Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. ISSN 1317-6781 https://n2t.net/ark:/42414/banih/722026/173
Caracas, Nº 72. Edición especial, octubre 2026: 145 – 183

APORTES DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN VENEZUELA – AVANCES Y DESAFÍOS[1]

Michael SCHMITZ [2]

RESUMEN

Este compendio sintetiza los fundamentos, metodología, avances, desafíos y recomendaciones derivadas de los estudios de microzonificación sísmica realizados en Venezuela durante las últimas décadas. Un alto porcentaje de la población venezolana se encuentra asentada en zonas de alta amenaza sísmica. Los estudios de microzonificación sísmica permiten identificar zonas de respuesta similar al movimiento sísmico con el fin de poder ajustar el diseño sísmico de los edificios a los diferentes escenarios dentro de las ciudades y tomar decisiones más acertadas sobre las edificaciones existentes, así como sobre el uso de la tierra para la planificación urbana. En Venezuela se realizaron estudios de microzonificación sísmica en diferentes ciudades del país con variable estado de avance. Si bien en las áreas metropolitanas de Caracas y Barquisimeto, así como en Carora, se finalizaron los estudios, se encontraron dificultades al momento de la aprobación de ordenanzas municipales y su puesta en práctica junto con los planes municipales de gestión del riesgo sísmico. Otras ciudades cuentan con estudios avanzados de la configuración del subsuelo, pero no se han finalizado las evaluaciones de la respuesta sísmica en superficie de las diferentes microzonas sísmicas identificadas. Esto dificulta el uso eficiente de esta información, por lo cual se enfatiza en la necesidad de su finalización y posterior implementación en ordenanzas municipales y planes de gestión del riesgo.

ABSTRACT

Contributions of seismic microzonation to seismic risk mitigation in Venezuela – advances and challenges

This compendium synthesizes the fundamentals, methodology, advances, challenges and recommendations derived from seismic microzonation studies carried out in Venezuela during the last decades. A high percentage of the Venezuelan population lives in areas of high seismic hazard. Seismic microzonation studies allow the identification of zones with similar seismic response patterns to adjust the seismic design of buildings to different scenarios within cities and make more informed decisions regarding existing buildings, as well as land use for urban planning. In Venezuela, seismic microzonation studies have been carried out in different cities throughout the country, with varying stages of progress. While studies have been completed in the metropolitan areas of Caracas and Barquisimeto, as well as in Carora, difficulties arose during the approval of municipal ordinances and their implementation in conjunction with municipal seismic risk management plans. Other cities have advanced studies of subsurface configuration, but the assessments of the surface seismic response of the different identified seismic microzones have not been finalized. This hinders the efficient use of this information, which underscores the need for their completion and subsequent implementation in municipal ordinances and risk management plans.

Palabras clave: Microzonificación sísmica, efectos de sitio, mitigación del riesgo sísmico, ordenanzas municipales, Venezuela
Keywords: Seismic microzonation, site effects, seismic risk mitigation, municipal ordinances, Venezuela

INTRODUCCIÓN

Justificación

Por su ubicación en el límite de las placas del Caribe y de Suramérica, gran parte del norte de Venezuela está sujeto a una moderada a alta amenaza sísmica, proveniente de las fallas tectónicas y la sismicidad asociada, la cual se ve reflejada en los mapas de zonificación sísmica de la norma COVENIN 1756-1 vigente (COVENIN, 2019). Los referidos mapas representan los movimientos sísmicos en roca; sin embargo, las ondas sísmicas pueden sufrir modificaciones importantes en amplitud, duración y contenido de frecuencias cuando llegan a la superficie, en especial si se trata de cuencas sedimentarias, situación en la cual se ubican la mayoría de las ciudades en Venezuela y otras partes del mundo.

La metodología aplicada en los proyectos de microzonificación sísmica contempla la evaluación del peligro sísmico en roca y la respuesta en superficie. En estos estudios se integra la información existente del subsuelo con los resultados de nuevas mediciones geofísicas y evaluaciones geológicas y geotécnicas en campo. Para la respuesta en superficie de las diferentes situaciones evaluadas se desarrollan perfiles para el cálculo de la respuesta dinámica mediante

[1] Compendio del Trabajo de Incorporación Académica (TIA) ante la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (ANIH), como requisito parcial para optar a su incorporación como Miembro Correspondiente Extranjero.

[2] Profesor e investigador, Universidad Simón Bolívar - USB, Universidad Central de Venezuela – UCV (jubilado), Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas – FUNVISIS (jubilado), Caracas, Venezuela. E-mail.: schmitzschutt@gmail.com

análisis lineal equivalente, tomando en cuenta la calidad del suelo somero (Vs30) y del espesor de los sedimentos hasta el basamento sísmico (H); con esta información se definen las microzonas de similar respuesta sísmica (Hernández et al., 2006). Dependiendo de las condiciones locales se estudia además el peligro de deslizamiento de laderas provocado por el terremoto, el peligro de licuación del suelo y las deformaciones permanentes asociados a la ruptura de fallas en superficie. Los resultados finales de los estudios de microzonificación sísmica se implementan en ordenanzas municipales y planes de gestión del riesgo sísmico para su mitigación.

El análisis de la amenaza sísmica con efectos de sitio y análisis de recurrencia de intensidades en Caracas, que sugiere que un futuro sismo probable tendría intensidad entre 7.5 y 8 y podría ocurrir entre 2024 y 2060 con expectación hacia 2045 (Hernández y Schmitz, 2023), evidenció la necesidad de emprender un esfuerzo de mitigación del riesgo sísmico que bien puede durar dos décadas. Para ello deben priorizarse el tipo de construcciones y las zonas a atender, tal como se indica en dicho estudio.

Motivación

Sitios con espesores grandes de suelo, como cuencas sedimentarias en las cuales se asientan muchas ciudades, son sujetos a amplificación del movimiento del terreno en comparación con los sitios en roca (e.g. Aki, 1993). Estas modificaciones de las ondas sísmicas por las condiciones geológicas se ven influenciadas por la forma y el contenido de las cuencas sedimentarias, es decir, el espesor sedimentario, las velocidades de propagación de las ondas sísmicas (sobre todo las ondas de corte), tanto en la parte somera (e.g. Boore, 2004), como profunda.

Para estimar las características de las cuencas, y con ello los efectos de sitio, se pueden utilizar diferentes métodos geofísicos, entre los cuales destacan los métodos sísmicos, gravimétricos y métodos que aprovechan las vibraciones ambientales o microtremores (e.g. Nakamura, 1989; Bard, 1999; Louie, 2001).

El espesor de los sedimentos cuaternarios (H) y sus parámetros (velocidades de onda de corte - Vs), así como como la calidad del suelo somero (Vs30 - la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 m), que afecta significativamente la respuesta sísmica, son la base para la evaluación de las respuestas sísmicas en superficie y la construcción de espectros de diseño, mediante análisis de sitio, ajustados a las diferentes microzonas sísmicas de una ciudad.

Como precursores de la microzonificación sísmica en Venezuela pueden considerarse los estudios realizados posteriores al terremoto de 1967 debido a la concentración de los daños en las cuencas en Caracas y en el Litoral. Mediante investigaciones sísmicas posteriores al sismo se pudo determinar la profundidad de los sedimentos en el valle de Caracas con 300 m en Los Palos Grandes y 120 m en San Bernardino (Murphy et al., 1969). Se determinó la importancia de la relación entre la altura de los edificios y los períodos fundamentales de suelos, que alcanzan 1.6 en la parte más profunda del valle, afectando edificios de más de 14 pisos (Seed et al., 1970; Seed y Alonso, 1974), derivando en una primera microzonificación sísmica de Caracas (Alonso, 1957; Alonso y Larotta, 1977), Mérida (Alonso, 1976) y Caraballeda (1978).

Estudios piloto de microzonificación sísmica se realizaron entre 1992 y 1994 en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM) en colaboración entre FUNVISIS, PDVSA-INTEVEP y el CETE-Méditerranée de Nice (Francia) (e.g. CETE Méditerranée, 1993; Duval et al., 1995). Estos estudios se centraron en áreas como Tía Juana y Lagunillas y tuvieron como objetivo principal calibrar un método experimental para evaluar la respuesta dinámica del suelo frente a terremotos, además de mapear los riesgos sísmicos.

A raíz del Seminario para conmemorar el 30 aniversario del terremoto de Caracas de 1967 llegaron en 1997 investigadores de Francia y del Japón a Venezuela y realizaron mediciones de ruido ambiental. Para Caracas determinaron que los periodos más largos coincidían con las zonas de mayor acumulación de sedimentos (1-1,6 s en Los Palos Grandes), mientras los periodos bajaron a 0,2 s en roca (Abeki et al., 1998a; Duval et al., 1998).

En Cumaná se realizaron posterior al sismo de Cariaco de 1997 mediciones de ruido ambiental (Abeki et al., 1998b), pudiendo correlacionarse los periodos predominantes mayores a 1 s con los sedimentos deltáicos del río Manzanares y los depósitos marinos costeros. Debido al gran volumen de daños se realizaron en Cariaco mediciones de ruido ambiental (Masaki et al., 1999); los períodos predominantes reportados varían desde valores de 0,1 s en la parte rocosa hasta valores de 0,4 s en la parte norte de la cuenca. Mediante 12 perforaciones geotécnicas hasta 22 m de profundidad se determinó la naturaleza del subsuelo como suelos blandos degradables sísmicamente saturadas con alto potencial de licuación (De Santis y Hernández, 1999).

Posteriormente, en Venezuela se realizaron estudios de microzonificación sísmica en varias ciudades, iniciando en los años 2005-2010 con el "Proyecto de Microzonificación Sísmica en las Ciudades Caracas y Barquisimeto", cuyos resultados finales han sido implementados en ordenanzas municipales en Caracas y Barquisimeto. Los avances de estos estudios se reportan en detalle en este trabajo.

Los resultados de los proyectos de microzonificación sísmica podrían contribuir considerablemente a la mitigación del riesgo sísmico si son tomados en cuentas en el diseño de nuevas construcciones y su ubicación dentro de la ciudad (planificación urbana), así como en la evaluación y eventual reforzamiento sismorresistente de edificaciones existentes.

Objetivo

El objetivo general del trabajo es la evaluación de los avances de los estudios de microzonificación sísmica realizados en Venezuela y su contribución a la mitigación del riesgo sísmico a nivel nacional, analizando los avances logrados en su implementación y los desafíos pendientes para su aplicación efectiva y extensión a otras ciudades.

AMENAZA SÍSMICA EN VENEZUELA

Sismicidad

La geodinámica de Venezuela está caracterizada por la interacción de las placas del Caribe y Sudamérica, lo que ha dado lugar a la formación cordilleras y cuencas asociadas.

La placa del Caribe se mueve con una velocidad de ~19,6 ± 2 mm/año hacia el oeste con respecto a la placa Sudamericana (e.g. Pérez et al., 2018; Figura 1).

La sismicidad en Venezuela coincide con las zonas de fallas activas y fajas de deformación (Audemard et al., 2000; Figuras 1 y 2). La mayor parte de la sismicidad es somera (en los primeros 20 km (Figura 2), asociada a la ubicación de las fallas activas, con mayor actividad en el Oriente del país y en los Andes de Mérida.

En la sismicidad profunda destacan dos zonas de elevada sismicidad, en el oeste el Nido de Bucaramanga con sismicidad a una profundidad alrededor de 150 km y en el este el llamado "Paria Cluster" a una profundidad de unos 70 km (Bezada et al., 2010; Audemard et al., 2025). Otra zona de sismicidad intermedia-profunda entre 50 y 150 km de profundidad está asociada a la subducción de la placa del Caribe debajo del noroeste de Sudamérica (Van der Hilst y Mann (1994).

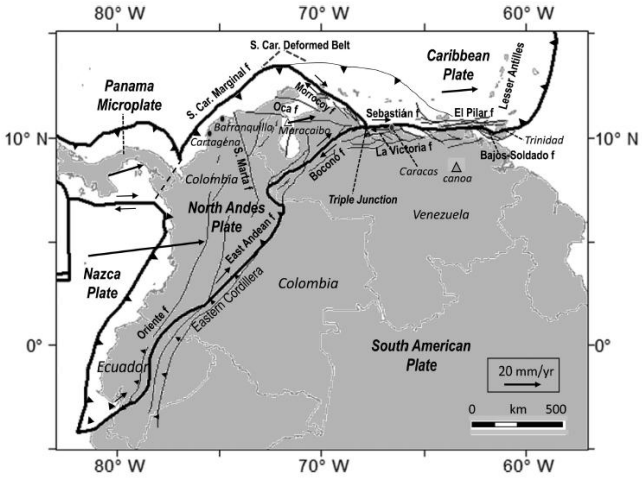


Figura 1. Configuración tectónica del sur de la placa del Caribe y del norte de la placa Suramericana (Pérez et al., 2018). El bloque Norandino (placa Norandina según estos autores) es importante para la dinámica en el noroeste de Venezuela.

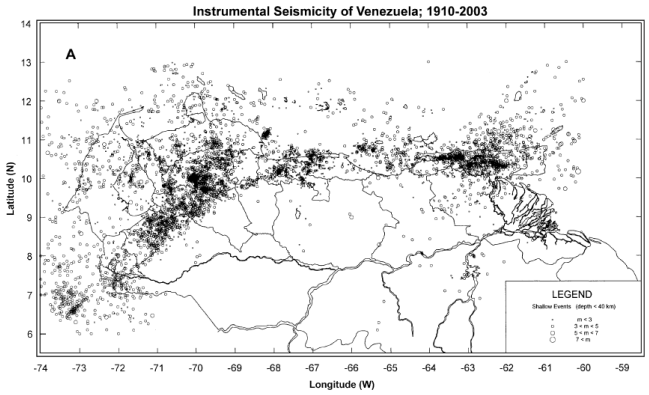


Figura 2. Sismicidad (fuente: catálogo de FUNVISIS) de eventos someros (menos de 40 km de profundidad) en Venezuela (Audemard et al., 2005).

Amenaza sísmica

Los mapas de amenaza sísmica forman la base para las normas sísmicas; se desarrollan en el tiempo debido al avance en el conocimiento de las fuentes sismogénicas y en la metodología de su evaluación. Las dos normas más recientes, la Norma Venezolana de Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2001) y de la actualmente vigente Norma Venezolana de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) expresan la amenaza sísmica en roca (Figuras 3 y 4).

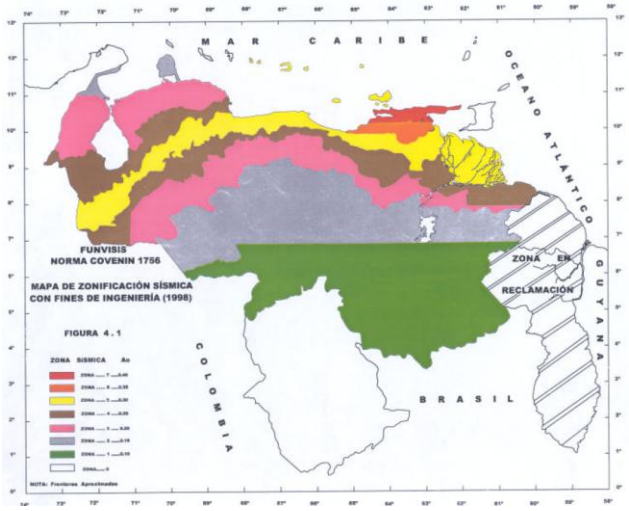


Figura 3. Mapa de zonificación sísmica de la norma COVENIN 1756 (2001).

En la norma COVENIN 1756 (2019) se define A0 como el coeficiente de la aceleración horizontal del terreno en la clase de sitio referencial para un periodo medio de retorno de 475 años para construcciones comunes. La clase de sitio referencial es la clase de sitio BC con Vs30 de 760 m/s en condición topográfica leve, lo que corresponde a un sitio clasificado como roca sin efectos topográficos. Además, se definen dos mapas con los coeficientes A1 (aceleración para periodo estructural de 1 s) y el período de transición TL.

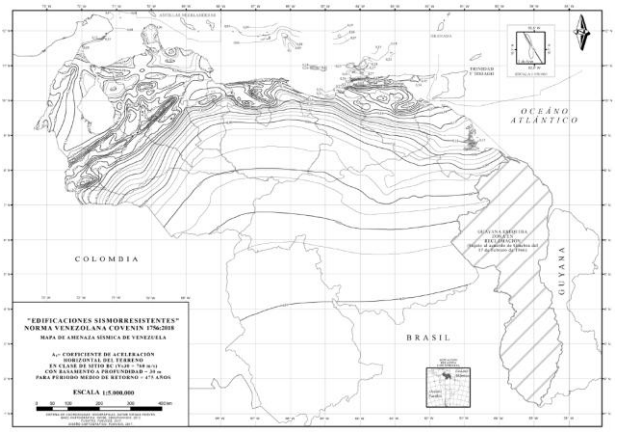


Figura 4. Mapa del parámetro A0 de la norma COVENIN 1756 (2019).

El análisis de la amenaza sísmica se basa en un modelo sismogénico que identifica las fuentes sísmicas como un catálogo sismológico instrumental (Rendón et al., 2014), en terremotos históricos ocurridos en el país (Hernández, 2009b) y una base de datos de fallas tectónicas (Paolini et al., 2012); véanse detalles en Hernández y Schmitz (2019). Estas características quedan plasmadas en un conjunto de parámetros sismogénicos siguiendo la metodología propuesta por Esteva (1967) y Cornell (1968).

Los sitios de ubicación de las construcciones deben clasificarse de acuerdo con las características del terreno y se deben emplear los factores de sitio indicados en la norma COVENIN 1756 (2019) a los fines de la construcción de los espectros de respuesta para el diseño de las edificaciones.

MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL

Normativas y políticas de gestión del riesgo

La Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009) establece el marco general de las políticas públicas en materia de gestión de riesgos. Como obligaciones del estado define 1) garantizar que las acciones propias de la ordenación del territorio y de la planificación del desarrollo a todos los niveles de gestión, eviten potenciar o incrementar las condiciones de vulnerabilidad o de amenazas en el país, 2) propiciar la ejecución de acciones orientadas a la reducción de la vulnerabilidad existente y 3) fortalecer las actividades de prevención, mitigación y preparación en todas las instancias de gobierno, así como en la población. Para su funcionamiento ordena la creación de consejos y gabinetes de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos a nivel nacional, estadal y municipal.

El marco legal para fortalecer las capacidades institucionales requeridas para las labores de reconstrucción ante la ocurrencia de desastres en el territorio nacional lo da la Ley de la Organización Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres (2001), que regula la organización y funcionamiento de la Organización de Protección Civil y Administración de Desastres en el ámbito nacional, estadal y municipal.

En la Norma Venezolana de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) se establecen los criterios y procedimientos mínimos para el análisis, diseño y evaluación de edificaciones tipificadas sujetas a la acción de movimientos sísmicos, así como las acciones sísmicas que deben ser aplicadas a todo tipo de construcciones según su desempeño esperado. En el capítulo Amenaza sísmica se presentan los mapas con los parámetros a ser aplicados en cada sitio de Venezuela.

Organismos responsables

El organismo rector en la materia es la Dirección Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres (Protección Civil), así como sus direcciones estadales y municipales. En el Sistema Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres están integradas las instituciones Protección Civil, los Bomberos, la Fuerza Armada Nacional Bolivariana (FANB) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Protección Civil, Bomberos y la FANB se enfocan en las actividades preventivas, comunitarias y en la respuesta y coordinación de emergencias, trabajando articuladamente ante eventos sísmicos. FUNVISIS es la institución oficial encargada de la investigación científica en sismología e ingeniería sísmica y opera la Red Sismológica Nacional para monitorear y reportar la actividad sísmica; además, participa en la divulgación de los conocimientos.

La permisología de construcción es fundamentalmente responsabilidad de las Alcaldías (Oficinas de Urbanismo y de Ingeniería Municipal) para permisos locales como uso de suelo y licencias de obra. Para los estudios ambientales el responsable el Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y para la infraestructura vial asociada a las construcciones el Ministerio del Poder Popular para Obras Públicas. Toda la normativa, tal como la norma COVENIN 1756, sigue los estándares establecidos por la Comisión Nacional de Normas Industriales.

Integración de la microzonificación sísmica en el entorno normativo y en la planificación urbana

Las leyes que rigen la planificación territorial son la Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio (LOOT) (1983) (posteriormente modificada en los años 2005 y 2006 y derogadas las modificaciones en el año 2007) y la Ley Orgánica de Ordenación Urbanística (LOOU) (1987) junto con normativas posteriores como la Ley de Tierras Urbanas (2009) y el Decreto de Regularización Integral de la Tenencia de la Tierra de los Asentamientos Urbanos o Periurbanos (2011) que complementan su aplicación en temas específicos sobre todo en asentamientos informales, siendo el Reglamento de la LOOU (1991) una pieza clave para su ejecución. En este reglamento se define qué se considera variable urbana fundamental para urbanizaciones y edificaciones, como uso, densidad poblacional, espacios viales, retiros, alturas y restricciones ambientales o de seguridad. Establece normas técnicas y disposiciones que regulan la subdivisión de terrenos, lotificación, urbanización y construcción y complementa los instrumentos de planificación territorial, lo cual lo convierte en un documento fundamental

para la aplicación práctica de la legislación urbanística en Venezuela.

La Norma Venezolana de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) establece criterios y procedimientos para el análisis, diseño y evaluación de edificaciones tipificadas sujetas a la acción de movimientos sísmicos. Se basa en la LOOU (1987), el Reglamento de la LOOU (1991) y en la Ley Orgánica del Sistema Venezolano para la Calidad (2002). Para la revisión de proyectos estructurales y las variables urbanas se remite a los organismos municipales con los procedimientos indicados en las leyes previamente indicadas.

La norma COVENIN 1756 (2009) indica que las ciudades con más de 100.000 habitantes deberán disponer de un estudio de microzonificación sísmica en su territorio y, en caso de existir una microzonificación sísmica avalada por la autoridad competente (en este caso FUNVISIS), los valores de amenaza y los espectros elásticos deben sustituirse por los dados en ésta. Las autoridades municipales deben apoyar a las autoridades nacionales en el desarrollo de las microzonificaciones sísmicas que se planteen en su ámbito territorial, particularmente suministrando toda la información geológica y geotécnica existente en él y velar por la implementación de los resultados de las microzonificaciones sísmicas en decretos u ordenanzas municipales.

FUNDAMENTOS DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Definición y propósito

Estudios de microzonificación sísmica son una herramienta fundamental en la mitigación del riesgo sísmico en áreas urbanas o zonas metropolitanas. Es el proceso de dividir un área geográfica, en zonas más pequeñas (microzonas) que presentan un comportamiento similar ante la ocurrencia de un sismo. El propósito principal es proporcionar información detallada y validada mediante modelos científicos para reducir la vulnerabilidad y mitigar el riesgo sísmico mediante la planificación y el diseño sismorresistente de las construcciones.

Se basa en estudios multidisciplinarios que combinan la geología, la geofísica, la sismología y la ingeniería geotécnica y sismorresistente para caracterizar el subsuelo y su respuesta sísmica en caso de un terremoto. El primer paso es la evaluación de la amenaza sísmica en roca en la zona de estudio. Para poder definir cuánto se amplificaría la vibración del suelo en cada sector específico de la ciudad en comparación con un suelo de roca dura (lo que se llama los "efectos de sitio") se debe estudiar la geología y geomorfología, la topografía, investigar el subsuelo mediante la aplicación de perforaciones geotécnicas y estudios geofísicos, y modelar el comportamiento de las ondas sísmicas para obtener la respuesta en superficie de cada zona específica determinada durante el estudio. Adicionalmente, se determinan los efectos geológicos o inducidos (licuación del suelo, deslizamientos o ruptura de falla en superficie) basado en la amenaza sísmica local.

De esta manera, se puede proveer los parámetros de diseño específicos para cada microzona (espectros de respuesta de aceleración de diseño, factor de amplificación). Esto permite a los ingenieros diseñar estructuras que no entren en resonancia con el período predominante del suelo, lo cual es vital para su seguridad.

Esta información puede ser usada en la planificación urbana y la ordenación territorial (Figura 5) al suministrar información crítica para establecer restricciones de uso del suelo o exigir requisitos de construcción más rigurosos en las microzonas de mayor peligro (donde la amplificación es alta). Igualmente se puede guiar la ubicación de infraestructura vital (hospitales, escuelas, etc.) en las zonas de mejor comportamiento sísmico.

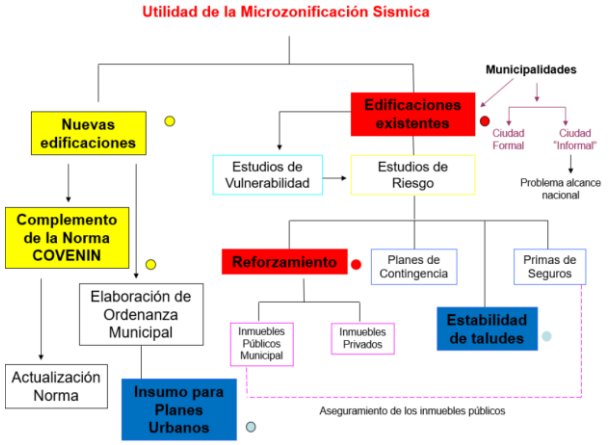


Figura 5. Esquema de uso de los resultados de estudios de microzonificación sísmica para la mitigación del riesgo sísmico (Schmitz et al., 2020a).

Los resultados de la microzonificación sísmica pueden ser utilizados en la gestión del riesgo y la preparación para emergencias como insumo fundamental para la evaluación del riesgo sísmico (cálculo de pérdidas humanas y materiales) en una ciudad. Permiten la elaboración de escenarios de daños (mapas de intensidad y daños probables) necesarios para la planificación de la respuesta a desastres y los planes de evacuación.

Los resultados se presentan en mapas que muestran la respuesta sísmica esperada y el potencial de la ocurrencia de efectos inducidos en las diferentes zonas de la ciudad. Para las diferentes microzonas sísmicas se elaboran las recomendaciones para el diseño.

Metodología de Microzonificación Sísmica

La metodología utilizada en los estudios de microzonificación sísmica se refiere a las diferentes partes de los estudios, tal como la evaluación de la amenaza sísmica en roca, las características del suelo de punto de vista geológico, geofísico y geotécnico (lo que incide en las características de las vibraciones en superficie, su potencial amplificación de las vibraciones por efectos de sitio y la ocurrencia de efectos inducidos como licuación del suelo o deslizamientos) y la

metodología para evaluar la respuesta sísmica en superficie y su delimitación en microzonas de similar respuesta sísmica.

En líneas generales, los estudios de microzonificación sísmica realizados en Venezuela recientemente han seguido la metodología propuesta por Hernández et al. (2006) para los estudios en las ciudades de Caracas y Barquisimeto, en la cual se hace énfasis también en el uso de la información para la gestión del riesgo y el esfuerzo estructural. A continuación, se identifican los detalles para cada parte de los estudios con ejemplos de los estudios realizados en Caracas, resumidos en Schmitz y Singer (2015).

Amenaza sísmica en roca

La amenaza sísmica en roca se establece comúnmente mediante un estudio probabilístico de amenaza sísmica (PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Assessment) siguiendo las indicaciones de Esteva (1967) y Cornell (1968). Para ello se analizan las fuentes sísmicas y se condensa la información en un modelo sismogénico (Hernández, 2009a), basado en evaluaciones neotectónicas y paleosísmicas para las fallas activas y un análisis espacio-temporal de la sismicidad.

Una vez determinadas las fuentes sísmicas, se evalúan los patrones de atenuación de las ondas sísmicas desde la fuente hasta el sitio. Como resultado se obtienen estimados de las tasas de ocurrencias de diversos eventos sísmicos (en términos de aceleraciones pico y aceleraciones espectrales) con valores del período medio de retorno (PMR) asociados a las acciones de diseño y el tipo de construcción.

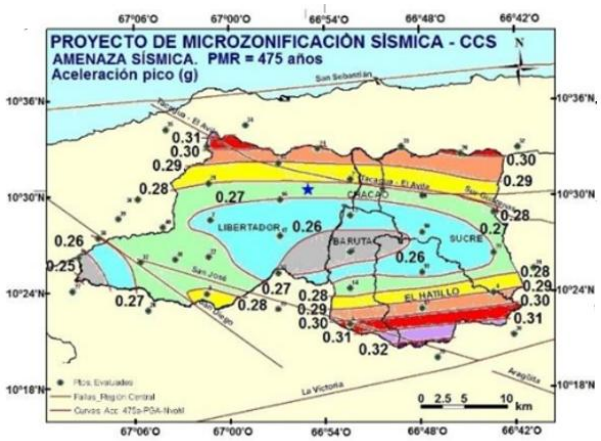


Figura 6. Amenaza sísmica en roca (A0), PMR = 475 años, para Caracas (Hernández y Schmitz, 2023).

Partiendo del mapa de amenaza sísmica realizado para la norma COVENIN 1756 (COVENIN, 2001), en el marco del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas se calculó la amenaza sísmica regional (Hernández et al., 2009), la cual fue actualizada aplicando un nuevo modelo sismogénico y modernas relaciones de atenuación (Hernández y Schmitz, 2023). En la Figura 6 se muestra la amenaza sísmica en roca de Caracas para PMR = 475 años, correspondientes a A0.

Evaluación geológica y geomorfológica

El primer paso de evaluación del subsuelo en la microzonificación es el estudio de la geología y geomorfología del lugar, siendo en muchos casos la diferencia entre la roca y los sedimentos cuaternarios de primer orden para la respuesta sísmica. En Caracas se han realizado evaluaciones de la geología desde los primeros mapas (e.g. Dengo, 1951) hasta los más recientes (Figura 7).

Para el valle aluvional de Caracas se elaboró un mapa con las unidades geológicas y fallas cuaternarias a escala 1:25.000 basado en evaluaciones fotogeológicas de misiones de los años 1936-1938, así como observaciones de campo efectuadas en unas 250 excavaciones sobre las características depositionales. Se utilizó la información litoestratigráfica del banco de datos geotécnicos (Feliziani et al., 2004) para mayor diferenciación de los diferentes cuerpos sedimentarios identificados (Singer et al., 2007; 2023; Figura 8). Esta definición de las diferentes unidades sedimentológicas ha sido utilizada para la delimitación detallada de las microzonas sísmicas, basada en sí en los valores de Vs30.

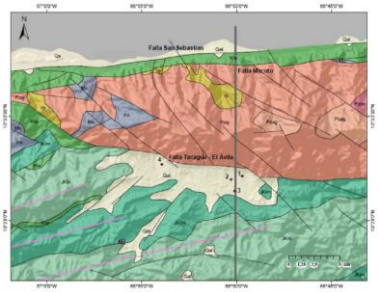


Figura 7. Mapa geológico del valle aluvial de Caracas, rodeado de afloramientos de rocas metamórficas (Schmitz et al., 2020a; modificado de Hackley et al., 2006).

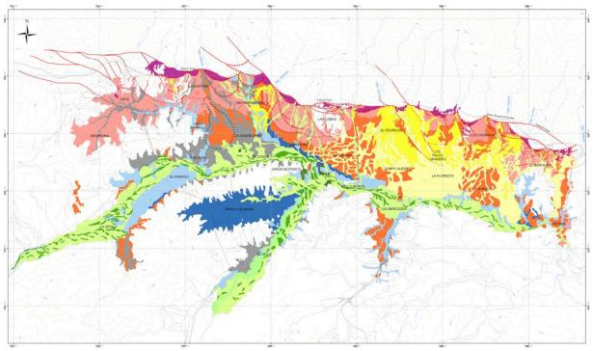


Figura 8. Unidades geológicas y fallas cuaternarias del valle de Caracas (leyenda ver: Singer et al., 2007).

Evaluación geotécnica

La información del banco de datos geotécnicos (Feliziani et al., 2004) fue utilizada en Caracas para la evaluación de los valores Vs30 dentro del valle aluvional. Con el fin de generar u mapa de velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m (Vs30) se aplicó la ecuación de ajuste de la NEHRP (BSSC, 2003; fórmula 1), que convierte los de número de golpes (SPT) de los ensayos geotécnicos a valores Vs, a unas 1000 perforaciones geotécnicas.

$$Vs = 37.86 * N^{0.5757} \quad (1)$$

Los valores obtenidos mediante la conversión de SPT a VS fueron calibrados con mediciones geofísicas.

Evaluación geofísica somera

Para las calibraciones de Vs30 se aplicaron 21 mediciones de refracción sísmica, 16 análisis de ondas superficiales tipo de SASW y 13 mediciones sísmicas de pozos con crosshole y downhole (Kantak et al. 2005; Campos et al., 2004; Morales, 2006; García et al., 2006; Flores, 2006). Para incluir las zonas de laderas, se utilizó una aproximación del valor Vs30 según los valores de la pendiente topográfica (Allen y Wald, 2009), a la cual se aplicó un ajuste (Morales et al., 2011). Los valores Vs30 se ubican en un rango de 185-325 m/s en gran parte del valle, con valores superiores a 325 m/s en el oeste y en partes del este del valle, así como en las zonas de ladera (Figura 9).

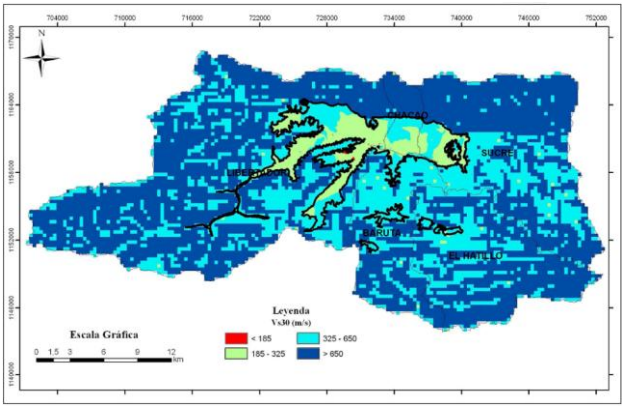


Figura 9. Mapa de Vs30 de Caracas (Morales et al., 2011); la línea negra delimita el área de sedimentos aluvionales.

Evaluación geofísica profunda

Los primeros estudios que permitieron estimar los espesores de sedimentos fueron los estudios sísmicos realizados posterior al terremoto de Caracas de 1967 (Murphy et al., 1969). Kantak (2001) analizó estos datos junto con la recopilación de pozos de agua para determinar los espesores de sedimentos. En el año 2001 se realizaron mediciones sísmicas de gran ángulo para la determinación del espesor de sedimentos (Sánchez et al., 2005a).

Esta información de complementó con unas 2000 mediciones de ruido ambiental en una malla de 250 m aproximadamente para determinar los períodos predominantes del suelo (Rocabado et al., 2006; Figura 10). Los valores de Vs hasta el basamento se corroboraron con mediciones de arreglos de microtremores en 5 sitios en el valle (Cornou et al., 2011).

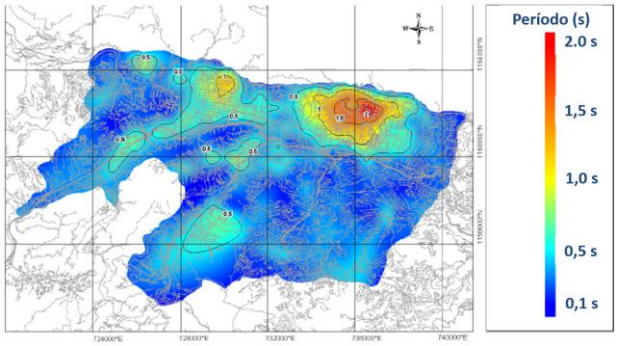


Figura 10. Períodos fundamentales del suelo en Caracas (Rocabado et al., 2006).

Con el fin de tener una visión 3D de la profundidad al basamento se realizaron unas 1500 mediciones gravimétricas que fueron analizadas mediante un modelado 3D para un modelo integrado de los espesores de sedimentos (Amarís et al., 2011a; Schmitz et al., 2023c; Figura 11).

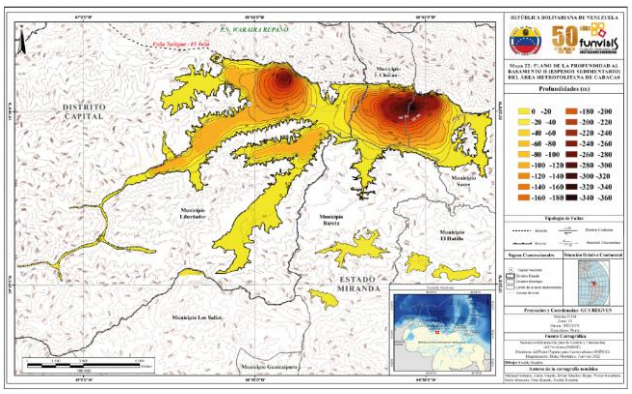


Figura 11. Espesores de sedimentos en Caracas (Schmitz et al., 2019; 2023c).

Espectros de respuesta

Para obtener los espectros de respuesta en superficie se realizó un estudio paramétrico de respuesta dinámica 1D usando análisis equivalente lineal con el programa SHAKE (Schnabel et al. 1972), variando el espesor de sedimentos (entre 10 y 350 m) y la velocidad promedio de ondas de corte de los primeros 30 m (Vs30 entre 150 y 650 m/s), los cuales se agruparon dentro de 12 clases (Figura 12) de acuerdo con su comportamiento típico.

Adicionalmente, se toman en cuenta los efectos 2D y 3D de la cuenca, un factor de terminante en la distribución de los daños del terremoto de Caracas de 1967. Utilizando los espectros obtenidos por Papageorgiou & Kim (1991) para la zona de Los Palos Grandes, se obtuvieron amplificaciones 2D respecto a 1D hasta un período de 2 s, con una ampliación del rango hasta 4 s con los resultados de un modelado 3D de la respuesta sísmica (Delavaud, 2007).

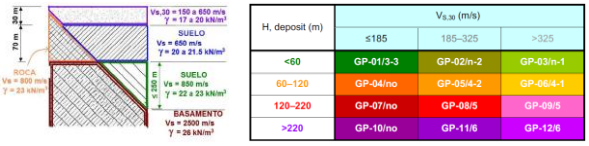


Figura 12. Esquema de velocidades de ondas de corte y peso unitario para el modelo geofísico/geotécnico utilizado para el estudio paramétrico de respuesta dinámica 1-D (izquierda) y grupos de perfiles de suelo genéricos (derecha) utilizados para la respuesta dinámica de sedimentos y las microzonas resultantes asociadas (Schmitz et al., 2020a).

Los espectros resultantes se grafican respecto a los espectros correspondientes de la norma COVENIN 1756 (2001) para los diferentes tipos de suelo (en la Figura 13 se muestran ejemplos de los espectros de los grupos de perfiles de mayor profundidad de sedimentos). Detalles del procedimiento, incluyendo los efectos de topografía, se indican en Hernández et al. (2011) y en Schmitz et al. (2011).

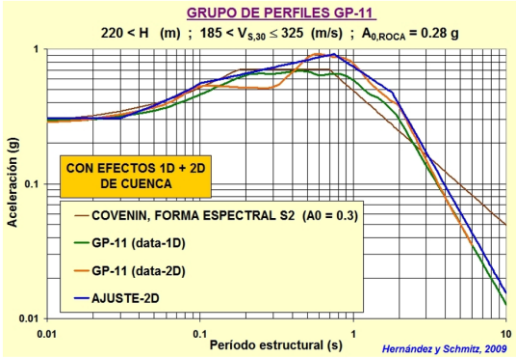


Figura 13. Ejemplo de espectros de respuesta elástica (ξ = 5%) para microzonas con espesor de sedimento de> 220 m (derecha), para VS, 30> 325 m / s (Hernández et al., 2011; Schmitz et al., 2011).

Determinación de microzonas sísmicas

Con el fin de ubicar las respectivas microzonas sísmicas se agruparon los mapas de Vs30 (Figura 9) y de especores de sedimentos (Figura 14) según los grupos de perfiles en la Figura 12. Para la definición de las microzonas de respuesta sísmica similar se añadieron varias fuentes de información, como el análisis geomorfológico, geológico y geofísico de los sedimentos en el valle, el análisis de las rocas expuestas en laderas, la evaluación de la topografía y el análisis de los daños reportados durante el terremoto de Caracas de 1967.

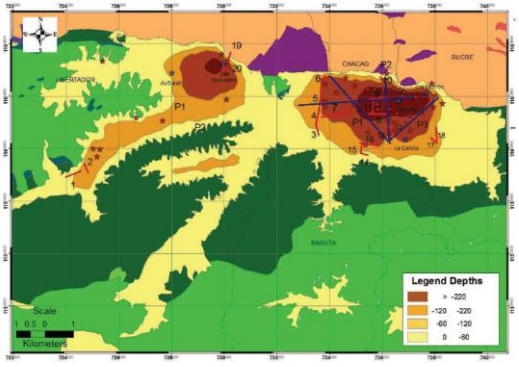


Figura 14. Espesores de sedimentos distribuidos en 4 clases para la definición de microzonas en Caracas (Amarís et al., 2011a).

En la Figura 15 se muestra el mapa final de microzonas con similar respuesta sísmica obtenido para el Área Metropolitana de Caracas (AMC). A cada microzona delimitada se le asigna un espectro de diseño (Figura 13) según su clase de sitio (Figura 12). Esta distribución de microzonas se calibró a través de diferentes variables, tales como perfiles de suelos "reales" de pozos profundos, períodos predominantes de H/V y funciones de transferencia experimental.

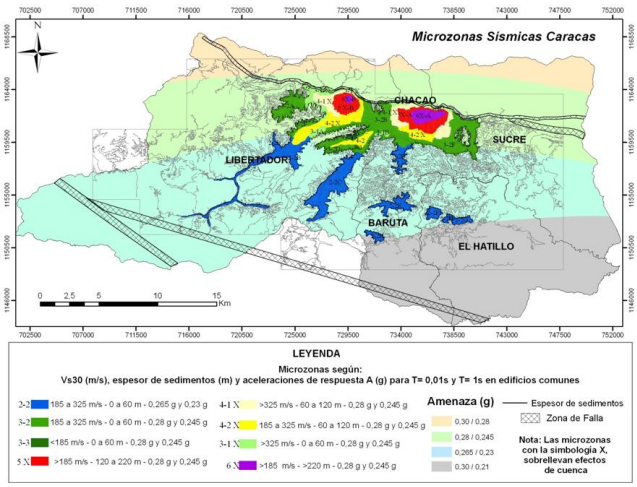


Figura 15. Zonificación de la amenaza sísmica en afloramientos de roca (macrozonas) y microzonas de comportamiento sísmico similar en el AMC (Schmitz et al., 2011).

Aplicación en la gestión del riesgo

Fuera de las áreas sedimentarias, el peligro de movimientos en masa activados por terremotos ha sido evaluado usando información geológica, geotécnica, geomorfológica, de pendientes y modificaciones antrópicas, mediante índices cuantitativos (detalles ver Hernández et al., 2008; 2023). Los resultados (Figura 16) permiten identificar las áreas de mayor prioridad para intervención y para la planificación urbana (ver Figura 5).

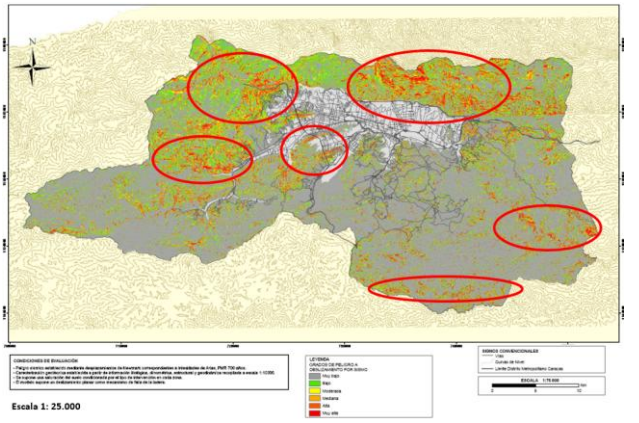


Figura 16. Peligro de deslizamientos por sismos en el AMC (Hernández et al., 2008); las zonas identificadas en rojo presentan regiones de mayor peligro.

Para la toma de decisiones sobre potenciales intervenciones para la mitigación del riesgo sísmico se incluyó la evaluación de edificaciones existentes respecto a su comportamiento estructural típico, orientada a establecer prioridades para su reforzamiento según su localización en las diferentes microzonas (Hernández y Domínguez, 2009). Esta información ha sido incorporada en un Sistema de Información Geográfico (SIG), el cual permitirá la interacción con las instituciones locales y planificadores urbanos para la rápida implementación de las recomendaciones, así como la interacción con las comunidades locales.

AVANCES DE PROYECTOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Área Metropolitana de Caracas

Durante el terremoto de Caracas/Litoral en el año 1967 se dio una concentración de los daños en las cuencas (Los Palos Grandes-Altamira y San Bernardino y Caraballeda) para edificaciones altas, lo que llevó a primeros estudios de la relación espesores de sedimentos – altura de edificios versus daños (Seed et al., 1970; Seed y Alonso, 1974). Murphy et al. (1969) realizaron estudios sísmicos determinando una profundidad de los sedimentos con 300 m en Los Palos Grandes y 120 m en San Bernardino. Mediante análisis de mediciones de ruido ambiental mediante H/V se determinaron periodos de vibración del suelo entre 0,2 s en roca y 1-1,6 s en Los Palos Grandes (Abeki et al., 1998a; Duval et al., 1998). Mediciones sísmicas realizadas en el año 2001 permitieron corroborar los espesores de sedimentos propuestos por Murphy et al. (1969) – cuyos datos originales nunca se publicaron, con definiciones detalladas de las velocidades de propagación de las ondas P y S (Sánchez et al., 2005a).

Se contó también con la información recopilada por el Proyecto Ávila (liderado por el IGVSB/MARNR en los años 2000 y 2003) y por el Estudio sobre el Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas en los años 2003-2005 (con el financiamiento de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, JICA). Durante este proyecto se estudiaron varios escenarios para desastres de terremotos (Yamazaki et al., 2005). Sin embargo, como no se pudo explicar la concentración de daños en la cuenca, se solicitó financiamiento en el marco del programa FONACIT- BID II 200400738 para el estudio de microzonificación sísmica de Caracas y Barquisimeto en los años 2005-2009. Para su ejecución, así como para los demás proyectos de microzonificación sísmica desarrollados, se siguió la metodología propuesta por Hernández et al. (2006), la cual se detalla en el capítulo previo con los respectivos resultados, los cuales se exponen en detalle en Schmitz et al. (2009a; 2011; 2020a; 2023c) y en Schmitz y Singer (2015).

Para la implementación de los resultados se iniciaron conversaciones con las direcciones municipales de Ingeniería Municipal, Planificación Urbana y Protección Civil de los 5 municipios del Área Metropolitana de Caracas en el año 2010. Después de definir el contenido de la ordenanza municipal, se sometió la ordenanza del municipio Libertador al concejo municipal en el año 2015. Después de su discusión en el concejo municipal, la primera ordenanza fue publicada en el año 2018 (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2018), basándose los espectros elásticos en la norma COVENIN 1756 (2001).

En el mismo año se reimpulsaron las conversaciones en los demás municipios del Área Metropolitana de Caracas. Los espectros elásticos y demás artículos en las ordenanzas municipales se ajustaron a las indicaciones de la norma COVENIN 1756 (2019). En el año 2021 se publicaron las respectivas ordenanzas en los municipios El Hatillo (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio El Hatillo del Estado Bolivariano de Miranda, 2021) y Sucre (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Sucre del Estado Miranda, 2021). Dada la vigencia de la nueva norma COVENIN 1756 (2019), la ordenanza del Municipio Libertador fue actualizada a las indicaciones de esta norma actualizada (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2024; Figura 17). En los municipios Chacao y Baruta se iniciaron conversaciones sobre la publicación de las respectivas ordenanzas municipales, sin embargo, aún no han sido discutidas en concejo municipal.

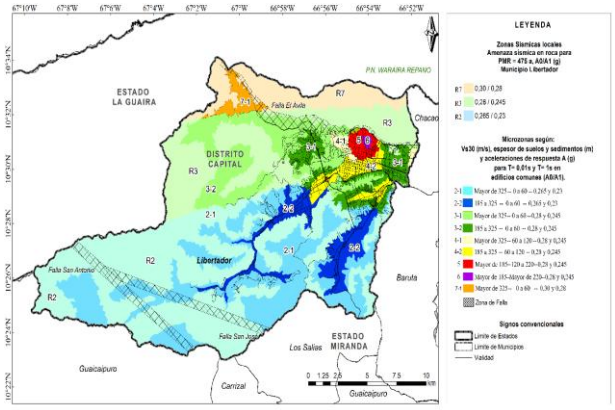


Figura 17. Plano de microzonas sísmicas y fallas tectónicas activas del Libertador.

A cada microzona sísmica se asocia un espectro elástico (por ejemplo: Municipio Libertador; Figura 18) con sus respectivos parámetros. Para la construcción de los espectros de respuesta se toma en cuenta el Período Medio de Retorno (PMR = 475 años para edificaciones comunes) de acuerdo con la microzona respectiva. Se emplearán los factores de importancia para el grupo de importancia y el PMR del proyecto. Se definirán factores de reducción de respuesta R, factores de amplificación de desplazamiento, factores de sobrerresistencia, factores de irregularidad y factores de redundancia en cada dirección de acción sísmica en cada dirección de la acción sísmica, acorde a las características particulares del proyecto (tipos estructurales, materiales y nivel de diseño), según los previstos en la norma COVENIN 1756 (2019).

Las ordenanzas municipales para edificaciones sismorresistentes contemplan la puesta en marcha de planes de gestión del riesgo sísmico, el reforzamiento estructural y sismorresistente. Dentro de estos planes toman un rol importante los mapas de peligro de deslizamientos (ver Figura 16), así como el reforzamiento estructural según la evaluación de vulnerabilidad en las diferentes microzonas de los municipios. En las ordenanzas se indica el orden de Revisión (priorización general) para los estudios de vulnerabilidad de edificaciones con el fin de definir las edificaciones de mayor urgencia para la realización de estudios de vulnerabilidad y su respectivo reforzamiento estructural, si amerita.

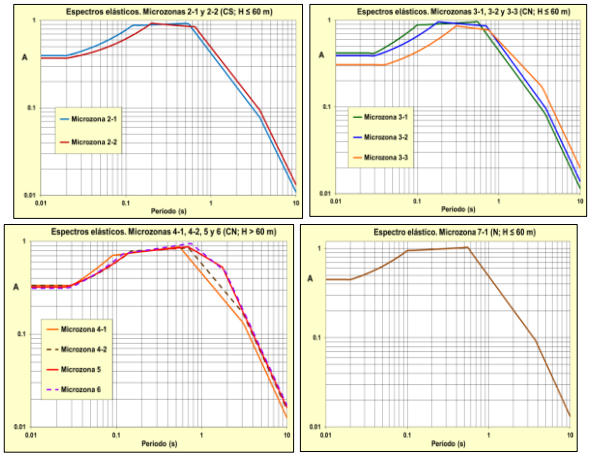


Figura 18. Espectros Elásticos en las Microzonas sobre roca meteorizada y depósitos sedimentarios para PMR = 475 años del Municipio Libertador (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2024).

Área Metropolitana de Barquisimeto -Cabudare

El proyecto de Microzonificación sísmica del Área Metropolitana de Barquisimeto -Cabudare se inició junto con el de Caracas en el mismo proyecto. Barquisimeto había sido afectado por terremotos destructivos en varias oportunidades, entre ellas 1812 y en el terremoto de El Tocuyo 1950 (Grases et al., 1999). La información técnica elaborada en las ciudades Barquisimeto y Cabudare ha sido presentada en Schmitz et al. (2009b) y se resume en Schmitz y Morales (2016) y Schmitz et al. (2020b)

La evaluación de la amenaza sísmica se efectuó en términos probabilísticos; como valor promedio se consideró 0,28 g que corresponde a la zona característica de la terraza de Barquisimeto y de la cuenca de Cabudare (Hernández et al., 2016). Además, este valor corresponde al valor expresado para la macrozona Centro-Norte de Caracas (Hernández y Schmitz, 2009; Morales et al., 2015) en el valle sedimentario y permite comparar los espectros resultantes para el Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare.

Basado en trabajos de fotointerpretación realizados a partir de las misiones 020266 (escala 1:20.000) del año 1968 y la misión 0201106 (escala 1:50.000) del año 1975, completados con trabajos de campo, Bechtold (2004) logró mejorar la delimitación de las unidades cuaternarias.

Mediante el reconocimiento geomorfológico se identificaron las geoamenazas, siendo los vicios de suelo y subsuelo originados por procesos de tubificación – colapso en el tope de la terraza de Barquisimeto y de menor extensión en la planicie aluvial de los ríos Claro y Turbio la principal amenaza (Figura 19). Además, se evaluaron las áreas posibles hacer afectadas por licuación de suelo y las inestabilidades por movimientos gravitacionales originados en el talud sur de la terraza de Barquisimeto (Timaure et al., 2016; Figura 20) y en las laderas adyacentes a Cabudare, así como las amenazas de origen hidrogeomorfológico (Rodríguez y Singer, 2016).

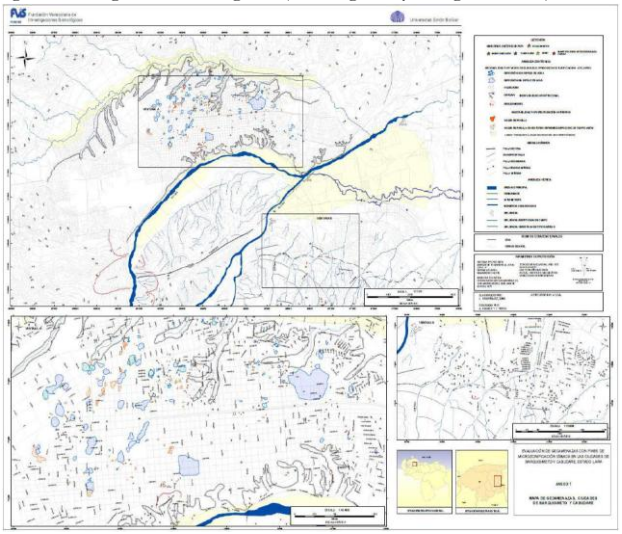


Figura 19. Mapa de geoamenazas sísmicas, geotécnicas e hídricas en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare (Rodríguez et al., 2005; Rodríguez y Singer, 2016).



Figura 20. Mapa de susceptibilidad a movimientos de la terraza sur de Barquisimeto (Timaure et al., 2016).

Para la caracterización de los sedimentos se emplearon diversos métodos, tanto geofísicos como geotécnicos, apoyados en su ejecución por trabajos de campo e información existente. La caracterización somera se llevó a cabo mediante empleo de información geotécnica existente (más de 100 ensayos SPT), sísmica de pozos (*downhole*) en dos pozos al basamento sísmico e instrumentado con alelerógrafos (uno en Barquisimeto y uno en Cabudare), exploración geotécnica y análisis de topografía. Mediante los ensayos SPT existentes,

suministrados por la Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado (UCLA), y mediante conversión de N° de golpes a Vs se generó un mapa de Vs30 (García et al., 2016).

Para la determinación de los espesores y las características de los sedimentos profundos que suprayacen a rocas cretácicas de las formaciones Barquisimeto, Bobare y Mamey, se consideró la geología local, así como estudios geofísicos (método de Nakamura o H/V, mediciones gravimétricas, sísmica de refracción profunda y los pozos perforados hasta roca con fines de instrumentación acelerográfica. Del análisis de unas 1200 mediciones de ruido ambiental con el método H/V resultan valores máximos del período fundamental del suelo de 0,8 s y 3,0 s en Barquisimeto y Cabudare, respectivamente, con menores valores hacia el norte y el oeste (Figura 21).

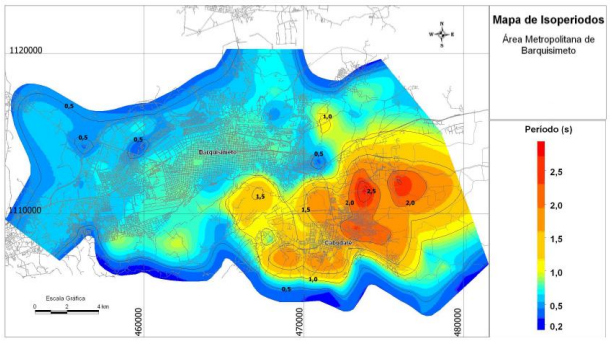


Figura 21. Mapa de períodos fundamentales del suelo del Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (Rocabado et al., 2007).

Para determinar la profundidad de los sedimentos se realizaron 5 perfiles sísmicos de hasta 3 km de longitud con explosivos como fuente, lo que permitió determinar las velocidades de propagación de las ondas P y S de los sedimentos y del basamento (Figura 22).

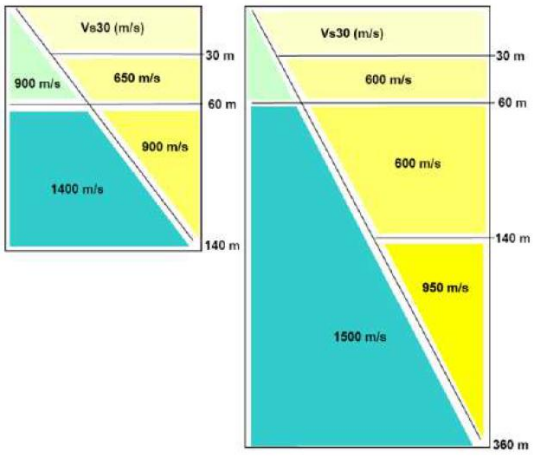


Figura 22. Modelo geológico/geofísico con velocidades Vs para los sedimentos de la terraza aluvial de Barquisimeto (izquierda) y para los sedimentos que rellenan la Cuenca de Tracción de Cabudare (derecha).

Como base para el modelado gravimétrico 3D sirvieron unas 670 mediciones gravimétricos, así como la información de profundidad proveniente de la conversión de períodos (Figura 21) a profundidad, las perforaciones geotécnicas profundas, así como los resultados de la sísmica como control. Se pudieron determinar profundidades del espesor de sedimentos de máximo 140 m en Barquisimeto y cercanas a 400 m en Cabudare (Figura 23).

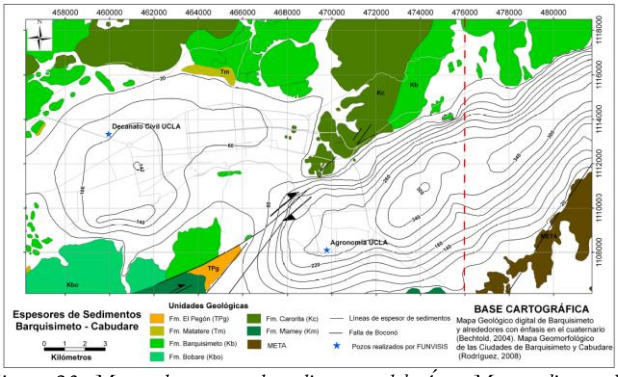


Figura 23. Mapa de espesor de sedimentos del Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (Reinoza et al., 2011; Schmitz et al., 2019).

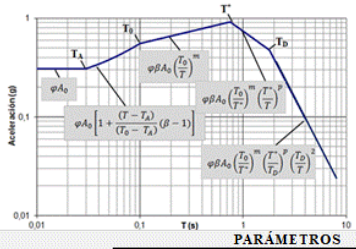
Abreu et al. (2016) estimaron la respuesta sísmica de Barquisimeto a lo largo de perfiles 2D de simulación de propagación de ondas. Los resultados permiten ajustar los espectros de respuesta derivados del análisis 1-D.

La selección de las microzonas de igual respuesta sísmica en sedimentos y laderas se basa en la respuesta sísmica proveniente del estudio paramétrico 1D incorporando efectos de cuenca 2D mediante un análisis lineal-equivalente (Schnabel et al., 1972) según las características de los sedimentos (Figura 22) y su espesor (Figura 23). para la definición de los espectros de cada microzona sísmica se emplearon los valores A0 = 0,28 g y A1 = 0,245 g de la macrozona Centro Norte de Caracas (Hernández y Schmitz, 2009).

La delimitación de las microzonas sísmicas se realizó en función de la calidad del suelo superficial (Vs30) y del espesor de sedimentos (Figura 23), con agrupación de 4 clases de espesores, ajustadas las microzonas a los límites catastrales. Mediante la calibración del modelo de subsuelo con estudios geofísicos y registros sísmicos en los observatorios acelerográficos en Barquisimeto y Cabudare se efectuaron comparaciones con los espectros de respuesta para estas microzonas (Morales et al., 2015). Los espectros (Figura 24) son asociados a cada microzona en el Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (Figura 25).

Las respectivas ordenanzas municipales fueron preparadas en conjunto con las respectivas alcaldías y concejos municipales (Schmitz et al., 2017) y publicadas en el año 2018 (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes del Municipio Iribarren, 2018; Ordenanza de Microzonificación Sísmica del Municipio Palavecino, 2018). Dentro de las ordenanzas, la evaluación de vulnerabilidad de las edificaciones en las diferentes microzonas y su eventual reforzamiento estructural y sismorresistente dentro de los planes de gestión del riesgo toman un lugar importante. Se basan en gran parte en la distribución de las edificaciones en Barquisimeto y

Cabudare (Rojas et al., 2016) y en la evaluación de edificaciones tipificadas (Hernández y Domínguez, 2009) y se realizó la sectorización de las ciudades, siendo de mayor urgencia el reforzamiento de las edificaciones escolares (López et al., 2015).



MICRO-ZONA SÍSMICA	Vs30 (m/s)	H (m)	PARÁMETROS								
			A_0 (g)	φ	β	T_A (s)	T_0 (s)	T* (s)	T_D (s)	m	p
1	>650	-	0.28	1	2.35	0.02	0.10	0.38	2.8	0	1
2	325 a 650	≤ 60	0.28	1.50	2.10	0.03	0.10	0.55	2.6	-0.05	1.40
3	185 a 325	≤ 60	0.28	1.40	2.45	0.03	0.18	0.70	2.0	0.08	1.30
4	<185	≤ 60	0.28	1.10	2.80	0.04	0.3	0.75	2.0	0.12	1.00
5	325 a 650	60 a 120	0.28	1.20	2.10	0.03	0.09	0.55	2.0	-0.12	1.10
6	185 a 325	60 a 120	0.28	1.20	2.35	0.03	0.18	0.70	1.9	-0.05	1.10
7	325 a 650	120 a 220	0.28	1.20	2.10	0.03	0.09	0.60	1.50	-0.10	0.55
8	185 a 325	120 a 220	0.28	1.15	1.80	0.03	0.10	0.70	1.5	-0.20	0.55
9	185 a 325	>220	0.28	1.10	1.80	0.03	0.10	0.75	1.80	-0.25	0.75

Figura 24. Espectro Elástico para el Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare según Hernández et al. (2011) (arriba) con los respectivos parámetros para su construcción (abajo).

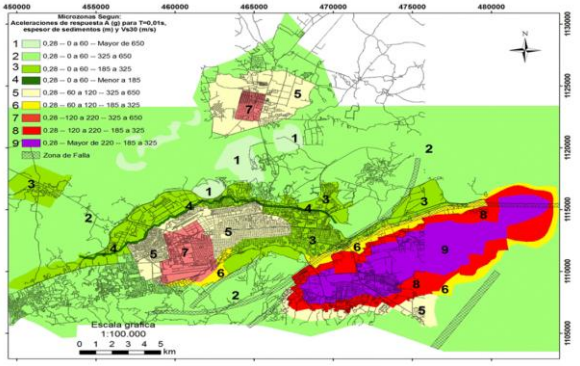


Figura 25. Mapa de microzonas sísmicas y fallas activas del Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (García et al., 2016).

Carora y otras ciudades en el Estado Lara (El Tocuyo, Quíbor, Duaca)

En el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica del Estado Lara iniciado en el año 2006, que contó con el apoyo económico de la Gobernación del Estado Lara y FUNVISIS, se realizaron estudios en las ciudades Carora, El Tocuyo, Quíbor y Duaca. Carora está ubicada en el borde suroriental de la cuenca con el mismo nombre, sobre sedimentos cuaternarios, depositados discordantemente sobre rocas de las formaciones Barquisimeto (Cretácico Superior) y Matatere (Paleoceno – Eoceno) (Oropeza, 2012) en una zona de moderada sismicidad con un valor A0 de 0,18 g (Hernández y Schmitz, 2019).

Para la evaluación del subsuelo se procesaron 915 datos correspondientes a la cuenca Sabana de Carora y 86 puntos en la ciudad de Carora (Martínez, 2007). Se adquirieron 192 mediciones de ruido ambiental con una duración de 20 minutos; resultaron valores de los períodos de vibración del suelo entre 0,6 y 1,7 s con valores menores a 0,6 s en el sur y oeste (Figura 26). Mediante la adquisición de perfiles largos de Refracción de Microtremores (ReMi) se pudieron determinar profundidades a un basamento sísmico con Vs de 1600 m/s entre 75 y 135 m (Duque et al., 2011).

Zerpa (2019) aplicó la técnica de decremento aleatorio (RayDec; Hobiger et al., 2009) para la inversión de las curvas de elipticidad de las ondas Rayleigh a los datos de Paolini (2006), lo que permitió desarrollar perfiles de Vs versus profundidad con espesores entre 30 y 230 para Vs del basamento entre 1250 m/s y 1550 m/s para la Formación Matatere (Centro, Norte y Este de Carora) y entre 1550 m/s y 1800 m/s para la Formación Barquisimeto (suroeste de Carora) con un valor promedio del basamento sísmico de Vs = 1400 m/s.

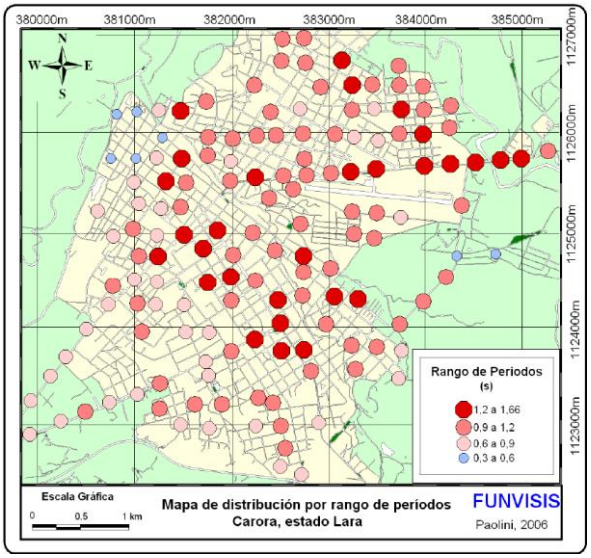


Figura 26. Períodos de vibración del suelo de Carora (Paolini, 2006).

Con la integración de la información disponible (gravimétrica, H/V, ReMi) y los perfiles Vs mediante la inversión RayDec se elaboraron mapas de espesores de sedimentos de Carora clasificado en 3 rangos (30-80 m, 80-150 m y 150-230 m) (Zerpa, 2019) y de Vs30 inferido desde el relieve (siguiendo la metodología de Allen y Wald, 2009) clasificado en 2 rangos, de 200-400 m/s y mayor a 400 m/s (Figura 27). Para estimar la respuesta sísmica en superficie se desarrollaron evaluaciones de la amenaza sísmica en roca y en los sitios sedimentarios (Hernández et al., 2021).

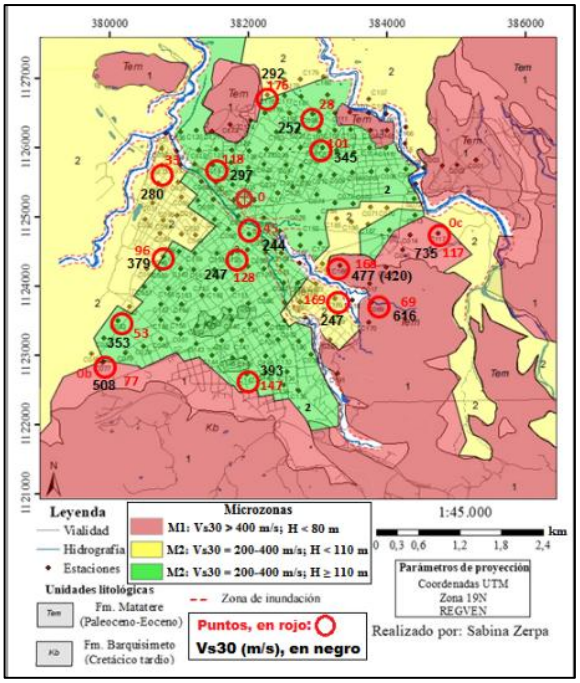


Figura 27. Mapa microzonas sísmicas de Carora; se muestran los sitios de evaluación de la respuesta sísmica indicando Vs30 (derecha).

Basado en el análisis de los resultados se distinguen dos microzonas sísmicas, una en sedimentos someros de hasta 80 m con Vs30 > 400 m/s, y otra con Vs30 de 200-400 m/s y profundidad del basamento sísmico mayor a 80 m (diferenciada para espesores menores y mayores de 110 m). Se especificaron los espectros de diseño asociados a cada una, para diferentes períodos de retorno (PMR = 225, 475, 689 y 975 años). Los espectros de respuestas (Figura 28) deberán ser implementados a través de una ordenanza municipal que oriente las nuevas construcciones, así como la gestión del riesgo sísmico de las edificaciones existentes.

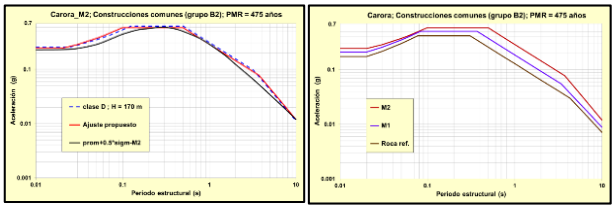


Figura 28. Espectro representativo, ajuste propuesto y normativo para la microzona M2 (izquierda) y espectros ajustados en roca y para las microzonas M1 y M2 (derecha) para PMR = 475 años (Schmitz et al., 2023b).

El Tocuyo se encuentra ubicado en la cercanía de importantes fallas, como es el sistema de fallas de Boconó, responsables para la elevada amenaza sísmica de A0=0,33 g (Hernández y Schmitz, 2019). La ciudad, ubicada en un valle cuaternario (Figura 29), fue parcialmente destruida por el terremoto del 3 de agosto de 1950 con una magnitud de ~ 6,9.

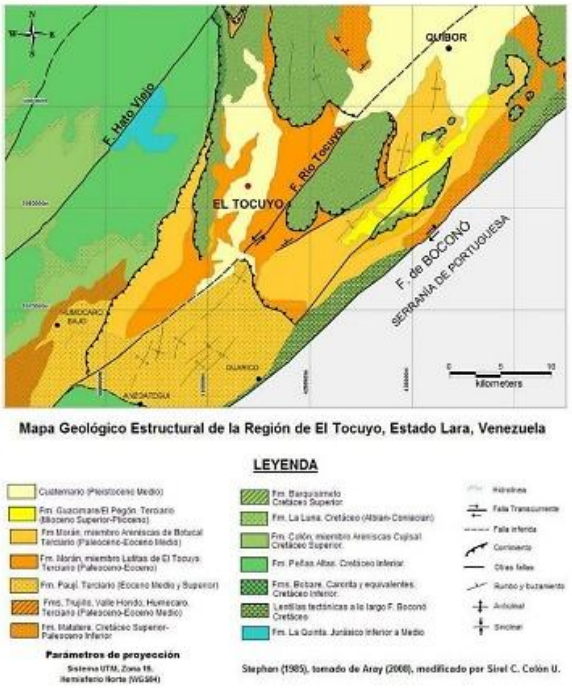


Figura 29. Mapa geológico estructural de la región El Tocuyo (Silva et al. 2023; modificado de Stephan, 1985).

Los trabajos realizados en El Tocuyo comprendieron estudios geológicos (Colón, 2009) y geofísicos (Aray, 2008; Duque et al., 2011; Ávila et al., 2012; 2016) con el fin de determinar microzonas sísmicas preliminares basados en la integración de información del subsuelo y plantear espectros de respuesta asociados a ellas (Silva et al., 2023).

El mapa de Vs 30 (Silva et al. 2023) se basa en el análisis de la topografía, integrado con resultados de mediciones sísmicas. La distribución de los resultados de Vs30 observados están relacionados con la geología de El Tocuyo, en su mayoría terrazas. sobre rocas pertenecientes a la Formación Morán (Paleoceno-Eoceno), específicamente a su Miembro de Lutitas de El Tocuyo (Colón, 2009).

Basado en los análisis de mediciones de ReMi se obtuvieron velocidades Vs30 entre 250m/s y 450m/s. Los sedimentos no consolidados poseen un espesor promedio de 60m y están asociados a velocidades de 540m/s y los sedimentos consolidados están caracterizados por velocidades de 900m/s, cuyas capas tienen espesores promedios de 50m (Duque et al., 2011). El basamento sísmico con un Vs mayor a 1200 m/s podría ubicarse a cierta profundidad dentro de las lutitas de la Formación Morán o en el tope de las formaciones Colón y Barquisimeto.

Se establecieron perfiles de respuesta sísmica con variación de litología para una orientación general, teniendo como referencia información geotécnica. Se definieron para El Tocuyo 4 grupos de microzonas sísmicas preliminares (Figura 30), basado en los valores Vs30. Las bajas velocidades Vs30 de 200 - 300 m/s (grupo MS-4) se deben a los sedimentos

aluvionales en el centro de la cuenca. Hacia los bordes de la cuenca se encuentran microzonas sísmicas con Vs30 de 300-400 m/s y de 400-650 m/s, diferenciados por su profundidad al basamento (hasta 150 m o más de 150 m). En las zonas de alto relieve topográfico predomina los grupos MS-2 y MS-1 (roca). Las partes bajas de la cuenca (grupo de microzonas sísmicas MS-4) podrían ser propensos a fenómenos de licuación del suelo, mientras en la zona de alta topografía (grupos de MS-1 y MS-2) podría haber un peligro de deslizamientos.

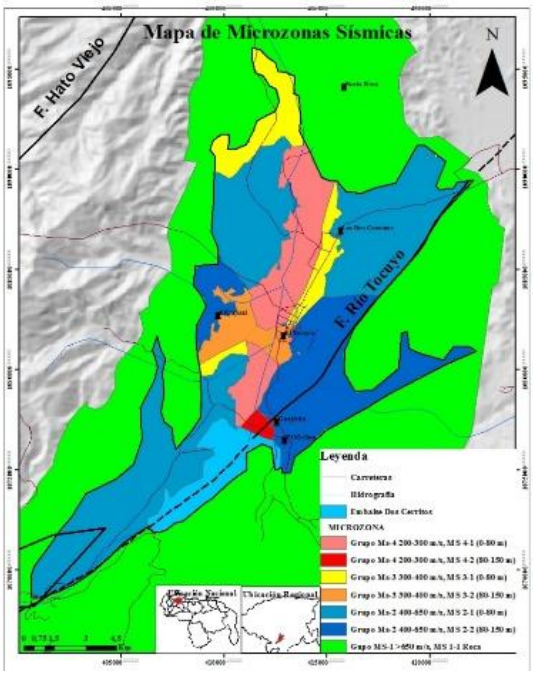


Figura 30. Mapa de microzonas sísmicas preliminares para El Tocuyo (Silva et al., 2023).

La ciudad de Quíbor (Municipio Jiménez) se ubica al sur de la depresión del Valle de Quíbor (Figura 29), una región fértil de gran producción agrícola. Se ubica cercano a la Falla Río Tocuyo; el valor de la amenaza sísmica A0 es 0,25 g (Hernández y Schmitz, 2019). Para la caracterización del subsuelo de la ciudad se realizaron investigaciones geológicas y geofísicas (Valls, 2008; Wurst, 2010; Duque et al., 2011; Ávila et al., 2012; 2016). Se midió el ruido ambiental en 158 sitios en la zona, obteniendo períodos predominantes entre 0,2 s en la cercanía de los afloramientos de la Formación Morán y 1,6 s en la zona más distante a los afloramientos (Figura 31).

Basado en los resultados de perfiles ReMi se obtuvieron espesores de sedimentos de aproximadamente 200 m con Vs30 promedio de 350 m/s y velocidades Vs de 550 m/s hasta 110 m de profundidad y 840 m/s hasta el tope del basamento con 1300 m/s (Duque et al., 2011). Para el modelado 3D de los espesores de sedimentos se realizaron unas 200 mediciones gravimétricas distribuidas en la ciudad de Quíbor (Valls, 2008) y en toda la depresión del Valle de Quíbor (Wurst, 2010). Tanto a nivel de la ciudad de Quíbor como en todo el valle se observan variaciones importantes en los espesores de sedimentos, que varían entre 250 y 400 m con una topografía importante del tope de roca (Formación Morán) (Figura 32).

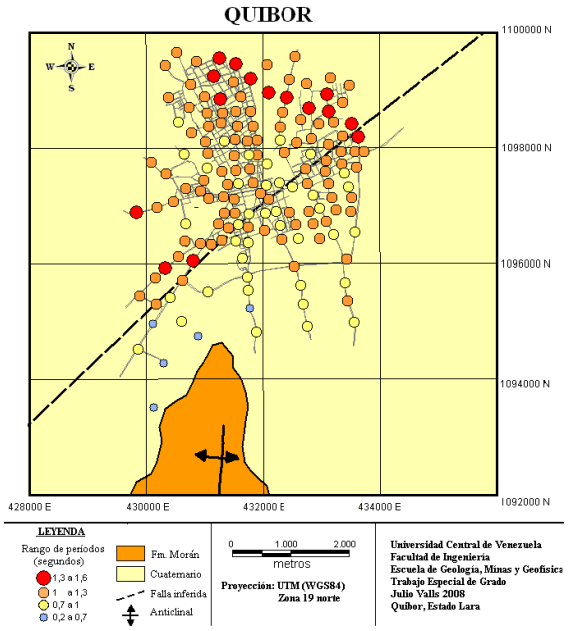


Figura 31. Mapa de los períodos predominantes del suelo de Quíbor (Valls, 2008).

En la parte montañosa del municipio Jiménez se activó en el año 2012 un deslizamiento que abarcó gran parte del pueblo de Cubiro. Se trata de deslizamientos fósiles reactivados por las filtraciones de nuevos desarrollos y falta de mantenimiento de quebradas, lo que requiere el reasentamiento de una parte de la población (Dasco et al., 2013).

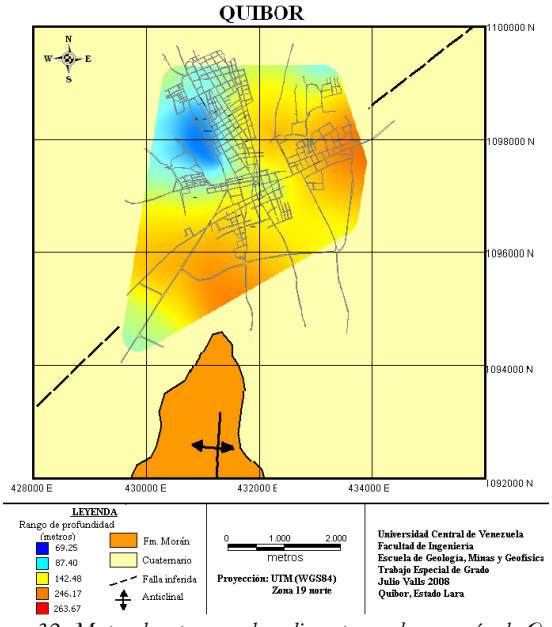


Figura 32. Mapa de espesores de sedimentos en la cercanía de Quíbor (Valls, 2008).

Duaca (Municipio Crespo) está ubicado unos 35 km al noreste de Barquisimeto en una meseta montañosa. Las investigaciones geofísicas incluyeron 48 mediciones de ruido ambiental y 106 mediciones gravimétricas (Hernández, 2008), así como 3 perfiles ReMi (Duque et al., 2011). Los períodos fundamentales resultantes varían entre 0,2 s sobre sitios en la Formación Bobare y 0,91 s en la parte central de Duaca (Hernández, 2008).

Los espesores de sedimentos (Figura 33) se determinaron mediante modelado gravimétrico 3D tomando como control los espesores obtenidos por perfiles ReMi (Duque et al., 2011). Los máximos espesores de 220 metros se ubican en el centro de Duaca con valores promedio de Vs30 de 400 m/s, seguido por sedimentos no consolidados con Vs de 700 m/s hasta unos 100 m de profundidad y en la parte baja sedimentos consolidados con Vs de 1170 m/s.

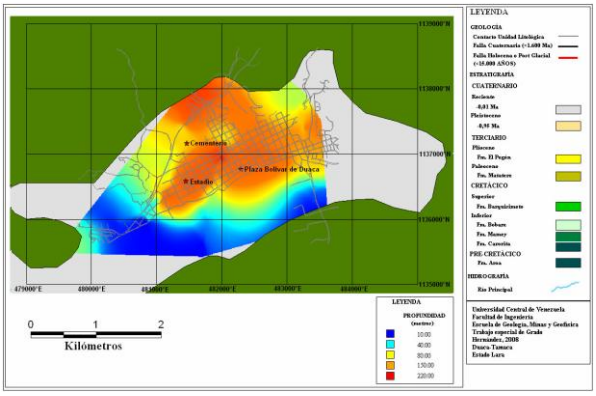


Figura 33. Mapa de espesores de sedimentos de Duaca (Hernández, 2008; geología base de Bellizia y Rodríguez, 1968, modificado de Bechtold, 2004).

Cumaná y ciudades en el Estado Sucre (Carúpano, Cariaco)

Cumaná, ubicada en el extremo norte de la Serranía del Interior, se encuentra asentada sobre sedimentos fluvio-deltaicos del río Manzanares y de la llanura costera. La traza de la falla de El Pilar cruza la ciudad, por lo cual Cumaná es una de las ciudades venezolanas más afectadas por sismos destructores a lo largo de los años (1530, 1684, 1766, 1797, 1853, 1929 y 1997; Grases et al., 1999).

A comienzos de los años 90, se evaluó la seguridad sísmica del hospital de Cumaná por estar ubicado muy cerca de la traza de la Falla El Pilar (e.g. OPS, 1995). Posterior al terremoto de Cariaco de 1997 se realizaron mediciones de ruido ambiental (Abeki et al., 1998b), pudiendo correlacionarse los periodos predominantes mayores a 1 s con los sedimentos deltáicos del río Manzanares y los depósitos marinos costeros (Figura 34).

En el año 2001 se realizaron mediciones sísmicas en torno al hospital para precisar la ubicación de la Falla El Pilar (Schmitz et al., 2006) y en el año 2009 se inició el Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cumaná (LOCTI) por FUNVISIS. El Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos (CIGIR, Mérida) gestionó con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) un proyecto de Microzonificación Sísmica en Cumaná con la Universidad de Oriente (años 2017-2018) y posteriormente con Total Energies proyectos para la socialización de las amenazas (EDURIESGO 3.0 y APPMENAZAS 1.0, años 2019-2020).

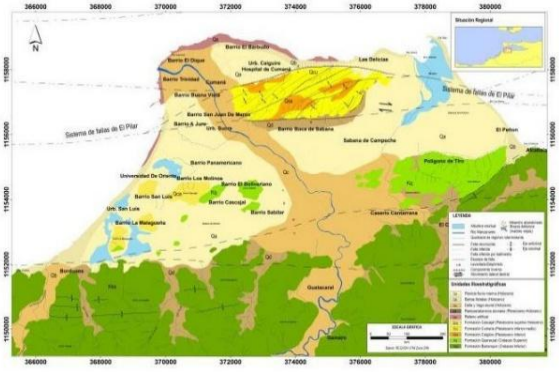


Figura 34. Geología de Cumaná, ubicada al norte de la Serranía Interior (Aray et al., 2015, basada en Viete, 2012).

La caracterización del subsuelo de la ciudad de Cumaná se realizó a través de la integración de estudios geofísicos de ruido sísmico ambiental (Aray et al., 2010; 2015), gravimetría (Cruces et al., 2008), sísmica de refracción (Schmitz et al., 2006; Román, 2011) e información de una perforación geotécnica (Oropeza, 2011). Se adquirieron más de 200 estaciones de ruido sísmico ambiental, confirmando los resultados las observaciones de Abeki et al. (1998b) con valores encima de 1 s (1-1,4 s) (Figura 35). Hacia los afloramientos de la Serranía del Interior en el sur, los valores bajan a 0,1 s. Se realizaron además análisis de las características de las curvas H/V con picos en diferentes rangos de períodos (F. Bonive, comunicación personal, 2018). La evaluación de las intensidades del sismo de Cariaco de 1997 realizada sobre todo en el centro de Cumaná, muestra la coincidencia de intensidades entre 6 y 7 con zonas de mayor período fundamental del suelo (Lang et al., 2004).

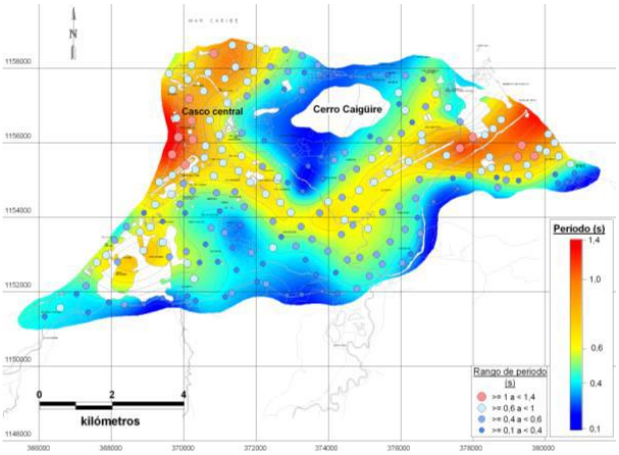


Figura 35. Mapa de períodos fundamentales de vibración del suelo de Cumaná (Aray et al., 2015).

El mapa de Vs30 se obtuvo aplicando la metodología de Allen y Wald (2009) a la topografía (Aray et al., 2010). Los valores obtenidos por García (2019) mediante el análisis de

mediciones MASW coinciden en gran medida, mostrando valores menores con Vs30 entre 150 y 200 m/s en la barra litoral.

Para determinar la profundidad de los sedimentos cuaternarios, así como de la profundidad al tope de los estratos cretácicos (formaciones Querecual y Barranquín) se analizaron aproximadamente 700 estaciones gravimétricas con un espaciamiento promedio de 250 m (Cruces, 2008) mediante un modelado 3D, usando como amarre los resultados de 4 perfiles sísmicos (Román, 2011; Schmitz et al., 2006), una perforación hasta 230 m de profundidad (Oropeza, 2011) y los períodos fundamentales del suelo (Aray et al., 2010). Los mayores espesores de sedimentos cuaternarios se acumularon en la zona de la actual desembocadura del río Manzanares en el centro con más de 60 m y en el antiguo delta del río Manzanares en el este con más de 300 m (Figura 36). Farías (2017) determinó profundidades al tope de los estratos cretácicos aún mayores (más de 800 m) mediante la inversión 1D de datos de ruido ambiental a lo largo de 2 perfiles. Indica velocidades Vs para los sedimentos cuaternarios de 200-700 m/s, de los sedimentos terciarios (Formación Caigüire) entre 1000 y 1300 m/s y del tope del Cretácico entre 1700 y 3200 m/s.

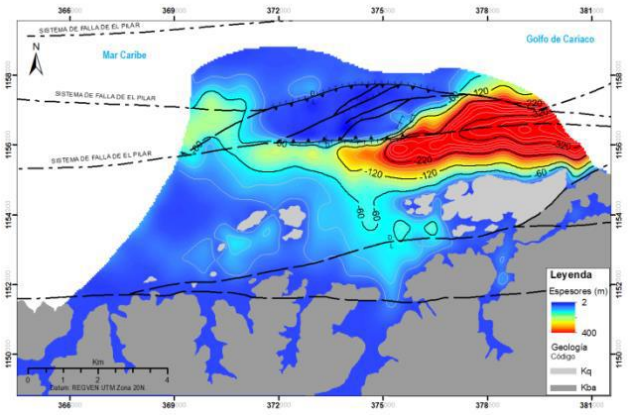


Figura 36. Mapa de espesores de sedimentos cuaternarios obtenidos a partir del modelado gravimétrico para la ciudad de Cumaná (Aray et al., 2015).

Considerando los efectos de licuación observados durante el terremoto de Cariaco de 1997, Olivier (2009) aplicó los procedimientos de Idriss y Boulanger (2004) y Cetin et al. (2001) a los datos provenientes de más de 100 perforaciones geotécnicas, calibrado los valores Vs con datos sísmicos. Las zonas cercanas a la costa y en la desembocadura del río Manzanares, pero también una delgada franja en el sur, resultaron con alto a muy alto potencial de licuación (Olivier, 2009).

Para determinar las amplificaciones y su variabilidad frecuencial, se realizó un modelado de la respuesta sísmica de Cumaná para frecuencias de 0.5 y 1 Hz (Abreu y Schmitz, 2009). Las mayores amplificaciones se observaron para sismos lejanos para la frecuencia de 0,5 Hz y para sismos lejanos para 1 Hz. Basado en el valor de amenaza en roca de A0 = 0,54 g (COVENIN 1756 (2019) se elaboraron espectros preliminares para las microzonas (J.J. Hernández, comunicación personal, 2018). Sin embargo, estos no se finalizaron, ya que la prórroga prevista del proyecto BID del CIGIR no se pudo realizar.

Mediante la integración de los estudios geológicos y geofísicos se generó un mapa de microzonas sísmicas preliminares donde se delimitaron aquellas regiones de igual respuesta sísmica (Figura 37). Del Cerro de Caigüire hacia la costa, así como en dos partes al sur se presentan suelos duros o sedimentos terciarios (formaciones Caigüire y Cumaná) o cretácicos (Formación Querecual) aflorando o a poca profundidad en la Microzona 1-1 con Vs30 entre 325 y 650 m/s. Al norte de la desembocadura del río Manzanares y las zonas centro-sur de la ciudad se ubican en la Microzona 1-2 con espesores de sedimentos menores a 60 m y Vs30 entre 185 y 325 m/s. Al sur, a lo largo del río Manzanares, los espesores de sedimentos aumentan a 60 a 120 m (predominantemente Microzona 2-2 con Vs30 entre 185 y 325 m/s). Los grupos de microzonas 3 y 4, con espesores de sedimentos de 120 a 220 m y mayores a 220 m, respectivamente, se ubican en el este de Cumaná.

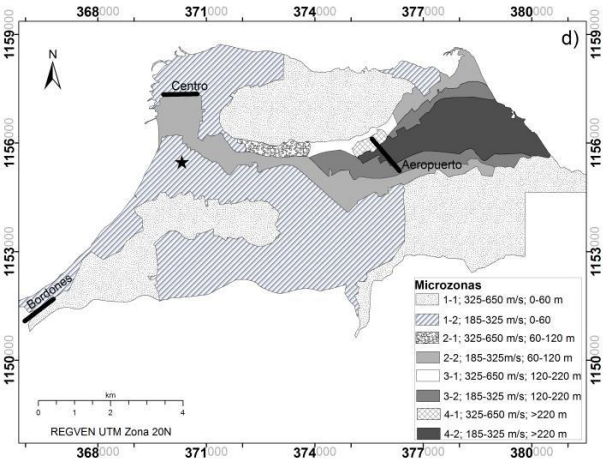


Figura 37. Mapa de microzonas sísmicas preliminares para la ciudad de Cumaná (Aray et al., 2015). La estrella indica la ubicación de la perforación geotécnica de Oropeza (2011). Las líneas negras indican la ubicación de los perfiles sísmicos de Román (2011).

Debido a los daños en las escuelas sufridas durante el terremoto de Cariaco 1997 en el estado Sucre, se analizaron las edificaciones escolares en Venezuela (López et al., 2015). Coronel y López (2010) determinaron el nivel del riesgo sísmico para las edificaciones escolares en el Estado Sucre para su priorización en planes de gestión del riesgo. Para varias edificaciones escolares ya se dispone de planes detallados para su reforzamiento. Es urgente la finalización de la microzonificación sísmica de Cumaná con la elaboración de los espectros respectivos y su implementación en ordenanza municipal, así como la pueste en marcha del plan de gestión del riesgo con los respectivos reforzamientos para mitigar el riesgo sísmico.

En el marco de los proyectos en torno al Complejo Industrial Gran Mariscal de Ayacucho (CIGMA) se evaluó la amenaza sísmica en Carúpano, ubicado al norte de la península de Paria

(Molina et al., 2008). La aceleración pico (A0) para PMR de 500 años fue evaluada en 0,41 g para el puerto de Carúpano, algo mayor que los 0,35 g según la norma COVENIN 1756 (2019). La ciudad está ubicada en un valle aluvional encima de rocas de las formaciones Carúpano y Tunapui.

Se realizaron mediciones de ruido ambiental y gravimetría para determinar los períodos predominantes del suelo y el espesor de los sedimentos (Pacheco, 2008; Paolini et al., 2009). Los máximos valores de períodos se observaron en el centro de Carúpano con 1.1s, disminuyendo hacia los bordes de la cuenca (Molina et al., 2008). Los espesores determinados por la inversión de las mediciones de ruido ambiental, aplicando los métodos de RayDec o campo difuso, superaron los 150 m (Figura 38).

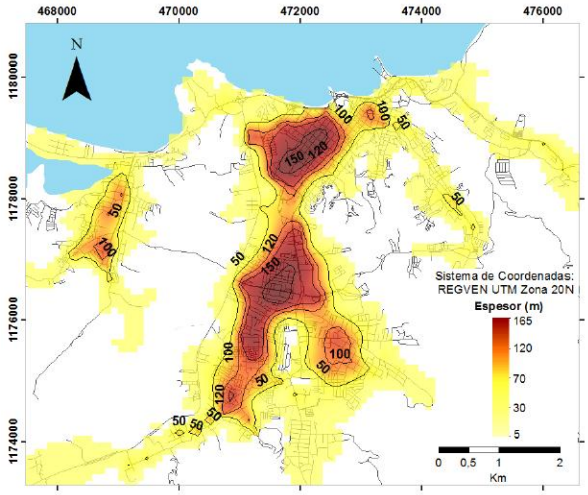


Figura 38. Mapa de espesores de sedimentos basado en la inversión de datos de mediciones de ruido ambiental (Hinojosa et al., 2021).

Acosta et al. (2021) generaron un mapa de Vs30 de Carúpano aplicando la metodología de Allen y Wald (2009) al modelo digital del terreno. Los valores de Vs30 varían dentro del valle aluvional de Carúpano entre 200 y 400 m/s y aumentan hacia las laderas con los afloramientos de las formaciones Carúpano y Tunapui.

El terremoto de Cariaco de 1997, de magnitud 6,9, ocurrió a lo largo de la falla El Pilar, en el este de Venezuela, y fue el terremoto más destructivo en Venezuela desde el terremoto de Caracas de 1967. El terremoto causó 73 muertos y 531 heridos; los daños a las edificaciones se concentraron principalmente entre la ciudad de Cariaco, ubicada a 10 km del epicentro, y Cumaná, capital del estado Sucre, a unos 70 km al oeste (e.g. FUNVISIS et al., 1997). En Cariaco se produjeron derrumbes de dos escuelas, daños en un banco y un hotel en construcción, así como el derrumbe de una parte importante de las casas de bahareque locales. Muchas de las casas de bahareque, así como una camaronera local, se vieron afectadas por la licuefacción y deslizamiento lateral (De Santis y Hernández, 1999). Se observó una ruptura en superficie de la Falla El Pilar de 0,4 – 1 m de desplazamento a lo largo de 35 km. El valor A0 de la amenaza en roca es 0,54 g según la norma COVENIN 1756 (2019).

Se realizaron estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos para caracterizar las condiciones del suelo en Cariaco y sus alrededores, incluyendo mediciones de microtremores en 64 sitios (Figura 39) y refracción sísmica enfocadas en suelos blandos (Masaki et al., 1999; González et al., 2004). Los períodos predominantes del suelo varían entre 0,6 y 1,2 s.

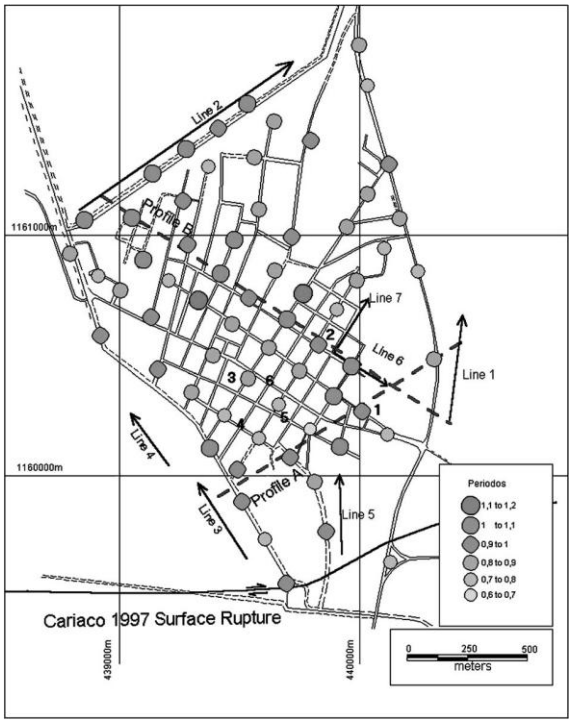


Figura 39. Mapa de períodos predominantes de Cariaco. Los números indican la ubicación de las líneas de sísmica de refracción (González et al., 2004).

De un modelado gravimétrico, en el cual se identifican rocas metamórficas de la cordillera Araya – Paria en el norte y rocas sedimentarias de la Serranía del Interior en el sur, se determina la cobertura sedimentaria con una profundidad máxima de 270 m en el centro de la cuenca, con areniscas y calizas del Mio-Plioceno por debajo. Los espesores disminuyen hacia el sur, donde alcanzan 120 m en el contacto con la falla (Figura 40).

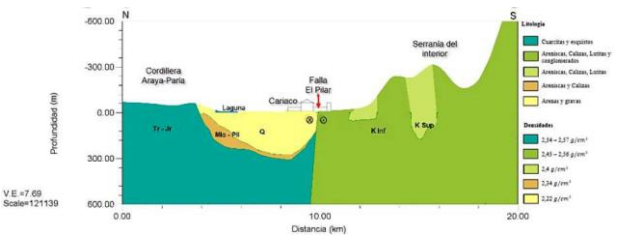


Figura 40. Modelo gravimétrico de Cariaco (Crasto et al., 2021).

El alto porcentaje de daños en el centro de Cariaco se puede atribuir a la mala calidad de las viviendas, combinada con la presencia de suelos gruesos y poco consolidados y, en algunos casos particulares, a fenómenos de licuefacción. Las obras de

refuerzo sísmico son una tarea urgente, ya que aún existen numerosos edificios escolares vulnerables en la región. La finalización de los estudios de microzonificación sísmica con el cálculo de la respuesta en superficie y el desarrollo de ordenanzas municipales proporcionarían a Cariaco herramientas para construir edificios más seguros en el futuro.

CIUDADES EN EL MARCO DEL PROYECTO GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO EN ESPACIOS URBANOS

En el año 2008 se inició el proyecto Investigación Aplicada a la Gestión del Riesgo en Espacios Urbanos (Proyecto FONACIT 2007000939) en las áreas metropolitanas de Mérida, Valencia, Maracay y Barcelona, así como en Valle de La Pascua (Vernáez et al., 2011; Schmitz et al., 2015). Valle de La Pascua se seleccionó como ciudad con potencial crecimiento futuro en el Eje Norte Llanero. Se estudiaron aspectos relacionados con la presencia de las diferentes amenazas en las regiones, como las amenazas hidrometeorológicas, el peligro de deslizamientos y amenazas tecnológicas. No se ha logrado una integración de las diferentes amenazas y riesgos; los resultados parciales de la amenaza sísmica han sido utilizados en la planificación urbana, faltando el desarrollo de los espectros en superficie para una mejor estimación de los efectos esperados, y por tanto una confiable herramienta para la mitigación del riesgo sísmico

Área Metropolitana de Valencia

La geología del Área Metropolitana de Valencia (AMV) está caracterizada por las unidades de la Asociación Metamórfica del Ávila. La cuenca del Lago de Valencia tiene una geomorfología dominada por las planicies lacustrinas y aluviales cercano al lago y los valles aluviales y, en la transición a las rocas del Complejo San Julián aflorando, el piedemonte (Figura 41). El valor A0 de la amenaza en roca es 0,15 g según la norma COVENIN 1756 (2019), considerablemente menor que los 0,3 g de la norma anterior (COVENIN 1756, 2001).

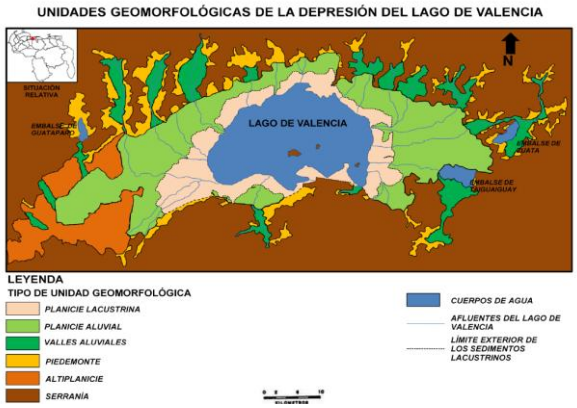


Figura 41. Unidades geomorfológicas en la región de Valencia – Maracay (tomado de Zinck, 1980) (Gil, 2021).

Mediante un modelado 3D gravimétrico, Romero (2017) evaluó los espesores de sedimentos en la cuenca del Lago de Valencia basado en la compilación de 580 datos terrestres y datos satelitales con datos sísmicos de amarre (Rocabado et al., 2011). Los valores máximos en la cuenca alcanzan unos 300 m en la parte oeste y 350 m en la parte este de la cuenca (Romero, 2017).

Localmente, se alcanzaron profundidades de sedimentos grandes en los valles aluvionales, en el caso del valle de Valencia más de 300 m (Figura 42; Goitia, 2012) con una perforación a 240 m de profundidad (Schmitz et al., 2015). Sin embargo, los períodos predominantes del suelo, alrededor de 1,4 s en Valencia, no reflejan estos grandes espesores (Rocabado et al., 2011).

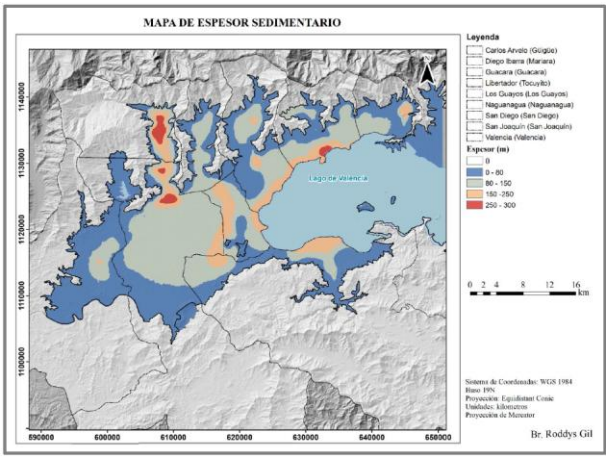


Figura 42. Mapa de espesor sedimentario integrado (Gil, 2021).

Para definir las microzonas sísmicas preliminares (Figura 43), se usaron los mapas de Vs30 (Gil, 2021) y de espesores sedimentarios (Figura 42). Para el mapa Vs30 se recopiló información proveniente de perforaciones geotécnicas, datos obtenidos por iMASW (interferometric Multichannel Analisys of Surface Waves) (Mijares et al., 2021) y por el análisis de la topografía (Parra et al., 2016). Las zonas cercanas al lago (arenas limosas y arcillosas) muestran velocidades de Vs30 entre 200 y 300 m/s. Se integraron además el potencial de licuación (Pombo, 2018) y las fallas activas de la zona (Paolini et al., 2012; Singer et al., 2014).

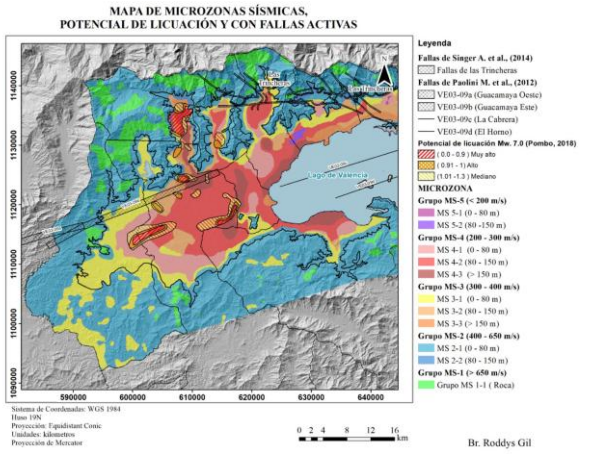


Figura 43. Mapa de Microzonas sísmicas preliminares del AMV a partir de los datos de Vs30 integrado y el mapa de espesor sedimentario, así como el potencial de licuación y fallas activas (Gil, 2021).

Muchas edificaciones del AMV presentan un riesgo sísmico alto y requieren de revisiones especializadas para su adecuación estructural (Pombo, 2018). Si bien la amenaza sísmica en roca bajó en la norma actual COVENIN 1756 (2019), es importante considerar las amplificaciones por los espesores de sedimentos y los bajos valores de Vs30 y elaborar ordenanzas municipales y planes de prevención sísmica en los municipios del AMV.

Área Metropolitana de Maracay

El Área Metropolitana de Maracay (AMM) está delimitado en el norte por las unidades de la Asociación Metamórfica del Ávila; el Complejo San Julián y los esquistos Las Brisas y Las Mercedes y en el sur por los sedimentos de la cuenca del Lago de Valencia con las planicies lacustrinas y aluviales cercano al lago y los valles aluviales (Figura 41). El valor A0 de la amenaza en roca es 0,18 g según la norma COVENIN 1756 (2019), considerablemente menor que los 0,3 g de la norma anterior (COVENIN 1756, 2001).

Parra et al. (2016) compararon los resultados de mediciones de ReMi (Casalena, 2011) con la evaluación por análisis de topografía. Escobar et al. (2023) usaron los datos adquiridos por (Casalena, 2011) para evaluar diferentes metodologías (ReMi, iMASW). López (2021) integró la información con datos provenientes de la conversión de valores SPT de perforaciones geotécnicas a Vs y del análisis de la topografía en un mapa Vs30 de Maracay. Se observa una graduación de norte a sur con los afloramientos de roca con Vs30 > 650 m/s y roca meteorizada con Vs30 de 400 – 650 m/s en el norte. En la zona aluvional disminuyen los valores de Vs30 a 300 - 400m/s, abarcando parte del centro y norte de la ciudad. Acercándose al Lago de Valencia en el sur, los valores Vs30 en las planicies lacustrinas bajan a 200 – 300 m/s con valores menores a 200 m/s en una pequeña zona en el sur.

Para la evaluación del potencial de licuación se aplicó el método simplificado de Seed e Idriss (1971) usando las variables geotécnicas y Vs30 (Ali, 2021). Los sitios con moderado y alto potencial de licuación coinciden con las zonas de menores Vs30, un nivel freático menor a 5 metros de profundidad y en muchos casos con suelos con la presencia de caracolillo (sedimento lacustre de origen diatomáceo) cerca de la costa del Lago de Valencia.

El espesor de los sedimentos fue evaluado utilizando 315 datos de ruido ambiental (Rojas, 2008), datos sísmicos (Rocabado et al., 2011), de inversión de datos de ruido ambiental (Ornelas, 2018) y gravimétricos (Romero, 2017), así como información de una perforación profunda hasta 300 m de profundidad (Schmitz et al., 2015). Los períodos fundamentales del suelo aumentan desde el norte, en sitios con roca, hacia el sur con valores máximos de 2,9 s (Figura 44). Mediante la inversión de las curvas de elipticidad de las ondas Rayleigh con el método de campo difuso se obtuvieron espesores máximos de sedimentos de 310 m al sur de Maracay con Vs entre 137 y 657 m/s. Un segundo estrato con Vs promedio de 1250 m/s puede asociarse a los esquistos Las Mercedes y Las Brisas (Ornelas, 2018).

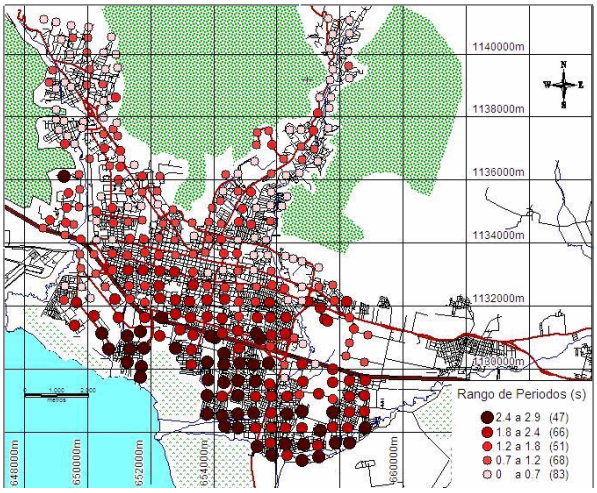


Figura 44. Mapa de períodos predominantes del suelo del AMM (Rojas, 2008).

La información de las evaluaciones sísmicas arriba mencionadas, así como los datos geotécnicos y geológicos de la zona fueron integrados con los resultados del modelado 3D gravimétrico de Romero (2017) con un espesor máximo en la zona de Maracay de 350 m, amarrado con los 300 m de profundidad de la perforación al norte de la Autopista Regional del Centro (López, 2021).

Con el fin de proporcionar datos de entrada para los cálculos de la respuesta sísmica en superficie y para soporte en la delimitación de las microzonas sísmicas se desarrollaron 17 perfiles de suelo integrando la información geotécnica, las velocidades Vs, el período fundamental y el espesor de los sedimentos (López, 2021). Las microzonas sísmicas resultantes fueron ajustadas a la malla urbana y se ubican en el mapa (Figura 45) las fallas activas (Paolini et al., 2012; Singer et al., 2014). Con base en la información recopilada deberán calcularse los espectros de respuesta en superficie y elaborarse las ordenanzas respectivas en los municipios del AMM.

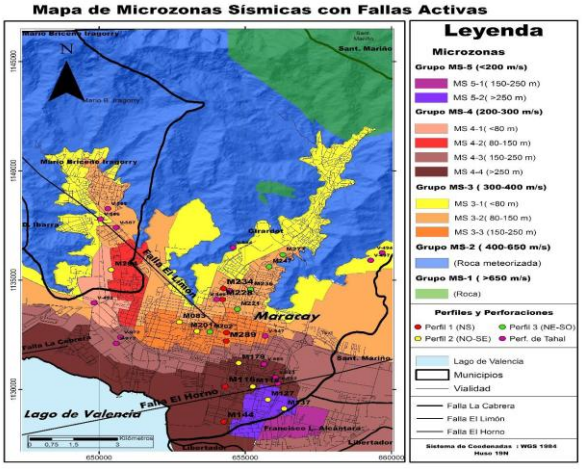


Figura 45. Mapa de Microzonas sísmicas preliminares y fallas activas de Maracay (López, 2021).

Área Metropolitana de Barcelona

El Área Metropolitana de Barcelona (AMB) en el norte del Estado Anzoátegui está delimitado en el norte por el mar Caribe y se asienta sobre unidades cretácicas en el este, estratos terciarios en el oeste y sedimentos cuaternarios en la parte central. El valor A0 de la amenaza en roca se ubica entre 0,2 y 0,3 g según la norma COVENIN 1756 (2019), algo menor que los 0,3 - 0,35 g de la norma anterior (COVENIN 1756, 2001).

Una base para la delimitación de las zonas de igual respuesta sísmica del AMB fue la evaluación geomorfológica considerando las amenazas asociadas para la sectorización (González, 2011; Figura 46). Para la generación del mapa de Vs30 (Alba, 2022) se usó como primera aproximación un método de Vs30 por topografía (Allen y Wald, 2009), luego se calibró con datos Vs30 provenientes de ReMi (Padrón, 2013; Rodríguez, 2013) y después se ajustó usando el mapa de geomorfología (Figura 46).

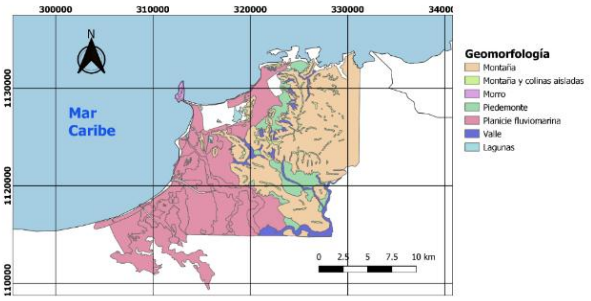


Figura 46. Unidades geomorfológicas en el AMB (Alba, 2022, modificado de González, 2011).

Los espesores de sedimentos fueron evaluados utilizando datos sísmicos (Schmitz et al., 1999; Medina et al., 2016), de ReMi (Rodríguez, 2013), un total de 670 mediciones de ruido ambiental (Mendes, 2004; Gascón et al., 2009; Paolini y Schmitz, 2014; Alba, 2022) y modelado gravimétrico basado en más de 800 puntos de medición (Mendes, 2004; Ramírez-Lisboa et al., 2015). El análisis de las mediciones de ruido ambiental permite diferenciar el AMB con los menores períodos, menos de 0,5 s en el este (rocas del Cretácico aflorando) de zonas con períodos de 1-1,5 s hacia el oeste. Además, destacan una zona con períodos de 1,5-1,7 s en Lechería, así como una zona con períodos mayores a 1,7 s en el extremo oeste de Barcelona (Paolini y Schmitz, 2014).

Se integraron los espesores derivados de la inversión de las curvas de H/V y de elipticidad utilizando los espesores del modelo gravimétrico 3D (Ramírez-Lisboa et al., 2015) identificando valores Vs aumentando de unos 125 m/s en los primeros 10 m a unos 800 m/s en la base de los sedimentos y con valores de Vs del basamento entre 1250-1690 m/s (Alba, 2022). Las profundidades máximas del modelado gravimétrico fueron observadas en el oeste de Barcelona con más de 600 m (Ramírez-Lisboa et al., 2015). En la zona de Puerto La Cruz se tuvieron que ajustar los espesores por diferencias con las inversiones de ruido y se clasificaron los espesores de sedimentos en 4 rangos con fines de microzonificación sísmica (Alba, 2022).

Se generó el mapa de microzonas preliminares del AMB (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), integrando el mapa de Vs30 y el mapa de espesores de sedimentos (Alba, 2022), ajustando los límites de las microzonas sísmicas a los límites de las unidades geomorfológicas (Figura 46), evitando que resulten zonas muy pequeñas. Puerto la Cruz, Lechería y Barcelona están ubicadas en zonas de Vs30 de 170-300 m/s, perteneciendo a los grupos MS3 (200-300 m/s) y MS4 (170-200 m/s), una buena parte de Barcelona está en el Grupo MS4, es decir, suelos blandos.

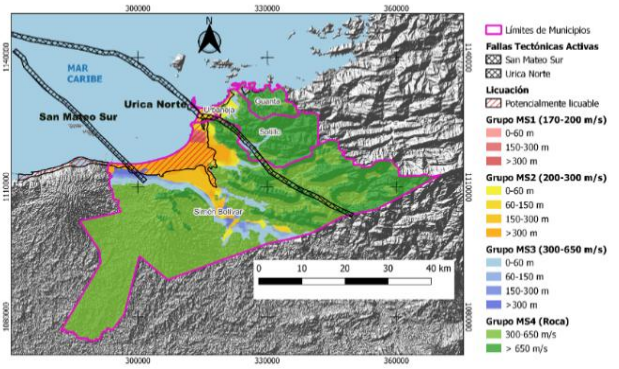


Figura 47. Mapa de microzonas sísmicas preliminares del AMB, incluyendo franjas con la ubicación de las fallas activas (Paolini et al., 2012) e información sobre zonas con alto potencial de licuación (Graffe, 2002) (Alba, 2022).

En una fase final, al considerar la respuesta sísmica en superficie en las diferentes microzonas sísmica, se recomienda ajustar los límites de las microzonas a la trama urbana. Durante el desarrollo de la investigación se estuvo una intensa interacción con los funcionarios de las alcaldías del AMC, lo que resultó en un uso parcial de la información en la planificación urbana (Delgado et al., 2014).

Área Metropolitana de Mérida (más San Juán y Lagunillas)

El Área Metropolitana de Mérida (AMM) en los Andes de Mérida es una conurbación elongada de tres municipios ubicados sobre terrazas del Pleistoceno del rio Chama y afluyentes y las laderas de estos ríos. Las rocas que afloran corresponden mayormente a la Asociación Sierra Nevada (Proterozoico Superior) en el sur rocas terciarias a permicos en el norte. El valor A0 de la amenaza sísmica en roca se ubica en 0,36 g según la norma COVENIN 1756 (2019).

Para determinar las características del subsuelo se midieron 654 estaciones de ruido ambiental y 189 gravimétricas para determinar la profundidad de los sedimentos, así como 62 perfiles sísmicos someros para determinar el Vs30. Los periodos fundamentales del suelo varían entre 0,2 y 2 s, con los periodos bajos en la parte apical de los diferentes abanicos que se encuentran laterales a la terraza y cercanos a las diferentes formaciones rocosas aflorando (Cerrada et al., 2015).

Los máximos espesores de sedimentos son entre 100 y 130 m (Reinoza et al., 2006) en un área alargada en sentido noreste

– suroeste (Cerrada et al., 2015). En el borde sur de la terraza se ubica el basamento rocoso en la perforación para el observatorio acelerográfico a 145 m de profundidad. En Tabay, los espesores sedimentarios no superan los 50 m, mientras en Ejido pueden alcanzar localmente 120 m. (Schmitz et al., 2015). Los valores de Vs30 en la terraza, la mayor parte de Mérida y Ejido, oscilan entre 350 y 650 m/s (Cerrada et al, 2015), lo que corresponde a la microzona sísmica 1-2 con espesores entre 0 y 60 m (Figura 48). Hacia las laderas se observan valores de Vs30 mayores a 650 m/s.

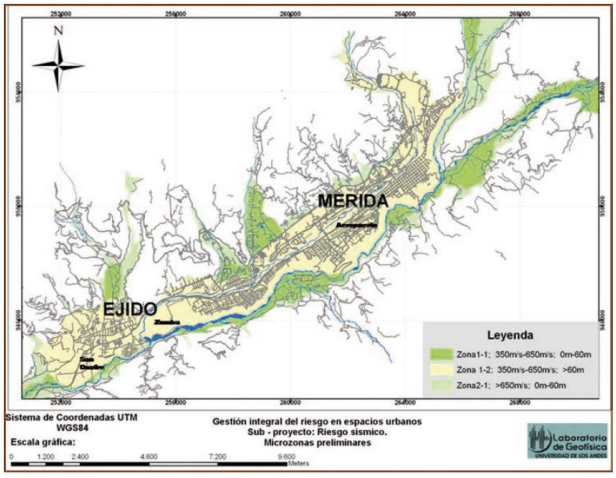


Figura 48. Microzonas sísmicas preliminares del AMM (Cerrada et al., 2015).

Rocabado et al. (2015) evaluaron los efectos de amplificación mediante registros en roca y en superficie del observatorio acelerográfico en el borde de la terraza. Las máximas amplificaciones se obtienen para períodos bajos, en el orden de 3 para las componentes vertical y este-oeste y un máximo de 8 para la componente norte-sur. Esto es acorde con resultados de modelados 1D (Yegres et al., 2020), indicando una amplificación de 4 veces entre roca y superficie.

Con el propósito de diseñar mecanismos para promover una mayor integración de los estudios locales de zonificación de amenazas naturales en la gestión urbana del Municipio Libertador del estado Mérida, Aranguren (2018) realizó un diagnóstico de los avances y retos para integrar los estudios de amenazas de desastres de origen natural en la gestión urbana de la ciudad de Mérida. Entre los factores a tomar en cuenta está la susceptibilidad de las laderas a movimientos en masa (Ramírez, 2014). Sobre la base de estos análisis se proponen 3 aportes concretos para mejorar las capacidades de gestión municipal: El establecimiento de lineamientos internos para incorporar los estudios de amenazas locales en el quehacer de la alcaldía, el desarrollo de herramientas cartográficas digitales para la zonificación urbana de amenazas con fines de apoyo a la gestión urbana y el diseño de un programa de capacitación en gestión local de riesgos socionaturales dirigido específicamente a los funcionarios de esa alcaldía.

Fuera del AMM se realizaron evaluaciones geológicas y mediciones geofísicas para la determinación de las condiciones del subsuelo en las poblaciones de San Juán y Lagunillas, ubicadas unos 25 y 30 km al suroeste de Mérida, respectivamente, sobre terrazas sedimentarias cuaternarias al norte del rio Chama. Se realizaron mediciones de ruido ambiental para determinar el período fundamental del suelo (Figuras 49 y 50). Rojas (2015) y Rodríguez y Sánchez (2016) determinaron las direcciones preferenciales de los períodos fundamentales mediante un análisis H/V rotado. Mediante mediciones ReMi se determinaron los valores de Vs30 (Guillen, 2016) y la distribución de las velocidades Vs dentro de los sedimentos.

Todos los valores Vs30 superan los 400 m/s y los períodos fundamentales alcanzan 2,8 s en la zona, indicativo para espesores de sedimentos mayores a 400 m. En noviembre 2015 inició un enjambre sísmico asociado a los movimientos de la Falla de Boconó con una gran cantidad de sismos (Barrios et al., 2019). Estos movimientos enfatizan la necesidad de finalizar los estudios de microzonificación sísmica en la zona con la elaboración de espectros de respuesta en superficie para poder contribuir a la mitigación del riesgo sísmico en la zona.

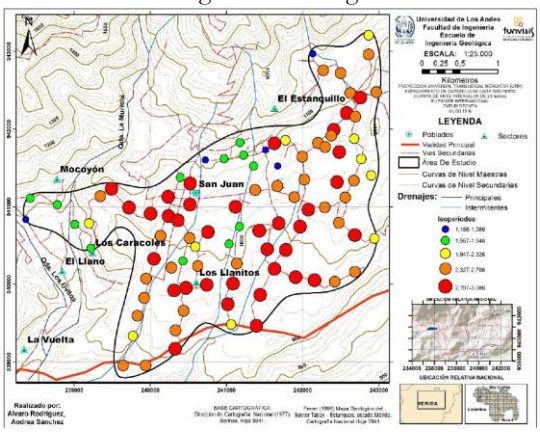


Figura 49. Períodos fundamentales del suelo en San Juán (Rodríguez y Sánchez, 2016).

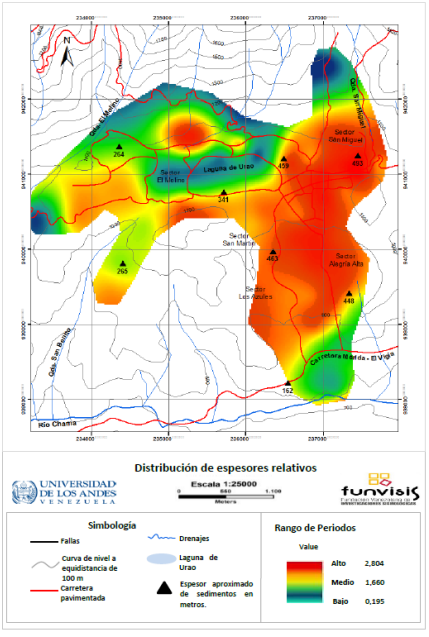


Figura 50. Períodos de vibración del suelo de Lagunillas (Rojas, 2015).

Valle de la Pascua

Para evaluar la amenaza sísmica en superficie en una zona de menor amenaza en roca con A0 = 0,05g (COVENIN 1756, 2019) se seleccionó la ciudad Valle de la Pascua como ciudad con potencial crecimiento futuro en el Eje Norte Llanero (Vernáez et al., 2011; Schmitz et al., 2015).

El basamento está compuesto de rocas cretácicas con diferentes ciclos de sedimentación en el Terciario Superior, pertenecientes a la Formación Quiamare. El área presenta diferentes unidades morfodinámicas como superficies aplanadas, ondulaciones, llanuras de inundación y lagunas. El análisis de 140 mediciones de ruido ambiental y 54 perfiles de ReMi permitió caracterizar de manera general los suelos de la ciudad como compactos con Vs30 oscilando entre 300 y 580 m/s (Figura 51) y períodos fundamentales del suelo entre 0,1 y 0,4 s sin mucho potencial de amplificar la baja amenaza sísmica en la región (Acosta et al., 2018). Se identifico una velocidad de ondas de corte de aproximadamente 1200 a 1500 m/s como basamento sísmico, ubicado a 100 - 150 m de profundidad. La distribución de velocidades está, posiblemente, asociada a cambios litológicos de la Formación Quiamare. Se sugiere prestar atención a potenciales problemas geotécnicos por la presencia de arcillas expansivas.

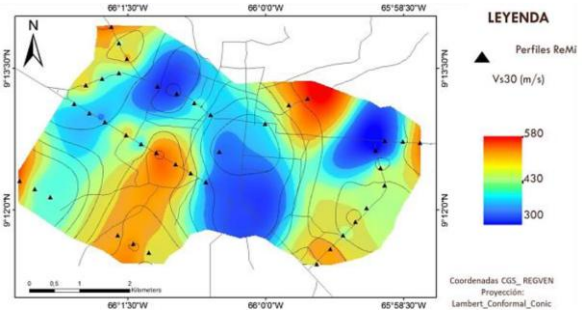


Figura 51. Mapa de distribución de velocidad Vs30 de Valle de la Pascua (Pastor, 2014).

Ciudades en el estado Trujillo (Valera, Trujillo, Boconó)

Las ciudades Valera, Trujillo y Boconó, ubicadas en Los Andes de Mérida, se encuentran asentadas sobre terrazas sedimentarias, los cuales han generado múltiples problemas de inestabilidad. Están bajo influencia de la Falla de Boconó, lo cual deriva en una amenaza sísmica alta (Valera y Trujillo, A0 = 0,28 g; Boconó, A0 = 0,36 g) según la norma COVENIN 1756 (2019). En el año 2011 se inició el proyecto "Investigación aplicada a la gestión del riesgo sísmico en el estado Trujillo" (FONACIT N° 2011001400), en el marco del cual se llevan a cabo estudios geológicos y geotécnicos, mediciones de ruido sísmico ambiental, refracción de microtremores (ReMi) y gravimétricas para la caracterización del subsuelo en las ciudades (Mazuera et al., 2015; Schmitz et al., 2015).

En Valera, ubicada en las terrazas de los ríos Motatán, Momboy, Escuque y El Caño, se midieron 26 tendidos ReMi, 121 mediciones de ruido ambiental y 222 mediciones gravimétricas. De las mediciones ReMi se obtuvieron valores Vs30 de 330 – 385 m/s en el suroeste de Valera, aumentando a 400 - 513 m/s en la medida que se acerque a los sedimentos compactados en el centro de la terraza (Mazuera et al., 2015). Los valores del período fundamental de vibración del suelo mediante el análisis H/V varían desde 0,2 s en la cercanía de los afloramientos rocosos hasta 1,3 s en las laderas de las terrazas de edad terciaria (Mazuera et al., 2015).

A partir del análisis y modelado de los datos gravimétricos se puede concluir que las zonas que presentan mayores espesores de sedimentos corresponden a la zona del aeropuerto de Carvajal (al este de Valera), alcanzando un espesor de 200 metros, la zona ubicada entre "La Beatriz" y "El Milagro" en el sureste de Valera, alcanzando más de 300 metros de espesor de sedimentos (Figura 52).

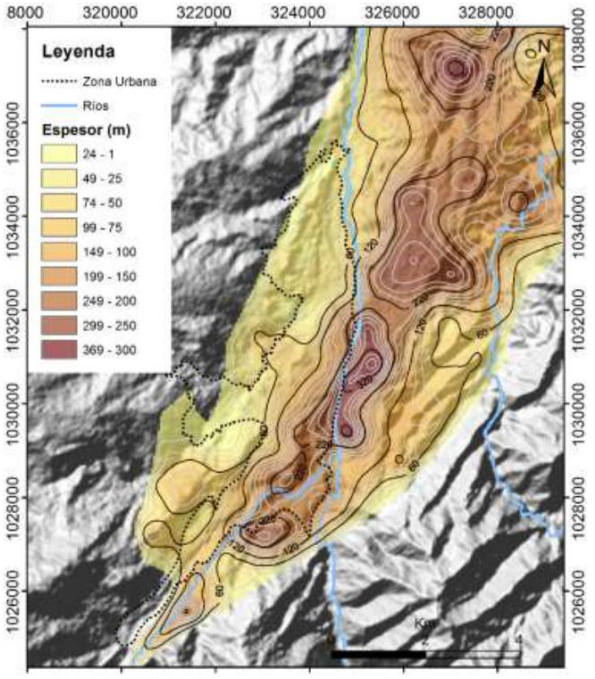


Figura 52. Espesores de sedimentos de Valera (Sánchez-Rojas et al., 2016).

El control estructural juega un papel fundamental en la distribución de espesores de sedimentos que presenta la terraza de Valera. Los espesores menores, tienden a ubicarse adyacentes a los flancos de los pliegues anticlinales, y los espesores mayores, se encuentran suprayacantes a los ejes de los pliegues sinclinales (Sánchez-Rojas et al., 2016).

Trujillo, capital del estado del mismo nombre, está ubicada sobre rocas de la Asociación Mucuchachí (Paleozoico Superior), así como hacia el sureste sobre rocas de edades cretácicas y jurásicas. Los sedimentos cuaternarios de edad Pleistoceno Medio -Superior – Holoceno son drenados por los ríos Castán y Mocoy, Los valores de Vs30, obtenidos a partir de 23 tendidos de ReMi, van de 180 m/s en la parte sedimentaria hasta 760 m/s en roca meteorizada en el sur, con mayores valores en la zona rocosa (Mazuera et al., 2015).

De las 67 mediciones de ruido ambiental se obtuvieron valores de períodos fundamentales del suelo que oscilan entre

0,1 y 0,92 s, siendo los sectores de valor es más altos Tres Esquinas y los alrededores del Estadio Cuatricentenario (Mazuera et al., 2015). A partir del modelado gravimétrico, basado en 148 puntos de medición, se determinó un máximo espesor sedimentario de 150 m en la zona central de la ciudad (Parroquia La Matriz y Estadio Cuatricentenario), y entre 50-100 m, en el sector Tres Esquinas (Figura 53). La sección ONO-ESE del modelo gravimétrico se encuentra ubicado en la zona central del área de estudio. Se observa que el espesor sedimentario de unos 140 m distribuidos de manera uniforme a lo largo de su extensión.

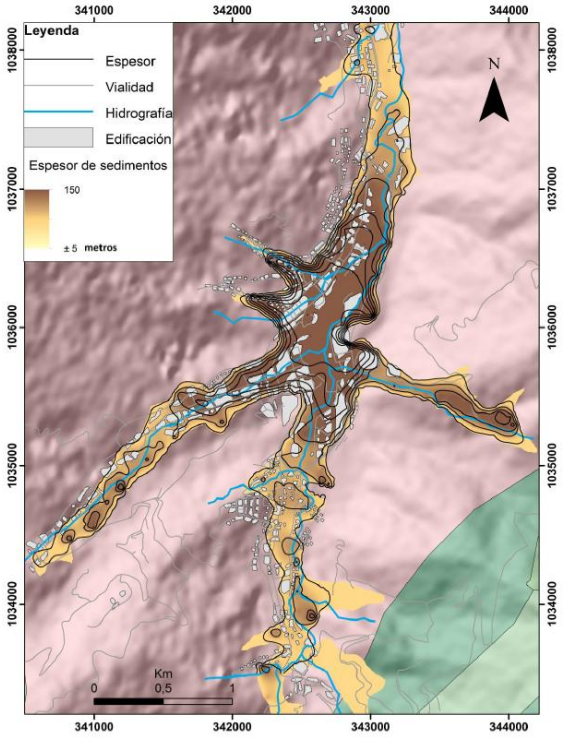


Figura 53. Mapa de espesores de sedimentos en Trujillo) (García et al., 2015).

Boconó está ubicada en pleno eje de la falla que lleva su mismo nombre sobre abanicos aluviales (Qal) de los ríos Boconó y Burate, que suprayace al basamento cristalino de edad precámbrica. Basado en el modelado 3D de 183 mediciones gravimétricas, se obtuvo que el espesor sedimentario varía entre ~50 y 150 m (Figura 54); los menores espesores, se encuentran sobre el cauce de la Quebrada Segovia (Noreste); estos espesores aumentan gradualmente hacia el oeste, alcanzando el máximo observado en la región donde confluyen dicha quebrada con el Río Boconó.

Para determinar los valores Vs30 se midieron 20 líneas sísmicas tipo ReMi; hacia el este del abanico, se determinaron velocidades mayores a 760 m/s (suelos rígidos o roca). Velocidades de Vs30 entre 550 a 750 m/s se encontraron al noreste y suroeste de la ciudad y al oeste se observaron velocidades entre 330 y 640 m/s (Mazuera et al., 2015).

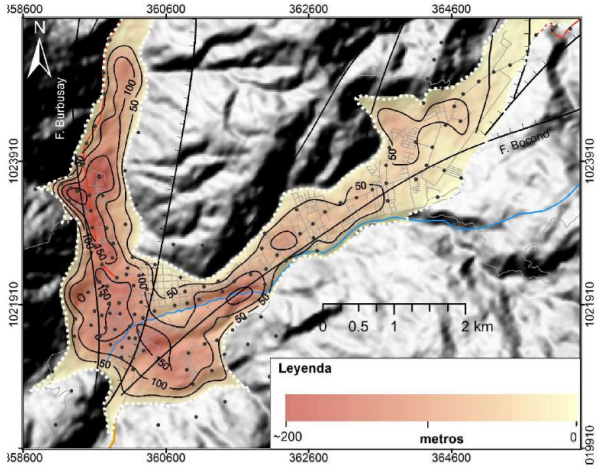


Figura 54. Espesores de sedimentos de Boconó (León et al., 2015).

Basado en la medición de 106 estaciones de ruido ambiental, Boconó muestra valores de períodos fundamentales del suelo en un rango de 0,26 y 1,20 s (Mazuera et al., 2015); los mayores valores se observan en el área distal del abanico en donde se asienta el centro de la ciudad.

Linares et al. (2026) identificaron las evidencias geomorfológicas de deformación de los sistemas de fallas activas en torno a la Falla Boconó. Indican que muchos de los movimientos en masa están asociados a la debilidad y fracturamiento de la roca están relacionados con la Falla de Boconó. Deberán finalizarse los estudios en el estado Trujillo con la elaboración de espectros de respuesta en superficie, la elaboración de los mapas de microzonas sísmicas y su implementación en ordenanzas municipales, considerando los efectos inducidos sobre todo en los bordes de terraza en Valera.

Ciudades en el estado Táchira (San Cristóbal, San Antonio del Táchira, Ureña, Michelena, Lobatera y Rubio)

Con el fin de iniciar los estudios de microzonificación sísmica en el estado Táchira, que tiene una alta amenaza sísmica debido al sistema de fallas de Boconó, FUNVISIS, en colaboración con la especialidad de Geociencias del Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial (IUTAI) y la maestría de Geofísica Aplicada del convenio (MPPEUCT-CUJAE) desarrollaron trabajos geofísicos con el fin de caracterizar el subsuelo en las ciudades San Cristóbal, San Antonio del Táchira, Ureña, Lobatera, Michelena y Rubio.

San Cristóbal, la capital del estado Táchira, está ubicada sobre terrazas de sedimentos cuaternarios del Pleistoceno (QT) y lutitas de la Formación Colón del Cretáceo Superior (KSC). La aceleración pico en roca es A0 = 0,32 g (COVENIN 1756, 2019). Se midió el ruido ambiental en 96 puntos, obteniéndose valores de periodos fundamentales del suelo 0,6 y 1,2 s (Figura 55). Los períodos con mayores valores, cercanos a 1 s, corresponden a una zona de sedimentos fluviales próximos a las quebradas La Machiri y La Bermeja.

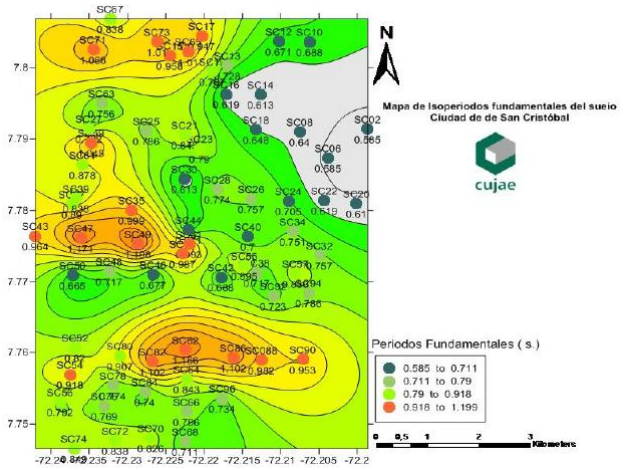


Figura 55. Mapa de períodos predominantes del suelo de San Cristóbal (Durán, 2015).

San Antonio del Táchira y Ureña están ubicadas sobre rocas terciarias y cretácicas, con cobertura de sedimentos cuaternarios. La aceleración pico en roca es alta con A0 = 0,36 g (COVENIN 1756, 2019), por la cercanía del sistema de fallas de Boconó. Los valores de Vs30 por topografía en San Antonio del Táchira, varían entre 300 m/s en el centro y hasta 760 m/s en la zona sureste. Los períodos fundamentales del suelo van desde 0,6 s en el centro norte y sur a más de 1 s hacia las zonas este y sureste de la ciudad (Figura 56, izquierda). El estimado de los espesores de los sedimentos indica más de 100 m en los extremos (Molina et al., 2015).

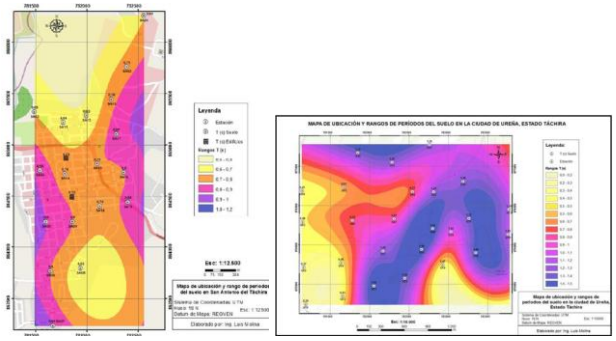


Figura 56. Mapa de períodos fundamentales del suelo en San Antonio del Táchira (izquierda) y Ureña (derecha) (Molina et al., 2015).

En Ureña los valores de Vs30 por topografía varían entre 360 m/s en el oeste y hasta más de 600 m/s en el este. La zona central presenta velocidades de Vs30 entre 425 y 500 m/s. Los períodos fundamentales del suelo van desde 0,2 s en el oeste y sureste y sur a 1,5 s en las zonas norte, sur y centro-este (Figura 56, derecha) con un estimado de los espesores de los sedimentos que superan los 200 m (Molina et al., 2015).

Michelena se encuentra asentado sobre una terraza aluvional del Cuaternario (Qal), originadas por los depósitos de los sedimentos cretácicos provenientes del páramo El Zumbador, mientras que Lobatera se ubica sobre rocas de las formaciones Colón (KSc) y Mito Juan (Kmj). La aceleración pico en roca es alta con A0 = 0,35 g (COVENIN 1756, 2019), por la cercanía del sistema de fallas de Boconó.

En Michelena los valores de Vs30 por topografía varían entre 590 m/s en el Este y 760 m/s en el oeste. Para la determinación de los períodos fundamentales del suelo se adquirieron datos en 25 estaciones y los valores de períodos van de 0,23 s en el extremo este a 0,96 s en el noroeste (Figura 57) con la mayoría de los puntos alrededor de 0,6 s, lo que resulta en un estimado de los espesores de los sedimentos alrededor de 100 m (Molina, 2016).

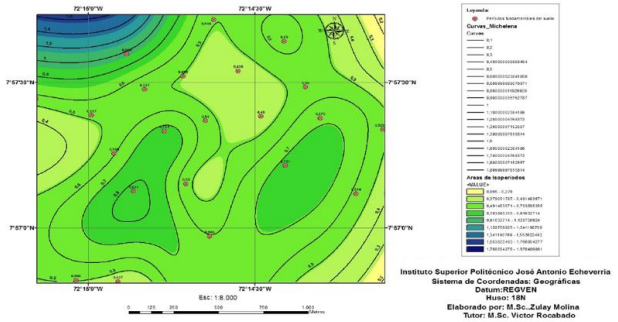


Figura 57. Mapa de períodos fundamentales del suelo en Michelena (Molina, 2016).

En Lobatera los valores de Vs30 por topografía se encuentran uniformemente entre 500 m/s y 550 m/s. Para la determinación de los períodos fundamentales del suelo se adquirieron datos en 11 estaciones y los valores de períodos van de 0,56 s en el suroeste a 1,1 s en el este (Figura 58), lo que resulta en un estimado de los espesores de los sedimentos encima de 100 m (Molina, 2016). Considerando que Lobatera está ubicado sobre rocas del Cretácico, y sin embargo muestra períodos más altos que en Michelena sobre una terraza del Cuaternario, debería haber un contraste de impedancia a ciertos niveles dentro de las rocas, posiblemente por niveles de areniscas.

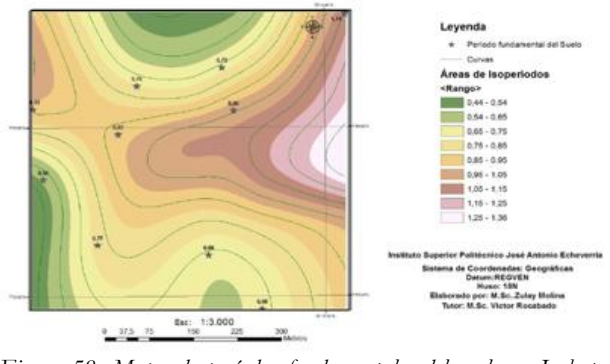


Figura 58. Mapa de períodos fundamentales del suelo en Lobatera (Molina, 2016).

La depresión de Rubio está dominada por sedimentos molásicos de edad Mio-Plioceno más una importante cobertura de terrazas Cuaternarias. La aceleración pico en roca es alta con A0 = 0,33 g (COVENIN 1756, 2019), por la cercanía del sistema de fallas de Boconó.

En Rubio los valores de Vs30 por topografía varían entre 350 y 460 m/s con los menores valores en el centro y hacia el este. Para la determinación de los períodos fundamentales del suelo se adquirieron datos en 33 estaciones y los valores de períodos varían entre 0,4 y 1,0 s con algunos valores por debajo de 0,4 s y uno de 1,3 s (Figura 59), lo que resulta en un estimado de los espesores de los sedimentos entre 100 y 150 m (Cárdenas et al., 2015). En el caso de Rubio, esta profundidad podría indicar el tope de las formaciones cretácicas.

Los trabajos realizados en el estado Táchira en el marco de la cooperación entre el Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial (IUTAI) y la maestría de Geofísica Aplicada del convenio (MPPEUCT-CUJAE) representan el primer paso en la microzonificación sísmica con la recopilación de la información geológica, topográfica y la medición de ruido ambiental con el apoyo de FUNVISIS.

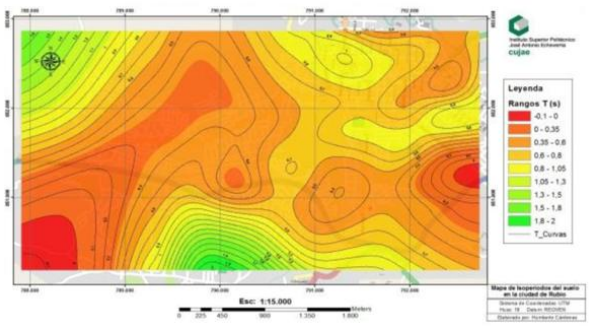


Figura 59. Mapa de períodos fundamentales del suelo en Rubio (Cárdenas et al., 2015).

Los resultados indican la presencia de espesores de sedimentos que podrían amplificar las ondas sísmicas en caso de un terremoto en esta región con una alta amenaza sísmica. Por ello deberían gestionarse fondos para completar los respectivos estudios de microzonificación sísmica con su aplicación en ordenanzas municipales en complemento de la norma de construcciones sismorresistentes.

La Guaira y Ciudad Caribia

El estado La Guaira se ubica en una franja montañosa limitada por la costa del mar Caribe en el norte con asentamientos poblacionales que se concentran principalmente en los conos aluviales. En el suroeste, en terrenos pertenecientes tanto al estado La Guaira como al Distrito Capital, se ubica Ciudad Caribia en las colinas formadas por los Esquistos Las Brisas profundamente meteorizadas. La Guaira posee una elevada amenaza sísmica (con A0 = 0,3 g para La Guaira y algo menor, A0 = 0,27 g, para Ciudad Caribia; COVENIN 1756, 2019), donde la Falla San Sebastián marca la línea de costa. La Guaira ha sufrido varios terremotos con destrucciones importantes (Grases et al., 1999); el último, el terremoto de Caracas/Litoral de 1967, con daños en edificios de mediana altura en la zona de Caraballeda. Por ello, primeras evaluaciones basadas en perfiles sísmicos determinaron un elevado espesor de sedimentos en esta zona (Murphy et al., 1969).

Posterior a los deslaves del año 1999, donde las zonas más afectadas fueron los conos aluviales entre las localidades de Catia La Mar y Camurí Grande, se desarrollaron estudios geofísicos integrados para la caracterización de los suelos en el estado La Guaira (e.g. Romero et al., 2006). En los conos aluviales, el nivel freático se ubica entre 5-10 m de profundidad y las velocidades Vs30, basadas en los análisis de mediciones sísmicas en los diferentes conos, varían generalmente entre 300 y 650 m/s en los conos (con algunas zonas con aluvionales poco consolidados con valores por debajo de 300 m/s) y valores mayores a 650 m/s en las laderas al sur (Romero et al., 2006). Esto está en congruencia con evaluaciones posteriores que incorporaron análisis de Vs30 por topografía para todo el estado La Guaira (García, 2023).

Basado en las mediciones de 130 estaciones de ruido ambiental en las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, Romero et al. (2006) determinaron valores del período fundamental del suelo entre 0,9-1,8 s con valores máximos hasta 2,7 s. Se midieron 348 estaciones gravimétricas; del modelado resultaron los mayores espesores de sedimentos en el cono de Caraballeda con valores máximos cercanos a los 450 m, espesores máximos de 180 m en el cono de La Guaira y hasta 290 m cono de Macuto (Romero et al., 2006). El modelado gravimétrico realizado por García (2023) confirmó en gran medida estos valores con un máximo de 200 m hacia la línea de costa en el cono de La Guaira, un máximo de 480 m en el cono de Caraballeda y 280 m en el Macuto. Se definieron microzonas sísmicas preliminares donde destacan en la zona de Caraballeda microzonas con espesores mayores a 400 m (Figura 60) para las cuales deberán tomarse en cuenta efectos de cuenca para el cálculo de la respuesta en superficie.

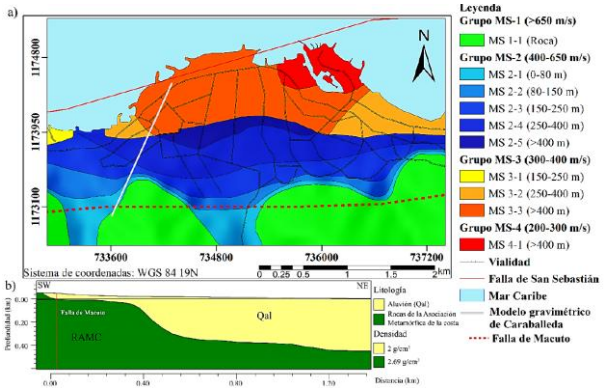


Figura 60. a) Microzonas sísmicas preliminares en el cono de Caraballeda. b) Detalle del perfil gravimétrico de Caraballeda (García et al., 2023).

Para finalizar la microzonificación sísmica de La Guaira se deberían complementar las mediciones geofísicas para tener una base uniforme para toda la parte urbanizada del estado, calcular la respuesta sísmica en superficie y elaborar ordenanzas municipales.

En Ciudad Caribia se realizaron 246 mediciones de ruido ambiental y 325 mediciones gravimétricas; los períodos

fundamentales están entre 0,2 y 0,85 s (Bueno et al., 2009), efecto de la profunda meteorización de los Esquistos Las Brisas. Del modelado gravimétrico se determinó un espesor máximo de meteorización de 45 m. A partir de la evaluación geomorfológica se identificaron superficies residuales en el área y se seleccionaron zonas con potencial de desarrollo urbanístico sin la presencia de movimientos de remoción en masa o procesos de tipo torrencial.

Guarenas-Guatire

En Guarenas y Guatire, zona de expansión de Caracas ubicada unos 20 km al este, se realizaron estudios geofísicos (e.g. Sánchez et al., 2005b) que fueron complementados desde el año 2008 con estudios de microzonificación en el marco de los proyectos de microzonificación sísmica de la Cooperación Cuba-Venezuela (González et al., 2009; Schmitz et al., 2012).

La cuenca de Guarenas-Guatire se encuentra ubicada en una depresión dentro de la Cordillera de la Costa, limitada al norte por el Macizo del Ávila con los Esquistos San Julián y al sur por el cerro Colorado (Urbani y Rodríguez, 2004) principalmente sobre Esquistos Las Mercedes y en la cuenca la Formación Guatire (cementada y no cementada) del Plio – Pleistoceno. La cuenca está delimitada por la Falla Ávila en el norte y el sistema de fallas Guarenas al sur; la aceleración pico en roca es A0 = 0,27 g (COVENIN 1756, 2019).

En una primera fase se adquirieron 390 mediciones de ruido ambiental, 600 mediciones gravimétricas y 21 perfiles sísmicos. Los períodos predominantes del suelo varían entre 0,23 y 2,2 s (Sánchez et al., 2005b). Del modelado gravimétrico 3D resultan espesores de sedimentos en la cuenca hasta 360 m en Guatire, mientras que Amarís et al. (2011b) indican un espesor máximo de 280 m.

Para determinar las velocidades de ondas de corte de los sedimentos se desarrollaron mediciones sísmicas (Sánchez, 2015) y ReMi largos (García, 2012). En Guatire los promedios de Vs de los sedimentos someros es de 420-500 m/s y de los sedimentos profundos (hasta 270 m de profundidad) 850-900 m/s y en Guarenas y en Guarenas de 400 m/s y 1000 m/s (hasta 120 m de profundidad), respectivamente; la Vs del basamento está alrededor de 1600 m/s. Morfe et al. (2015) estimaron la respuesta sísmica 2D del suelo mediante una simulación de la propagación de las ondas sísmicas y la generación de sismogramas sintéticos con un método híbrido. En la zona profunda de Guatire los espectros de respuesta de aceleración horizontal para suelo blando son mayores para todos los períodos, lo que deberá tomarse en cuenta en el cálculo la respuesta del suelo en superficie. Singer et al. (2008) evaluaron los procesos geomorfológicos activos en la cuenca.

Guerrero et al. (2024) crearon un mapa de microzonas sísmicas preliminares de los municipios Plaza y Zamora, en función del parámetro Vs30 y el espesor sedimentario de la cuenca (Figura 61). Recopilaron la información de los trabajos previos en la zona y realizaron 166 mediciones sísmicas analizadas mediante el método iMASW y de ruido ambiental para determinar las velocidades Vs30 y los períodos predominantes de vibración del suelo para su integración con los espesores de sedimentos. Queda pendiente el desarrollo de los espectros de respuesta en superficie y las respectivas ordenanzas municipales.

Como primer paso para los planes de gestión del riesgo se realizó un diagnóstico situacional con fines de gestión del riesgo considerando los estudios geológicos y geofísicos, el fondo habitacional, las líneas vitales y la fragilidad ambiental (Guasch et al., 2011). Los resultados fueron utilizados para una cartografía del riesgo sísmico detallada que permitió determinar las zonas de mayor riesgo sísmico (Morejón et al., 2014). La totalidad de las edificaciones informales, así como la mitad de las edificaciones formales presentan una alta vulnerabilidad sísmica. Los edificios de muros de concreto armado en una dirección son muy vulnerables y se sugieren medidas urgentes de reforzamiento estructural para mejorar su comportamiento.

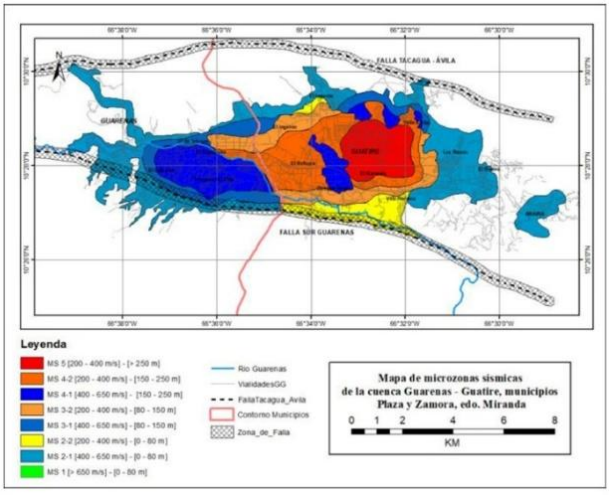


Figura 61. Mapa de microzonas sísmicas preliminares de la cuenca de Guarenas – Guatire (Guerrero et al., 2024; actualizado: Guerrero, com. pers. 2025).

En la Figura 62 se muestran los municipios venezolanos que cuentan con estudios de microzonificación sísmica y su estado de avance.

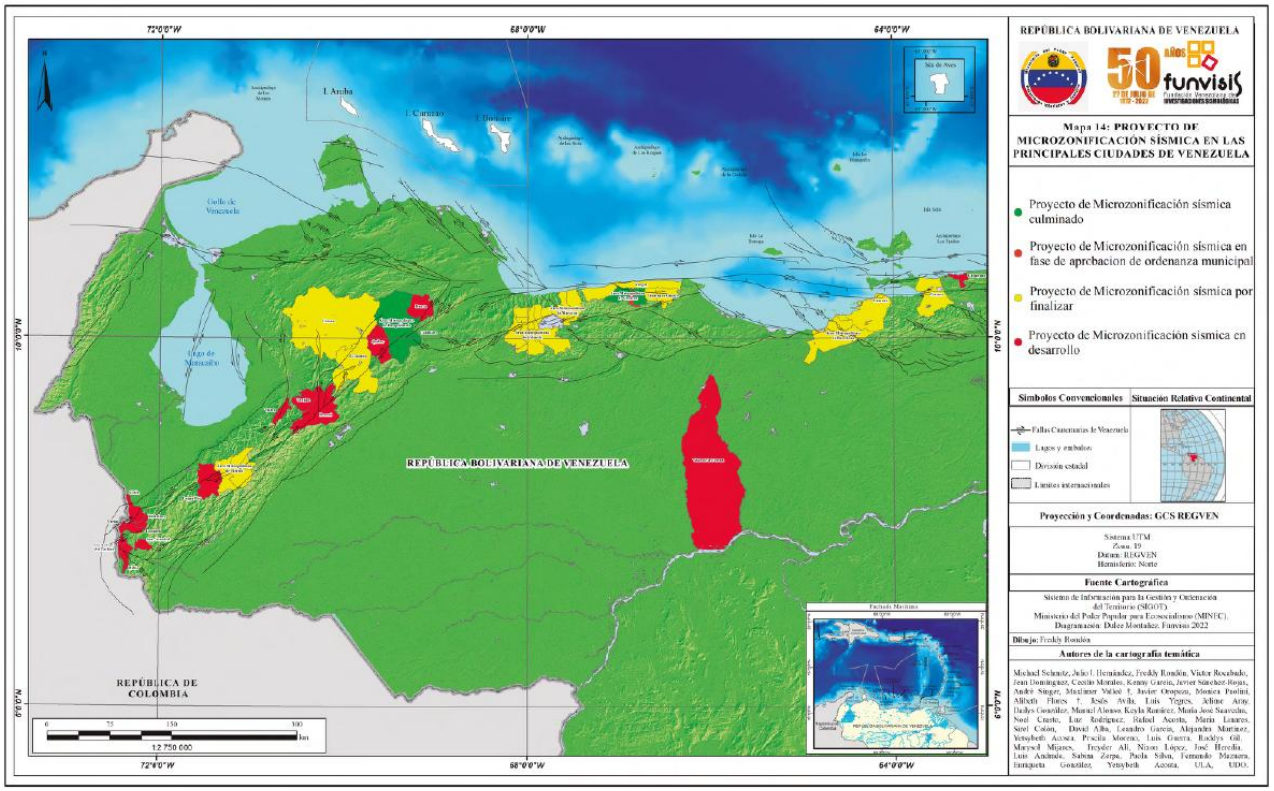


Figura 62. Avances de estudios de microzonificación sísmica en los municipios venezolanos (Schmitz et al., 2023a).

DESAFÍOS Y LIMITACIONES

Finalización o actualización de estudios

La revisión de los avances logrados en materia de microzonificación sísmica en las últimas dos décadas da constancia de un esfuerzo importante en el conocimiento del subsuelo en las zonas más sísmicas de Venezuela (ver Figura 62). En una gran parte de las ciudades se logró llegar a la definición de microzonas sísmicas preliminares, sin que se hayan definido espectros en superficie específicos para las diferentes microzonas sísmicas. Por ello, para poder llegar a la fase de implementación de los estudios, se debe realizar el cálculo de la respuesta sísmica en superficie para la definición de espectros en complemento de los espectros de la norma de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019).

En la mayoría de las ciudades no se ha hecho un énfasis sistemático en la definición de los efectos inducidos, con excepción de Caracas y Barquisimeto, dónde se ha definido el peligro de deslizamiento de laderas o del borde de la terraza, y de Cumaná, Valencia, Maracay y el Área Metropolitana de Barcelona, donde se han generado primeras evaluaciones del potencial de licuación. Estos esfuerzos deben sistematizarse ajustado al contexto geográfico de las respectivas ciudades, en el caso de las ciudades andinas y en montañas, donde el peligro de deslizamiento juega un rol importante y las ciudades costeras, muchas veces con un importante potencial de licuación.

De punto de vista tecnológico se ha dado un salto importante en estos últimos 20 años; el uso de Sistemas de Información Geográfico (SIG) permite la integración de múltiples capas de información. En la parte de investigación geofísica se ha migrado del uso de sísmica activa al uso de diferentes metodologías de sismología pasiva, desde el análisis de mediciones o arreglos de ruido hasta perfiles sísmicos pasivos analizados por ReMi o iMASW. Este cambio permite una densa adquisición de datos para determinar las propiedades del subsuelo (Vs30 y Vs hasta el basamento, período fundamental) como insumo principal para los cálculos de la respuesta sísmica en superficie y los respectivos espectros de respuesta en las microzonas sísmicas.

Retos en la implementación normativa

La principal norma legal para la implementación de los resultados de estudios de microzonificación sísmica es la norma de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019). En la definición de las acciones sísmicas (Sección 1.3.2) se indica que las ciudades con más de 100.000 habitantes deberán tener un estudio de microzonificación sísmica y que se debe establecer un plan nacional de microzonificaciones sísmicas para ello. Igualmente indica que, en caso de existir una microzonificación sísmica avalada por la autoridad competente, los valores de los mapas de amenaza sísmica deben sustituirse por los dados en ésta. Además, para la definición de los efectos de sitio, se utilizará como profundidad H la establecida en la microzonificación sísmica y el valor local de Vs30 en el sitio se comparará con el rango indicado para la microzona prescrita en la microzonificación sísmica, así como

las indicaciones para efectos inducidos. Se usarán los espectros elásticos definidos en la microzonificación sísmica y se deberán implementar las que ya se finalizaron.

La implementación es un proceso muy complejo que requiere tanto del consenso técnico (muchas veces obtenido con los funcionarios de las direcciones municipales de Ingeniería, Urbanismo y Protección Civil) como de la formulación y aprobación de las respectivas ordenanzas municipales con las respectivas comisiones de los concejos municipales (en muchos casos la comisión de urbanismo). Este proceso de implementación legal tarda hasta más tiempo que el propio estudio técnico (Figura 63), de manera que en Caracas aún falta la aprobación de las ordenanzas en los municipios Chacao y Baruta.

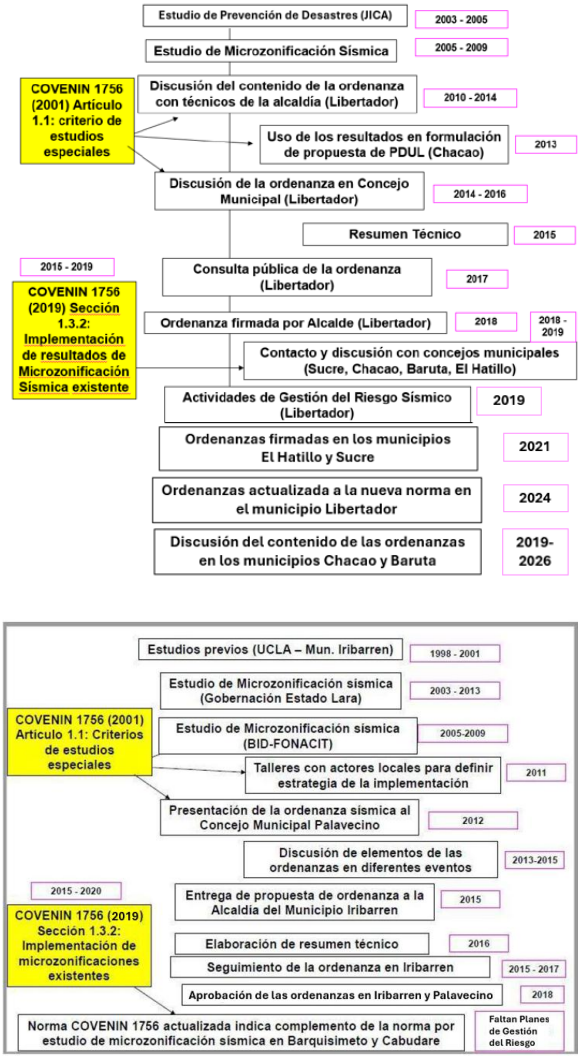


Figura 63. Diagrama de flujo de las actividades para la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica en ordenanzas municipales en las áreas metropolitanas de Caracas (arriba) y Barquisimeto (abajo; adaptado y actualizado de Schmitz et al., 2020a; 2020b).

Sin embargo, cuando se trata de una actualización del estudio, la implementación legal puede ser más rápida, como es el caso de Bogotá (Colombia), donde el respectivo decreto municipal de la tercera revisión técnica fue implementado en el mismo año 2010 (Schmitz et al., 2025), mientras que el decreto del primer estudio de 1997 fue publicado en el año 2001. Un factor que podría haber favorecido la implementación en Bogotá respecto a Caracas es el hecho que en Bogotá el Decreto es publicado por el Alcalde Mayor de Bogotá, mientras en Caracas son 5 municipios que deben publicar las respectivas ordenanzas.

Resultados y aplicaciones prácticas

Una de las incógnitas importantes en la implementación de los resultados de estudios de microzonificación sísmica es, hasta qué punto los espectros de diseño son utilizados en la práctica en el diseño de las edificaciones o la evaluación de su vulnerabilidad (ver Figura 5). En el Área Metropolitana de Barquisimeto aún no han sido implementado, mientras que en el municipio Chacao los resultados del estudio de microzonificación sísmica se introdujeron en el diseño del Plan de Desarrollo Urbano Local (PDUL) en 2013, de manera de promover una mayor seguridad para edificaciones altas en la zona de la cuenca con grandes espesores de sedimentos; lamentablemente, esta propuesta no ha sido introducida formalmente para su publicación.

En el Área Metropolitana de Barcelona, dónde los estudios de microzonificación sísmica fueron acompañados por una intensa interacción con los funcionarios municipales (Delgado et al., 2014), los resultados, aún preliminares, fueron considerados dentro de las herramientas de ordenación urbanística y ordenación del territorio. En aquel momento, los resultados preliminares de la microzonificación sísmica para Barcelona fueron incorporados a la propuesta del Plan de Ordenación Territorial Local (POTL) del sector Maruica, en Barcelona. Además, se estableció un vínculo operativo con el equipo que desarrollaba el Plan de Desarrollo Urbano Local (PDUL) de Barcelona, para que las variables sísmicas generadas por FUNVISIS se integraran de manera coherente a la normativa urbana (M. Capriles, com. pers., 2026). De las discusiones técnicas en donde se evaluó cómo traducir los mapas de amenaza sísmica diferenciada, la caracterización geotécnica de suelos, los períodos fundamentales de vibración, las zonas de amplificación y los niveles de aceleración esperada, en criterios urbanísticos y constructivos vinculantes se plantearon, entre otras: 1) Restringir la construcción de piscinas elevadas sobre estacionamientos o en azoteas, debido al incremento significativo de cargas dinámicas y al riesgo asociado a modos de vibración acoplados. 2) Regular la altura máxima permitida para edificaciones en zonas donde la aceleración espectral, los tipos de suelo y la respuesta dinámica local incrementaban el riesgo estructural. 3) Incorporar refuerzos estructurales en edificaciones existentes, incluyendo soluciones prácticas como la Cruz de San Andrés en estructuras de mampostería confinada o en edificaciones sin un adecuado sistema de diafragma rígido. 4) Establecer zonas de limitación o condicionamiento del desarrollo urbano en sectores donde la microzonificación indicaba susceptibilidad

elevada a efectos como licuación. 5) Ajustar el índice de ocupación del suelo, densidades y usos, según los niveles de amenaza sísmica local.

Transferencia de conocimiento y tecnología

La clave para una exitosa implementación de los resultados de estudios de microzonificación sísmica es una acertada interacción con los funcionarios de las alcaldías, pero también con los representantes de los concejos municipales. En los proyectos en las áreas metropolitanas tanto en Caracas como en Barquisimeto se interactuó con las alcaldías, principalmente con los funcionarios de las direcciones de Infraestructura, Catastro, Planificación Urbana y Protección Civil, pero también de la Alcaldía Metropolitana de Caracas y la gobernación del estado Lara, mediante talleres con el fin de implementar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con la información del proyecto en las alcaldías y discutir las estrategias de implementación (Aguilar et al., 2015; 2016; Figura 63). Posteriormente se discutieron con representantes de los concejos municipales los contenidos de las ordenanzas municipales.

Para Caracas se desarrolló una herramienta en línea que permite calcular para cada punto en el mapa el respectivo espectro de diseño y de esta manera facilita la aplicación de los resultados en las ordenanzas municipales (Gómez et al., 2014). Con ello se puede visualizar rápidamente los efectos de cuenca por ejemplo en el este de Caracas y tomar consideraciones especiales para edificaciones altas (existentes y por construir), tal como se discute en Padrón et al. (2011), proponiendo la activación de procesos de gestión urbana que garanticen la reducción de riesgo sísmico. En estas zonas se tendrán espectros más exigentes, mientas en otras partes de Caracas pueda haber espectros menos exigentes que en la norma.

IMPACTO EN LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Contenido de las ordenanzas municipales

Como principal herramienta para la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica, las ordenanzas municipales para edificaciones sismorresistentes (Figura 64) presentan los mapas de microzonificación sísmica con las indicaciones como ubicar los respectivos edificios en las diferentes microzonas, incluyendo las franjas de fallas activas. Para cada microzona sísmica indican los diferentes espectros con sus parámetros y factores según el tipo de construcción, irregularidades y efectos topográficos con su procedimiento de diseño. Se indican los estudios geotécnicos o geofísicos que deben realizarse en el sitio, así como las consideraciones en caso de ubicarse en una ladera con peligro de deslizamientos.


REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
DISTRITO CAPITAL
GACETA MUNICIPAL
MUNICIPIO BOLIVARIANO LIBERTADOR
MES XI AÑO CXXIV CARACAS, VIERNES 17 DE MAYO DE 2024 Nº 5062-A
SUMARIO
Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital.

Figura 64. Portada de la Gaceta Municipal con la Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital (2024).

De acuerdo con las indicaciones en la norma COVENIN 1756 (2019) se requiere una certificación especial como especialista en ingeniería sismorresistente para el diseño de ciertas edificaciones, como por ejemplo edificaciones de más de 8 pisos de altura en microzonas de gran espesor de sedimentos, así como indicaciones para la revisión de los proyectos. Para los funcionarios de las alcaldías se agrega una guía para revisar el cumplimiento de lo indicado en la ordenanza en los proyectos de construcción. Con el fin de tener una base sólida para la gestión del riesgo sísmico se crea un registro de edificaciones, en el cual entrarán todas las edificaciones nuevas y con modificaciones. Este será complementado en el marco de los planes especiales de gestión del riesgo sísmico mediante la evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones existentes y se indican criterios de priorización para la evaluación sismorresistente y el reforzamiento estructural si fuera requerido según los estudios. Para su cumplimiento se establecen lapsos, en algunas ordenanzas asociadas con sanciones, y se proporcionan enlaces a instituciones, así como un fondo financiero que podrá ser utilizado también en caso de ocurrencia de un evento sísmico.

Evaluación sísmica y propuestas de mitigación

En el marco de los proyectos de microzonificación sísmica se evaluó en varias ciudades la vulnerabilidad de edificaciones existentes. Con el fin de establecer recomendaciones para reforzamiento de los edificios de mayor riesgo según su ubicación en las microzonas, se realizó una evaluación aproximada de edificios típicos en Caracas (Hernández, 2009c; Hernández y Domínguez, 2009). Para 13 prácticas de construcción (según los respectivos códigos) empleados entre 1939 y 2009, y para edificios de 1 a 20 pisos, se estimaron sus espectros inelásticos de diseño y se compararon con la demanda inelástica de los espectros en 8 microzonas. Este set fue dividido en grupos de dos espesores de depósitos (más y menos de 120 m), y tres alturas de edificios (bajo, mediano y alto). Con fines de evaluación se presenta el índice de confiabilidad estructural asociado a daño intermedio para el sismo de diseño (A0 = 0.28 g) (Tabla 1) para dos escenarios sísmicos menores, correspondientes a A0 = 0.1 y 0.167 g (Hernández, 2009c). En las ordenanzas municipales, la priorización de reforzamientos sísmicos de los edificios con respecto a su ubicación dentro de las diferentes microzonas, siendo su práctica de construcción y la clasificación según su

uso los factores más influyentes (añadiendo una penalización por las construcciones irregulares), se apoya en esta evaluación.

En el marco de varios proyectos de investigación se evaluaron más de 1000 edificaciones en Caracas respecto a su vulnerabilidad (López y Coronel, 2024). Presentan la metodología y los resultados de las evaluaciones del riesgo sísmico de las construcciones existentes en Caracas, tanto las formales hechas por profesionales siguiendo criterios técnicos normativos, como las construcciones informales. Se evalúan en detalle edificaciones escolares, de salud, otros edificios esenciales, edificios de vivienda y viviendas populares y puentes, se identifican los sistemas más vulnerables y se dan recomendaciones para reducir el riesgo sísmico, incluyendo propuestas de reforzamiento. En específico existen planos de reforzamiento para varias edificaciones escolares, construidos con sistemas constructivos tipificados (López et al., 2015), cuyo reforzamiento sismorresistente podría gestionarse en el marco de la aplicación de los resultados de la microzonificación sísmica y los respectivos planes de gestión del riesgo sísmico.

Tabla 1. Índices de confiabilidad estructural β, ante "A0 ~ 0.28 g" para daño intermedio # (Hernández, 2009c).

NORMA DISEÑO C/A	NORMA SÍSMICA		DEPÓSITOS SOMEROS			DEPÓSITOS PROFUNDOS		
			Edif. BAJOS	Edif. MEDIANOS	Edif. ALTOS	Edif. BAJOS	Edif. MEDIANOS	Edif. ALTOS
MOP -39	MOP-39		0.01	0.05	0.29	0.06	-0.36	-0.25
MOP-47	MOP-47	Rs > 2	-0.44	-0.98	-1.05	-0.42	-1.25	-1.49
		Rs ≤ 2	-0.12	-0.22	-0.04	-0.08	-0.60	-0.56
MOP-55	MOP-55	No ofic.	-0.22	-1.13	-1.86	-0.20	-1.39	-2.18
		Ofic.	-0.11	-0.65	-1.01	-0.08	-0.98	-1.44
MOP-CA-TC-67	MOP-67		0.34	0.64	0.99	0.40	0.18	0.42
			0.61	1.07	1.49	0.67	0.58	0.90
ACI 318-71 = COVENIN 1753-81			0.86	1.53	1.99	0.91	1.02	1.39
	COVENIN 1756-82		1.08	1.49	1.35	1.12	0.93	1.00
ACI 318-80 = ATC 3-06			1.33	1.86	1.74	1.38	1.28	1.38
COVENIN 1753-85			1.55	2.17	2.06	1.60	1.57	1.70
	COVENIN 1756-98		2.07	2.75	2.60	2.24	2.52	2.79
	COVENIN 1756:2001		1.79	1.87	1.89	1.84	1.28	1.52
	PMZS-CCS		2.09	1.87	1.77	2.09	1.87	1.77

Violeta: alto riesgo; Rojo: riesgoso; Naranja: algún riesgo; Verde: seguro/econ.; Azul: sobre-seguro.

En Guarenas y Guatire, la principal zona de expansión del Área Metropolitana de Caracas, se determinó la vulnerabilidad de las tipologías constructivas existentes y se estimaron las pérdidas humanas y materiales, además de proponer medidas generales de reforzamiento estructural (Morejón et al., 2014). Aparte de las edificaciones informales, se identificaron a los edificios de muros de concreto armado en una dirección como muy vulnerables y se sugieren medidas urgentes de reforzamiento estructural para mejorar su comportamiento.

En el Área Metropolitana de Barquisimeto se realizó una auditoria de vulnerabilidad sísmica que atendió, aparte de las edificaciones ordinarias, las edificaciones esenciales y las líneas vitales (Rojas et al., 2016). Como resultado se obtuvo una zonificación de las ciudades Barquisimeto y Cabudare por tipologías urbanas que sirve como base para un estudio detallado de vulnerabilidad, así como para el ordenamiento urbano.

En el Área Metropolitana de Valencia (AMV), Pombo (2018) hizo una evaluación de la vulnerabilidad basado en la clasificación de más de 200.000 edificaciones mediante la creación de una extensa base de datos y con inspecciones visuales rápidas con el fin de obtener índices de vulnerabilidad, de priorización y de riesgo sísmico. Se analizaron 41 modelos estructurales y resaltan la ausencia de vigas altas y el adosamiento de losa contra losa como irregularidades que poseen más de la mitad de las edificaciones estudiadas. En general, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico encontrado en el AMV es alto, afectando a más de la mitad de la muestra, en su mayoría motivado a el año de construcción, a alguna irregularidad o por la tipología constructiva.

La información de vulnerabilidad recabada y las propuestas de reforzamientos sísmico deberían utilizarse en el marco de los planes municipales de gestión del riesgo, cuya creación están indicados en la Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009) y que están contemplados en las ordenanzas municipales de edificaciones sismorresistentes. Actualmente se considera la necesidad de que los riesgos de desastres sean interpretados de manera más holísticas, integrales y más sociales donde se presente un estudio de los procesos que constituyen la construcción social del riesgo. Incluso podría exponer a los responsables a una penalización (Molina, 2017). Los planes municipales de gestión del riesgo podrían contribuir considerablemente a la mitigación del riesgo sísmico mediante la sistematización de la información y los reforzamientos sismorresistentes de edificaciones, para los cuales ya existen planteamientos concretos (sobre todo para edificaciones escolares), pero, con pocas excepciones, no se han gestionado los reforzamientos.

Participación comunitaria y educación sísmica

Otro aspecto importante para la mitigación del riesgo sísmico es la incorporación de las comunidades en los estudios y la transferencia del conocimiento hacia ellas. En los proyectos de microzonificación sísmica llevados a cabo desde FUNVISIS, se ha impulsado a través del Aula Sísmica la sensibilidad hacia el riesgo sísmico mediante la formación de multiplicadores en prevención sísmica. En Caracas se han desarrollado, en cooperación con diferentes organismos unos 650 talleres, en los cuales se discutieron el proyecto de microzonificación sísmica y los resultados esperados (Aguilar et al., 2015). Parte de las actividades fue el relato de la percepción de sismos sentidos por los participantes y el uso de medidas de autoprotección en los diferentes ámbitos (en los hogares, escuelas y lugares de trabajo).

En Barquisimeto, las actividades de divulgación y capacitación sísmica desarrolladas en los sectores comunitarios brindaron una excelente oportunidad de involucrar e informar a las personas sobre la amenaza sísmica en el Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare y sobre el impacto del Proyecto de Microzonificación en su vida cotidiana, dándole al producto final un mayor valor social (Aguilar et al., 2016). Se demostró la necesidad de abordar el tema de la reducción local del riesgo de una manera global, debido a la recurrencia de otra clase de riesgos, como las lluvias y la inseguridad personal. Por el otro lado, las comunidades apoyaron activamente en el levantamiento de los datos. De esta manera, las personas conscientes de la dimensión del riesgo sísmico pueden apoyar en la gestión de los recursos y la implementación de los resultados de la microzonificación sísmica.

CONCLUSIONES

Aportes clave de la microzonificación sísmica

El desarrollo de los estudios de microzonificación sísmica en las últimas décadas ha permitido un detallado conocimiento de la amenaza sísmica y la configuración del subsuelo en un número importante de ciudades venezolanas, mayormente ubicadas en el eje de las fallas activas más importantes (Boconó, San Sebastián y el Pilar). De esta manera, la microzonificación sísmica ha pasado de ser un estudio teórico con definiciones importantes logradas mediante la interacción con grupos de investigadores extranjeros (franceses y japoneses) a una herramienta fundamental para la ordenación territorial y la reducción del riesgo sísmico.

En los trabajos se ha logrado estimar los efectos locales del suelo mediante la identificación detallada de la forma de las cuencas sedimentarias y cómo su geometría contribuye a la amplificación de las ondas sísmicas (especialmente en Caracas, Barquisimeto, Guarenas-Guatire y Cumaná). El período fundamental de vibración del suelo, derivado de mediciones individuales de ruido ambiental, es un indicativo importante de la forma de la cuenca y la amplificación de las ondas sísmicas. La metodología utilizada, tanto para los espesores de sedimentos cómo para el Vs30, indicativo para los efectos someros, ha migrado de métodos sísmicos activos (con el uso de fuentes como explosivos o mandarria) a métodos sísmicos pasivos con el ruido ambiental como fuente. Se han aplicado métodos como ReMi o iMASW que permiten un mayor número de mediciones para una cobertura densa de mediciones, complementando información de Vs30 proveniente del análisis de la topografía.

Los métodos geofísicos de investigación del subsuelo se aplican juntamente con los análisis geomorfológicos, geológicos y geotécnicos para determinar la delimitación de las diferentes unidades, así como la identificación de efectos inducidos como el potencial de licuación, el peligro de deslizamientos en laderas o la afectación por ruptura de falla en superficie.

Mediante el cálculo de la amenaza sísmica local y de la respuesta sísmica en superficie, incorporando efectos de cuenca 2D y 3D, se han definido espectros de respuesta locales en las diferentes microzonas sísmicas que complementan los espectros de la norma de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) en el ámbito local. La incorporación de los mapas de amenaza sísmica local y los efectos inducidos en los planes de desarrollo urbano contribuyen a limitar construcciones en zonas de alta amenaza y de esta manera a la mitigación del riesgo sísmico.

Reflexión final sobre los avances y desafíos

Se han logrado en las últimas décadas estudios de microzonificación en las principales áreas metropolitanas venezolanas (Caracas, Barquisimeto, Valencia, Maracay, Barcelona, Mérida, Cumaná) y otras ciudades en zonas de alta amenaza sísmica gracias a la cooperación entre FUNVISIS y universidades nacionales e internacionales, produciendo resultados aplicables que van desde la caracterización detallada del subsuelo hasta la formulación de ordenanzas municipales.

Los principales desafíos son, aparte del desarrollo de espectros de respuesta en superficie para las microzonas sísmicas en las ciudades con información avanzada sobre la configuración del subsuelo, la interacción eficiente con los actores municipales que permite la elaboración de ordenanzas municipales, su aprobación y efectiva aplicación. Estos conocimientos deben incluirse también en planes de gestión de riesgos para una eficiente mitigación del riesgo sísmico. En este sentido, un tema fundamental son las construcciones en asentamientos no controlados, donde la mitigación puede lograrse mediante la planificación urbana, evitando el uso de zonas de alto riesgo.

Los estudios de microzonificación sísmica existentes deberán ampliarse a zonas de crecimiento urbano con la aplicación de metodologías eficientes con los nuevos avances tecnológicos. Es indispensable la transferencia del conocimiento a la práctica de la ingeniería civil, las entidades municipales los constructores y a las comunidades. La reducción efectiva del riesgo sísmico dependerá de la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica en ordenanzas municipales u otras herramientas de índole de planificación urbana y de gestión del riesgo sísmico y su aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Le dedico este trabajo a la memoria del Ing. Enrique Gajardo, quien me ha impulsado hacia la aplicación de la microzonificación sísmica en Venezuela. Un agradecimiento muy especial va al Ing. Julio J. Hernández, quien ha diseñado la metodología utilizada en los proyectos de microzonificación sísmica y quien ha participado ampliamente en su ejecución. Por último, quiero agradecer al grupo grande de profesionales y estudiantes de los equipos de trabajo de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y de varias universidades nacionales e internacionales – sin ellos no hubiera sido posible realizar los proyectos. Agradezco el apoyo de FUNVISIS para la realización de los proyectos y al FONACIT para su financiamiento.

REFERENCIAS

Abeki, N., Seo, K., Matsuda, I., Enomoto, T., Watanabe, D., Schmitz, M., Rendón, H., Sánchez, A. (1998a). Microtremor observations in Caracas city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Balkema, 619-624.

Abeki, N., Watanabe, D., Hernández, A., Pernía, A., Schmitz, M., Avendaño, J. (1998b). Microtremor observations in Cumaná city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Balkema, 613-618.

Abreu, R., Schmitz, M. (2009). Simulación numérica de la respuesta sísmica 2D de Cumaná y Barquisimeto aplicando el método de elementos espectrales. V Col. Microzon. Sís., Caracas, 4p.

Abreu, R., Alvarado, L., Schmitz, M., Hernández, J.J. (2016). 6.3 Efectos de cuenca 2D. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 141-148.

Aguilar, A., Cano, V., Guzmán, J.., Marín, W., Quintero, B. (2015). 6.2. Divulgación y capacitación en prevención sísmica, en: Schmitz, M., Singer, A. (Editores), Microzonificación sísmica de Caracas. FUNVISIS, p. 165-169.

Aguilar, A., Quintero, B. Guzmán, J.., Marín, W., Figueira, W., Rodríguez, L., Quinteros, C. (2016.) 6.6. Divulgación y capacitación en prevención sísmica, en: Schmitz, M., Morales, C. (Editores), Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 154-157.

Aki, K. (1993). Local site effects on weak and strong ground motion. Tectonophysics, 218, 93–111.

Acosta, R., Schmitz, M., Rondón, F. (2021). Mapa de Vs30 de Carúpano a partir de la topografía. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.

Acosta, Y., Sánchez-Rojas, J., Pastor, P., García, K., Schmitz, M. (2018). Integración de estudios geofísicos en Valle de la Pascua con fines de microzonificación sísmica. JIFI-UCV, 9p.

Alba, D. (2022). Determinación de microzonas sísmicas del Área Metropolitana de Barcelona basadas en la evaluación de Vs30 y espesores sedimentarios. TEG, USB, 87p.

Allen, T., Wald, D. (2009). On the use of High-Resolution Topographic Data as proxy for seismic site conditions (Vs30). Bull. Seismol. Soc. Am, 99, (2A), 935-943.

Ali, F. (2021). Evaluación del potencial de licuación de suelos utilizando información geofísica y geotécnica en Maracay, estado Aragua. TEG, UCV, 126p.

Alonso, J.L. (1975). La microzonificación sísmica como elemento imprescindible en el planeamiento urbano. Bol. Col.-Ing. Ven., 304.

Alonso, J.L. (1976). Microzonificación sísmica de Mérida - espectros sísmicos, coeficientes de corte basal de diseño y recomendaciones finales. Ministerio de Obras Públicas, Oficina Técnica Especial del Sismo, Caracas, 48p.

Alonso, J.L., Larotta, J. (1977). Seismic Risk and Seismic Zoning of the Caracas Vallez. 6to Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Nueva Delhi, abstract.

Amarís, E., Schmitz, M., Murphy, V. (2011a). Map of sediment thickness as primary input for the Caracas Seismic Microzoning Project. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago de Chile, Paper Nr. MOSAM, 12p.

Amarís, E., Moncada, J., Schmitz, M. (2011b). Modelo gravimétrico del basamento de la cuenca de Guarenas y Guatire estado Miranda. Venezuela. I Congr. Ven. Geociencias, Caracas, 4p.

Aranguren, R. (2018) aportes para la integración de estudios de zonificación de amenazas naturales en la gestión urbana del Municipio Libertador, Mérida. TEG-Msc, ULA, 94p.

Aray, J. (2008) Estudio geofísico integrado en la ciudad de El Tocuyo y zonas adyacentes. (Municipio Morán, Estado Lara). TEG, UCV.

Aray, J., Schmitz, M., Amaris, E. y 19 co-autores (2010). Informe técnico de avance proyecto LOCTI: microzonificación sísmica en la ciudad de Cumaná, estado Sucre. FUN – 029, 2010. Inédito, 9 anexos, 60p.

Aray, J., Rocabado, V., Sánchez-Rojas, J., Morales, C., Schmitz, M., Álvarez, F. (2015). Resultados de estudios geofísicos realizados en la ciudad de Cumaná como aporte al proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad. X CONVESIS, Cumaná, 6p.

Audemard M., F.A., Machete, M.N., Cox, J.W., Dart, R.L., Haller, K. (2000). Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. US Geological Survey, Open-file report 00-018, 72p. + map.

Audemard, F.A., Romero, G., Rendón, H., Cano, V. (2005). Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from fault-slip data and focal mechanism solutions. Earth-Sci. Rev., 69, 181–233.

Audemard, F.A., Alvarado, L., Arnaiz-Rodríguez, M. y 11 co-autores (2025). Sismicidad de profundidad intermedia de la losa de subducción de las Antillas menores, próxima a la península de Paria, Venezuela. Bol. Geol. 47 (1), 105–127.

Ávila, J., Schmitz, M., Oropeza, J., García, K., Moncada, J.A. 2012. Estimación de espesores sedimentarios de las ciudades de Carora, El Tocuyo, Duaca, Tamaca y Quibor como aporte en la microzonificacion sísmica en el estado Lara. Informe Técnico, FUN – 021, 2012, 85p.

Ávila, J., Oropeza, J., Gómez, A., Schmitz, M., García, K. (2014). Integración de datos geofísicos y geológicos para la microzonificación sísmica de Carora, estado Lara. GEOS, 46(1), 1-17.

Ávila, J., Aray, J., Colón, S., Schmitz, M. (2016). Microzonas sísmicas de El Tocuyo, estado Lara basadas en integración de datos geofísicos y geológicos. VII Col. Microzon. Sís., Mérida, 26p.

Bard, P.Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatani, T. (eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study, vol. 3, Balkema, p. 1251-1279.

Barrios, I., Rendón, H., Schmitz, M., Martínez, A. (2019). Relocalización absoluta y relativa de la secuencia sísmica de Lagunillas, estado Mérida, Venezuela**.** Rev. Fac. Ing. UCV, 34(1), 9p.

Bechtold, M. (2004). Mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores con énfasis cuaternario. Informe inédito. FUNVISIS.

Bellizzia, A., Rodríguez, D. (1968). Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. Bol. Geol., Caracas, 9(18), 515-563.

Bezada, M.J., Magnani, M.B., Zelt, C.A., Schmitz, M., Levander, A. (2010). The Caribbean–South American plate boundary at 65◦W: results from wide-angle seismic data. J. Geophys. Res. 115, B08402.https://doi.org/10.1029/ 2009JB007070.

Boore, D.M. (2004). Estimating Vs (30) (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m). Bull. Seismol. Soc. Am., 94, 591-597.

Bueno, M., Schmitz, M., Hernández, J.J. y 13 co-autores (2009). Caracterización física del terreno con fines de Microzonificación Sísmica de la zona del proyecto "Ciudad Camino de los Indios". V Col. Microzon. Sís., Caracas, 4p.

Campos, A., Schmitz, M., Cataldi, A. (2004). Definición de las relaciones entre parámetros geofísicos y geotécnicos en pozos disponibles a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, 12p.

Cárdenas, H., Rocabado, V., Schmitz, M. (2015). Caracterización sísmica del suelo de la ciudad de Rubio por el método H/V, municipio Junín, estado Táchira. X CONVESIS, Cumaná, 10p.

Casalena, M. (2011). Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por microtremores (ReMi) en la ciudad de Maracay - estado Aragua. TEG, UCV, 154p.

Cerrada, M., Klarica, S., Choy, J., Guada, C., Aranguren, R., Laffaille, J., Mazuera, F., Reinoza, C., Schmitz, M., Rocabado, V., Morales, C., Yegres, L. (2015). Determinación de microzonas sísmicas preliminares del Área Metropolitana de Mérida. Bol. Geol., 37 (1), 67-74.

CETE-Méditerranée (1993). Microzonage Venezuela 1992: El Vigía y Maracaibo. Premier bilan des séismes enregistrés. Descriptif des traitements effectués. Spectres des séismes sur les sites. Rapports spectraux site/référence. Rapports signal/bruit. 5 vol., Niza.

Cetin, K.O Seed, R.B., Moss, R.E.S., Der Kiureghhian, A. (2001). Field case histories for SPTBased In Situ Liquefaction Potential Evaluation. Geotechnical Research Rep. No. UCB/GT-2000/09.

Colón, S. (2009) Estudio geológico integrado de la cuenca de El Tocuyo - Estado Lara, con fines de microzonificación sísmica. TEG, ULA, Mérida.

Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull. Seismol. Soc. Am., 58, 1583-1606.

Cornou, C., Cadet, H., Rocabado, V., Schmitz, M., Rendón, H., Causse, M., Wathelet, M. (2011). Shear-wave velocities in Caracas inferred from inversion of phase velocities and ellipticities of Rayleigh waves. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 153–159.

Coronel D., G., López, O. (2010). RISEV: un Sistema para la Evaluación de Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela Basado en SIG. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME). Presentado en Taller sobre SIG, FUNVISIS.

COVENIN (2001). Norma venezolana COVENIN 1756-1:2001, Edificaciones sismorresistentes. Parte 1: Articulado (1ra. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, FUNVISIS, Caracas, http://www.sencamer.gob.ve/ sencamer/normas/1756-01.pdf.

COVENIN (2019). Norma venezolana COVENIN 1756-1:2019, Construcciones sismorresistentes. Parte 1: Requisitos (2da. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FODENORCA, Caracas, http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1756-1-2019.pdf .

Crasto, N., Acosta, R., Rondón, F., Schmitz, M. (2021). Modelos gravimétricos 2D de Cariaco. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.

Cruces, J., Izarra, C., Schmitz, M. (2008). Modelado gravimétrico 3D en Cumaná usando datos procesados a partir de nuevos estándares. XIV Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 7p.

Dasco, A., Rodríguez, L., Singer, A., Quintero, B. (2013). El caso Cubiro, una experiencia de gestión de riesgo compartida en una población del interior de Venezuela afectada por deslizamientos de tierra. IV Col. Mesoam. Gest. Riesgo, Mexico, 8p.

Decreto con Rango, Valor y Fuerza de Ley Especial de Regularización Integral de la Tenencia de la Tierra de los Asentamientos Urbanos o Periurbanos (2011). Decreto 8.198 publicado en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela Nº 39.668 del 6 de mayo de 2011.

Delavaud, É. (2007). Simulation numérique de la propagation d'ondes en milieux géologiques complexes: application à l'évaluation de la réponse sismique du bassin de Caracas. PhD thesis, IPGP, France, 155p.

Delgado V., J., Jiménez, V., Barreto, S. y 19 co-autores (2014). Estrategia V.I.D.E.O. Módulo de Transferencia de conocimientos del Proyecto Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos. VI Col. Microzon. Sís., Valencia, 5p.

Dengo, G. (1951). Mapa geológico de la región de Caracas a escala 1:50000. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de Geología.

De Santis, F., Hernández, R. (1999). Caracterización de los suelos que licuaron durante el sismo del 9 de Julio de 1997 en Cariaco, Estado Sucre, VI CONVESIS, Mérida, 10p.

Duque, M.E., García, K., Schmitz, M. (2011). Caracterización de los sedimentos en Duaca, Tamaca, Carora, Quibor y El Tocuyo, Edo. Lara, aplicando el método ReMi. I Congr. Ven. Geociencias, Caracas, 4p.

Durán, L. (2015). Caracterización sísmica del suelo en la ciudad de San Cristóbal Estado Táchira a través del método de Nakamura. TEG-Msc, Geofísica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría – CUAJE, 62p.

Duval, A.-M., Mendoza, J., Méneroud, J.-P., Prida, F., De Santis, F., Singer, A., Vidal, S. (1995). Experimental Microzonation in Venezuela, 5th International Conference on Seismic Zonation, Oct. 17-19, 1995, Nice, France, EERI, (3), 2227-2234.

Duval, A.-M., Méneroud, J.-P., Vidal, S., Singer, A. (1998). Relation between curves obtained from rnicrotremor and site

effects observed after Caracas 1967 earthquake, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, p. 1-9.

Escobar, V.A., Schmitz, M., López, N., Sánchez-Rojas, J., Rondón, F. (2023). Aporte del mapa Vs30 obtenido del análisis de ondas superficiales (iMASW y ReMi) para la microzonificación sísmica de Maracay, Venezuela. II Congr. Ven. Geociencias, Caracas, 2p.

Esteva, L. (1967). Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico. Boletín Técnico del IMME, 19, 49-73. XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y III Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas.

Farías, V. (2017). Inversión 1D de perfiles de ruido sísmico ambiental en la ciudad de Cumaná, Venezuela. TEG, USB, 64p.

Feliziani, P., Piscitelli, G., Castillo, A. (2004) Sistema de Información Geográfica aplicado al subsuelo del Área Metropolitano de Caracas – Proyecto SIGAMC. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, Memorias.

Flores, Y. (2006) Evaluación sísmica y sondaje geotécnico de pozos en la ciudad de Caracas. TEG, UCV, 128p.

FUNVISIS, IMME-UCV, UDO, ACV, CAV and CI-Sucre (1997). The July 9, 1997, Cariaco, Eastern Venezuela Earthquake. EERI-Newsletter, 31 (10), EERI Special Earthquake Report, 1-8.

García, C.E. (2019). Caracterización de suelos de la ciudad de Cumaná, estado sucre aplicando arreglos de multicanal con geófonos de 1 Hz. TEG, USB, 114p.

García, K. (2012). Caracterización geofísica en Guarenas-Guatire mediante la aplicación de técnicas de arreglos de vibraciones naturales. TEG-Msc., UCV.

García, K., Morales, C., Sánchez, J., Schmitz, M. (2006). Determinación de velocidades de ondas de corte (Vs30) en el Área Metropolitana de Caracas, a partir de conversión SPT-velocidad de ondas de cortes, análisis de ondas superficiales y sísmica de refracción. VIII CONVESIS, Valencia, 9p.

García, K., Morales, C., Schmitz, M., Hernández, J.J., Masy, J., Tagliaferro, M., Andrade, L., Rojas, R. (2016). 4.2 Características geofísicas y geotécnicas someras de los sedimentos (Vs30). En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 64-71.

García, K., Hernández J.J., Rocabado, V., Schmitz, M. (2016) 6.4. Selección de microzonas en sedimentos y laderas. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 148-151.

García, L. (2023). Determinacion de microzonas sísmicas de La Guaira, basada en Vs30, estudios gravimétricos y espesores sedimentarios. TEG, USB, 132p.

García, L., Rondón, F., Crasto, N., Schmitz, M. (2023). Microzonas sísmicas preliminares del estado La Guaira, en base a evaluación de Vs30, estudios gravimétricos y espesor de sedimentos. II Congr. Ven. Geociencias, Caracas, 2p.

García, O., Sánchez-Rojas, J., Rocabado, V., Mazuera, F., Schmitz, M. (2015). Modelado gravimétrico 3D en torno a la ciudad de Trujillo, estado Trujillo. X CONVESIS, Cumaná, 9p.

Gascón, R., Paolini, M., Schmitz, M. (2009). Determinación de los períodos fundamentales del suelo en las ciudades de Barcelona, Puerto La Cruz y Lecherías, como aporte a la microzonificación sísmica. V Col. Microzon. Sís., Caracas, 4p.

Gil, R. (2021). Mapa de clasificación de microzonas sísmicas, con base en las velocidades Vs30, los espesores de sedimentos y el potencial de licuación en la ciudad de Valencia, Estado Carabobo. TEG, UCV, 149p.

Goitia, M. (2012). Modelado gravimétrico del basamento de la zona norte de la ciudad de Valencia, Edo. Carabobo. TEG, USB, 105p.

Gómez, J., Schmitz, M., Coronel, G., Morales, C., Santana, L.A., Brugueras, C., Rodríguez, A. (2014). Aplicación WEB para el cálculo de los espectros de diseño de las microzonas sísmicas de Caracas. VI Col. Microzon. Sís., Valencia, 5p.

González, E. (2011). Formas de relieve y amenazas asociadas como criterios en las sectorizaciones de los planes urbanos. TEG-Msc, USB.

González, J., Schmitz, M., Masaki, K., De Santis, F., Sánchez, A. (1999). Characterization of the soils in Cariaco using seismic refraction, rnicrotremor measurements and geotechnical information AGU Spring Meeting, Boston, S228.

González, J., Schmitz, M., Audemard, F., Contreras, R., Mocquet, A., Delgado, J. and De Santis, F. (2004). Site effects of the 1997 Cariaco, Venezuela earthquake. Engineering Geology, 72, 143-177.

González, M., Álvarez, L., Schmitz, M. y 9 co-autores (2009). Principales avances del proyecto microzonificación para la planificación urbana y la gestión local de riesgo en Guarenas y Guatire, Venezuela. III Simposio de Sismología y Riesgos Geológicos, III Convencion Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 9p.

Graffe, J.L. (2002). El fenómeno de licuación en el subsuelo del área Norte del Estado Anzoátegui, un enfoque actual de evaluación y análisis. TEG, UDO.

Grases, J., Altez, R., Lugo, M. (1999). Catálogo de sismos sentidos o destructores, Venezuela, 1530-1998. Acad. Cienc. Fis. Mat. y Nat. y UCV-FI, Ed. Innovación Tecnológica, FI-UCV, 654p.

Guasch, F., Rodríguez, L., Vega, I., Morales, C., Schmitz, M., Miró, C., Viete, H., Rada, F., González, M., Noda, F., Amaris, E. (2011). Diagnóstico situacional con fines de gestión de riesgo en las ciudades de Guarenas y Guatire, estado Miranda, Venezuela. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 33–48.

Guerrero, L., Moreno, P., Schmitz, M., Rondón, F., González, D. (2024). Estudios del subsuelo mediante la aplicación de los métodos IMASW y la Relación Espectral H/V para la Microzonificación Sísmica de los Municipios Plaza y Zamora de la Cuenca Guarenas – Guatire. JIFI-EAI-UCV, 8p.

Guillen, G. (2016). Determinación de la condición local del subsuelo a partir de mediciones de microtremores (ReMi) en la población de Lagunillas, Estado Mérida. TEG, ULA, 102p.

Hackley, P., Urbani, F., Karlsen, A.W., Garrity, C.P. (2006). Geologic shaded relief map of Venezuela U.S. Geological Survey, open file report 2005–1038. https://pubs.usgs.gov/of/ 2005/ 1038/index.html; 2006.

Hernández, A. (2008). Caracterización geofísica en la zona Tamaca-Duaca Del estado Lara, mediante estudios Gravimétricos y de ruido sísmico ambiental. TEG, UCV, 184p.

Hernández, J.J. (2009a). Revisión de la sismicidad y modelo sismogénico para actualización de las evaluaciones de amenaza sísmica en la región norcentral de Venezuela. IX CONVESIS, Caracas, 15p.

Hernández, J.J. (2009b). Incorporación de la información macrosísmica en modelo sismogénico de Venezuela con fines de evaluaciones de amenaza sísmica. V Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica, Mérida, 5p.

Hernández JJ. (2009c). Confiabilidad sísmica-estructural de edificaciones existentes de Caracas. Proyecto Pensar en Venezuela, C.I.V., Jornadas 18 y 19 de septiembre de 2009, 107p.

Hernández, J.J., Domínguez, J. (2009). Evaluación de edificaciones tipificadas. Sub.capítulo 5.3, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007. Inédito, p. 701-816.

Hernández, J.J., Schmitz, M. (2009). Evaluación actualizada de amenaza sísmica para las microzonificaciones de Caracas, Barquisimeto y Cabudare. V Col. Microzon. Sís., Caracas, 4p.

Hernández, J.J, Schmitz, M. (2019). Amenaza sísmica en los Andes de Mérida, Venezuela. Rev. Fac. Ing. UCV, 34(2), 15p.

Hernández, J.J., Schmitz, M. (2023). Amenaza sísmica con efectos de sitio y análisis de recurrencia de intensidades para Caracas. Rev. Ing. Sís., 110, 45-85. https://www.smis.mx/index.php/RIS/index.

Hernández, J.J., Schmitz, M., Audemard, F., Malavé, G. (2006). Marco conceptual del proyecto de microzonificación de Caracas y Barquisimeto. VIII CONVESIS, Valencia, 8p.

Hernández, J.J., Valleé, M., Feliziani, P., Schmitz, M., Oropeza, J., Tagliaferro, M., Castillo, A., Cano, V. (2008). Peligro sísmico de deslizamientos en laderas de Caracas. 50 aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), Caracas, 14p.

Hernández, J.J., Schmitz, M., Molina, D., Azuaje, J. (2009). Amenaza sísmica local. Capítulo 2.4 del Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, Inédito, p. 150-250.

Hernández, J.J., Schmitz, M., Delavaud, É., Cadet, H., Domínguez, J. (2011). Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas incluyendo efectos de sitio 1D, 2D y 3D. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 49–66.

Hernández, J.J., Azuaje, J., Molina, D. (2016). 3.4 Amenaza sísmica local. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 51-56.

Hernández, J.J., Schmitz, M., Zerpa, S. (2021). Evaluación de la amenaza sísmica para la microzonificación sísmica de Carora. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.

Hernández, J.J., Valleé, M.†, Schmitz, M., Oropeza, J., Tagliaferro, M., Feliziani, P. (2023). Peligro de deslizamientos en Caracas. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, p. 110-115.

Hinojosa, M.G., Schmitz, M., Sánchez-Rojas, J., Rondón, F. (2021). Caracterización de la cuenca de Carúpano mediante el uso de las curvas de elipticidad de ondas de Rayleigh. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.

Hobiger, M., Bard, P.-Y., Cornou, C., Bihan, N.L. (2009). Single Station Determination of Rayleigh Wave Ellipticity by Using the Random Decrement Technique (RayDec). Geophys. Res. Lett., 36(14). doi:10.1029/2009gl038863.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE. p 32-56.

Kantak, P. (2001). Sediment thickness, an east-west cross section, shallow seismic velocities, and microtremor measurements in the Caracas valley. Graduate thesis, Universität Bonn (Germany) / FUNVISIS, Caracas, 268 p (published on CD in GEOS, 35 (2002), UCV, Caracas).

Kantak, P., Schmitz, M., Audemard, F. (2005). Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas Valley. Rev. Fac. Ing. UCV, 20(4), 43-56.

Lang, D.H., Raschke, M., Schwarz, J. (2004). The Cariaco, Venezuela, earthquake of July 09, 1997: strong-motion recordings, site response studies and macroseismic investigations. Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar, 116p.

Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio (1983). Ley Orgánica Derogatoria en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela Nº 38.633 del 27 de febrero de 2007.

Ley Orgánica de Ordenación Urbanística (1987). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°33.868 del 17 de diciembre de 1987.

Ley de la Organización Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres (2001). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°5.557, Extraordinaria del 13 de noviembre del 2001.

Ley Orgánica del Sistema Venezolano para la Calidad (2002). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°37.555 del 23 de octubre de 2002.

Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela Nº 39.095 del 9 de enero de 2009.

Ley de Tierras Urbanas (2009). Gaceta Oficial Extraordinario de la República Bolivariana de Venezuela Nº 5.933 del 21 de octubre de 2009.

Linares, M., Rodríguez, L., García, I., González, O., Crasto, N., Alvarado, J.L., Schmitz, M., García, M.V., Valero, D., Abreu, O. (2026). Evidencias geomorfológicas de deformación de los sistemas de fallas activas en Boconó. Contribución al proyecto "Análisis de sistemas dinámicos sismológicos mediante gráficos de recurrencia y mapas autoorganizados para caracterizar la sismicidad en Venezuela" (Fonacit 2024PGP100), Informe inédito, FUNVISIS, 21p.

López, N. (2021). Generación de mapas Vs30 y microzonas sísmicas, mediante el análisis multicanal de ondas

superficiales interferométrico (IMASW) y ensayos geotécnicos en Maracay, estado Aragua. TEG, UCV, 99p.

López, O.A., Coronel D., G. Editores (2024). Riesgo sísmico en Caracas y estrategias de mitigación. Ediciones de la Biblioteca EBUC-UCV, ISBN: 978-980-18-3841-8, 510p.

López, O. A., Marinilli A., Coronel D., Editores (2015). Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela. IMME-UCV, FUNVISIS y FEDE. ISBN: 978-980-12-7455-1 Depósito Legal: If25220146202146, 1046p.

Louie, J.N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bull. Seismol. Soc. Am., 91: 347-364.

Martínez, C. (2007). Análisis espectral y modelado 3D de datos gravimétricos de la cuenca de Carora, estado Lara – Venezuela. TEG, UCV, 185p.

Masaki, K., González, J., De Santis, F., Schmitz, M., Pernía, A., Sánchez, A., Saguchi, K., Duque, H. (1999). Caracterización de los suelos de Cariaco mediante mediciones de ruido ambiental, sísmica de refracción y análisis de información geotécnica. VI CONVESIS, Mérida, 6p.

Mazuera, F., Sánchez, J., Cerrada, M. y 13 co-autores (2015). Investigación aplicada a la gestión del riesgo sísmico en las ciudades de Valera, Trujillo y Boconó, estado Trujillo, con fines de microzonificación sísmica. X CONVESIS, Cumaná, 11p.

Medina, P., Paolini, M., Sánchez Rojas, J., Schmitz, M. (2016.) Modelado preliminar 2D del subsuelo del Área Metropolitana Norte del Estado Anzoátegui, a través de datos de refracción sísmica. VII Col. Microzon. Sís., Mérida, 4p.

Mendes, M. (2004). Caracterización geofísica del subsuelo de la zona oeste de Barcelona, estado Anzoátegui, aplicando métodos sísmicos y gravimétricos. TEG, UCV.

Mijares, M.M., Schmitz, M., Sánchez-Rojas, J., Rondón, F. (2021). Estudio del parámetro Vs30 mediante el análisis multicanal de ondas superficiales en la ciudad de Valencia. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.

Molina C. (2017). Penalización de la construcción social del riesgo de desastre en países Andinos. TEG-Msc, Gestión de Riesgos Socionaturales, ULA, 199p.

Molina, D., Paolini, M., Moncada, J.A., Amarís, E., Reinoza, C., Quinteros, C., Pacheco, D. (2008). Estudio de amenaza sísmica del puerto de Carúpano y sus zonas aledañas, Estado Sucre. Contrato Nº 4600005279 (PDVSA – FUNVISIS), Informe Técnico, FUN – 075, 2007, 73p.

Molina, L., Rocabado, V., Schmitz, M. (2015). Caracterización sísmica del suelo aplicando el método de relación espectral H/V en las ciudades de San Antonio del Táchira y Ureña, estado Táchira. X CONVESIS, Cumaná, 8p.

Molina, Z. (2016). Caracterización sísmica del suelo aplicando el método Nakamura en las ciudades Lobatera y Michelena Estado Táchira. TEG-Msc, Geofísica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría – CUAJE.

Morales, C. (2006). Elaboración de un mapa de velocidades de ondas de corte hasta los 30m de profundidad mediante refracción sísmica y datos geotécnicos. TEG, UCV, 118p.

Morales, C., Hernández, J.J., Schmitz, M., Cano, V., Tagliaferro, M. (2011). Velocidades promedias de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (Vs30), inferidos a partir del relieve en el Área Metropolitana de Caracas. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 161–168.

Morales, C., Schmitz, M., Pullammanappallil, S. (2015). Calibración del modelo geológico-geofísico del subsuelo de Barquisimeto y Cabudare a través de métodos sísmicos y la respuesta espectral en superficie. Bol. Geol., 37 (1), 57-66.

Morejón, G., López, O.A., Berenguer, Y., Leyva, K., Villalón, M., Rengel, J.G., González, O., Álvarez, L., Schmitz, M. (2014). Evaluación del riesgo sísmico del fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire. Rev. Fac. Ing. UCV, 29(3), 37-50.

Morfe, J., Schmitz, M., Alvarado, L., Álvarez, L., Zapata, J., Rendón, H. (2015). Simulación del campo de ondas sísmicas y caracterización de amplitud y período con fines de microzonificación sísmica para las ciudades Guarenas-Guatire. Bol. Geol., 37 (1), 27-43.

Murphy V, Linehan D, Turcotte T. (1969). Seismic investigations, Valley of Caracas and the Litoral Central. Weston, Massachusetts (under Planning and Supervision of the Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo): Weston Geophysical Engineers International, Inc.; 1969; p. 1–22.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. QR of RTRI, 30 (1).

Olivier M. (2009). Evaluation of the liquefaction potential of the city of Cumaná, Venezuela. Internship Report. CEDI-FUNVISIS.

OPS (1995). Evaluación sismorresistente del hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Estado Sucre. Organización Panamericana de Salud, Caracas, volumen 1, 132p.

Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes del Municipio Iribarren (2018). Gaceta Municipal Extraordinaria del Municipio Iribarren, Estado Lara Nº 4512 del 16 de mayo de 2018.

Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital (2018). Gaceta Municipal del Municipio Bolivariano Libertador Nº 4331-2 del 10 de julio de 2018.

Ordenanza de Microzonificación Sísmica del Municipio Palavecino (2018). Gaceta Municipal del Municipio Palavecino, Estado Lara Nº 9285 del 13 de julio de 2018.

Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio El Hatillo del Estado Bolivariano de Miranda (2021). Gaceta Municipal del Municipio El Hatillo Nº 119/2021 del 31 de mayo de 2021.

Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Sucre del Estado Miranda (2021). Gaceta Municipal Extraordinario del Municipio Sucre Nº 415-A del 25 de noviembre de 2021.

Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital (2024). Gaceta Municipal del Municipio Bolivariano Libertador Nº 5062-A del 17 de mayo de 2024.

Ornelas A. (2018). Inversión 1D de la onda Rayleigh de datos de ruido ambiental en la ciudad de Maracay. TEG, USB, 123p.

Oropeza, J. (2011). Resultados preliminares de la perforación profunda realizada en la ciudad de Cumaná, estado Sucre, para ulterior instalación de observatorios acelerográficos. FUN-058,2011. CEDI-FUNVISIS. 6p.

Oropeza, J. (2012). Estudio de amenazas naturales en la cuenca de Carora, edo. Lara, con fines de microzonificación sísmica. Informe Interno FUN-067/2012, FUNVISIS. 68p. + 5 anexos.

Pacheco, D. (2008). Estudio geofísico integrado de la ciudad de Carúpano, Edo. Sucre aplicando método gravimétrico y ruido sísmico ambiental. TEG, UCV, 138p.

Padrón, C., Mendes, K., Schmitz, M., Hernández, J.J. (2011). La Microzonificación Sísmica en el Proceso de Planificación Urbana del Municipio Chacao. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 89–101.

Padrón, M.F. (2012). Caracterización geofísica del subsuelo somero mediante ReMI en el Área Metropolitana del Norte de Anzoátegui. TEG, USB, 76p.

Paolini, M. (2006). Análisis de los períodos fundamentales del suelo en la ciudad de Carora, Municipio Torres, estado Lara. TEG, USB, 97p.

Paolini, M., Schmitz, M. (2014). Caracterización de sitio a partir de mediciones de ruido ambiental en la Región Norte Metropolitana del Estado Anzoátegui. VI Col. Microzon. Sís., Valencia, 4p.

Paolini, M., Pacheco, D., Rocabado, V., Moncada, J., Reinoza, C., Amarís, E., Schmitz, M. (2009). Estudio geofísico integrado en la ciudad de Carúpano, estado Sucre. V Col. Microzon. Sís., Caracas, 4p.

Paolini, M., Rodríguez, L.M., Olbrich, F. (2012). Actualización de las fallas activas de Venezuela como aporte a la evaluación de la amenaza sísmica. FUN-077; 2012, FUNVISIS, Caracas.

Papageorgiou AS, Kim J. (1991). Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. Bull. Seismol. Soc. Am.;81, 2214–33.

Parra, J., Morales, C., Schmitz, M., Cerrada, M., Linares, M., Sánchez Rojas, J. (2016). Analogía entre valores de Vs30 calculados para ciudades venezolanas a partir del relieve y refracción por microtremores. VII Col. Microzon. Sís., Mérida, 4p.

Pastor, P (2014). Caracterización de los sedimentos someros y profundos en Valle de la Pascua, Estado Guárico, Aplicando el Método ReMi. TEG, USB.

Pérez, O.J.P., Wesnousky, S.G., De La Rosa, R., Márquez, J., Uzcátegui, R., Quintero, C., Liberal, L., Mora-Páez, H., Szeliga, W. (2018). On the interaction of the North Andes plate with the Caribbean and South American plates in northwestern South America from GPS geodesy and seismic data. Geophys. J. Int., doi: 10.1093/gji/ggy230.

Pombo A. (2018). Riesgo sísmico en el Área Metropolitana de Valencia. Tesis doctoral, U. Carabobo, Valencia, 271p.

Ramírez, N. (2014). Aplicación de una metodología para zonificar susceptibilidad ante movimientos de masa. Ciudad de Mérida y sus alrededores. TEG-Msc, ULA.

Ramírez-Lisboa, P., Guillén, B., Sánchez-Rojas, J., Schmitz, M. (2015). Modelado gravimétrico 3D del basamento del Área Metropolitana del Norte del estado Anzoátegui, Venezuela. Rev. Fac. Ing. UCV, 30 (4), 35-48.

Reglamento de la Ley Orgánica de Ordenación Urbanística (1991). Decreto 833, Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 34.678 del 19 de marzo de 1991.

Reinoza, C., Sánchez, J., Schmitz, M., Klarica, S. (2006). Modelado geofísico del basamento del área Metropolitana de la ciudad de Mérida, Venezuela. Rev. Fac. Ing. UCV, 21(4), 71-80.

Reinoza, C., Morales, C., Rocabado, V., García, K., Sánchez, C., Abreu, R., Schmitz, M. (2011). Espesores de sedimentos a partir de la integración de datos geofísicos en Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 67–76.

Rendón, H., Alvarado, L., Vásquez, R., Romero G. (2014). Depuración y actualización del catálogo sísmico instrumental de Venezuela, BASEVEN, como producto previo al catálogo necesario en los estudios de la amenaza sísmica. FUN-056,2014, FUNVISIS, Caracas, 38p.

Rocabado, V., Schmitz, M., Rendón, H., Vilotte, J.-P., Audemard, F., Sobiesiak, M., Ampuero, J.-P., Alvarado, L. (2006). Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del valle de Caracas. Rev. Fac. Ing. UCV, 21(4), 81-93.

Rocabado, V., Schmitz, M., Sánchez, J., Reinoza, C. (2007). Geophysical studies in Barquisimeto metropolitan area, Venezuela, as contribution to a seismic microzoning Study: 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. 1425.

Rocabado, V., Aray, J., Morales, C., García, K., Schmitz, M., Sánchez, C., Heredia, J., Pombo, A., Rojas, C., Meza, J. (2011). Determinación del espesor de sedimentos para las ciudades de Maracay y Valencia a partir de mediciones de ruido ambiental y sísmica de refracción como aporte a los estudios de microzonificación. JIFI-UCV, 2p.

Rocabado, V., Schmitz, M., Cerrada, M. (2015). Determinación de las funciones de transferencia para la ciudad de Mérida a partir de registros acelerográficos de pozo. X CONVESIS, Cumaná, 5p.

Rodríguez, A.R. (2013). Caracterización geofísica del subsuelo profundo mediante la técnica ReMi en el Área Metropolitana del Norte del Estado Anzoátegui. TEG, USB, 67p.

Rodríguez, A., Sánchez, A. (2016). Determinación de los periodos fundamentales del subsuelo a través de mediciones de ruido sísmico ambiental en San Juan de Lagunillas, Edo. Mérida con fines de microzonificación sísmica. TEG, Ingeniero Geólogo, ULA.

Rodríguez, L., Singer, A. (2016). 4.4 Evaluación de Geoamenazas en Barquisimeto-Cabudare. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 82-98.

Rodríguez, L., Singer, A., Rocabado, V. (2005). Evidencias geomorfológicas de fenómenos de sufosión-tubificación-colapso en el tope de la terraza pleistocena de Barquisimeto. IV Col. Microzon. Sís., Barquisimeto, Serie Técnica FUNVISIS No. 1, 2005, p. 235-239.

Rojas, C. (2008). Determinación de los períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Maracay, Edo. Aragua. TEG, UCV, 123p.

Rojas, M. (2015). Determinación de los periodos fundamentales de los suelos en la localidad de Lagunillas Estado Mérida, a partir de mediciones de ruido sísmico

ambiental, con fines de microzonificación sísmica. TEG, ULA.

Rojas, R., Delgado, J., Domínguez, J., Hernández, J.J. (2016). 5.2 Distribución de edificaciones. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 120-129.

Román W. (2011). Caracterización geofísica del subsuelo mediante estudios sísmicos con fines de microzonificación en la ciudad de Cumaná, estado Sucre. TEG. UCV.

Romero, G. (2017). Elaboración de un modelo gravimétrico en 3D del basamento en la ciudad de Maracay. TEG, USB, 68p.

Romero, M., Cragno, A., Ambrosio, R., Schmitz, M. y González, J. (2006). Evaluación geofísica de los conos aluviales en Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, edo. Vargas. Boletín del IMME, Vol. 44 (1), 16-29.

Sánchez J.A. (2015). Caracterización de la cuenca de Guarenas-Guatire, estado Miranda, mediante perfiles de refracción sísmica. TEG, UCV, 57p.

Sánchez, J., Schmitz, M. y Cano, V. (2005a). Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas. Boletín Técnico del IMME, 43(2), 49-67.

Sánchez, J., Hecht, J., Amarís, E., Rodríguez, S., Schmitz, M. (2005b). Estudio geofísico de la cuenca de Guarenas-Guatire y la zona este de expansión de la ciudad de Caracas (Municipios Sucre y Plaza, Distrito Capital). IV Col. Microzon. Sís., Barquisimeto, Serie Técnica FUNVISIS No. 1, 254-259.

Sánchez-Rojas, J., Prieto, A., Mazuera, F., Schmitz, M. (2016). Análisis y modelado 3D del subsuelo a partir de integración de información geológica y gravimétrica con fines de microzonificación sísmica de la ciudad de Valera, estado Trujillo. JIFI-UCV, 8p.

Schmitz, M., Singer, A. (Editores) (2015). Microzonificación sísmica de Caracas. FUNVISIS, 171p.

Schmitz, M., Morales, C. (Editores). 2016. Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, 161p.

Schmitz, M., Alvarado, L., González, J., Audemard, F. (1999). Informe final proyecto INTEVEP 98-437 Estudio de Neotectónica, Geología de Fallas Activas y Refracción Sísmica Superficial en el Área de Expansión Oeste de Barcelona. FUNVISIS, Informe inédito, Volumen 1, 24p.

Schmitz, M., Romero, M., Bonive, F., Audemard, F., González, J. (2006). Resultados de mediciones sísmicas e implicaciones de dinámica de suelo en torno al hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Estado Sucre. Boletín del IMME, 44(1), 30-50.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Morales, C. y 49 co-autores (2009a). Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, Inédito, 978p.

Schmitz, M., Hernández, J.J., García, K. y 43 co-autores (2009b). Informe Técnico Final, Volumen 2 Barquisimeto, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035b, 2007, Inédito, 432p.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Morales, C. y 10 co-autores y el grupo de trabajo del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (2011). Principales resultados y recomendaciones del proyecto de microzonificación sísmica en Caracas. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 113–127.

Schmitz, M., Álvarez, L., Morejón, G. y 32 co-autores (2012). Mirozonificación sísmica para la planificación urbana y la gestión local de riesgo de las ciudades en los ejes de desarrollo: caso piloto Garenas y Gatire - continuación del proyecto anterior y estudios comparativos en Santiago de Cuba - Informe técnico final. FUN 04-2012, 414p.

Schmitz, M., Cano, V., López, O.A., Klarica, S., Pombo, A., Díaz, J.F., Heredia, J., Avendaño, J., Morales, C. y el grupo de riesgo sísmico del proyecto Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos (2015). Estudios geofísicos en cuencas urbanas en Venezuela con fines de microzonificación sísmica. Bol. Geol., 37 (1), 17-26.

Schmitz, M., Fuenmayor, R., Morales, C. y 9 co-autores (2017). Proyecto de ordenanza para edificaciones sismorresistentes del municipio Iribarren, estado Lara. XI CONVESIS, Caracas, CONV-110, 14p.

Schmitz, M., Sánchez, J., Rocabado, V. y 17 co-autores (2019). Espesores sedimentarios de cuencas urbanas como aporte a los estudios de microzonificación sísmica en Venezuela. Geominas, 47(79), 81-98.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Rocabado, V. y 9 co-autores and the Caracas Seismic Microzoning Project Working Group (2020a). The Caracas, Venezuela, seismic microzoning project: methodology, results and implementation for seismic risk reduction. Progress in Disaster Science 5, doi: 10.1016/j.pdisas.2019.100060.

Schmitz, M., Morales, C., Hernández, J.J. y 10 co-autores y el grupo de trabajo de microzonificación sísmica Barquisimeto-Cabudare (2020b). Resultados e implementación de la Microzonificación Sísmica de Barquisimeto y Cabudare. Geominas, 48(81), 3-14.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Rondón, F. y 15 co-autores y el grupo de Microzonificación Sísmica (2023a). Estudios de Microzonificación Sísmica en Venezuela. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, p. 92-97.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Zerpa, S. (2023b). Microzonificación Sísmica de Carora, Municipio Torres, estado Lara. Informe Interno FUN-008/2023, FUNVISIS, 52p. + 1 Apéndice.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Rocabado, V. y 9 co-autores y el Grupo de Trabajo del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (2023c). Estudio de microzonificación sísmica de Caracas. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, p. 98-103.

Schmitz, M., Hernández, J.J., Günther, A., Buchert, W., Alam, M.F. (2025). Recommendations on implementing results of seismic microzonation in Bangladesh – experiences from South America. The 15th Asian Regional Conference (ARC-15) of IAEG, Kathmandu, Asian J. Eng. Geol., 2 Special Issue,

ARC-15 of IAEG, Abstract No. 147. DOI: https://doi.org/10.64862/ajeg.2025.2sp.42.147.

Schnabel, P., Lysmer, J., Seed, H. (1972). SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-72/12. University of California, Berkeley.

Seed H.B., Alonso J.L. (1973). Soil-structure Interaction effects in the Caracas Earthquake of 1967. Fifth World Conference in Earthquake Engineering, Rome.

Seed. H.B., Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J Soil Mechan Found Div, 1249–1273.

Seed, H.B., Idriss, I.M., Dezfulian, H. (1970). Relaciones entre las condiciones del suelo y el daño a edificios durante el sismo de Caracas del 29 de Julio de 1967. Estudio realizado para la Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo. Report EERC 70-2. University of California, Berkeley, 38p.

Silva, P., Andrades, L., Schmitz, M., Rondón, F., Andrades-Grassi, J., Hernández, J.J. (2023). Determinación de microzonas sísmicas preliminares en El Tocuyo, municipio Morán, estado Lara, basado en la evaluación de Vs30 y espesores sedimentarios. II Congr. Ven. Geociencias, Caracas, 2p.

Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., Tagliaferro, M. (2007). Cartografía de las unidades geológicas cuaternarias del Valle de Caracas a escala 1:25.000. IX Congreso Geológico Venezolano, Caracas.

Singer, A., Rodríguez, L., Noda, F. Schmitz, M. Rocabado, V. (2008). Fuentes de geoamenazas a lo largo de la ruta y para las obras del tren Caracas-Guarenas-Guatire y estudios geofísicos (sísmica de refracción en Guarenas y Guatire). Segundo informe de avance, en el estudio de amenaza sísmica, procesos geomorfológicos activos y estimación de los efectos de sitio para el proyecto del tren Caracas – Guarenas – Guatire. (Informe interno FUNVISIS), 34p.

Singer, A., Nevado, F., Gómez, A., Rodríguez, L. (2014). Evidencias de actividad tectónica reciente en la falla de Las Trincheras. VI Col. Microzon. Sís., Valencia, 6p.

Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., Tagliaferro, M. (2023). Mapa de unidades geológicas cuaternarias del valle de Caracas. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, p. 104-1093.

Stephan, J. (1985). Carte Geologique de la Tranversale de Barquisimeto. Entre la faille de Boconó et le neautochtone du Falcón (Etats de Lara, Trujillo et Falcón: Venezuela). Andes et chaîne Caraïbe sur la Tranversale de Barquisimeto (Vénézuéla): évolution géodynamique. Symposium géodynamique des Caraïbes. París, Francia, p. 505-529.

Timaure, N., Rodríguez, L., Hernández J.J. (2016) 4.5 Caracterización de laderas. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, p. 98-104.

Urbani, F., Rodríguez, J. (2004). Atlas geológico de la Cordillera de la Costa de Venezuela. Ediciones Fundación GEOS, escala 1:25000, 146p.

Valls., J. (2008). Caracterización geofísica en la zona de Quíbor, estado Lara, mediante estudios gravimétricos y de ruido sísmico ambiental. TEG, UCV, 151p.

Van der Hilst, R., Mann, P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. Geology 22(5), DOI: 10.1130/0091-7613.

Vernaéz, G., Cano, V., Schmitz, M. y 53 co-autores (2011). Informe Técnico de Avance correspondiente al Segundo Año del Proyecto de investigación aplicada a la gestión integral del riesgo en espacios urbanos (FONACIT 2007000939). FUN 012-2011, 229p.

Viete H. (2012). Evaluación geológica con fines de Microzonificación Sísmica de la región de Cumaná, edo. Sucre. Informe Técnico. CEDI-FUNVISIS. Caracas.

Wurst, M. (2010). Neotectonic cartography of the eastern flank and geophysical modeling of the sediment thickness in the depression of Quibor, state of Lara, Venezuela. Diploma tesis, Technische Universität Berlin, 101p.

Yamazaki, Y., Audemard, F., Altez, R., Hernández, J., Orihuela, N., Safina, S., Schmitz, M., Tanaka, I., Kagawa H., and JICA Study Team -Earthquake Disaster Group (2005). Estimation of the seismic intensity in Caracas during the 1812 earthquake using seismic microzonation methodology. Rev. Geogr. Ven., Número Especial 2005, 199-216.

Yegres, L., Schmitz, M., Cerrada, M., Rojas, R. (2020). Evaluación del efecto de amplificación sísmica, a partir de la integración de métodos geofísicos y el análisis lineal 1D del suelo en Mérida – Venezuela. CIVGEO, Perú, 3p.

Zerpa, S. (2019). Inversión de curvas de elipticidad de ondas Rayleigh para la caracterización de la ciudad de Carora. TEG, USB, 100p.

Zinck, A. (1980). Valles de Venezuela. Caracas: Cuadernos LAGOVEN, p. 1–154.