (ej. helio) o por sales fundidas, se ha eliminado el uso de agua como refrigerante, lo cual tiene un impacto clave en la seguridad operativa y en la integridad de los sistemas, particularmente en lo que respecta a la eliminación del riesgo de fugas de agua. Lo anterior tiene varias implicaciones importantes:

- **Mayor flexibilidad geográfica:** al no depender de grandes volúmenes de agua, estos SMR pueden instalarse en regiones áridas, alejadas de ríos o mares, o incluso en zonas remotas donde otras fuentes de energía serían inviables.
- **Mayor resiliencia frente al cambio climático:** con la creciente escasez hídrica y el aumento de las temperaturas, los reactores dependientes del agua enfrentan desafíos operativos, como restricciones de caudal o eficiencia térmica reducida. Los SMR sin agua evitan estas limitaciones.
- **Seguridad intrínseca mejorada:** varios de estos diseños incluyen características de seguridad pasiva, como la convección natural o el calor latente en las sales fundidas, que permiten mantener el núcleo en condiciones seguras incluso sin intervención activa ni energía externa.
- **Reducción de impacto ambiental:** al prescindir de torres de enfriamiento o de vertidos térmicos al medio acuático, se disminuyen los efectos ecológicos asociados al uso intensivo de agua.
- **Reducción del riesgo de corrosión y degradación de componentes:** en los reactores tradicionales, el agua (especialmente a alta temperatura y presión) puede inducir procesos de corrosión en tuberías, intercambiadores de calor y sistemas de contención, lo que incrementa los riesgos de fugas a lo largo del tiempo. En diseños que usan gas (como helio) o sales fundidas, estos mecanismos de corrosión asociados al agua se reducen o eliminan.
- **Mitigación de eventos de pérdida de refrigerante (LOCA):** uno de los accidentes más temidos en reactores nucleares convencionales es el LOCA (*Loss of Coolant Accident*), en el cual una fuga repentina compromete la capacidad del sistema para extraer calor del núcleo. En reactores que no utilizan agua como refrigerante, este escenario no existe en los mismos términos, lo que simplifica el diseño de seguridad y disminuye la necesidad de sistemas de emergencia complejos.
- **Menor complejidad en el sistema de contención:** sin agua presurizada que pueda escapar en forma de vapor, los requisitos para la contención de fugas radiactivas se

reducen. Esto permite diseños más compactos, con menos sistemas activos y, en algunos casos, contenedores de presión más simples o incluso innecesarios.

- **Reducción del riesgo de hidrógeno:** al producirse un accidente severo en un reactor con agua como refrigerante (como en Fukushima), la radiólisis del agua (descomposición de las moléculas H₂O bajo la acción de la radiación) puede generar hidrógeno, lo que implica riesgo de explosión. La ausencia de agua elimina este vector de riesgo.
- **Simplificación del mantenimiento:** sin sistemas de agua, bombas de alta presión o generadores de vapor, hay menos componentes susceptibles a fugas, lo que facilita el mantenimiento, reduce los costos de operación y mejora la confiabilidad a largo plazo.

En resumen, eliminar el agua como refrigerante del núcleo no solo ofrece ventajas geográficas y ambientales, sino que reduce de forma significativa los riesgos asociados a fugas, corrosión y accidentes por pérdida de refrigerante, contribuyendo a un paradigma de seguridad más robusto y pasivo en la energía nuclear (*World Nuclear Association, 2024*) (*European Commission, 2024*) (*SMR Instrumentation, 2025*).

9.1.1 TIPOS DE SMR

Existen varios tipos de mini reactores nucleares avanzados diseñados para mejorar la seguridad y eficiencia en la generación de energía. Aquí se mencionan algunos de los más destacados:

- **Reactores de Agua a Presión (PWR)**
 - Son los más comunes en el mundo.
 - Utilizan agua como refrigerante y moderador.
 - Funcionan bajo alta presión para evitar la ebullición del agua dentro del reactor.
- **Reactores de Agua en Ebullición (BWR)**
 - Permiten que el agua hierva dentro del núcleo del reactor.
 - Generan vapor directamente para mover las turbinas.
 - Son más eficientes en la conversión de calor en electricidad.
- **Reactores de Lecho de Esferas (HTGR)**
 - Utilizan helio como refrigerante y grafito como moderador.
 - Operan a temperaturas más altas, lo que mejora la eficiencia.
 - Son intrínsecamente seguros, ya que el diseño evita el sobrecalentamiento.
- **Reactores Rápidos Enfriados por Sodio (SFR)**
 - Emplean sodio líquido como refrigerante en lugar de agua.
 - Pueden utilizar una gama más amplia de combustibles nucleares.
 - Reducen la producción de residuos radiactivos.
- **Reactores de Sales Fundidas (MSR)**
 - Usan sales fundidas como refrigerante y, en un tipo específico de reactor, el propio combustible nuclear (uranio, torio o plutonio) está disuelto en una mezcla de sales fundidas.

- Son altamente seguros, ya que el combustible está en estado líquido y no puede derretirse.
- Pueden operar a temperaturas más altas, mejorando la eficiencia energética.
- **Reactores de Torio (LFTR)**
 - Utilizan torio en lugar de uranio como combustible.
 - Generan menos residuos radiactivos de larga duración.
 - Son más seguros debido a su diseño de ciclo de combustible líquido.

9.1.1.1 Ejemplo: Reactor nuclear de esferas de grafito (Pebble-Bed Reactor)

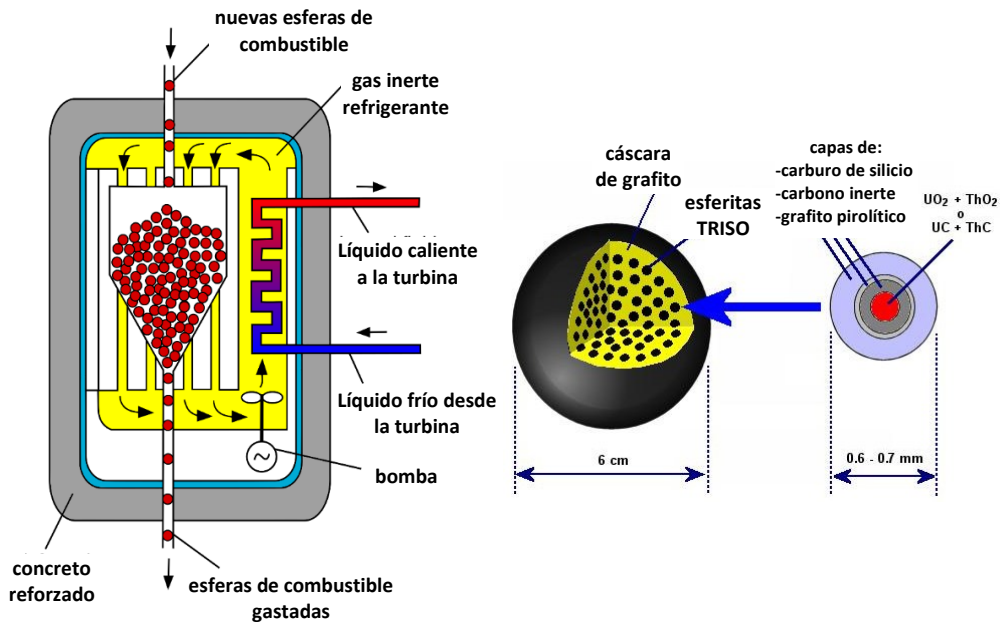


Fig. 9-1 Reactor nuclear de esferas de grafito (*Pebble-Bed Reactor*) (Fuente: Picoterawatt, 2013. Lic. *Creative Commons 1.0* Dominio Público)¹⁸⁷.

Fig. 9-2 Estructura de las esferas de grafito (Fuente: Picoterawatt, 2010. Lic. Dominio Público)¹⁸⁸.

Un reactor nuclear de esferas de grafito es un reactor modular de alta temperatura HTGR, (por sus siglas en inglés: *High Temperature Gas-cooled Reactor*), también conocido como reactor de lecho de esferas (*Pebble-Bed Reactor*). Utiliza como combustible partículas TRISO (*Tristructural Isotropic*), que son esferitas recubiertas de grafito con material fisible en su interior. Este tipo de reactor es refrigerado por un gas inerte. A continuación se describe su estructura y funcionamiento, haciendo referencia a la Fig. 9-1 (Nuclear España, 2021) (IAEA, 2012) (Ingersoll, 2009) (OECD-NEA, 2014).

• Combustible en forma de partículas TRISO

El combustible consiste en esferitas o partículas formadas por un núcleo de isótopos de uranio (principalmente U-235) bajo forma de dióxido de uranio (UO₂) o carburo de uranio (UC) recubierto por múltiples capas protectoras que actúan como contenedores cerámicos individuales, capaces de retener productos de

¹⁸⁷ [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pebble_bed_reactor_scheme_\(English\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pebble_bed_reactor_scheme_(English).svg)

¹⁸⁸ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8905605>

fisión incluso en caso de fallo. Este diseño se conoce como TRISO, por las tres capas principales de protección de las partículas, constituidas por carburo de silicio, carbono inerte y grafito pirolítico (Fig. 9-2). Estas partículas miden aproximadamente 0,9 mm de diámetro. El uranio-235 o U-TRISO contenido en el núcleo es radiactivo; sin embargo, no decae espontáneamente a una velocidad suficiente como para liberar energía útil y generar calor apreciable sin que sea sometido a irradiación neutrónica. La irradiación neutrónica activa es el proceso mediante el cual un material (por ejemplo, el uranio-235) es expuesto a un flujo de neutrones térmicos¹⁸⁹ dentro del núcleo del reactor. Solo la absorción de un neutrón térmico provoca la fisión inmediata del núcleo del átomo U-235, liberando una gran cantidad de energía. Es este bombardeo neutrónico el que desencadena la fisión nuclear y, por tanto, la producción de calor.

- **Moderación y reflexión con grafito**

El grafito no solo forma parte del material estructural de las partículas TRISO, sino que también recubre en forma de cáscara esférica (*pebble*), de unos 6 cm de diámetros, el material donde están dispersas estas partículas, actuando como moderador (Fig. 9-2). Su función es reducir la velocidad de los neutrones para mantener una fisión sostenida y controlada.

- **Operación**

El sistema está concebido para ser cargado y descargado de forma continua, mientras está en operación. No es necesario apagar el reactor para cargar las esferas. Las esferas se introducen desde la parte superior, atraviesan lentamente el lecho, y son sometidas a irradiación; luego se extraen por la parte inferior tras haber completado su ciclo de irradiación (Fig. 9-1). Un sistema automatizado decide si una esfera debe ser reinsertada para un uso adicional o retirada de forma definitiva (combustible agotado). Este mecanismo reduce la necesidad de paradas programadas, aumentando la eficiencia operativa.

- **4. Refrigeración con gas inerte**

El reactor es refrigerado mediante helio, un gas inerte que no se activa radiactivamente y tiene buena capacidad de transferencia de calor. El helio circula a alta presión a través del lecho de esferas, absorbiendo el calor generado por la fisión.

- **5. Ciclo termodinámico**

El gas caliente se dirige luego a un intercambiador de calor o directamente a una turbina de gas¹⁹⁰, generando electricidad. Las temperaturas de operación pueden alcanzar los 750 °C o más, lo que mejora significativamente la eficiencia térmica del sistema (más del 40 %).

- **Seguridad intrínseca**

La principal ventaja de este tipo de reactor es su seguridad pasiva. Las esferas TRISO son extremadamente estables y pueden soportar temperaturas superiores a 1600 °C sin liberación significativa de radiactividad. El diseño permite que, en caso de pérdida de refrigeración, el calor se disipe por conducción natural sin

¹⁸⁹ Neutrones que después de múltiples colisiones con núcleos moderadores, han perdido energía cinética hasta llegar a un nivel de energía comparable con la de agitación térmica del medio. En algunos núcleos pesados, como el U-235, puede inducirse un estado sobreexcitado incluso con la energía mínima aportada por un neutrón térmico.

¹⁹⁰ Turbina de ciclo Brayton: el gas calentado por el núcleo acciona directamente la turbina para generar electricidad

riesgo de fusión del núcleo. El helio no se condensa ni reacciona químicamente con los materiales del reactor.

- **Disposición de los *pebbles***

Las esferas usadas contienen productos de fisión radiactivos, pero están protegidas por:

- El recubrimiento TRISO, que retiene los radionúclidos con alta fiabilidad.
- La cáscara de grafito de los *pebbles*, que actúa como una barrera adicional y como moderador.

Una vez fuera del reactor, las esferas deben almacenarse en instalaciones blindadas, pero no presentan problemas de criticidad, porque:

- Están físicamente separadas.
- Ya no contienen suficiente material fisionable activo como para sostener una reacción en cadena.

- **Aplicaciones y perspectivas**

Este tipo de reactor es considerado uno de los más prometedores entre los diseños de reactores avanzados de IV generación, especialmente por su potencial para:

- Producir hidrógeno por craqueo térmico.
- Generar calor industrial de alta calidad para usos no eléctricos.
- Alcanzar una alta resiliencia frente a accidentes severos.

9.2 BATERÍAS DE ESTADO SÓLIDO

Otra innovación clave son las baterías de estado sólido, que representan una evolución frente a la tecnología de iones de litio convencional. A diferencia de estas, las baterías de estado sólido utilizan electrolitos sólidos (típicamente un óxido, un sulfuro o un polímero conductor iónico) en lugar de líquidos, lo cual mejora significativamente la seguridad, la densidad energética, el tiempo de carga y la durabilidad. Su desarrollo es crucial para mejorar el almacenamiento permanente de energía renovable y acelerar la electrificación del transporte. Sin embargo, todavía están en fase de desarrollo y actualmente no están siendo comercializadas en volúmenes significativos (López de Benito, 2024).

9.2.1 DISEÑOS DE ÚLTIMA GENERACIÓN

En los diseños de última generación se ha eliminado el ánodo físico preformado en el sentido convencional (como ocurre con el grafito en las celdas tradicionales). Este tipo de arquitectura de las baterías se denomina “sin ánodo” (*anodeless design*) o también “de ánodo por recubrimiento” (*plating anode*). Dada su relevancia, a continuación profundizaremos en este concepto. (Manthiram, Yu, y Wang, 2017)

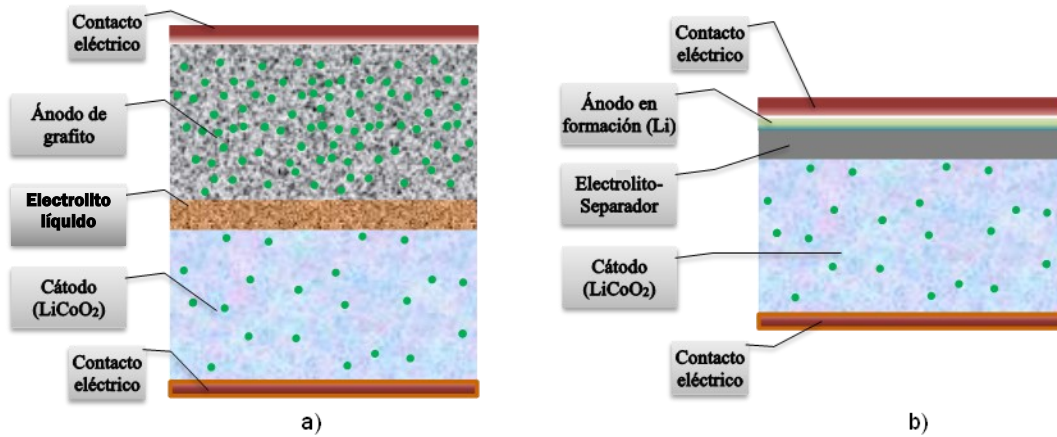


Fig. 9-3 Baterías recargables de iones de litio: a) convencional b) de electrolito sólido (Fuente: elaboración propia).

Tabla 9-1 Materiales y arquitecturas en baterías Li-ion *anodeless* de estado sólido (Ma, et al., 2023).

Componente	Materiales típicos	Descripción
Cátodo	- LCO: LiCoO ₂ - NMC: Li(Ni _x Mn _y Co _z)O ₂ - LFP: LiFePO ₄ - LNMO: LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄	Alta densidad energética; equilibrio entre capacidad, seguridad y costo; opciones seguras y de alto voltaje.
Electrolito sólido	- Sulfuro: Li ₁₀ GeP ₂ S ₁₂ (LGPS), Li ₇ P ₃ S ₁₁ , Li ₆ PS ₅ Cl (argyrodite) - Óxido: LLZO (Li ₇ La ₃ Zr ₂ O ₁₂), LIPON (Li ₃ PO ₄ dopado con N) - Polímero: PEO-LiTFSI	Alta conductividad iónica; diferentes niveles de estabilidad química y mecánica.
Colector de corriente	- Cobre (Cu) - Níquel (Ni) - Aluminio (Al)	Materiales conductores sobre los que se deposita el litio (en el ánodo) o el material activo (en el cátodo).
Interfase (<i>interlayer</i>)	- Li ₃ PO ₄ - LiNbO ₃ - Al ₂ O ₃ - Ta ₂ O ₅ - LiPON amorfo	Capas delgadas aplicadas entre el litio y el electrolito sólido para mejorar la estabilidad química y mecánica.

Existen diversas razones de orden tecnológico, de seguridad y de estrategia, que justifican las crecientes inversiones en investigación y desarrollo de la tecnología *anodeless* y de electrolitos de estado sólido en baterías recargables:

- Mayor **densidad de energía**. El uso de litio metálico como ánodo, en lugar de grafito, permite aumentar significativamente la densidad energética tanto gravimétrica como volumétrica. Esto es posible porque los electrolitos sólidos son más estables en contacto con el litio metálico, mientras que los electrolitos líquidos convencionales tienden a reaccionar con él o a favorecer la formación de dendritas. El resultado son baterías más pequeñas y ligeras para una misma capacidad, lo cual es particularmente ventajoso en vehículos eléctricos (EV) y en aplicaciones aeroespaciales.

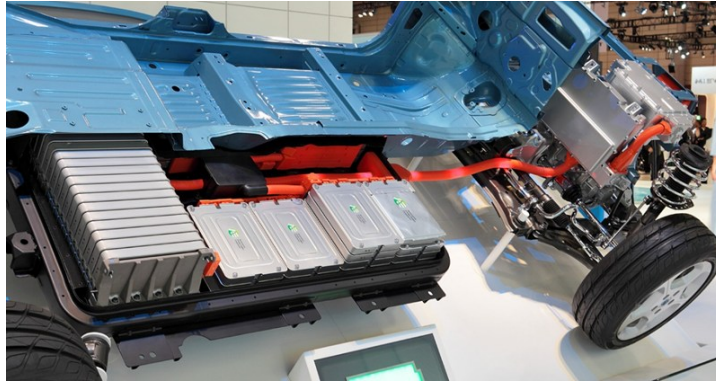


Fig. 9-4 Vista en corte del Nissan Leaf mostrando parte de la batería (Fuente: Tennen-Gas, 2009. Lic. *Creative Commons-by-sa-3.0*)¹⁹¹.

- **Mayor vida útil (mayor número de ciclos).** Los electrolitos sólidos presentan, en principio, una mayor estabilidad química y menor volatilidad, lo que reduce la degradación de los componentes internos. Al minimizar reacciones secundarias, disolución de electrodos y formación de productos parásitos, es posible prolongar la vida útil del sistema. Además, permiten un proceso de depósito y disolución (*plating/stripping*) del litio metálico más controlado, lo que reduce significativamente el riesgo de formación de dendritas.
- **Mayor voltaje operativo y compatibilidad con cátodos de alto voltaje.** Algunos electrolitos sólidos, como los óxidos cerámicos (por ejemplo, LLZO, LATP) y los sulfuros (como LGPS), presentan ventanas de estabilidad electroquímica más amplias que los electrolitos líquidos. Esto permite utilizar cátodos de alto voltaje (mayores a 4,2 V) sin que se produzca descomposición del electrolito, lo que contribuye a incrementar la densidad de energía del sistema.
- **Mejor comportamiento térmico y mayor tolerancia a altas temperaturas.** A diferencia de los electrolitos compuestos por líquidos orgánicos, que presentan bajo punto de ebullición y alto riesgo de ignición, los electrolitos sólidos no son inflamables y pueden operar con mayor seguridad a temperaturas elevadas (dependiendo del material empleado). Esto se traduce en una mayor estabilidad térmica y menor riesgo de eventos catastróficos.
- **Integración estructural y diseño compacto.** El uso de electrolitos sólidos permite configuraciones de tipo monolítico o multicapa, en las que el electrolito puede desempeñar simultáneamente funciones mecánicas, eliminando así la necesidad de separadores convencionales. Esta integración favorece la miniaturización y posibilita el diseño de baterías más delgadas o con geometrías no tradicionales, lo cual es particularmente útil en dispositivos portátiles o integrados.
- **Menor autodescarga y ausencia de evaporación.** Dado que los electrolitos sólidos no contienen disolventes volátiles, presentan menor propensión a la evaporación o a fugas, y generalmente exhiben tasas de autodescarga más bajas que sus contrapartes líquidas.
- **Reducción del uso de materiales tóxicos e inflamables y menor riesgo de explosión.** Muchos electrolitos líquidos actuales emplean disolventes orgánicos tóxicos (como EC, DEC, DMC) y sales como el LiPF_6 , que pueden descomponerse en condiciones adversas, generando compuestos corrosivos e inflamables. Estos disolventes, al ser volátiles y tener bajo punto de ignición, presentan un riesgo

¹⁹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery#/media/File:Nissan_Leaf_012.JPG

significativo de combustión o explosión en caso de cortocircuito, sobrecarga o daño físico de la celda. En contraste, los electrolitos sólidos carecen de componentes líquidos inflamables y exhiben una alta estabilidad térmica y electroquímica. Su naturaleza no volátil impide la formación de mezclas explosivas con el oxígeno del aire, incluso en situaciones de abuso térmico o mecánico. Esto elimina o reduce drásticamente el riesgo de ignición espontánea, fuga de gases o explosión, lo que convierte a las baterías de estado sólido en una alternativa mucho más segura tanto en operación normal como en condiciones extremas.

Analizaremos ahora el principio de funcionamiento de una batería de iones de litio sin ánodo (Zheng et al., 2022)¹⁹², describiendo los procesos que ocurren durante la carga y la descarga.

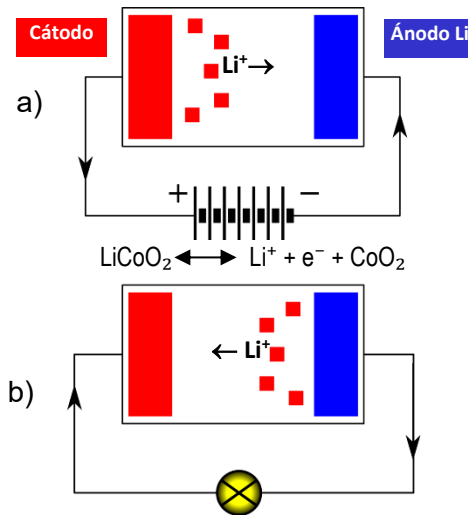
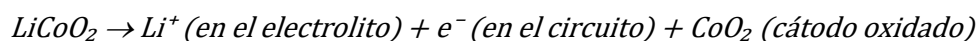


Fig. 9-5 a) carga y b) descarga de una batería de iones de litio con cátodo de $LiCoO_2$ (se indica la dirección de los electrones, contraria a la de la convención para la dirección de la corriente) (Autor: Sergey WereWolf, 2016. Lic. Creative Commons).

- **Carga de una batería de iones de litio sin ánodo.** En una celda de iones de litio, la energía eléctrica suministrada por el cargador obliga a los iones de litio (Li^+) a migrar desde el cátodo hacia el ánodo, atravesando el electrolito, mientras que los electrones, al no poder atravesar el electrolito, se desplazan a través del circuito externo, también desde el cátodo hacia el ánodo, en sentido opuesto al de la descarga natural de la celda (Fig. 9-5). Veamos más en detalle qué sucede en el cátodo y en el ánodo.
 - **En el cátodo:** El cargador de baterías establece una diferencia de potencial entre el cátodo (positivo) y el ánodo (negativo), lo que incrementa el potencial electroquímico del cátodo con respecto al ánodo. Como consecuencia, el retículo cristalino del cátodo, constituido por materiales como, por ejemplo, óxido de litio cobalto ($LiCoO_2$), se desestabiliza, permitiendo que los iones de litio se desliguen de la estructura cristalina y migren al electrolito. Al liberarse un ion de litio (Li^+), también queda libre un electrón (e^-) que es transferido hacia el ánodo a través del circuito cargador externo a la celda. Este proceso puede representarse mediante la siguiente reacción global:



¹⁹² Vea el video (15) en la sección "Animaciones y videos"

Lo que se produce en el cátodo es una reacción electroquímica redox (óxido-reducción) que se describe en forma resumida a continuación:

- El ion Li^+ se disocia de su sitio cristalino en la estructura del LiCoO_2 .
 - El átomo de cobalto (Co) permanece en el material catódico, pero experimenta un ligero cambio en su estado de oxidación¹⁹³ para compensar eléctricamente la pérdida del ion Li^+ .
 - El retículo de CoO_2 permanece estructuralmente estable, lo que permite posteriormente reinsertar el litio durante la descarga. Sin embargo, Si se extrae una cantidad excesiva de litio durante la carga, la estructura del cátodo puede sufrir daños irreversibles, como el colapso del retículo cristalino. Por esta razón, en aplicaciones prácticas se limita la “profundidad de carga” para preservar la integridad estructural del material catódico.
- **En el ánodo:** En la arquitectura *anodeless* los iones de litio, una vez atravesado el electrolito, se recombinan con los electrones provenientes del circuito externo en la superficie interna del colector de corriente (o contacto eléctrico), usualmente de cobre (Cu), formando progresivamente una capa de litio metálico (Li) que se deposita y adhiere a esta superficie. Este proceso se conoce como recubrimiento de litio (*lithium plating*). De esta manera va constituyéndose un ánodo de litio metálico en la interfaz entre el colector de corriente y el electrolito sólido. Esta interfaz es crítica, ya que debe ser electroquímica y mecánicamente estable. Por esta razón muchas veces la superficie interna del colector se optimiza con capas de películas delgadas de carbono amorfo, óxidos, o metales como Ag, Au. Estos materiales facilitan una nucleación homogénea del litio metálico, evitan la formación de dendritas (que pueden perforar el electrolito), disminuyen la resistencia interfacial y el despegue del litio en ciclos posteriores. (Fig. 9-6)¹⁹⁴.

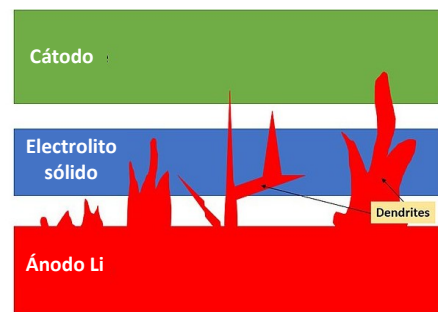


Fig. 9-6 Formación de dendritas en el ánodo en formación (Autor: Spk9264, 2019. Licencia: *Creative Commons BY-SA 4.0*).

En síntesis, durante la carga el cátodo se oxida (cede electrones) y el ánodo se reduce (los recibe), mientras el potencial electroquímico del sistema aumenta progresivamente hasta alcanzar el estado de carga completa.

Descarga de una batería de iones de litio sin ánodo. El litio metálico que se ha depositado durante la carga en la superficie del colector de corriente actúa como ánodo activo en el ciclo de descarga. El proceso de descarga es impulsado por una diferencia de potencial electroquímico entre el ánodo y el cátodo, determinada por los respectivos potenciales químicos (μ_e) de los electrones más externos que participan de los procesos de transferencia de carga en la reacción redox¹⁹⁵. Aunque ambos electrodos son eléctricamente neutros en conjunto, sus niveles de Fermi¹⁹⁶ son distintos: el litio metálico en

¹⁹³ $\text{LiCo}^{3+}\text{O}_2 \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^- + \text{Co}^{4+}\text{O}_2$

¹⁹⁴ La figura se obtuvo de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=77283118>

¹⁹⁵ El litio metálico (Li) es un conductor y los electrones de valencia forman una banda de conducción parcialmente llena. El potencial químico μ_e corresponde al nivel de energía de los electrones en la banda de conducción. El óxido de cobalto (CoO_2) es un material de tipo semiconductor, donde los electrones implicados están principalmente en los orbitales d del cobalto.

¹⁹⁶ El nivel de Fermi es la energía máxima que pueden tener los electrones en un material en equilibrio y a la temperatura del cero absoluto (0 K) (*Science Facts*, 2025).

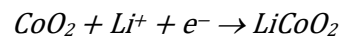
el ánodo posee electrones con un nivel de energía más alto que el del cátodo parcialmente privado de litio, lo que genera una fuerza electromotriz que impulsa el flujo de electrones y la migración iónica. El sistema evoluciona en forma espontánea desde un estado de alta energía (batería cargada) hacia uno de menor energía (batería descargada), liberando energía útil en forma de corriente eléctrica.

- **En el ánodo:** Durante la descarga, el litio metálico se oxida en el ánodo, liberando un electrón (e^-) y generando un ion Li^+ :



El electrón fluye de manera espontánea a través del circuito externo hacia el cátodo, proporcionando energía útil al dispositivo conectado, mientras que, simultáneamente, el ion Li^+ migra a través del electrolito sólido hasta llegar al material catódico.

- **En el cátodo,** el ion Li^+ se reincorpora al retículo cristalino del óxido metálico (por ejemplo, CoO_2), completando el proceso de reducción:



Este mecanismo implica un cambio reversible en el estado de oxidación del metal de transición (por ejemplo, de Co^{4+} a Co^{3+}), lo cual permite almacenar y liberar energía electroquímicamente de forma controlada. El equilibrio de carga se mantiene en todo momento gracias al movimiento concertado de iones en el electrolito sólido y de electrones en el circuito externo.

Como conclusión general para este ejemplo relativo al funcionamiento de las baterías de litio-ion de estado sólido sin ánodo, podemos afirmar que, si el sistema está bien diseñado, el proceso de recubrimiento (carga) y desprendimiento (descarga) del litio, en inglés *plating/stripping*, puede realizarse de manera reversible, con mínimas pérdidas de material y sin degradación significativa a lo largo de múltiples ciclos.

9.3 EL HIDRÓGENO “VERDE”

El hidrógeno “verde” se obtiene a partir de la descomposición del agua (H_2O) utilizando electricidad proveniente exclusivamente de fuentes renovables, tales como la energía solar fotovoltaica, eólica o hidroeléctrica. A diferencia del hidrógeno gris o azul¹⁹⁷, este proceso no produce emisiones directas de dióxido de carbono (CO_2), por lo que constituye una alternativa limpia y prometedora para la descarbonización de sectores industriales y energéticos.

El hidrógeno “verde” generado puede luego ser almacenado, comprimido, licuado o transformado en vectores energéticos, y utilizado en múltiples aplicaciones: movilidad, industria, generación eléctrica o exportación.

El hidrógeno “verde” se ha posicionado como un vector energético clave para la descarbonización de sectores difíciles de electrificar. Su producción mediante electrólisis alimentada por fuentes renovables, su posibilidad de almacenamiento y su conversión eficiente en electricidad mediante celdas de combustible ofrecen una vía limpia y sostenible para el almacenamiento y uso de energía (*Hydrogen Council, 2023*).

¹⁹⁷ El hidrógeno gris se obtiene principalmente mediante reformado de gas natural con vapor (SMR) o gasificación de carbón, procesos que liberan grandes cantidades de CO_2 . El hidrógeno azul se produce de la misma manera que el hidrógeno gris, pero con la incorporación de captura y almacenamiento o reutilización del CO_2 generado (CCS o CCU).



Fig. 9-7 Sistema de almacenamiento de hidrógeno verde (Fuente: *US Department of Energy*, 2025. Licencia: Dominio Público)¹⁹⁸.

La producción industrial de hidrógeno “verde” puede utilizar varios tipos de sistemas electrolíticos, además de los que describimos en la sección anterior. A continuación, se resumen las principales tecnologías tanto tradicionales como emergentes, sus características y su grado de desarrollo.

Tabla 9-2 Tecnologías de producción de hidrógeno “verde”.

Tecnología	Características principales	Estado tecnológico	Aplicaciones y ventajas
PEM (<i>Proton Exchange Membrane</i>)	Alta eficiencia, rápida respuesta. Emplea una membrana polimérica y metales nobles como Pt o Ir.	Comercial – en expansión	Ideal para integrar con energías renovables intermitentes.
AWE (<i>Alkaline Water Electrolysis</i>)	Utiliza soluciones alcalinas (KOH o NaOH). Tecnología madura, funciona con baja densidad de corriente y es más sensible a las fluctuaciones de potencia	Comercial – ampliamente utilizada	Bajo costo de instalación, especialmente en aplicaciones estables.
SOEC (<i>Solid Oxide Electrolysis Cell</i>)	Opera a alta temperatura (700–900 °C) y aprovecha calor residual. Requiere materiales cerámicos avanzados.	En desarrollo – laboratorio/piloto	Potencialmente la más eficiente en términos energéticos.
Electrólisis fotoasistida	Combina captación de luz y separación del agua mediante fotoelectrodos o fotocatalizadores.	Investigación básica	Promete integración directa con sistemas solares de alta eficiencia.

Además de estas tecnologías, existen otras estrategias aún en fase experimental que podrían revolucionar la eficiencia o viabilidad económica del proceso. Entre ellas se encuentran:

- **Nuevos catalizadores:** El desarrollo de materiales avanzados como óxidos metálicos, fosfórenos o estructuras bidimensionales busca reducir la energía extra necesaria para iniciar las reacciones (sobretensión). También se investigan catalizadores bifuncionales, capaces de facilitar simultáneamente la oxidación y la reducción.
- **Fotocatálisis y fotoelectrólisis:** Utilizan directamente la energía solar, con materiales como TiO₂ dopado, para inducir la ruptura del enlace O–H. Estas técnicas podrían minimizar el uso de electricidad externa, aumentando la eficiencia global.

¹⁹⁸ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>

- **Plasmólisis del agua:** En este enfoque se genera un plasma de baja temperatura para ionizar y disociar las moléculas de agua, sin necesidad de electrodos convencionales. Aunque experimental, presenta un potencial disruptivo.
- **Microondas y campos eléctricos pulsados:** Recientes investigaciones han demostrado que los campos electromagnéticos de alta frecuencia (GHz), en combinación con nanopartículas, pueden acelerar la disociación del agua de forma eficiente.

Estas alternativas, aunque no plenamente desarrolladas, representan una vía hacia tecnologías más sostenibles y con menor dependencia de materiales críticos (*International Energy Agency*, 2022).

9.3.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO “VERDE”: PRINCIPIOS, TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

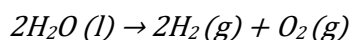
La técnica tradicional utilizada para la producción de hidrógeno “verde” es la electrólisis del agua, una reacción no espontánea que requiere el aporte de energía eléctrica para disociar las moléculas de agua en sus componentes básicos: hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).

La electrólisis se lleva a cabo en una celda electrolítica que contiene dos electrodos (ánodo y cátodo), separados por un electrolito que facilita la conducción iónica. Al aplicar una diferencia de potencial entre ambos electrodos¹⁹⁹, se induce un proceso de oxidación en el ánodo y de reducción en el cátodo.

El material de los electrodos constituye un factor crítico para la eficiencia del proceso electrolítico, ya que debe actuar como catalizador en las reacciones de oxidación y reducción, facilitando la cinética de transferencia electrónica sin sufrir degradación significativa. La función catalítica de los electrodos se describe brevemente a continuación:

- Los electrodos no se consumen en la reacción, pero facilitan que ocurra más rápidamente y con menor energía.
- Actúan como superficies activas donde se llevan a cabo las reacciones de oxidación (en el ánodo) y reducción (en el cátodo).
- Su composición química y estructura influyen directamente en la eficiencia energética y la velocidad de producción de los gases hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).

La mayoría de las tecnologías de electrólisis comparten el mismo principio fundamental de descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, aunque difieren significativamente en los materiales utilizados, la temperatura de operación, la eficiencia energética y el grado de madurez tecnológica. No obstante, la reacción global que describe el proceso es común a todas ellas:



Las diferencias tecnológicas entre los distintos tipos de electrólisis dependen principalmente del tipo de electrolito empleado en la celda, lo que determina tanto la naturaleza de las especies químicas participantes en las reacciones redox como el mecanismo predominante de transporte iónico. Actualmente, existen dos categorías principales de electrolitos empleados: los **ácidos** y los **alcalinos**. Las celdas que operan con electrolito ácido (generalmente una membrana polimérica conductora de protones) se conocen como celdas PEM (*Proton Exchange Membrane*), mientras que aquellas que utilizan un electrolito alcalino, como una disolución de KOH o NaOH, se denominan AWE (*Alkaline Water Electrolysis*) (Tabla 9-3) (*U.S. Department of Energy*, 2022).

¹⁹⁹ Se aplica una fuente externa de voltaje de manera que el ánodo sea el electrodo positivo y el cátodo el negativo. De esta manera los electrones fluyen del cátodo al ánodo.

Tabla 9-3 Características de las celdas de electrolito ácido y básico.

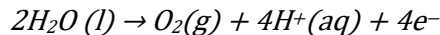
Características	Celdas de electrolito ácido (PEM)	Celdas de electrolito alcalino (AWE)
Ion transportado	H ⁺ (protones)	OH ⁻ (hidroxilos)
Membrana	Membrana polimérica (Nafion, etc.)	Diafragma poroso
Temperatura típica	50–80 °C	60–90 °C
Eficiencia	Alta (con buena respuesta dinámica)	Moderada, menor densidad de corriente
Sensibilidad a impurezas	Alta (requiere agua de elevada pureza)	Más tolerante

Analicemos ahora las diferencias en los elementos y el comportamiento de las celdas PEM y AWE.

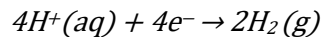
9.3.1.1 Celdas de electrolito ácido (membranas PEM)

En este caso, el electrolito es una membrana de intercambio protónico (*Proton Exchange Membrane*, PEM), que permite exclusivamente el paso de protones (H⁺). El agua se descompone según las siguientes reacciones:

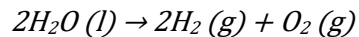
- **Ánodo (oxidación del agua):** En el ánodo (electrodo positivo), las moléculas de agua sufren un proceso de oxidación, cediendo electrones y generando oxígeno gaseoso, junto con protones (H⁺) que permanecen en solución acuosa. Los electrones liberados son conducidos hacia el cátodo a través del circuito externo de alimentación:



- **Cátodo (reducción de protones):** Los protones de hidrógeno generados en el ánodo atraviesan la membrana hacia el cátodo (electrodo negativo), donde se combinan con los electrones provenientes del circuito externo para formar hidrógeno molecular.



- La reacción global se expresa como:



Los materiales utilizados para los electrodos PEM son indicados en la Tabla 9-4.

Tabla 9-4 Materiales de los electrodos en celdas PEM

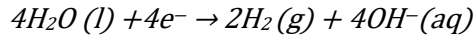
Electrodo	Materiales catalíticos típicos	Propiedades clave
Ánodo	IrO ₂ , RuO ₂ , Pt, óxidos mixtos	Alta resistencia a la corrosión ácida, excelente actividad catalítica
Cátodo	Platino, paladio, oro	Muy alta eficiencia, excelente estabilidad en medio ácido, pero costosos

9.3.1.2 Celdas de electrolito básico (electrólisis alcalina, AWE)

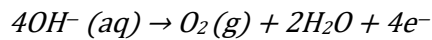
La electrólisis AWE (*Alkaline Water Electrolysis*) se produce en medios con electrolitos alcalinos, como el KOH o el NaOH. Estos electrolizadores, en lugar de tener una membrana de intercambio protónico (como en el caso PEM), utilizan un diafragma poroso que permite el paso de

los iones OH⁻ (que son las especies activas en este tipo de electrólisis) pero impide el contacto directo entre los productos gaseosos (H₂ y O₂). Así que la dinámica de transporte y reacción es la siguiente:

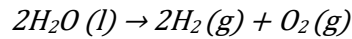
- **Cátodo (reducción del agua):** En esta región las moléculas de agua presentes en la solución alcalina adquieren electrones del circuito eléctrico externo, lo cual produce la división de las moléculas de agua y la liberación de hidrógeno (H₂) en estado gaseoso y de iones de hidroxilo (OH⁻) en solución acuosa.



- **Ánodo (oxidación de iones hidroxilo):** Aquí llegan los iones hidroxilo (OH⁻) que se formaron en el cátodo y viajaron a través del electrolito. Al llegar al ánodo, estos iones ceden electrones (se oxidan) al circuito eléctrico de la fuente de voltaje y se transforman en gas oxígeno (O₂) y moléculas de agua. Los electrones que se liberan aquí vuelven a recorrer el circuito hacia el cátodo, cerrando el ciclo eléctrico.



- **Reacción global:**



La Tabla 9-5 reseña los materiales utilizados en los electrodos AWE.

Tabla 9-5 Materiales de los electrodos en celdas AWE

Electrodo	Materiales catalíticos típicos	Propiedades clave
Ánodo	Níquel, óxidos de níquel (NiO, Ni(OH) ₂), perovskitas	Alta estabilidad en medio básico, buena actividad catalítica
Cátodo	Níquel, Raney níquel, aleaciones Ni-Mo, Ni-Fe	Buena conductividad, bajo costo, alta eficiencia para evolución de H ₂

9.3.1.3 Dificultades para la introducción al mercado

La producción de hidrógeno “verde” aún enfrenta desafíos tecnológicos significativos, especialmente en lo relativo al alto costo de las celdas electrolíticas, derivado principalmente de los materiales empleados en su construcción. A continuación se presentan algunas consideraciones adicionales sobre las tecnologías PEM y AWE, mientras que la Tabla 9-6 ofrece un análisis comparativo de sus características y costos. (*National Renewable Energy Laboratory, 2022*) (Newtrace, 2023)

- **PEM**
 - El uso de metales nobles como platino e iridio encarece significativamente el sistema.
 - La membrana de intercambio de protones (como Nafion®) también es costosa y delicada.
 - Aunque ofrecen alta eficiencia y dimensiones reducidas, su costo inicial elevado limita su adopción masiva.
- **AWE**
 - Utiliza materiales más baratos como níquel y acero, lo que reduce el costo.

- Sin embargo, tiene limitaciones en densidad de corriente y eficiencia comparado con PEM.
- Su diseño más robusto y económico lo hace más viable para producción industrial a gran escala.

Tabla 9-6 Comparación de costos: PEM vs AWE

Características	Celdas PEM	Celdas AWE
Materiales de electrodos	Metales nobles como platino (Pt), iridio (Ir), titanio	Níquel, acero inoxidable, óxidos metálicos
Costo de materiales	Muy alto: hasta el 50% del costo total del sistema	Mucho más bajo: materiales abundantes y económicos
Costo estimado por kW	\$1,300–\$800/kW según escala de producción	Menor: alrededor de \$922/kW en sistemas de 1 MW
Durabilidad en medios agresivos	Alta resistencia en medio ácido, pero costosa	Buena resistencia en medio alcalino, con menor costo
Complejidad de fabricación	Alta: requiere membranas especiales (Nafion®), recubrimientos de titanio	Menor: diseño más simple y materiales más accesibles
Aplicaciones típicas	Espacio limitado, alta eficiencia, producción bajo presión	Producción a gran escala, menor presión, menor costo operativo

9.3.1.4 Perspectivas de mercado para las celdas PEM y AWE

Según estudios del Instituto Fraunhofer y otros análisis técnicos, se espera que los costos de ambas tecnologías se reduzcan significativamente hacia 2030, pero la reducción en PEM depende fuertemente de avances en materiales alternativos y en la optimización de procesos de fabricación (*Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*, 2020).

9.3.2 TRATAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno producido por electrólisis se encuentra en forma gaseosa y debe ser tratado antes de su uso o transporte. En primer lugar, se requiere una etapa de purificación para eliminar impurezas residuales. Posteriormente, el hidrógeno puede ser comprimido (normalmente entre 200 y 700 bar) o licuado a aproximadamente -253 °C, dependiendo de su aplicación final.

Las opciones de almacenamiento incluyen:

- Cilindros metálicos de alta presión para aplicaciones móviles o portátiles.
- Tanques subterráneos o cavernas salinas, adecuados para almacenamiento estacional.
- Materiales absorbentes, como hidruros metálicos o estructuras porosas, que ofrecen soluciones seguras y densas en energía.

9.3.3 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno verde se perfila como un vector energético clave para la transición energética. Sus aplicaciones abarcan sectores muy diversos:

- Movilidad: Alimentación de celdas de combustible en vehículos pesados, trenes, embarcaciones y eventualmente en aviación.

- Industria: Sustitución del carbón en la producción de acero, síntesis de amoníaco y procesos de refinación de petróleo.
- Energía: Almacenamiento de energía renovable a gran escala y generación eléctrica mediante turbinas o pilas reversibles.
- Comercio internacional: Exportación en forma de amoníaco, metanol o hidrógeno licuado.

9.3.4 VENTAJAS DEL HIDRÓGENO VERDE

Entre los principales beneficios del hidrógeno verde se destacan:

- Cero emisiones directas: Su producción y uso no generan dióxido de carbono ni otros contaminantes.
- Capacidad de almacenamiento energético: Especialmente útil para equilibrar la oferta y demanda en redes eléctricas con alta penetración de renovables.
- Versatilidad: Puede sustituir combustibles fósiles en sectores de difícil electrificación.
- Dinamismo tecnológico: Actualmente existen numerosas iniciativas e inversiones significativas en su desarrollo, especialmente en la Unión Europea, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos y Australia.

9.3.5 RETOS COMERCIALES Y TECNOLÓGICOS

A pesar de su potencial, la adopción del hidrógeno verde enfrenta diversas limitaciones:

- Costo elevado: Actualmente, su producción puede ser entre tres y seis veces más cara que la del hidrógeno gris (producido con gas natural). Esto se debe principalmente al precio de la electricidad renovable y al costo de los electrolizadores.
- Escalabilidad industrial: Aún se requiere la expansión de capacidades de fabricación de electrolizadores, así como mejoras en su eficiencia, durabilidad y reducción del uso de materiales escasos o caros como el platino o el iridio.
- Infraestructura: Se necesita construir nuevas redes de distribución o adaptar gasoductos existentes. El transporte es complejo debido a los requisitos de alta presión o bajas temperaturas.
- Seguridad: El hidrógeno es altamente inflamable, presenta baja densidad energética por volumen y requiere sistemas especializados de manejo y monitoreo.
- Marco regulatorio: La ausencia de normativas claras y homogéneas en muchos países dificulta su adopción. Es imprescindible avanzar en la certificación del origen renovable, establecer estándares de calidad y definir incentivos económicos.
- Perspectivas futuras: Se espera que los avances en materiales, el desarrollo de plantas híbridas (por ejemplo, solar + electrólisis), y la creación de vectores químicos de transporte (como el amoníaco verde o los portadores orgánicos líquidos de hidrógeno, LOHC), impulsen la competitividad del hidrógeno verde, apoyados por políticas climáticas, mercados de carbono y acuerdos internacionales.

9.3.6 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE HIDRÓGENO. LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que generan electricidad de forma directa y continua a partir de la combinación controlada de hidrógeno y oxígeno, produciendo como único subproducto agua. Su proceso electroquímico puede entenderse como el inverso de la electrólisis del agua (*U.S. Department of Energy, 2023*).

En lugar de usar electricidad para dividir agua en hidrógeno y oxígeno (como ocurre en la electrólisis), en una celda de combustible el hidrógeno almacenado se oxida en el ánodo, liberando electrones y protones. Los electrones fluyen a través de un circuito externo, generando energía eléctrica, mientras que los protones atraviesan el electrolito hasta el cátodo, donde se combinan con el oxígeno del aire y los electrones que regresan, formando agua como subproducto.

Este proceso, que no involucra combustión, ofrece una conversión energética limpia, silenciosa y de alta eficiencia, especialmente en aplicaciones de movilidad, generación estacionaria o respaldo energético.

Existen varios tipos de celdas de combustible según la naturaleza del electrolito y el rango operativo, siendo las más comunes las de membrana de intercambio protónico (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, PEMFC), que funcionan a baja temperatura y son especialmente adecuadas para el sector transporte (Fig. 9-8).

9.3.6.1 Celda de combustible de hidrógeno PEMFC

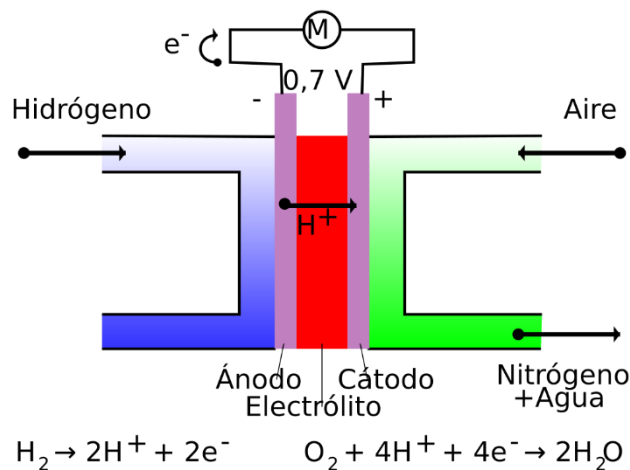


Fig. 9-8 Celda de combustible (Autor: HandigeHarry, 2008. Licencia: Dominio público)²⁰⁰

Una celda de hidrógeno (o celda de combustible de hidrógeno) produce electricidad mediante una reacción electroquímica que combina hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), generando agua (H_2O) como único subproducto, junto con energía eléctrica y calor. A continuación, se describe su funcionamiento básico:

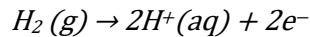
- **Estructura básica.** Una celda de combustible típica consta de tres componentes principales:
 - Electrodo: Los electrodos están constituidos por el ánodo, donde se introduce el hidrógeno, y el cátodo, donde se introduce el oxígeno (generalmente del aire). Las placas de los electrodos se hacen generalmente de nanotubos de metal, de níquel o de carbón, siendo las placas internas, a contacto con el electrolito, recubiertas por un catalizador.
 - Electrolito: permite el paso selectivo de iones pero no de electrones (de material cerámico o una membrana de polímero, por ejemplo Nafion®).
 - Catalizadores: de materiales como platino o paladio, son indispensables para activar las reacciones químicas en los electrodos, que son exotérmicas y, aunque espontáneas, suelen ser muy lentas como para ser operativas sin la presencia de catalizadores.

²⁰⁰ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3924755>

- **Reacciones químicas.**

- **En el ánodo**, el hidrógeno se oxida formando protones (H^+) y electrones (e^-) mediante un catalizador. El catalizador en el ánodo de una celda de combustible de hidrógeno cumple una función clave: permite que las moléculas de hidrógeno (H_2) se disocien en protones (H^+) y electrones (e^-) de forma eficiente, sin necesidad de altas temperaturas ni presiones (Tabla 9-7). En el ánodo se produce la siguiente reacción:

- Oxidación del hidrógeno: El gas hidrógeno llega al ánodo y entra en contacto con una superficie catalítica, usualmente compuesta de platino (Pt). Esta superficie facilita la ruptura del enlace covalente entre los dos átomos de hidrógeno, dando origen a la siguiente reacción ligeramente exotérmica:



- Los protones (H^+) atraviesan el electrolito hacia el cátodo. Los electrones (e^-) no pueden cruzar esa membrana, así que se ven forzados a tomar un camino externo: un circuito eléctrico, generando así corriente eléctrica.

Esto es un proceso químicamente difícil de realizar de forma espontánea en condiciones normales, pero el catalizador reduce la energía de activación necesaria para que la reacción ocurra. El uso de platino como catalizador es uno de los mayores costos de las celdas de combustible. Se están investigando catalizadores alternativos más abundantes y baratos, como aleaciones de metales no nobles o nanomateriales basados en carbono. La estructura del catalizador puede afectar la eficiencia: materiales con alta superficie específica permiten una mejor disociación de H_2 .

Tabla 9-7 El catalizador del ánodo

Requisitos del catalizador del ánodo

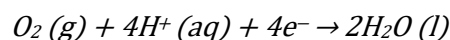
Debe tener una alta actividad catalítica para la disociación de H_2 .

Debe ser conductivo eléctricamente para permitir el flujo de electrones.

Debe ser estable químicamente en el ambiente electroquímico del ánodo.

En muchos diseños, se utiliza platino soportado sobre carbón (Pt/C) para aumentar el área activa y reducir el uso de platino.

- **En el cátodo** se produce la reducción del oxígeno. El oxígeno se combina con los protones y los electrones que llegan del circuito externo para formar agua. Esta es una reacción fuertemente exotérmica, ya que la formación de enlaces para dar origen a la molécula de agua libera una cantidad significativa de energía. La mayor parte del calor generado en la celda proviene de esta etapa. La reacción se describe con la siguiente fórmula:



El catalizador en el cátodo también es fundamental en una celda de combustible de hidrógeno, pero su función es distinta a la del ánodo (Tabla 9-8). Aquí se encarga de facilitar la reacción de reducción del oxígeno, que es más lenta y cinéticamente

difícil. La superficie catalítica del cátodo generalmente es de platino (Pt) o una aleación de platino.

Tabla 9-8 El catalizador del cátodo

Requisitos del catalizador del cátodo

Alta actividad catalítica para la reducción de oxígeno.

Alta resistencia a la corrosión en ambiente oxidante y ácido (como en una celda PEM).

Buena conductividad eléctrica.

Buena durabilidad frente a contaminantes como CO o SO₂.

El catalizador del cátodo, más que del ánodo, es de importancia crítica para el rendimiento y el costo global de una celda de combustible. Por eso, gran parte de la investigación actual se concentra en este lado. Debido al alto costo del platino, se investigan materiales como:

- Aleaciones de Pt con Co, Fe, Ni (que mejoran la actividad y reducen la carga de Pt).
- Catalizadores no nobles como óxidos de cobalto, manganeso, hierro, o materiales basados en nitruros y carbonos dopados con nitrógeno.
- Enzimas o materiales basados en principios biológicos.



201

²⁰¹ Imagen de cierre capítulo: "Central geotérmica de Krafla en Islandia" (Autor: Ásgeir Eggertsson, 2004. Lic. *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported*).
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Krafla_geothermal_power_station_wiki.jpg

ANIMACIONES Y VIDEOS

- (1) World Meteorological Organization – WMO. 193epartame of the climate in 2023.
<https://youtu.be/ES7eKWRRJ0o>
- (2) Focus. Variación de los glaciares permanentes entre 1984 y el 2019. (En italiano).
<https://www.facebook.com/watch/?v=1238963786283228>
- (3) NASA. Sea level Change. Greenland Ice Mass Loss 2002-2020.
<https://www.youtube.com/embed/sK4qz-h8o1M>
- (4) NASA. Sea level Change. Tracking 30 Years of Sea Level Rise
<https://sealevel.nasa.gov/resources/126/video-tracking-30-years-of-sea-level-rise/>
- (5) Water Cycle Extremes: Droughts and Pluvials
<https://youtu.be/QsbgZ9om0t8>
- (6) Khan Academy. El ciclo del carbono. El ciclo del carbono (video) | Ecología | Khan Academy (Creative Commons Attribution/Non-Commercial/Share-Alike)
- (7) Legado de Newton. FOTOSÍNTESIS: Fase luminosa y fase oscura | Preguntas examen UNAM. <https://www.youtube.com/watch?v=mVyP5H3racY>.
- (8) BBC News Mundo. Por qué el CO₂ está en el centro de la crisis climática.
<https://www.youtube.com/watch?v=T4jyoBVeXHM>
- (9) Reara Cenifer Energy Experts Cómo se calcula la huella de carbono de una organización https://www.youtube.com/watch?v=_dCTIA03Mjc
- (10) Universidad Piloto de Colombia. Huella Ecológica. <https://www.youtube.com/watch?v=w-Mg6SC0DU0>
- (11) NHC-NOAA. Fuerza destructiva de los huracanes según categoría.
<https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>
- (12) Imagen de radar de tormentas con “ganchos” bien definidos que denotan la presencia de tornados (© NOAA).
<https://www.rmets.org/sites/default/files/inline-images/This%20radar%20image%20shows%20definitive%20hooks%2C%20telling%20forecasters%20tornadoes%20are%20on%20the%20ground.%20%28NOAA%29.gif>
- (13) United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) – Comprehensive Disaster and Climate Risk Management. https://www.youtube.com/watch?v=0y_BJ0ek1zs
- (14) NDTV – What is Climate Adaptation, Mitigation & Resilience?
<https://www.youtube.com/watch?v=MgdeXn3YV4w>
- (15) Flash Battery – What are Solid-State Batteries?
<https://www.flashbattery.tech/en/blog/how-solid-state-batteries-work/>
- (16) US 193epartamento f Energy. Electrolisis. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/video-hydrogen-electrolysis-101>
- (17) Wikimedia Commons – Electrólisis del agua
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrolisis_Del_Agua-02.ogv

Bibliografía

- Asian Development Bank. (2023). *Climate Change and Disaster Resilience in Asia*. Manila: ADB.
- Ahrens, C. D. (2021). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment (13th ed.)*. Cengage Learning. Cengage Learning.
- American Council for an Energy-Efficient Economy. (2020). *The Role of Energy Efficiency in Achieving a Clean Energy Future*. Obtenido de ACEEE: <https://www.aceee.org/research-report/u2005>
- Awanthi, M., & Navaratne, C. (2018). Carbon Footprint of an Organization: a Tool for Monitoring Impacts on Global Warming. *7th International Conference on Building Resilience. Using scientific knowledge to inform policy and practice in disaster risk reduction*. Bangkok, Thailand: Elsevier Ltd. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818301140>
- Barlow, M. (2021). *Informe IPCC: por qué el cambio climático causa tormentas e inundaciones más intensas*. Europe: The Conversation. Obtenido de <https://theconversation.com/informe-ipcc-por-que-el-cambio-climatico-causa-tormentas-e-inundaciones-mas-intensas-165836>
- Bartels, & Suárez. (2021). *Participación comunitaria: la clave para enfrentar los desastres naturales en Guatemala, Honduras y El Salvador*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/efectividad-desarrollo/es/participacion-comunitaria-la-clave-para-enfrentar-los-desastres-naturales-en-guatemala-honduras-y-el-salvador/>
- BBC. (2021). *Cambio climático: el mundo está en riesgo de llegar pronto a un límite de temperatura*. Obtenido de BBC News Mundo, Prensa Libre: <https://www.prensalibre.com/vida/bbc-news-mundo-vida/cambio-climatico-el-mundo-esta-en-riesgo-de-llegar-pronto-a-un-limite-de-temperatura/>
- Bordino, J. (2024). *Sequía: qué es, causas y consecuencias*. Barcelona, España: Geoenciclopedia. Obtenido de <https://www.geoenciclopedia.com/sequia-que-es-causas-y-consecuencias-867.html>
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology : an introduction*. New York: Cambridge University Press.
- Carbon Footprint. (2024). *Carbon Calculator*. Recuperado el 2024, de Carbon Footprint: <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>
- CEPAL. (2021). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe*. Santiago: Naciones Unidas.
- Chinchar, A. (2022). *¿Por qué Estados Unidos tiene más tornados que cualquier otro país? Esta es la razón*. Obtenido de CNN en español.
- Chinchar, A. (2023). *Tornadoes around the world*. Obtenido de MetMatters - Royal Meteorological Society: <https://www.rmets.org/metmatters/tornadoes-around-world>
- City of Fort Lauderdale. (2024). *Qué es un Huracán?* Obtenido de City of Fort Lauderdale: <https://www.fortlauderdale.gov/government/departments-a-h/fire-rescue/emergency-services/hurricane-preparedness/informacion-en-espanol/que-es-un-huracan>
- Clarke, B., & Otto, F. (2021). *Cómo informar sobre fenómenos meteorológicos extremos y cambio climático*. United Kingdom: worldweatherattribution. Obtenido de https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/ESP_WWA-Como-informar-sobre-eventos-meteorolo%CC%81gicos-extremos-y-cambio-clima%CC%81tico.pdf
- Climate Action Tracker. (December de 2023). *Warming Projections Global Update*. Obtenido de Climate Action Tracker: <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2019). *Guía práctica para el ahorro de energía en el hogar*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conuee/documentos/guia-practica-para-el-ahorro-de-energia-en-el-hogar>
- Commission, E. (2023). *EU Climate Action Progress Report 2023, Brussels*. Obtenido de European Commission: <https://climate.ec.europa.eu>
- Congressional Budget Office. (2024). *Federal Spending for Flood Adaptations*. Washington, DC, USA: CBO.
- Costantino, C., & Dávila, A. (2021). Institutional approaches for designing strategies to address extreme hydrometeorological events in Mexico. *Climate and Development*, 13(6), pp. 513-526).
- Dasgupta, R., & Hirschmann, M. M. (2010). *The deep carbon cycle and melting in Earth's interior* (Vol. 298). Elsevier.
- Descarbonizar.me. (2024). *Emisiones de alcance 3*. Obtenido de Descarbonizar.me: <https://www.descarbonizar.me/huella-de-carbono/emisiones-de-alcance-3/>
- Dolman, N. D., & Verlinde, J. (2024). Achieving a Water-Resilient Rotterdam: *Blue Papers*, 3(1), pp. 164-77. doi:10.58981/bluepapers.2024.1.13

- DW. (2022). "Bomba ciclónica" afecta a 240 millones de estadounidenses. Obtenido de DW: <https://www.dw.com/es/bomba-cicl%C3%B3nica-afecta-a-240-millones-de-estadounidenses/a-64203461>
- EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico. (2024). *¿Qué son los huracanes?* Obtenido de EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico: <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/huracanes/que-son-los-huracanes/>
- EIA. (2023). *Coal explained: Coal and the environment*. U.S. Energy Information Administration.
- EIA. (2023). *Nuclear explained*. Obtenido de U.S. Energy Information Administration: <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/>
- Emerson, S., & Hedges, J. (2012). *Chemical Oceanography and the Marine Carbon Cycle*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9780511793202>
- Energía de mi País. (2025). *Los recursos naturales y sus transformaciones energéticas*. Obtenido de Energía de mi País: https://energiasdemipais.educ.ar/edmp_lecturas/fuentes-de-energia
- Energy Institute; KPMG; Kearney; Heriot Watt University. (2024). *Statistical Review of World Energy*. Obtenido de Energy Institute: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Energy Star. (2024). *How Big Is Your Carbon Footprint?* Obtenido de Energy Star: https://www.energystar.gov/ia/products/globalwarming/downloads/GoGreen_Activities%20508_compliant_small.pdf
- EPA. (2021). *Climate Change Indicators: Glaciers*. United States Environmental Protection Agency. Obtenido de <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-glaciers>
- EPA. (2024). *Understanding Global Warming Potentials*. USA: Environmental Protection Agency. Obtenido de <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials#Learn%20why>
- European Commission. (2024). *Small Modular Reactors explained*. Obtenido de Energy: https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/small-modular-reactors/small-modular-reactors-explained_en
- European Environment Agency. (2024). *Adaptation to Sea Level Rise and Coastal Flooding in Europe: Strategies and Best Practices*. Copenhagen, Denmark: EEA.
- European Environment Agency. (s.f.). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2022. *EEA Report*(No. 1/2022).
- European Environment Agency (EEA). (s.f.). *GEMET - General Multilingual Environmental Thesaurus*. Obtenido de https://www.eionet.europa.eu/gemet/es/concept/15266?utm_source=chatgpt.com
- Eurostat. (2022). *Beginners: Energy flows – from production to consumption*. Obtenido de European Commission: Recuperado de <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/>
- Ferrari, M. (2022). *Che cos'è il cambiamento climatico: cause, rimedi e 7 prove d'accusa (contro di noi)*. (Mondadori Scienza, Ed.) Obtenido de Focus Natura: <https://www.focus.it/ambiente/natura/che-cosa-cambiamento-climatico-cause-rimedi-giornata-terra>
- Fieerro, L. (. (2007). *Cronología de Historia de Venezuela y Eventos Mundiales*. Caracas: Fundación Empresas Polar (en CD).
- Fierro, L. (2007). *Cronología de historia de Venezuela y y eventos mundiales*. En L. Fierro (Ed.). Caracas, Venezuela: Fundación Empresa Polar.
- Flores, J. (2022). *La desertificación, uno de los grandes problemas ambientales de la actualidad*. España: National Geographic. Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/desertificacion-uno-grandes-problemas-ambientales-actualidad_14425
- Foro Nuclear. (2025). *Cómo se clasifican las energías*. Obtenido de Foro Nuclear: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/como-se-clasifican-las-fuentes-de-energia>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2020). *A comparative techno-economic analysis of PEM and alkaline electrolysis*. Obtenido de <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/techno-economic-analysis-of-electrolysis.html>
- Fundación Aquae. (2021). *¿Qué es y cómo se forma un tornado?* Obtenido de Fundación Aquae: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/como-se-forma-tornado/>
- Fundación Aquae. (2024). *Calculadora Huella de Carbono*. Obtenido de Fundación Aquae: <https://www.fundacionaquae.org/calculadoras-aquae/calculadora-huella-carbono/>
- Fundación Reforestamos. (2021). *¿Qué es, para qué sirve, y cómo se mide la huella de carbono?* Obtenido de Fundación Reforestamos: <https://www.reforestamos.org/blog/que-es-para-que-sirve-y-como-se-mide-la-huella-de-carbono/>

- Gallardo Ballat, Y. &. (2020). *Impactos de las sequías*. Obtenido de bmeditores: <https://bmeditores.mx/ganaderia/impactos-de-las-sequias/>
- Genatios, C. (2000). *Informe a Presidencia de la República*. AUAEV (Autoridad Única de Área del Estado Vargas).
- Genatios, C. (2018). Curso "Cambio Climático". Miami, FL: Miami Dade College (MDC).
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2020). *Vargas: Desastre, Proyecto y Realidad*. Caracas: Ediciones CITECi- ANIH.
- Grases, J., Amundaray, J., Malaver, A., Feliziani, P., & Rodríguez, J. (2000). *Efectos de las lluvias caídas en Venezuela en diciembre de 1999*. Caracas: CBC Publicaciones; PNUD, CAF.
- Graziati, G. (2023). *Olas de calor: qué son, temperaturas, causas y consecuencias*. España: Ecología verde. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/olas-de-calor-que-son-temperaturas-causas-y-consecuencias-4405.html>
- Greenfield, E. (2024). *¿Cuál es el nivel actual de CO2 en la atmósfera?* Obtenido de SigmaEarth: <https://sigmaearth.com/es/%C2%BFCu%C3%A1-es-el-nivel-actual-de-CO2-en-la-atm%C3%B3sfera%3F/>
- Grenn, T. (Dec. de 2021). Solar and Wind Power Integration Challenges. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(4).
- Grubb, M. (2014). *Planetary Economics: Energy, Climate Change and the Three Domains of Sustainable Development*. Londres: Routledge.
- Ha, M., Morrow, M., & Algiers, K. (2024). *Fotosíntesis y Respiración*. Obtenido de LibreTexts Español.
- Harrison, L. (Jul de 2024). Future Climate Scenarios and Their Impacts on Global Temperature. *Geophysical Research Letters*, 50(7), 1456-1469.
- Herring, S. C., Christidis, N., Hoell, A., Hoerling, M. P., & Stott, P. A. (2021). Explaining Extreme Events of 2019 from a Climate Perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102(1), pp. S1-S116).
- Herzog, H. (2018). *Carbon Capture*. Cambridge: The MIT Press.
- Hidalgo, L. (2000). La gran lluvia venezolana de diciembre 1999. En J. López, & R. García (Ed.), *Los Aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela. Memorias del seminario internacional Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela. Caracas, Venezuela, 27 de noviembre al 2 de diciembre de 2000*. Caracas, Venezuela: IMF, Facultad de Ingeniería, UCV.
- Humboldt, A. (1991). *Viajes a las regiones equinocciales del nuevo continente (Trad. de Lisandro Alvarado)*. Caracas, Venezuela: Monte Avila Editores.
- Hydrogen Council. (2023). *Hydrogen Insights 2023*. Obtenido de Hydrogen Council and McKinsey & Company: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023/>
- IAEA. (2012). *Advances in High Temperature Gas Cooled Reactor Fuel Technology*. IAEA-TECDOC-1674.
- Iberdrola. (2024). *¿Qué es la desertificación? Descubre sus causas y sus consecuencias*. Iberdrola. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/desertificacion>
- IEA. (2014). World energy balance. *IEA World Energy Statistics and Balances (database)*. doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.lib.ucalgary.ca/10.1787/data-00512-en>
- IEA. (2023). *Climate Impacts on Energy Systems*. Paris: International Energy Agency (IEA).
- IEA. (2023). *CO2 Emissions in 2022*. Paris: IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- IEA. (2024). *Key World Energy Statistics 2024*. OECD/IEA.
- INFOBAE. (2021). *Tormentas de nieve y frío en EEUU: al menos 23 muertos y más de 4 millones de personas sin servicio eléctrico*. Obtenido de INFOBAE: <https://www.infobae.com/america/eeuu/2021/02/17/tormentas-de-nieve-y-frio-en-eeuu-al-menos-23-muertos-y-mas-de-4-millones-de-personas-sin-servicio-electrico/>
- Ingersoll, D. (2009). Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy*, 51(4), 589-603.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2020). *Guía práctica de la energía: Consumo eficiente y responsable*. Obtenido de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, España: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-practica-de-la-energia>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- International Energy Agency - IEA. (2020). *Glossary: Primary energy supply*. Obtenido de IEA Glossary: <https://www.iea.org/glossary>
- International Energy Agency - IEA. (2025). *World energy balances and definitions*. Obtenido de World Energy Outlook (glosario y metodología): <https://www.iea.org>

- International Energy Agency (IEA). (2022). *Global hydrogen review 2022*. IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- International Energy Agency. (2022). *Energy Efficiency 2022: Analysis and Outlooks to 2030*. Obtenido de IEA: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>
- International Energy Agency. (2023). *Solid-state batteries: Technologies, prospects and challenges*. Obtenido de IEA: <https://www.iea.org/reports/solid-state-batteries>
- International Energy Agency. (2024). France - Electricity generation by source, 2023. *IEA Statistics*. Recuperado el 2025, de <https://www.iea.org/countries/france>
- International Energy Agency. (2024). India - Electricity generation by source, 2023. *IEA Statistics*,. Recuperado el 2025, de <https://www.iea.org/countries/india>
- International Renewable Energy Agency. (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023*. Obtenido de IRENA: <https://www.irena.org/publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- IPBES. (s.f.). *Renewable energy*. (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) Obtenido de Land Degradation and Restoration Assessment: Glossary term: <https://www.ipbes.net/ru/node/41794>
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge and NY: Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). *Special Report on Global Warming of 1.5°C (SR15)*, Geneva. Obtenido de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC. (2019). Annex I: Glossary. En D. R.-D. H.-O. Pörtner, & N. Weyer (Ed.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Obtenido de <https://apps.ipcc.ch/glossary/>
- IPCC. (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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Obtenido de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport_small.pdf
- IPCC. (2022). AR6 WGII – Technical Summary. IPCC.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers. Geneva: IPCC.
- IPCC. (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 and NY: Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- IPCC. (2024). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volume 2 - Energía*. Obtenido de IPCC: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- ITER Organization - a. (2023). *How does a fusion reactor work?* Obtenido de iter.org: <https://www.iter.org/sci/FusionFuels>
- ITER Organization - b. (2023). *Magnetic Confinement*. Obtenido de iter.org: <https://www.iter.org/sci/MagneticConfinement>
- Johnson, A. (May de 2025). Energy Consumption and Global Warming in the 21st Century: The High Emissions Scenario. *Journal of Climate Change Science*, 34(5), 1013-1027.
- Johnson, M., & Brown, A. (2015). The Future of Renewable Energy. *Proceedings of the Energy Summit*. New York, NY, USA. Obtenido de <https://www.energysummit.org/proceedings>
- Jordà, G., Cacho, I., Argüeso, D., Ayarzagüena, B., Ballabrera-Poy, J., García-Rodríguez, O., . . . Somavilla, R. (2024). *Informe Clivar-Spain sobre el Clima en España*. Madrid, Espana: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Obtenido de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/2024_INFORME_CLIVAR-SPAIN.pdf
- Khan Academy. (2024). *El Ciclo del Carbono*. Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/v/carbon-cycle>
- Killops, S., & Killops, V. (2004). *Introduction to Organic Geochemistry*. New York: Wiley-Blackwell. doi:DOI:10.1002/9781118697214

- Kitzes, J., Peller, A., Goldfinger, S., & Wackernagel, M. (2007). Current Methods for Calculating National Ecological Footprint Accounts. *Science for Environment & Sustainable Society*, 4(Nro. 1). Obtenido de E-Learning Area Humanística: https://elearning.humnet.unipi.it/pluginfile.php/101791/mod_resource/content/0/Footprint%20Method%202006.pdf
- KPMG. (s.f.).
- Krane, K. (2019). *Introductory Nuclear Physics (3rd ed.)*. Wiley.
- Kumar, P., & Gupta, S. (2023). Non-Renewable Energy Resources: Challenges and Opportunities. *Energy Policy Journal*, 45(3).
- Lin, D., Hanscom, L., Martindill, J., Borucke, M., Cohen, L., Galli, A., . . . Eaton, D. (2019). *Working Guidebook to the National Footprint and Biocapacity Accounts*. Oakland: Global Footprint Network (NFA). Obtenido de Global Footprint Network: https://www.footprintnetwork.org/content/uploads/2019/05/National_Footprint_Accounts_Guidebook_2019.pdf
- López de Benito, J. (Aug. de 2024). ¿Merece la pena esperar por un coche con baterías de estado sólido? *Movilidad Eléctrica*. Obtenido de <https://movilidadelectrica.com/coche-electrico-baterias-estado-solido/>
- López, J., & et al. (2000). Evaluación Hidro-Geomorfológica de los aludes torrenciales de diciembre de 1999 en Venezuela. En J. López, & R. García (Ed.), *Memorias del seminario internacional Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela. Caracas, Venezuela, 27 de noviembre al 2 de diciembre de 2000*. Caracas, Venezuela: IMF, Facultad de Ingeniería, UCV.
- López, J., & Pérez, H. (2010). El extraordinario evento hidrometeorológico de diciembre 1999 en el estado Vargas. En J. López (Ed.), *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas*. Caracas: IMF, UCV.
- Ma, M., Zhang, M., Jiang, B., Du, Y., Hu, B., & Sun, C. (2023). A review of all-solid-state electrolytes for lithium batteries: high-voltage cathode materials, solid-state electrolytes and electrode–electrolyte interfaces. *Materials Chemistry Frontiers*, 7(7), 1234-1256. doi:10.1039/d2qm01071b
- Manthiram, A., Yu, X., & Wang, S. (Apr. de 2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2(4), 16103. doi:10.1038/natrevmats.2016.103
- Mártinez-López, J. (2024). Mitigación de riesgos por tornados: Estrategias de prevención y diseño estructural resistente. *Revista de Gestión de Riesgos Naturales*, 12(3, pp. 45-62).
- Meteopedia. (2024). *Tornado ¿Qué es un tornado?* Obtenido de Clima - Pelmorex: <https://www.clima.com/meteopedia/tornado>
- MEWR (Ministry of the Environment and Water Resources); MND (Ministry of National Development). (2016). *Singapore's Climate Action Plan*. Singapur: MEWR, MND. Obtenido de https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1549Climate_Action_Plan_Publication_Part_2.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030*. Madrid: Gobierno de España.
- Molenaar, A., & Gebraad, C. (2014). *CASE STUDY - ROTTERDAM RESILIENT DELTA CITY*. (B. S. Publishers, Ed.) Obtenido de WUR eDepot: <https://edepot.wur.nl/431696>
- Moraci, F., Errigo, M., Fazia, C., Burgio, G., & Foresta, S. (2017). *Making Less Vulnerable City: Resilience as a New Paradigm of Smart Planning*. ResearchGate. doi:10.20944/preprints201801.0013.v1
- Moseman, A. e. (2024). *How much carbon dioxide would we have to remove from the air to counteract climate change?* Obtenido de Climate Portal - MIT: <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-carbon-dioxide-would-we-have-remove-air-counteract-climate-change>
- N3C (National Climate Change Committee). (2008). *Singapore's National Climate Change Strategy*. Singapur: MEWR (Ministry of the Environment and Water Resources). Obtenido de https://elaw.org/wp-content/uploads/archive/Singapore_Full_Version.pdf
- NASA. (2024 a). *Sea Level Change. Observations from space*. Obtenido de <https://sealevel.nasa.gov/>
- NASA. (2024 b). *Steric Height. Sea Level Change. Observation from space*. Obtenido de <https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/key-indicators/steric-height/>
- National Ignition Facility (NIF). (2023). *How Inertial Confinement Fusion Works*. Obtenido de National Ignition Facility & Photon Science: https://lasers.llnl.gov/about/how-nif-works?utm_source=chatgpt.com
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024). *Hurricane Resilience: Adaptation Strategies for Coastal Communities*. Silver Spring, MD, USA: NOAA Office for Coastal Management.

- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2022). *Updated manufactured cost analysis for proton exchange membrane (PEM) electrolyzer systems*. U.S. Department of Energy. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81283.pdf>
- Newsroom Infobae. (2024). *Un fuerte temporal obliga a cerrar escuelas y suspender trenes en el norte de Italia*. Obtenido de Infobae: <https://www.infobae.com/america/agencias/2024/02/28/un-fuerte-temporal-obliga-a-cerrar-escuelas-y-suspender-trenes-en-el-norte-de-italia/>
- Newtrace. (2023). *The critical role of materials in the high price of PEM electrolyzers*. Obtenido de <https://www.newtrace.io/post/the-critical-role-of-materials-in-the-high-price-of-pem-electrolyzers>
- NOAA. (2023). Arctic Report Card 2023. National Oceanic and Atmospheric Administration. Obtenido de <https://arctic.noaa.gov/Report-Card>
- NOAA. (2023). *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. USA: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Nuclear España. (2021). *Reactores HTR*. Obtenido de Nuclear España: <https://www.revistanuclear.es/divulgacion/reactores-htr/>
- Nyangan, L., Villarroel, R., & Alvarado, F. (Dec de 2023). The Role of Technology in Achieving Carbon Neutrality: Pathways and Challenges. *Nature Sustainability*, 5(12), 1002-1012.
- OECD. (2023). *Climate Finance Provided and Mobilised by Developed Countries in 2013–2021, Paris*. Obtenido de OECD Publishing: <https://www.oecd.org/climate-change/finance-usd100-billion-goal/>
- OECD-NEA. (2014). Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. *Generation IV International Forum*.
- OMM. (2024). *Los indicadores del cambio climático alcanzaron niveles sin precedentes en 2023: OMM*. Organización Meteorológica Mundial. Obtenido de <https://wmo.int/es/news/media-centre/los-indicadores-del-cambio-climatico-alcanzaron-niveles-sin-precedentes-en-2023-omm>
- ONU-HABITAT. (2021). *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*. Obtenido de ONU-HABITAT: <https://onu-habitat.org/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>
- OSU - Oregon State University. (2017). *Carbon Footprint - Bioenergy Education Initiative*. Obtenido de agsci.oregonstate.edu.
- Pérez Porto, J. &. (2022). *Huracán - Qué es, definición y concepto*. Obtenido de Definición.DE: <https://definicion.de/huracan/>
- Pérez, J. C. (N.A.). *Estaciones del año y temporadas climáticas*. (Centro de Ciencias de la Tierra, Ed.) Recuperado el 2024, de Universidad Veracruzana, México: <https://www.uv.mx/cienciauav/blog/estacionesdelanoytemporadasclimaticas>
- Portillo, G. (2023). *Lluvia torrencial: causas, consecuencias y qué hace*. Obtenido de EcologíaVerde : <https://www.ecologiaverde.com/lluvia-torrencial-causas-consecuencias-y-que-hacer-4624.html>
- Proyecto Resisto. (2022). *Improving resilience of electrical networks against extreme weather events*. Doñana National Park, Spain.
- R., N. (2024). Multi-Dimensional Infrastructure Resilience Modeling: An Application to Hurricane-Prone Electric Power Distribution Systems. *IEEE Access*, 6 pp. 42700-42714.
- Reynolds, J. F. (2013). *Desertification in Encyclopedia of Biodiversity*. ScienceDirect - Elsevier. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/desertification>
- Riebeek, H. (16 de Junio de 2011). *The Carbon Cycle*. (NASA, Ed.) Obtenido de Earth Observatory: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *CO₂ emissions*. Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2020). *Greenhouse gas emissions*. Published online at OurWorldInData.org. Obtenido de <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>
- Rodríguez, H. (2022). *Así afecta el cambio climático a la formación de huracanes*. España: National Geographic. Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/asi-afecta-cambio-climatico-a-formacion-huracanes_18987
- Rojeli, J. e. (2018). Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. En *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Rotterdam Climate Initiative. (2013). *Rotterdam Climate Change Adaption Strategy*. Rotterdam, NL: City of Rotterdam.
- Salcedo, D. (2000). Los flujos torrenciales catastróficos de diciembre de 1999 en el estado Vargas y en el Área Metropolitana de Caracas. Características y lecciones aprendidas. En J. López, & R. García (Ed.), *Los Aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela. Memorias del seminario*

- internacional Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela. Caracas, Venezuela, 27 de noviembre al 2 de diciembre de 2000.* Caracas, Venezuela: IMF, Facultad de Ingeniería, UCV.
- Sánchez, L., & Reyess, O. (2015). *Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Una revisión general.* Santiago de Chile: CEPAL.
- Schaefer, F., Luksch, U., Steinbach, N., Cabeça, J., & Hanauer, J. (2006). *Ecological Footprint.* Obtenido de ec.europa.eu/eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3888793/5835641/KS-AU-06-001-EN.PDF.pdf/d17ffc94-bf5a-404f-ac90-cc64891a2b67?t=1414779227000>
- Science Facts. (2025). *Fermi Level.* Obtenido de Science Facts.
- SciLine. (2024). *Lluvias torrenciales, inundaciones y cambio climático.* Obtenido de SciLine: <https://www.sciline.org/es/climate/cambio-climatico/lluvias-torrenciales-inundaciones-y-cambio-climatico/>
- Shalaby, H., & Aboelnaga, S. (2017). Climate change impacts on urban planning in the cities. *The 1st International Conference: Towards A Better Quality of Life.* Campus El Gouna, Egypt: Technische Universität Berlin.
- Shindell, D. (2013). *Radiative Forcing in the AR5.* IPCC, AR5 Working Group. Recuperado el 2016, de https://climate.envsci.rutgers.edu/climdyn2013/IPCC/IPCC_WGI12-RadiativeForcing.pdf
- Shubhrata, M. (2004). *Photosynthesis in Plants.* New Delhi: Discovery Publishing House.
- Simon, M. (2023). *Humedad por olas de calor, un nuevo riesgo para la salud.* España: WIRED. Obtenido de <https://es.wired.com/articulos/humedad-por-olas-de-calor-un-nuevo-riesgo-para-la-salud>
- Simon, M. (2023). *Las lluvias son cada vez más fuertes mientras el planeta se calienta, ¿por qué?* México: WIRED. Obtenido de <https://es.wired.com/articulos/calentamiento-global-por-que-las-lluvias-son-cada-vez-mas-intensas>
- Singer, A., Rodríguez, L., Audemar, F., & Ollarves, R. (2010). Estimación del período de retorno de manifestaciones de aludes torrenciales en la serranía del litoral por medio de dataciones C14 obtenidas en trinchera al pie del Ávila y por vía arqueogeológica en las formaciones aluvionales del valle de Caracas. En J. López (Ed.), *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas.* Caracas, Venezuela: IMF, UCV.
- Smith, J. (2022). Advancements in Renewable Energy Sources. *Journal of Energy Engineering, 30(2).*
- Smith, J. e. (Feb de 2024). Global Warming and Climate Policy Scenarios for the 21st Century. *Environmental Research Letters, 16(2), 244-258.*
- Smith, M. (2024). *How Is Primary Energy Defined and Used?* Washington: CRS (Congressional Research Service). Obtenido de Recabado de: https://www.congress.gov/crs-product/R48270?utm_source=chatgpt.com
- SMR Instrumentation. (2025). *SMR coolant systems.* Obtenido de SMR: <https://small-modular-reactors.org/smr-coolant-systems/>
- Soto, J., Acosta-Coll, D., Jiménez-Cano, A., & Gómez-Torres, J. A. (2017). Diseño de una red de monitorización de variables meteorológicas relacionadas con la formación de tornados. *Ingeniare. Rev. chil. ing., 25(4), pp.585-598.*
- Speight, J. (2020). *Petroleum Refining Technology and Economics (6th ed.).* CRC Press.
- Stacey, W. (2018). *Fusion Plasma Physics (3rd ed.).* Wiley-VCH.
- Statista. (2023). Distribution of energy sources used for gross electricity generation in Germany in 2023. Recuperado el 2025, de <https://www.statista.com/statistics/736640/energy-mix-germany/>
- Statista. (2023). Primary energy consumption in Brazil in 2023, by type of fuel. Recuperado el 2025, de <https://www.statista.com/statistics/265609/primary-energy-consumption-in-brazil-by-fuel/>
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review.* Cambridge, Cambridge University Press.
- Texas Department of Insurance. (2025). *Seguridad en Caso de Tornados.* Obtenido de Texas Department of Insurance, Austin, TX: <https://www.tdi.texas.gov/pubs/videoresourcessp/spt5tornadosafety.pdf>
- Tucker, M., & Wiright, P. (1990). *Carbonate Sedimentology.* (W. Blackwell, Ed.)
- Turns, S. (2013). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications (3rd ed.).* McGraw-Hill.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2024). *Developing Infrastructure Adaptation Pathways to Combat Hurricane Intensification.* Washington, DC, USA: USACE.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2024). *Miami-Dade Back Bay Coastal Storm Risk Management Feasibility Study.* Jacksonville District, FL, USA: USACE.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2024). *U.S. Army Corps of Engineers Releases 2024-2027 Climate Adaptation Plan.* Washington DC, USA: USACE.
- U.S. Department of Agriculture. (2024). *USDA Releases Updated Climate Adaptation and Resilience Plan.* Washington DC, USA: USDA.

- U.S. Department of Agriculture. (Jan. 2025). *Drought Resilient Practices*. Washington, DC, USA: USDA Climate Hubs,.
- U.S. Department of Energy. (2021). *Pumped-storage hydropower*. Obtenido de Pumped-storage hydropower: <https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>
- U.S. Department of Energy. (2022). *Hydrogen Production: Electrolysis*. Obtenido de Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- U.S. Department of Energy. (2023). *Fuel cell basics*. Obtenido de Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-basics>
- U.S. Department of the Interior. (2024). *U.S. Department of the Interior 2024-2027 Climate Adaptation Plan*. Washington, DC, USA: DOI.
- U.S. Geological Survey. (2022). *National Strategy for Landslide Loss Reduction*. Washington, DC, USA: USGS.
- UNCCD. (1996). *CONVENCIÓN DE LA NACIONES UNIDAS DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN*. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. Obtenido de https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-02/UNCCD_Convention_text_SPA.pdf
- UNDRR. (2024-a). *Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction: Disaster Risk*. Obtenido de United Nations Office for Disaster Risk Reduction: <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk>
- UNDRR. (2024-b). *Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction: Exposure*. Obtenido de United Nations Office for Disaster Risks Reduction: <https://www.undrr.org/terminology/exposure>
- UNDRR. (2024-c). *Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction: Resilience*. Obtenido de United Nations Office for Disaster Risk Reduction: <https://www.undrr.org/terminology/resilience>
- UNFCCC. (2024-a). *Introduction to Mitigation*. Obtenido de United Nations Framework Convention on Climate Change: <https://unfccc.int/topics/introduction-to-mitigation#:~:text=Efforts%20to%20reduce%20emissions%20and,measures%20to%20mitigate%20climate%20change>.
- UNFCCC. (2024-b). *Introduction to Adaptation and Resilience*. Obtenido de United Nations Framework Convention on Climate Change: <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/introduction>
- United Nations Environment Programme. (2023). *Emissions Gap Report 2023, Nairobi*. Obtenido de UNEP: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *The Paris Agreement*. Obtenido de UNFCCC: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- University of Toronto - Asset Management Corporation. (2018). *Carbon Footprint Report*. Obtenido de <https://utam.utoronto.ca/wp-content/uploads/2019/03/Carbon-Footprint-Report-July-2018.pdf>
- Urbani, F., & et al. (2000). Geología del estado Vargas. En J. López, & R. García (Ed.), *Memorias del seminario internacional Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela. Caracas, Venezuela, 27 de noviembre al 2 de diciembre de 2000*. Caracas, Venezuela: IMF, Facultad de Ingeniería, UCV.
- Ürge-Vorsatz, D., & et al. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *enewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85–98.
- USGS. (2020). *Glacier-wide mass balance and compiled data inputs: USGS benchmark glaciers (ver. 4.0, November 2019)*. doi:10.5066/F7HD7SRF
- van Daalen, K., & et al. (2023). *The 2022 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: towards a climate resilient future*. Obtenido de The Lancet Public Health: [https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article/PIIS2468-2667\(22\)00197-9/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article/PIIS2468-2667(22)00197-9/fulltext)
- Vela, A. (2023). *Las olas de calor serán cada vez más intensas*. Espana: National Geographic. Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/estas-han-sido-las-olas-de-calor-mas-extremas-nunca-registradas-_18228
- WGMS / Copernicus. (2017 Updated). *Glacier Mass Change in Europe relative to 1997*. Copernicus - Climate Change Service. doi:world glacier monitoring service
- White, A., & Brantley, S. (1995). *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals* (Vol. 31). Berlin, Boston: De Gruyter. doi:<https://doi.org/10.1515/9781501509650>
- WHO. (2023). *Climate Change and Health: Key Facts*. World Health Organization (WHO). Obtenido de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Wikipedia. (2007). *Compact Fluorescent lamp*. Recuperado el 2025, de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_fluorescent_lamp

- Wikipedia. (2023). *Circulación del agua en las plantas*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Circulaci%C3%B3n_del_agua_en_las_plantas
- Wikipedia. (2024). *2018 British Isles cold wave*. Obtenido de Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/2018_British_Isles_cold_wave
- Wikipedia. (2024). *Climatología de tornados*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Climatolog%C3%ADa_de_tornados#:~:text=Europa%20tiene%20cerca%20de%20300,son%20entre%20enero%20a%20marzo.
- Wikipedia. (s.f.). *Energía primaria*. Recuperado el 2025, de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_primaria
- WMO. (2024). *Extreme weather*. Recuperado el 2024, de World Meteorological Organization (WMO):
<https://wmo.int/topics/extreme-weather#:~:text=Examples%20of%20extreme%20weather%20and,drought%2C%20tornadoes%20and%20tropical%20cyclones.&text=The%20adverse%20impacts%20of%20extreme,intensity%2C%20duration%20and%20spatial%20extent>.
- World Bank. (2022). *Water Scarce Cities: Thriving in a Finite World*. Washington D.C.: World Bank Group.
- World Nuclear Association. (2024). *Small Modular Reactors*. Obtenido de World Nuclear Association:
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- World Weather Attribution. (2021). *Attributing extreme weather events to climate change: A new frontier in climate science*. London, UK: Imperial College London, London.
- WRI & WBCSD. (2024). *Standards & Guidance*. Obtenido de Greenhouse Gas Protocol:
<https://ghgprotocol.org/standards-guidance#:~:text=The%20GHG%20Protocol%20Corporate%20Accounting,corporate%2Dlevel%20GHG%20emissions%20inventory>
- WWF. (2022). *Living Planet Report 2022*. Gland: World Wildlife Fund (WWF).
- Young, H., & Freedman, R. (2019). *University Physics with Modern Physics (15th ed.)*. Pearson.
- Zhang, Y. Y. (2021). 2020/21 record-breaking cold waves in east of China enhanced by the 'Warm Arctic-Cold Siberia' pattern. *Environmental Research Letters*, 16(9). Obtenido de
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac1f46>
- Zheng, X., & et al. (2022). Li_3InCl_6 -coated LiCoO_2 for high-performance all solid-state batteries. *Applied Physics Letters*, 121(3). doi:<https://doi.org/10.1063/5.0097432>

Paolo Maragno

Paolo Maragno es egresado del Politécnico de Turín, Italia, donde en 1975 obtuvo el título de “*Dottore in Ingegneria Elettronica*”. En 1984 consiguió el título de “Ingeniero Electricista” de la Universidad Central de Venezuela (U.C.V.) y en el año 2001, el de Magister en “Política y Gestión de la Innovación Tecnológica” del Centro de Estudios del Desarrollo (CENDES-U.C.V.). Su carrera académica se desarrolló en la U.C.V., donde alcanzó el escalafón de Profesor Agregado y desempeñó varios cargos directivos, entre los cuales él de Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Coordinación Académica, del Instituto Tecnológico y posteriormente de la Coordinación de Extensión de la Facultad de Ingeniería de esa institución. Otras actividades destacadas del Prof. Maragno fueron la coordinación del “Proyecto de Acreditación de Programas de Enseñanza de la Ingeniería” del Núcleo de Decanos de Ingeniería del Consejo Nacional de Universidades de Venezuela (C.N.U.), la coordinación del “Convenio de Doble Titulación entre la U.C.V. y el Politécnico de Turín”. Fue asesor del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Venezuela, Director Ejecutivo del Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones (C.E.N.D.I.T.), Director del Centro para la Capacitación, la Innovación, el Desarrollo Tecnológico y del Conocimiento en Ingeniería (C.I.T.E.C.I.). En el año 2020 pasó a formar parte de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat como Miembro Corresponsal en el Extranjero. Desde el año 2021 hasta el 2025 ha sido Presidente de la Comisión de Educación Superior de la citada Academia. Es autor de varios libros y artículos en los campos de la transmisión de señales digitales, los planes de estudio de la carrera de ingeniería y la vinculación universidad-empresa.

Carlos Genatios

Carlos Genatios es Doctor en Ciencias por el *Institut National des Sciences Appliquées* de Francia e Ingeniero Civil egresado de la Universidad Central de Venezuela. Cursó la Maestría en la COPPE/UFRJ de Brasil y realizó estudios de postdoctorado en la *École Normale Supérieure de Cachan* y la Universidad Pierre et Marie Curie, en Francia. Ha desempeñado funciones relevantes en el ámbito académico y científico. Es profesor titular (jubilado) de la Universidad Central de Venezuela y fue director del Instituto de Mecánica de los Medios Continuos (IMME/UCV). Se ha especializado en infraestructura, reducción de riesgos de desastres y políticas de ciencia y tecnología, siendo actualmente Coordinador General de la Red Geópolis para la Reducción de Riesgos de Desastres en Latinoamérica. Es Individuo de Número de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. En la gestión pública ocupó cargos de alta responsabilidad: ministro de Ciencia y Tecnología, viceministro de Infraestructura, director general del Ministerio de Desarrollo Urbano y presidente del Consejo Andino de Ciencia y Tecnología. Su producción intelectual comprende catorce libros, más de ciento cincuenta artículos científico-técnicos y cerca de trescientos artículos de opinión. Asimismo, ha actuado como consultor del Banco Interamericano de Desarrollo, la CAF, la CEPAL y las Naciones Unidas. Su trayectoria ha sido reconocida con distinciones internacionales, entre ellas las Palmas Académicas en grado de Comendador y la Orden del Mérito en grado de Gran Oficial, otorgadas por la República Francesa.

Marianela Lafuente

Es Ingeniera Civil por la Universidad Central de Venezuela (1980), con Maestría en la Universidad Federal de Río de Janeiro y Doctorado en Ciencias por el *Institut National des Sciences Appliquées* de Francia (1991). Realizó estudios de postdoctorado en la *École Normale Supérieure de Cachan*. Complementariamente, obtuvo la Licenciatura en Filosofía en la Universidad Central de Venezuela

y la Licenciatura en Letras en la Universidad de Toulouse. Ha desarrollado una amplia trayectoria académica como profesora titular del Instituto de Mecánica de los Medios Continuos (IMME) de la UCV, del cual fue directora en 1999. Cofundó siete cátedras de pregrado y postgrado en ingeniería en la UCV, y ha orientado su investigación hacia la ingeniería estructural, la prevención de desastres y la política de ciencia y tecnología. Entre sus responsabilidades en el sector público, se desempeñó como viceministra de Ciencia y Tecnología entre 1999 y 2002. Asimismo, ha sido consultora del Banco Interamericano de Desarrollo, la CAF y el Banco Mundial. Su producción intelectual incluye numerosos artículos científicos y de opinión, así como varios libros. Ha participado en la creación de instituciones estratégicas como el Centro Nacional de Tecnologías de Información, el Fondo para la Investigación y el Desarrollo en Telecomunicaciones, el Centro CITECI y el Centro Pascal. Ha recibido reconocimientos a su labor investigadora, entre ellos el Primer Premio Nacional de Investigación en Vivienda, obtenido en coautoría. Es Individuo de Número de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, donde ocupa el sillón XXV.



El Centro para la Innovación, el Desarrollo Tecnológico y del Conocimiento en Ingeniería (CENTRO CITECI) es una organización creada en función de incentivar procesos de generación y aprovechamiento del conocimiento, de innovación y desarrollo tecnológico en el país. Esta iniciativa busca responder a las demandas del sector productivo venezolano y de la sociedad en general, en función de apoyar su crecimiento y competitividad con el fin de contribuir con la mejora de la calidad de vida de la población y con el desarrollo social y económico del país.



Academia Nacional
de la Ingeniería y el Hábitat

La Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, fue creada en 1998. Forma parte de la comunidad de Academias Nacionales, y de la comunidad internacional de Academias de Ingeniería. Es una institución llamada a contribuir con la discusión permanente de los asuntos más importantes del país, en especial, los vinculados a la Ingeniería y el Hábitat. En este campo, sus objetivos están orientados principalmente a: promover, programar y difundir trabajos de investigación y proyectos; cooperar en la definición y elaboración de directrices generales, políticas y estrategias públicas, así como a apoyar y fortalecer iniciativas, públicas y privadas, que incidan significativamente en el desarrollo nacional. La Academia agrupa en su seno a 35 Miembros, Individuos de Número, conprofesiones contempladas en la Ley de Ejercicio de la Ingeniería, Arquitectura y Profesiones afines, y Miembros del Colegio de Ingenieros de Venezuela.

ISBN: 978-980-7106-22-1



9 789807 110622 1