

Distribución geográfica y características del medio físico natural de los ambientes kársticos de México

Geographic distribution and characteristics of the physical environment of the Mexican karst

Oscar O. Álvarez-Rivera¹, Héctor Estrada-Medina^{2*}

¹ Unidad de Biotecnología. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Merida C.P. 97200. Yucatán, México
<https://orcid.org/0000-0002-0622-8538>

^{2*} Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales, Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán. C.P. 97315. Mérida, Yucatán, México.
<https://orcid.org/0000-0002-1081-5655>, hector.estrada@correo.uady.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Este trabajo analiza la distribución geográfica del karst (o karst) en México considerando su continuidad y algunas de sus características del medio físico (geología, clima, vegetación, relieve y suelos), la conservación y el estado de explotación de sus acuíferos. Se realizó un análisis cartográfico de superposición espacial del mapa mundial de acuíferos kársticos (WOKAM, por su acrónimo en inglés) y los mapas temáticos de México. El 25.52% del territorio mexicano está conformado por rocas parcialmente solubles en agua. Las rocas sedimentarias son las más abundantes en las zonas kársticas de México (92.76%), las sierras y llanuras son las formas predominantes del relieve, y los Leptosols son los suelos más abundantes. De los 278 acuíferos kársticos en México, 248 no están sobreexplotados. El 12.95% de la superficie kárstica de México está bajo alguna categoría de conservación. Se identificaron cinco zonas de karst en México, cada una con características específicas y distintivas.

Palabras clave: Caracterización del karst; karst continuo; karst discontinuo; karstificación; tipos de karst.

Abstract

This study analyzes the geographic distribution of karst in Mexico, considering its continuity and some of its physical environment characteristics (geology, climate, vegetation, relief, and soils), karst conservation, and aquifers exploitation status. A cartographic analysis of spatial overlapping was conducted on the world karst aquifer map (WOKAM) and thematic maps of Mexico. 25.52% of the Mexican territory is composed of rocks partially soluble in water. Sedimentary rocks are the most abundant in Mexico's karst areas (92.76%), with mountain ranges and plains being the predominant relief forms and with Leptosols being the most abundant soils. A total of 248 karst aquifers out of 278 in Mexico are not overexploited. 14.95% of Mexico's karstic area is under some conservation category. Five karst zones, each with specific and distinctive characteristics, were identified in Mexico.

Keywords: Karst characterization; continuous karst; discontinuous karst; karstification; karst types.

Recibido: 06 de abril de 2023

Aceptado: 31 de enero de 2024

Publicado: 10 de abril de 2024

Cómo citar: Álvarez-Rivera, O. O., & Estrada-Medina, H. (2024). Distribución geográfica y características del medio físico natural de los ambientes kársticos de México. *Acta Universitaria* 34, e3840. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2024.3840>

Introducción

La palabra carso o karst hace referencia a un tipo de paisaje muy particular, el cual está dominado por rocas parcialmente solubles, como las rocas calizas (conformadas principalmente por carbonatos de calcio) y las rocas evaporitas, entre las que se encuentran la halita (NaCl), anhidrita (CaSO₄) y yeso (CaSO₄·2H₂O) (Jennings, 1985; Jones & White, 2019). A nivel mundial, las regiones dominadas por rocas karstificables (rocas con al menos 75% de minerales solubles) representan el 15.2% de la superficie continental libre de hielo, presentándose en los cinco continentes y en diversas latitudes, desde climas fríos y polares hasta tropicales y áridos (Goldscheider *et al.*, 2020). El grado de disolución (karstificación) promueve la generación de porosidad mediante fisuras, fracturas y poros, incrementando la conductividad hidráulica con el tiempo (Chen *et al.*, 2009). De acuerdo con ello, algunos autores clasifican el karst en cuatro etapas o fases del desarrollo del karst: incipiente, joven, maduro y viejo (Kaufmann & Braun, 1999; Klimchouk, 2004).

Sin embargo, estas fases del desarrollo son más consistentes para sistemas de karst dinámico; para las condiciones de karst caribeño se ha propuesto que su evolución tiene tres fases: inicial (crecimiento de las fracturas y accidentes geológicos), avance (incremento de la disolución y formación de cuevas y cavernas verdaderas) y agrandamiento (crecimiento de un protoconducto o cueva a su tamaño completo) (Aguilar *et al.*, 2016; Bosák, 2008).

Una de las principales características de los ambientes kársticos es que permiten una rápida recarga de sus acuíferos a través del espacio poroso de la matriz rocosa que los conforman. Los acuíferos de las zonas kársticas representan una importante fuente de abastecimiento de agua dulce, en algunas regiones son la fuente más importante o la única; sin embargo, son sistemas difíciles de gestionar debido a su fragilidad y vulnerabilidad a la sobreexplotación y a la contaminación derivadas de actividades humanas como la agricultura, ganadería, minería, deforestación, depósitos de residuos al aire libre, entre otras (Calò & Parise, 2006; Chen *et al.*, 2017; Jemcov, 2007). De igual manera, este tipo de paisajes destaca por sus formas del relieve (dolinas, úvalas, poljes, puentes naturales, valles secos, planicies kársticas, cuevas y cavernas) (Jennings, 1985).

En México se han realizado diversos esfuerzos para describir y cartografiar sus regiones kársticas. Por ejemplo, Gunn (2004) calculó que en México existen 391 700 km² de karst. Posteriormente, se realizó una propuesta de clasificación morfo-climática del karst de México (Espinasa-Pereña, 2007), así como un análisis de la vulnerabilidad de estas regiones (Espinasa-Pereña & Nieto-Torres, 2015).

El propósito de este estudio fue analizar la distribución espacial de las zonas de karst en México, tomando en consideración su continuidad y utilizando como referencia la información proporcionada por el WOKAM. Además, se llevó a cabo una caracterización de los componentes naturales (geología, clima, vegetación, topoformas y suelos), la condición de explotación de los acuíferos kársticos y la relación espacial del karst con las zonas sujetas a conservación.

El WOKAM es el mapa mundial de acuíferos kársticos, se publicó con el objetivo de aumentar la conciencia sobre estos valiosos, pero vulnerables, suministros de agua dulce y ayudar a abordar la gestión global de los recursos hídricos, en el marco del Programa Mundial de Evaluación y Cartografía Hidrogeológica (Chen *et al.*, 2017).

Este es el primer estudio a escala nacional que emplea el WOKAM como herramienta cartográfica para identificar áreas de karst. Esto es importante porque es la fuente más actualizada que ofrece información sobre acuíferos kársticos a nivel mundial, además de que hace una diferenciación clara entre karst continuo y discontinuo. Esta diferenciación de zonas de karst continuo y discontinuo es relevante debido a que puede variar la intensidad de los procesos de karstificación; y el conocimiento de las características edafológicas, geológicas, climáticas, de vegetación, entre otras, es necesario para tener un mejor entendimiento y comprensión de la diversidad y dinámica de dichas zonas, puesto que estas diferencias deben ser consideradas para un manejo integral que permita la conservación de los ambientes.

Materiales y métodos

Se realizó la caracterización del karst de México a partir del mapa mundial de acuíferos kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017), el cual fue elaborado a partir de la reclasificación de las unidades del mapa litológico global elaborado por Hartmann & Moosdorf (2012). El WOKAM considera como karst continuo aquellas regiones con una proporción mayor a 65% de rocas carbonatadas o evaporitas, mientras que las zonas de karst discontinuo presentan una proporción entre 15% y 65%.

Lo primero que se hizo fue un recorte de la capa de rocas carbonatadas a nivel mundial del WOKAM con la capa de límites políticos de la República Mexicana (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019), seguido de un re-escalamiento de la escala original (1:1 000 000) a la escala de trabajo (1:250 000), que es la escala de mayor detalle de los insumos cartográficos nacionales. Este recorte se proyectó del sistema de coordenadas de la capa original al sistema de coordenadas geográficas WGS_1984 con la proyección cónica conforme de Lambert.

Posteriormente, se realizó la corrección de la topología, editando los límites geográficos de las dos capas para hacer coincidir los bordes de los polígonos del WOKAM con los límites políticos de México, mediante los siguientes pasos: 1) usar la opción *Alinear a forma* en la barra de herramientas (edición avanzada), 2) volver a formar entidades con la herramienta *trazado* y 3) usar *Capas para alinear*, con la finalidad de activar las capas que se desean alinear al borde trazado. Una vez finalizado este proceso, obtuvimos la capa base del karst de México a partir del WOKAM.

Para caracterizar el karst mexicano, se efectuó un análisis de superposición entre la capa base del karst de México (derivada del WOKAM) y las capas temáticas disponibles en la cartografía nacional. Utilizando la herramienta "intersect", se generaron nuevas entidades a partir de la intersección de polígonos. Luego, se calculó la geometría de los polígonos resultantes y, mediante operaciones aritméticas, se calculó la superficie de dichas entidades.

Los mapas temáticos que se emplearon para este trabajo fueron los siguientes: 1) el mapa de geología (litología) (1:250 000) (SGM, 2021) para identificar los tipos de roca dominantes en cada región; 2) el mapa de unidades climáticas (1:1 000 000) (INEGI, 2008); 3) el mapa de uso de suelo y vegetación (1:1 000 000) (INEGI, 2003); 4) el mapa de sistemas de topoformas de México (1:1 000 000) (INEGI, 2001a); 5) el conjunto de datos vectoriales Edafológico de la Serie II de México (1:250 000) (INEGI, 2007) basado en la clasificación WRB; 6) el mapa de condición de los acuíferos de México 2020 (1:250 000) (Conagua, 2021a); y 7) los mapas de los polígonos de las áreas naturales protegidas federales (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanpl], 2017), Estatales (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2020) y de las áreas destinadas voluntariamente a la conservación (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanpl], 2024). Los mapas temáticos de México con escala 1:1 000 000 se re-escalaron a la escala de trabajo 1:250 000 previo a la realización de los productos cartográficos correspondiente a la superficie del karst de México; la escala de visualización presentada para todos los productos fue de 1:16 000 000.

Adicionalmente, se realizó el mismo ejercicio de superposición entre la capa base del karst de México (a partir del WOKAM) con la capa de la condición de los acuíferos de México (sobreexplotados y no sobreexplotados), y con la capa de acuíferos con intrusión salina o fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres, ambas capas obtenidas a partir del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2021a; Conagua, 2021b), esto con la finalidad de identificar y obtener la información sobre los acuíferos del territorio kárstico que presentaran alguno de estos problemas.

Finalmente, se realizó la identificación y caracterización de zonas del karst de México considerando la continuidad del karst y los rasgos del medio físico natural (geología, clima, vegetación, topoformas y suelos predominantes), superponiendo la capa base del karst de México (a partir del WOKAM) y los mapas temáticos del karst de México con las provincias físico-geográficas del mapa de regionalización físico-geográfica de México, realizado por Bollo *et al.* (2015). Todo el manejo de capas e insumos, así como la elaboración de los productos cartográficos se realizó en el programa ArcMap versión 10.5 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2017).

Resultados

Ambientes kársticos de México

México tiene una superficie continental de 495 484 km² asociados a rocas potencialmente karstificables, esto representa el 25.52% de la superficie continental del territorio nacional, de los cuales el 62.63% corresponde a karst continuo, mientras que el 37.37% restante se considera discontinuo. El karst de México está conformado principalmente por rocas carbonatadas continuas (62.04% de la superficie de karst) y rocas carbonatadas discontinuas (37.25%), seguidas en menor proporción por las rocas evaporitas continuas (0.06%) y discontinuas (0.12%); adicionalmente, se pueden identificar zonas en las que podemos encontrar rocas carbonatadas y/o evaporitas continuas mezcladas (rocas mixtas) (0.53%) (Figura 1).

Como se puede observar en el mapa de la Figura 1, las zonas más extensas de karst en México se encuentran asociadas a la Sierra Madre Oriental, Altiplano Central, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas y Península de Yucatán, como lo reportaron Gutiérrez (2008) y Bautista *et al.* (2023). El karst en México está presente en 29 de los 32 estados que conforman el territorio nacional; los únicos estados donde no se identificaron zonas de karst son la Ciudad de México, Baja California y Tlaxcala.

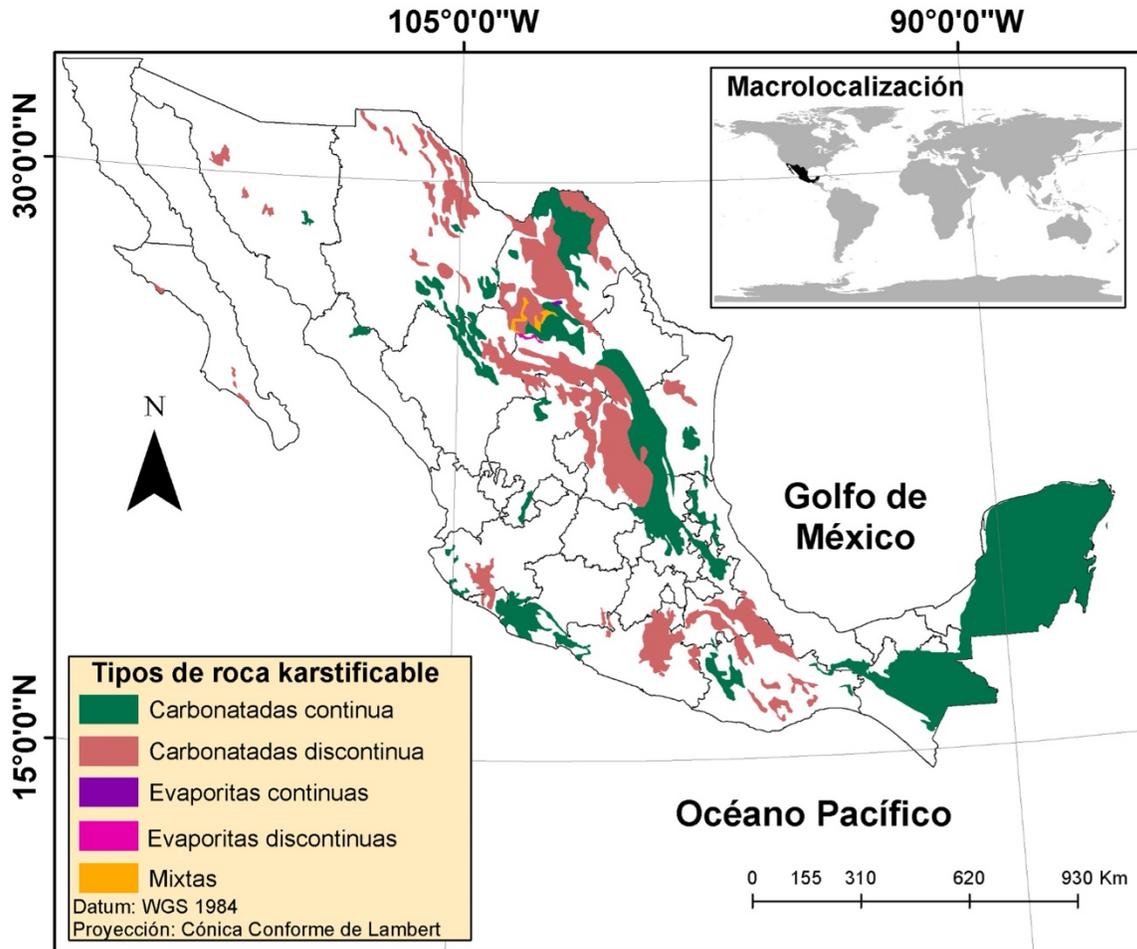


Figura 1. Distribución y tipos de rocas karstificables de México. Las rocas mixtas son las que están constituidas al menos en un 15% tanto de rocas carbonatadas como de evaporitas.

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017).

Los estados que presentan la mayor superficie de territorio kárstico (continuo + discontinuo) son Coahuila (92 732 km²), Campeche (45 666 km²), Chiapas (43 899 km²), Quintana Roo (42 999 km²) y Yucatán (38 449 km²) (Tabla 1). Por el contrario, los estados que presentan la menor superficie de territorio kárstico (con menos de 1000 km²) son Guanajuato (736 km²), Estado de México (283 km²), Nayarit (140 km²) y Aguascalientes (11 km²). Los únicos estados que presentan polígonos dominados por rocas evaporitas y mixtas son Coahuila y Durango. Por otra parte, los estados que presentan karst en un mayor porcentaje de su superficie son: Quintana Roo (99.72%), Yucatán (97.96%), Campeche (82.63%), Coahuila (61.55%), y Chiapas (60.14%), siendo la Península de Yucatán la región de karst continuo más extensa del país; mientras que los estados con menor porcentaje de su superficie (menos del 1%) asociada a karst son Aguascalientes (0.19%) y el Estado de México (0.51%).

Tabla 1. Superficie (km²) asociada a los diferentes tipos de karst y de rocas karstificables a nivel estatal en México.

Estado	Rocas carbonatadas			Rocas evaporitas			Rocas mixtas
	Continuas	Discontinuas	Total	Continuas	Discontinuas	Total	
Aguascalientes	11	0	11	0	0	0	0
Baja California Sur	0	1162	1162	0	0	0	0
Campeche	45 666	0	45 666	0	0	0	0
Chiapas	43 899	0	43 899	0	0	0	0
Chihuahua	7981	22 792	30 773	0	0	0	0
Coahuila	33 529	56 110	89 639	285	594	878	2214
Colima	1165	1469	2634	0	0	0	0
Durango	8847	7632	16 479	0	0	0	417
Guanajuato	736	0	736	0	0	0	0
Guerrero	1975	12 257	14 233	0	0	0	0
Hidalgo	6273	0	6273	0	0	0	0
Jalisco	3272	3907	7180	0	0	0	0
México	0	283	283	0	0	0	0
Michoacán	9178	511	9689	0	0	0	0
Morelos	0	1863	1863	0	0	0	0
Nayarit	140	0	140	0	0	0	0
Nuevo León	10 597	8705	19 302	0	0	0	0
Oaxaca	7349	14 440	21 789	0	0	0	0
Puebla	3758	8154	11 912	0	0	0	0
Querétaro	4217	0	4217	0	0	0	0
Quintana Roo	42 999	0	42 999	0	0	0	0
San Luis Potosí	7325	26 611	33 937	0	0	0	0
Sinaloa	1134	0	1134	0	0	0	0
Sonora	676	2952	3628	0	0	0	0
Tabasco	3713	0	3713	0	0	0	0
Tamaulipas	15 021	4215	19 236	0	0	0	0
Veracruz	6511	3794	10 305	0	0	0	0
Yucatán	38 449	0	38 449	0	0	0	0
Zacatecas	2995	7699	10 694	0	0	0	0
Total	307 417	184 557	491 974	285	594	878	2632

Nota. Las rocas mixtas son las que están constituidas por al menos un 15 tanto de rocas carbonatadas como de evaporitas (Chen *et al.* 2017).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de las tablas de atributos de los mapas obtenidos.

El 92.76% de las rocas asociadas a las regiones kársticas de México son de tipo sedimentario, seguidas por rocas extrusivas (3.69%), híbridas (2.14%), intrusivas (0.87%) y metamórficas (0.54%) (Figura 2). Las rocas sedimentarias están ampliamente distribuidas en el karst de todos los estados del territorio nacional, a excepción del estado de Aguascalientes, donde solamente están presentes rocas extrusivas. Así mismo, los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Puebla y Morelos presentan principalmente rocas volcánicas (intrusivas y extrusivas), mientras que en Sinaloa se encuentra la mayor región de karst asociado a rocas metamórficas.

En cuanto a la litología, el 61.94% de las rocas sedimentarias del país están asociadas a rocas calizas, de las cuales las más dominantes son las calizas puras (11.98%) y las siguientes asociaciones: caliza-coquina (10.86%), caliza-dolomita (10.82%), caliza-lutita (9.74%) y caliza-yeso (7.74%), representando el 51.12% del territorio kárstico del país.

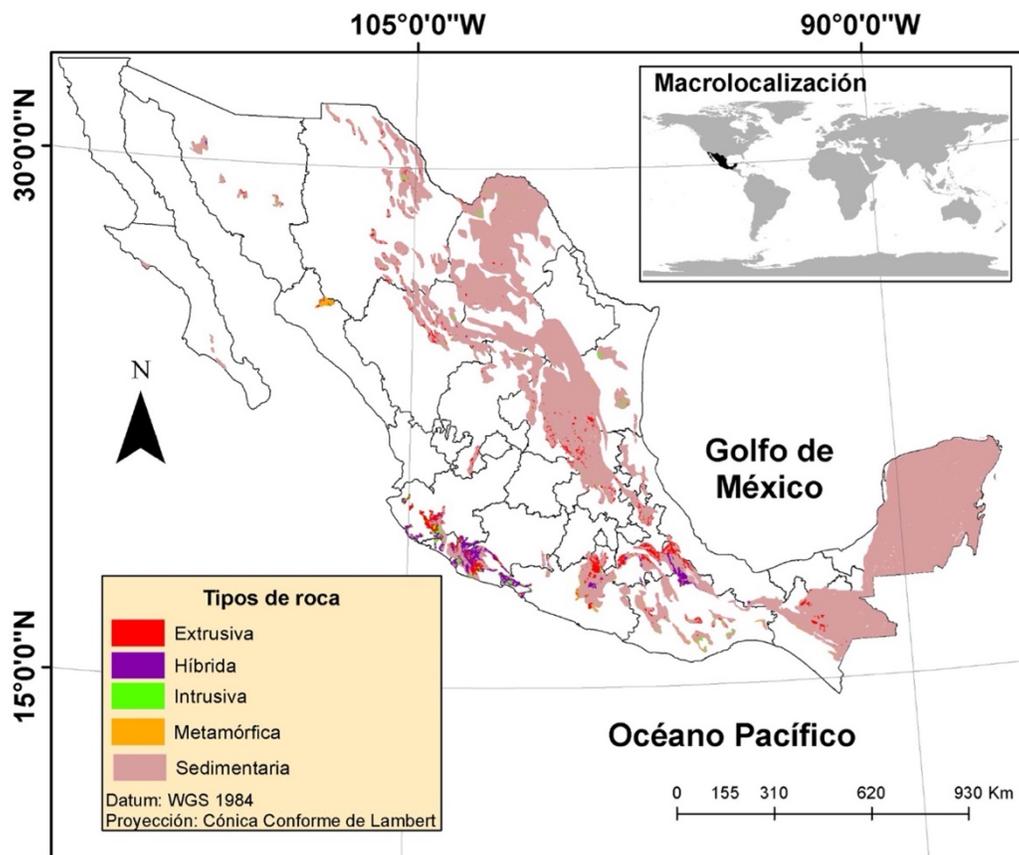


Figura 2. Tipos de rocas asociadas a las zonas kársticas de México según su origen.

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y del mapa de geología (litología) de México (SGM, 2021).

El karst de México se encuentra asociado a 18 unidades climáticas, de las cuales el clima cálido subhúmedo es el que tiene la mayor extensión, con el 33.58% de la superficie asociada al karst, seguido por muy seco semicálido (12.38%), templado subhúmedo (10.12%), seco semicálido (9.87%), semiseco templado (6.39%), cálido húmedo (6.35%), seco templado (5.82%), semicálido húmedo (3.96%), semiseco semicálido (3.56%), muy seco templado (2.47%), semiseco muy cálido (1.87%) y semicálido subhúmedo (1.83%); mientras que con menos del 1% de la superficie las unidades climáticas se encuentra templado húmedo, seco muy cálido, semiseco cálido, muy seco cálido, semifrío subhúmedo y seco cálido (Figura 3).

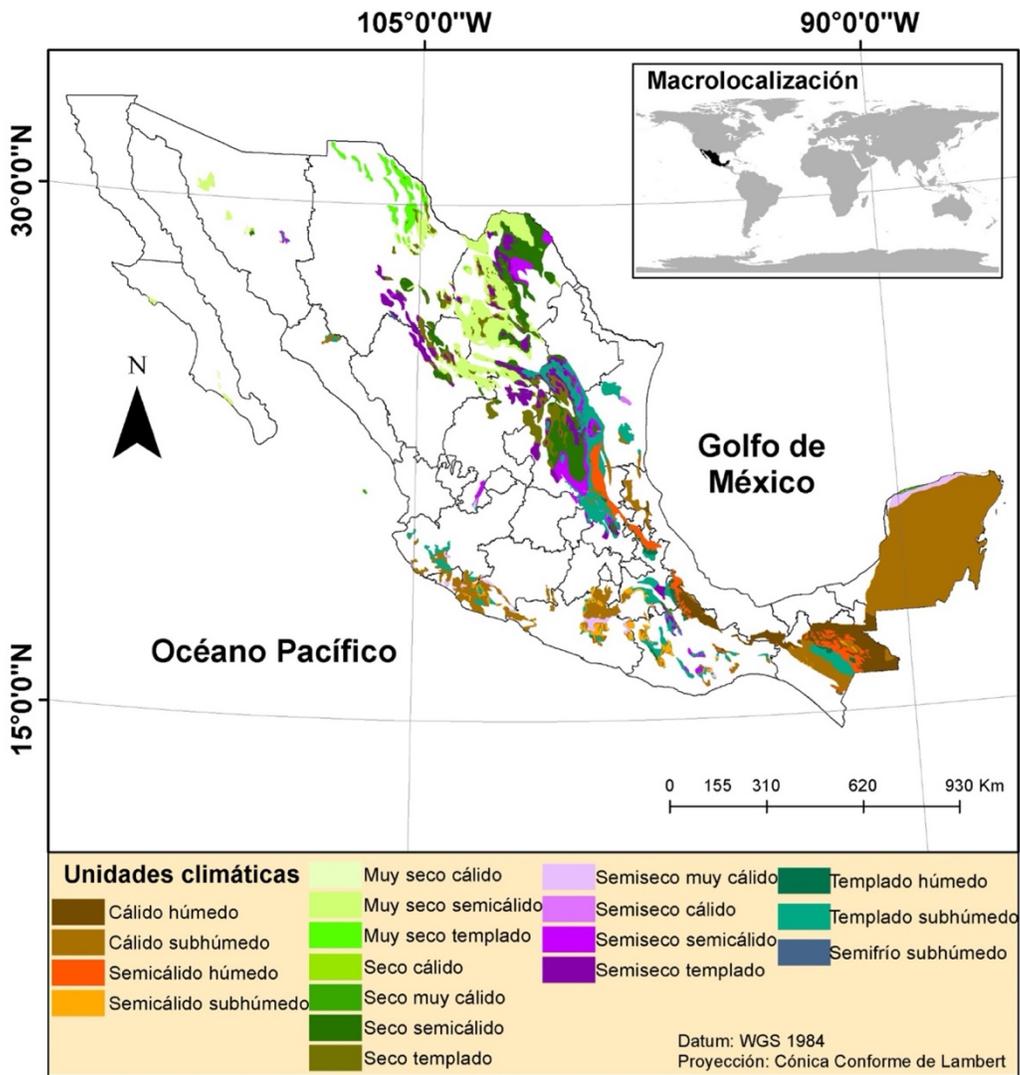


Figura 3. Climas asociados al karst de México.
Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y del mapa de Unidades climáticas de México (INEGI, 2008).

Los cuatro principales climas (cálido subhúmedo, seco semicálido, templado subhúmedo y seco semicálido), en conjunto, representan el 65.95% del territorio kárstico nacional. El clima cálido subhúmedo se presenta en 19 estados, de los cuales los que tienen mayor superficie con este clima en el territorio nacional son Campeche (27.82%), Quintana Roo (25.88%), Yucatán (20.30%) y Chiapas (7.36%). Es decir, en estos cuatro estados se encuentra el 81.36% del territorio nacional que presenta este clima. Por su parte, el clima muy seco semi cálido se presenta en ocho estados, de los cuales los principales son Coahuila (70.14%) y Chihuahua (11.47%), mientras que templado subhúmedo se encuentra en 21 estados, donde los principales son Tamaulipas (20.61%), Nuevo León (11.66%), Oaxaca (11.49) y Chiapas (9.88%). Finalmente, el clima seco semicálido se encuentra presente en 12 estados, de los cuales los que presentan mayor extensión territorial con este clima son Coahuila (53.05%) y San Luis Potosí (20.15%).

Otro componente importante en los procesos de formación del karst, y que se encuentra estrechamente relacionado con el clima, es la vegetación. En el karst de México los tipos de vegetación más predominantes son matorral (31.34%), bosque (11.99%), selva mediana subperennifolia (9.71%) y selva baja caducifolia (7.02%). También es importante resaltar que entre los principales usos del suelo podemos encontrar zonas agrícolas (8.99%), pastizales (8.31%) (entre los que se encuentran pastizales naturales e inducidos que son utilizados por la actividad ganadera) y vegetación secundaria (5.58%) (Figura 4).

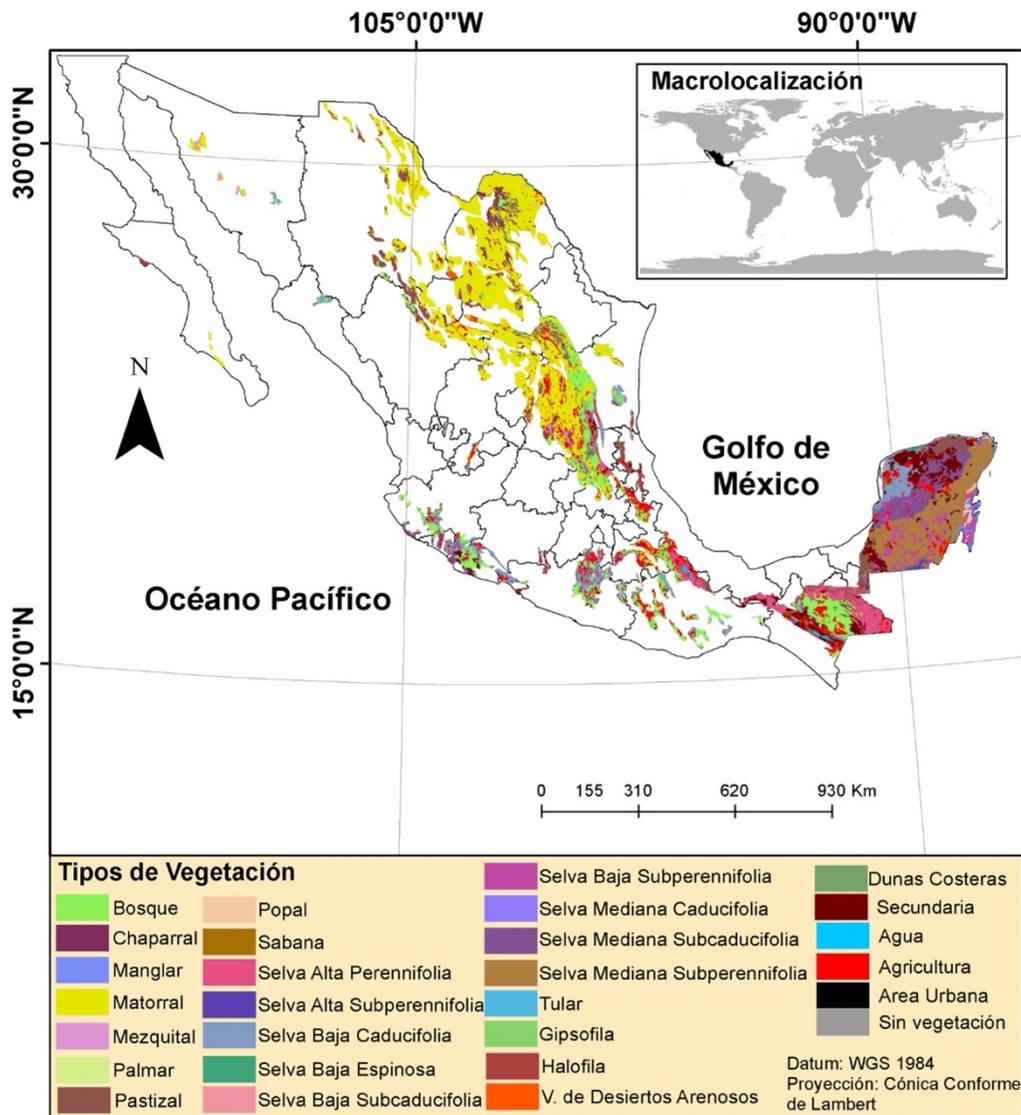


Figura 4. Tipos de uso de suelo y vegetación asociados al karst de México.

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y del mapa de Uso del suelo y vegetación de México (INEGI, 2003).

A nivel estatal, el matorral se encuentra distribuido en el karst de 16 estados, de los cuales las entidades que presentan mayor superficie en su territorio son Coahuila (34.13% de la superficie con matorral del karst de México), dominado por matorral del tipo desértico rosetófilo; Tamaulipas (29.48%), principalmente con matorral submontano; y Chihuahua (10.76%), con matorral microfilo como el más representativo. En cuanto a los bosques (presente en 23 estados), el estado de Chiapas es el que presenta mayor superficie de karst con este tipo de vegetación (19.83% del total de la superficie con bosques), principalmente con bosque mesófilo de montaña y bosques de pino-encino, le sigue el estado de Oaxaca (13.38%) con bosques de encino y pino-encino en su mayoría, el estado de Tamaulipas (9.38%) con bosques de encino y el estado de Nuevo León (8.40%) con bosques de pino-encino.

El tercer tipo de vegetación en cuanto a superficie dentro del territorio kárstico del país es la selva mediana subperennifolia (presente en únicamente ocho estados), y los que presentan mayor superficie de este tipo de vegetación son Quintana Roo (57.45%) y Campeche (39.60%). En cuarto lugar, se encuentra la selva baja caducifolia (presente en 22 estados con karst), y está representada principalmente en Guerrero (18.10%), Yucatán (15.38%), Michoacán (10.42%) y Campeche (10.37%); estos cuatro estados en conjunto presentan el 54.27% de la selva baja caducifolia del país.

Por su parte, las topoformas dominantes en las zonas kársticas de México son: sierras (39.32%), llanuras (25.86%), lomeríos (17.24%) y bajadas (10.98%) (Figura 5). Las sierras son el sistema de topoformas más predominante en el territorio nacional, están presentes en 25 estados del país, de los cuales Coahuila es el estado que presenta mayor porcentaje del territorio kárstico nacional asociado a sierras (19.95%), seguido por Chiapas (11.74%), Zacatecas (9.92%), San Luis Potosí (8.26%) y Oaxaca (7.43%). El siguiente sistema en extensión son las llanuras, las cuales se encuentran presentes en 27 estados, de los cuales los más representativos de estos sistemas son Yucatán (23.24% del total de la superficie kárstica asociada a esta topoforma), Quintana Roo (24.68%), Campeche (16.80%), Coahuila (9.91%) y San Luis Potosí (7.19%).

En cuanto a los lomeríos, éstos se encuentran distribuidos en 22 de los estados con karst del país, de los cuales Campeche es el que presenta la mayor superficie con este tipo de topoforma (28.42% de la superficie nacional con lomeríos), seguido por Chiapas (12.95%), Quintana Roo (12.27%), Coahuila (9.47%), Durango (8.79%) y Chihuahua (9.47%). Estos seis estados comprenden conjuntamente más del 80% del territorio de karst asociado a lomeríos. Las bajadas únicamente las podemos encontrar en ocho estados, de los cuales Coahuila presenta el 40.68% de la superficie nacional con esta topoforma, seguido por Chihuahua (19.11%) y San Luis Potosí (10.55%). Finalmente, las topoformas presentes en menor proporción en el karst de México son los valles (3.47%), mesetas (2.10%), cañones (0.43%), playas (0.41%) y campos de dunas (0.04%).

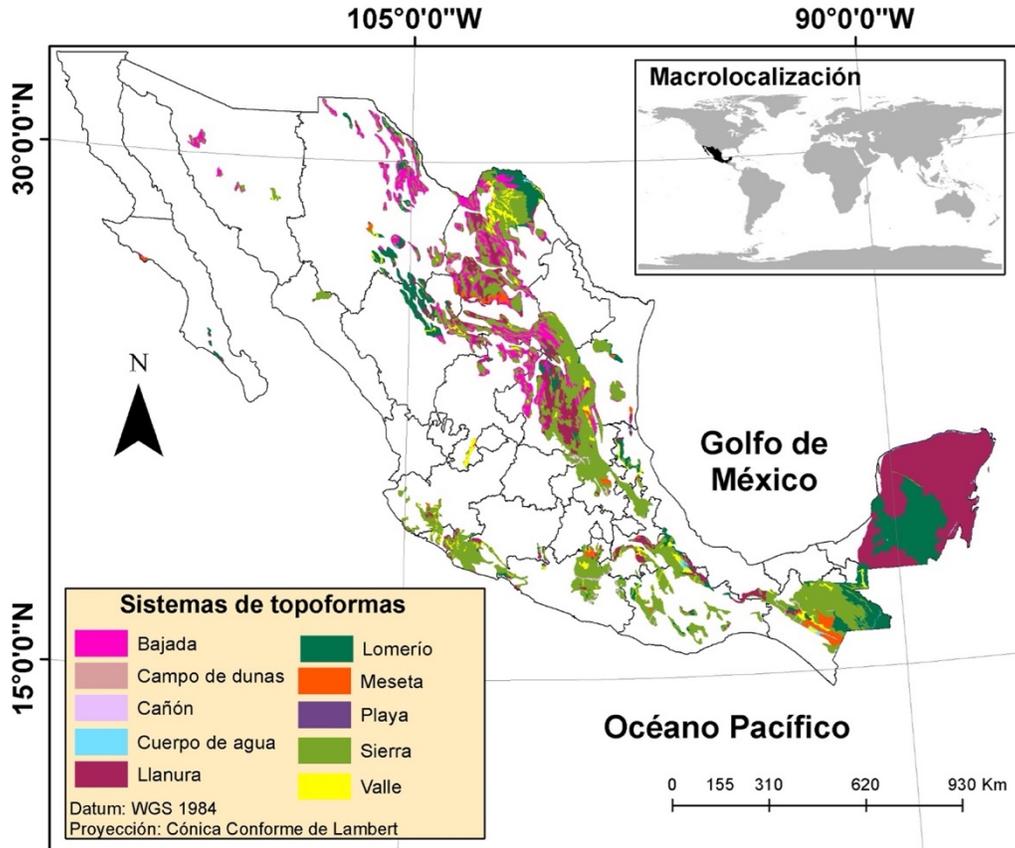


Figura 5. Principales topoformas asociadas al karst de México.

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y del mapa de Sistema topoformas de México (INEGI 2001b).

En el karst de México se pueden encontrar 25 de los 32 grupos de suelos reconocidos por la base de referencia mundial para los recursos del suelo (WRB, por sus siglas en inglés) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015), de los cuales los Leptosols son el grupo de suelos que se encuentra distribuido en todos los estados con territorio kárstico (29 estados), seguido por los Regosols (28 estados), Phaeozems (27 estados), Luvisols y Vertisols (26 estados) y Cambisols (25 estados).

En cambio, los Planosols y Alisols únicamente se encuentran representados en Chiapas, mientras que los Plintisols sólo se encuentran en Chiapas y Tabasco. Entre los menos representados les siguen los Durisols (sólo en Chihuahua, Puebla y San Luis Potosí), Histosols (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) y Lixisols (Campeche, Oaxaca y Yucatán) (Figura 6). Los grupos de suelos de la WRB que no se encuentran representados en el territorio kárstico de México son los Antrosols, Tecnosols, Criosols, Podzols, Ferralsols, Stagnosols y Retisols.

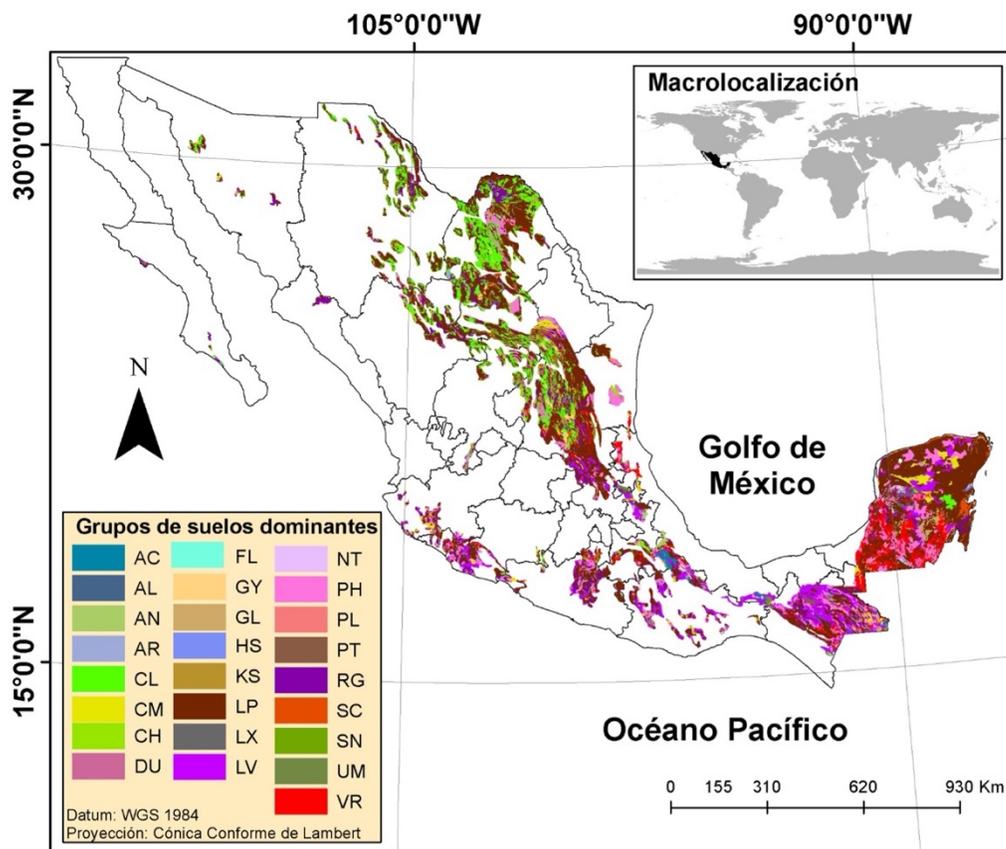


Figura 6. Grupos de suelos dominantes en el karst de México. AC = Acrisols, Al = Alisols, AN = Andosols, AR = Arenosols, CH = Chernozems, CL = Calsisols, CM = Cambisols, DU = Durisols, FL = Fluvisols, GL = Gleysols, GY = Gypsisols, HS = Histosols, KS = Kastañozems, LP = Leptosols, LV = Luvisols, LX = Lixisols, NT = Nitisols, PH = Phaeozems, PL = Planosols, PT = Plintisols, RG = Regosols, SC = Solonchak, SN = Solonetz, UM = Umbrisols, VR = Vertisols (FAO, 2015).

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y del mapa de Edafología de México (INEGI, 2007).

Los Leptosols son el grupo de suelos más ampliamente distribuido en la superficie del karst de México, con un 43.57%. Del total, el estado de Coahuila es el que presenta mayor superficie con dominancia de Leptosols (19.79%), seguido por Quintana Roo (12.28%), Yucatán (9.69%), Campeche (8.02%), San Luis Potosí (6.80%), Chihuahua (6.37%) y Chiapas (6.03%). Estos siete estados presentan el 68.98% de la cobertura de Leptosols en el karst de México. En segundo lugar, se encuentran los Calcisols, que se distribuyen en el 12.02% del karst de México, y el estado que presenta la mayor superficie es Coahuila (46.53%), le siguen los estados de Chihuahua (17.46%), San Luis Potosí (9.00%) y Durango (6.72%). Estos cuatro estados representan el 79.71% de Calcisols en el karst de México. En tercer lugar, se encuentran los Phaeozems presentes en el 10.43% del territorio kárstico del país, con Campeche como el estado con mayor superficie de este grupo de suelo (15.06%), seguido por Chiapas (13.46%), Coahuila (12.16%) y Yucatán (10.47%). En cuarto lugar, se encuentran los Luvisols con el 8.13% de la superficie de karst de México. A este respecto, los estados con mayor superficie de este grupo de suelos son Chiapas (34.94%), Oaxaca (15.56%) y Yucatán (11.93%). En quinto lugar, se encuentran los Regosols con el 7.25%, y los estados con mayor superficie son Coahuila (19.81%), Chihuahua (9.25%), San Luis Potosí (7.52%) y Guerrero (7.38%). En sexto lugar están los Vertisols con el 6.36%, con Campeche como el estado que presenta la mayor superficie (42.77%), seguido por Quintana Roo (12.69%), Chiapas (7.55%) y Veracruz (7.21%). Finalmente, con menos del 5% de la superficie se encuentran los Cambisols (2.90%), Chernozems (1.64%), Kastañoems (1.57%), Gleysols (1.22%), Solonchaks (1.08%), Gypsisols (0.59%), Acrisols (0.55%), Fluvisols (0.54%), Umbrisols (0.51%), Lixisols (0.37%), Andosols (0.33%), Nitisols (0.33%), Arenosols (0.20%), Plintisols (0.12%), Solonetz (0.10%), Histosols (0.07%), Alisols (0.04%), Durisols (0.02%) y Planosols (0.02%).

Acuíferos kársticos de México

Las aguas subterráneas de México están divididas en 653 acuíferos (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2023), de los cuales, a partir del mapa de condición de los acuíferos de México 2020 del Sistema Nacional de Información del Agua (Conagua, 2021a) y el WOKAM (Chen *et al.*, 2017), más de un tercio (278) están asociados total o parcialmente al karst de México. De estos últimos, 30 acuíferos se encuentran bajo la categoría de sobreexplotación (10.56%), mientras que los restantes 248 acuíferos no presentan sobreexplotación (Figura 7). Los acuíferos sobreexplotados se encuentran distribuidos en nueve estados, de los cuales Chihuahua y Coahuila son los que presentan mayor número, con ocho y siete acuíferos sobreexplotados, respectivamente; les siguen San Luis Potosí y Sonora (ambos con cuatro acuíferos), Durango (tres acuíferos) y, finalmente, Aguascalientes, Baja California Sur, Nuevo León y Puebla con un acuífero.

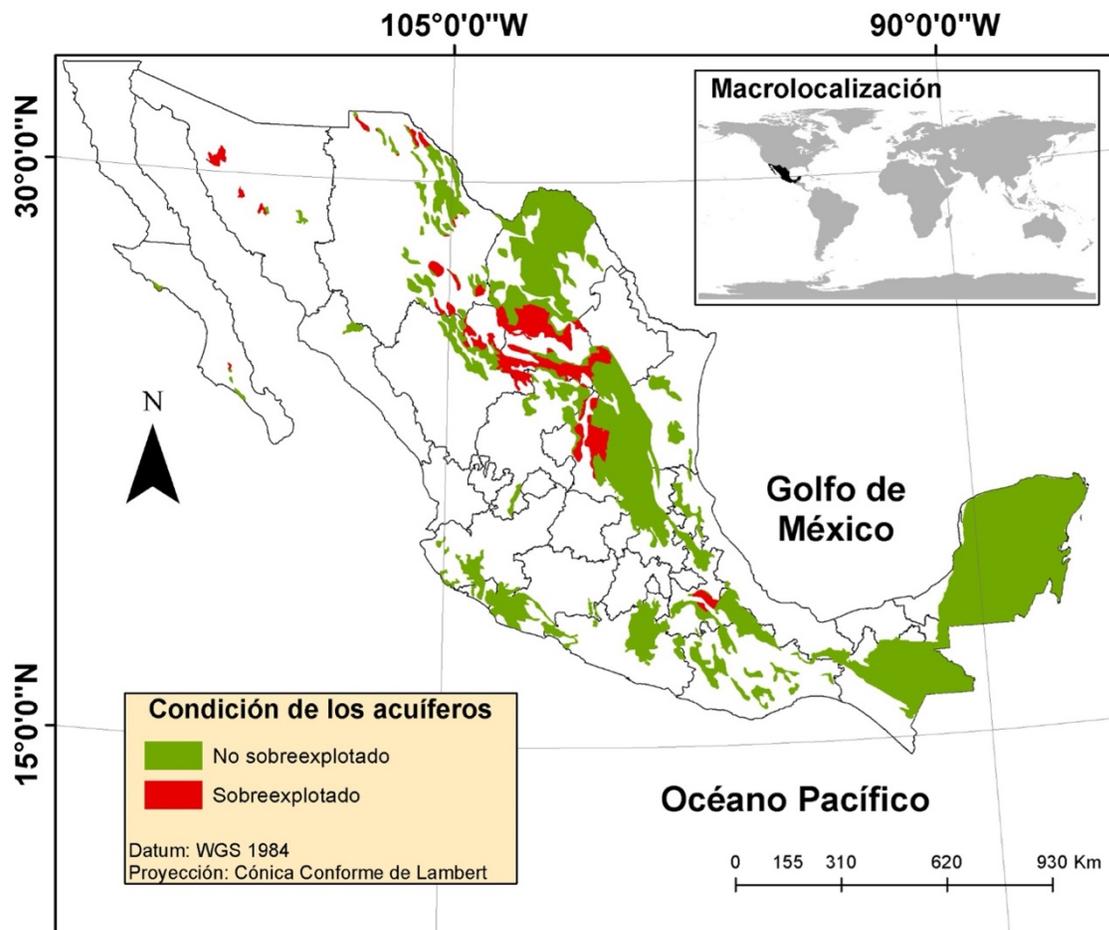


Figura 7. Condición de los acuíferos kársticos de México.

Fuente: Elaboración propia, a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y el mapa de condición de los acuíferos de México (Conagua, 2021a).

Además, como resultado de la intersección del WOKAM con el mapa de acuíferos con intrusión salina o fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (Conagua, 2021b), se obtuvo que 28 acuíferos presentan algún grado de salinización de suelos y aguas salobres o intrusión salina (Tabla 2). Cuatro acuíferos presentan intrusión salina, de los cuales dos están en Sonora y uno en Quintana Roo y Yucatán, mientras que 23 acuíferos presentan fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres distribuidos en Campeche (1), Chihuahua (2), Coahuila (9), Durango (4), Nuevo León (1) y Zacatecas (6). Finalmente, un acuífero de Baja California Sur presenta ambos problemas, cuatro acuíferos presentan intrusión salina.

Tabla 2. Acuíferos con intrusión salina o fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres asociados al karst de México.

Estado	Intrusión salina	Salinización de suelos y aguas subterráneas salobres	Ambos	Nombres de los acuíferos
Baja California Sur	0	0	1	Santo Domingo
Campeche	0	1	0	Xpujil
Chihuahua	0	2	0	Valle de Juárez, Laguna de Paloma
Coahuila	0	9	0	Cuatrociénegas - Ocampo, El Hundido, Cañón del Derramadero, Acatita, Las Delicias, La Paila, Principal - Región Lagunera, Paredón, Laguna del Rey - Sierra Mojada
Durango	0	4	0	Vicente Suarez, Pedriceña - Velardeña, Oriente Aguanaval, Ceballos
Nuevo León	0	1	0	Navidad - Potosí - Raíces
Quintana Roo	1	0	0	Isla de Cozumel
Sonora	2	0	0	Caborca, Costa de Hermosillo
Yucatán	1*	0	0	Península de Yucatán
Zacatecas	0	6	0	Guadalupe de Las Corrientes, Carnacho, El Cardito, Guadalupe Garzaron, El Salvador, Cedros

Nota. *El acuífero Península de Yucatán abarca varios estados y presenta intrusión salina en los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán.
Fuente: Conagua (2021b).

Conservación y protección del karst

El 14.95% del territorio kárstico de México se encuentra bajo alguna modalidad de conservación o protección, esto equivale a 74 097 km² (Figura 8). En el territorio kárstico de México hay un total de 78 áreas naturales protegidas (ANP) federales (Conanp, 2017) que abarcan una superficie de 57 587 (11.62%), de las cuales 23 están bajo el decreto de Reservas de la Biósfera, 17 son Áreas de Protección de Flora y Fauna, 16 Parques Nacionales y seis Santuarios; seguidos por las Área de Protección de los Recursos Naturales Zona Protectora Forestal, Monumentos Nacionales y Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre con tres cada uno; y finalmente se encuentran Reserva Integral de la Biósfera, Zona de Reserva y Refugio de Aves Migratorias y de la Fauna Silvestre y Zona Protectora Forestal Vedada con uno cada uno.

De estas categorías de decretos, las Reservas de la Biósfera son las que presentan la mayor superficie (26 410 km²), seguidos por las Área de Protección de los Recursos Naturales Zona Protectora Forestal (16 046 km²) y las Áreas de Protección de Flora y Fauna (8332 km²). Así mismo, en el karst de México hay un total de 72 Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales y Privadas (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2020), que representan una superficie de 13 676 km² que corresponden al 2.76% del karst de México. De estas áreas, las que están bajo la categoría de Zona Sujeta a Conservación Ecológica son las que abarcan una mayor superficie del territorio, con 7336 km², seguidas por las Reservas Estatales con carácter de Reserva de la Biosfera, con 2546 km², y las Áreas Ecológicas Protegidas Reserva de la Biosfera, con 1344 km², que en su conjunto representan el 83% de las ANP Estatales, Municipales, Ejidales y Privadas. Por último, hay un total de 100 Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (Conanp, 2024), con una superficie total de 2834 km², que representan el 0.57% del karst de México.

A nivel estatal, el estado de Coahuila es el que presenta una mayor superficie del karst de México, bajo alguna categoría de conservación y proyección con un total de 20 511 km², que representa el 27.68%, seguido por los estados de Campeche con 13 486 km² (18.20%), Quintana Roo con 8385 km² (11.32%) y Chiapas con 5671 km² (7.65%).

Es importante aclarar que el objetivo de estas áreas naturales protegidas se centra en la preservación y conservación del hábitat de especies animales y vegetales que se encuentran en algún grado de protección, así como los servicios ecosistémicos que ofrecen (biodiversidad, secuestro de carbono, recarga de acuíferos, entre otros), pero ninguna fue decretada con el objetivo de conservar o proteger el karst.

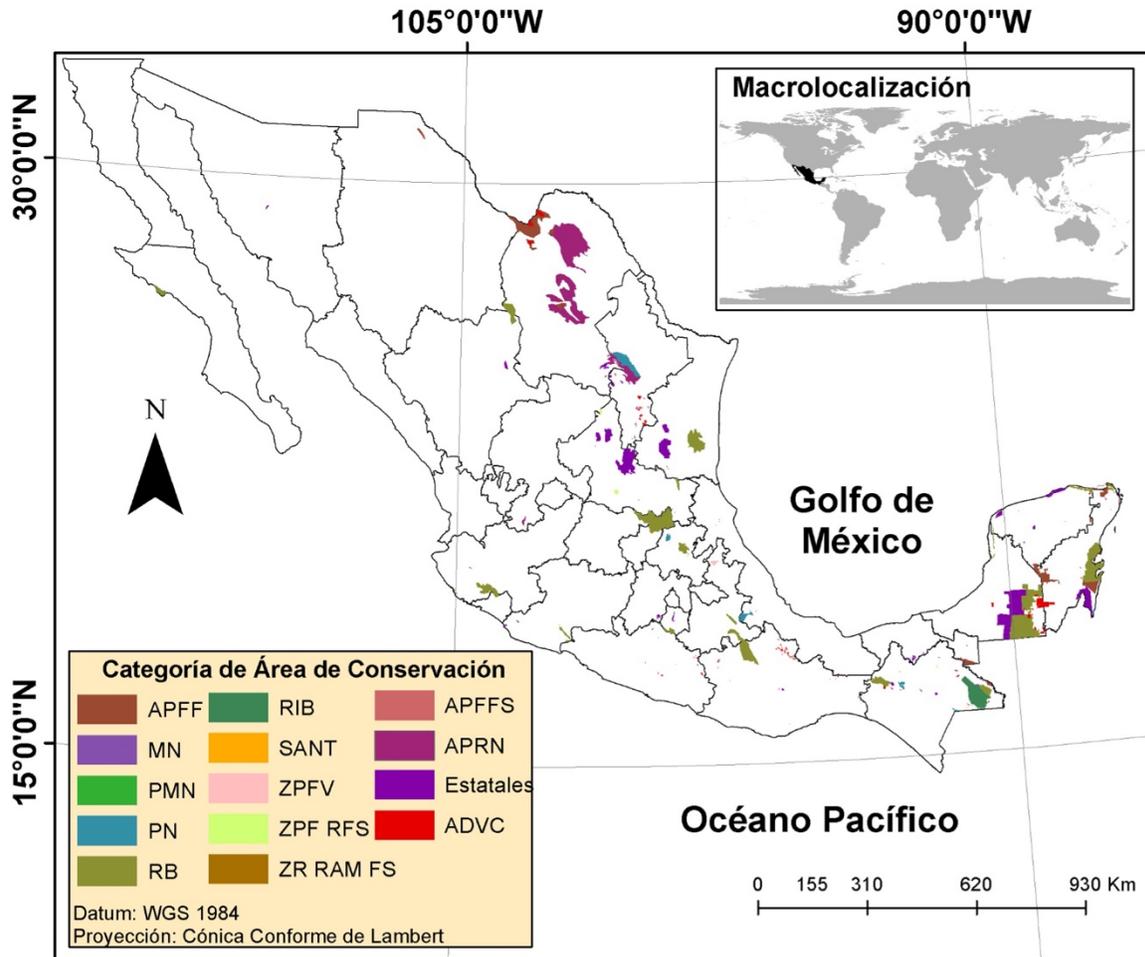


Figura 8. Áreas destinadas a la conservación y protección en los territorios kársticos de México. APFF = Áreas de Protección de Flora y Fauna, MN = Monumento Nacional, PMN = Parque Municipal Natural, PN = Parque Nacional, RB = Reserva de la Biósfera, RIB = Reserva Integral de la Biósfera, SANT = Santuario, ZPFV = Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre, ZPF RFS = Zona Protectora Forestal Vedada, ZR RAM FS = Zona de Reserva y Refugio de Aves Migratorias y de la Fauna Silvestre, APFFS = Área de Protección de Flora y Fauna Silvestres, APRN = Área de Protección de los Recursos Naturales Zona Protectora Forestal, ADVC = Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación.
Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y los mapas de Áreas Naturales Protegidas Federales (Conanp, 2017), Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas (Conabio, 2020) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (Conanp, 2024).

Zonas del karst en México

A partir de la superposición de la superficie kárstica de México realizada con WOKAM), tomando las provincias físico-geográficas identificadas por Bollo *et al.* (2015), se reconocieron cinco zonas de karst en México: 1) Zona Centro-Norte de México (Karst de la Sierra Madre Oriental, Karst de las Sierras y Llanuras del Norte-Centro y Karst de la Llanura Costera Meridional del Golfo), 2) Zona Sierra Madre del Sur (Karst de la Sierra Madre del Sur), 3) Zona Península de Yucatán (Karst de la Península de Yucatán), 4) Zona Sierras de Chiapas (Karst de las Sierras de Chiapas) y 5) Zonas de karst aislado (Karst de la Sierra Madre Occidental, Karst de la Llanura Sonorense y Karst de la Península de Baja California) (Figura 9).

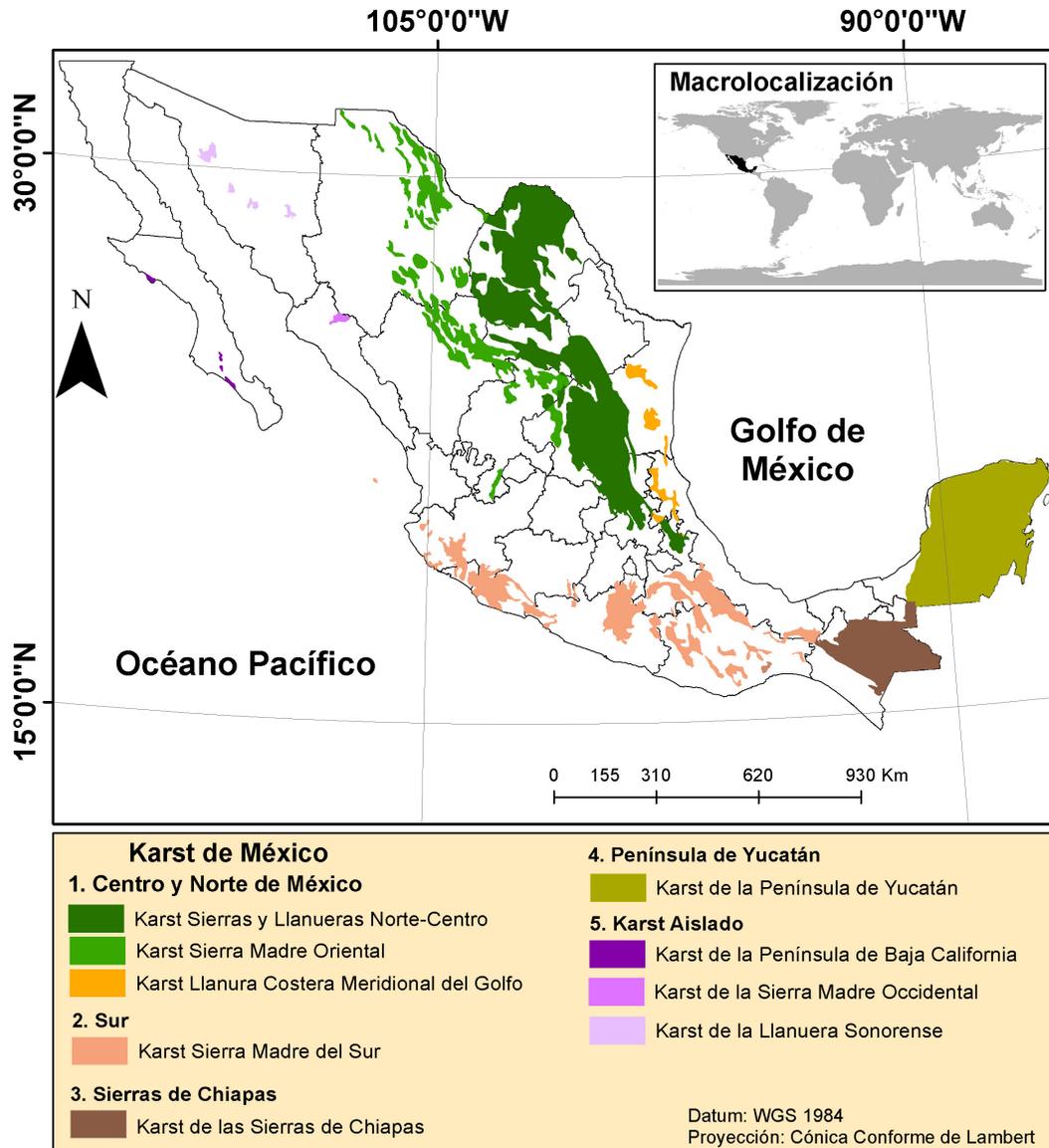


Figura 9. Zonas de karst de México.

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos cartográficos del Mapa Mundial de Acuíferos Kársticos (WOKAM) (Chen *et al.*, 2017) y el mapa de regionalización físico-geográfica de México (Bollo *et al.*, 2015).

Zona Centro-Norte de México. Esta zona de karst corresponde al país físico-geográfico: Sistemas Orográficos y de Plataforma Continental – Central – Meridional de América del Norte, y a las provincias físico-geográficas Sierras y Llanuras del Centro-Norte de México, Grandes Llanuras de Norteamérica en México, Mesas del Centro de México y Sierra Madre Oriental. Además, por su similitud en las características del medio físico y en la continuidad de su karst, en esta zona se incluyó el karst de la provincia físico-geográfica Llanura Costera Meridional del Golfo de México.

Se caracteriza por la presencia de karst continuo y discontinuo, prácticamente en la misma proporción, y presenta algunas incrustaciones de rocas intrusivas en la matriz de roca sedimentaria caliza. En la parte norte (provincia Sierras y Llanuras del Centro-Norte de México) dominan los climas muy seco templado y muy seco cálido, y en las demás provincias dominan los climas semisecos y templados. De manera general, la vegetación dominante es el matorral y los bosques, y las topoformas predominantes son sierras y bajadas y, en menor proporción, las llanuras y lomeríos; mientras que los suelos dominantes son los Leptosols y los Calcisols. Esta es la región kárstica donde se encuentra el mayor número de acuíferos sobreexplotados y suelos con problemas de salinización y/o acuíferos salobres.

Zona Sierra Madre del Sur. Esta zona de karst corresponde a dos Países físico-geográficos: Sistemas Orogénicos Meridionales de América del Norte y la Faja Neo-volcánica y a las provincias físico-geográficas Sierra Madre del Sur y Eje Neo-volcánico. Las principales zonas de karst continuo se encuentran en Oaxaca, Michoacán y Colima, mientras que el karst discontinuo predomina en Jalisco, Guerrero y Puebla. Ambas provincias físico-geográficas se consideraron en esta zona de karst debido a que es la zona de karst de México con mayor presencia de rocas ígneas, con incrustaciones aisladas de rocas metamórficas; así mismo, presenta una dominancia de clima cálido subhúmedo y templado subhúmedo, y bosques y selva baja caducifolia como los tipos de vegetación predominantes. Finalmente, sus topoformas características son las sierras, y se pueden observar diversas asociaciones de suelos con Phaeozems, Leptosols y Regosols.

Zona Península de Yucatán. Esta zona de karst corresponde al País físico-geográfico: Cuencas Costeras Transgresivas y Plataformas Meridionales de América del Norte, y a la provincia físico-geográfica Península de Yucatán. Es la superficie de karst continuo de mayor extensión del país y la zona de mayor recarga y disponibilidad de agua subterránea. La zona está dominada por rocas sedimentarias calizas (casi en su totalidad) y los suelos Leptosols. El clima cálido subhúmedo abarca casi la totalidad de esta provincia físico-geográfica, y los principales tipos de vegetación son selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia, destacando que es la zona de México con mayor superficie de vegetación secundaria. Las llanuras y lomeríos son las topoformas predominantes y, en menor proporción, las playas; sin embargo, es la región kárstica de México con mayor karst costero, con más de 2000 km.

Zona Sierras de Chiapas. Esta zona de karst corresponde al País físico-geográfico: Sistemas Orogénicos Meridionales de América del Norte, y a la provincia físico-geográfica Sierra Madre del Sur. Es una zona de karst continuo que abarca parte del estado de Chiapas, Veracruz y Tabasco. Es la segunda zona de mayor recarga y disponibilidad de agua subterránea. Dominan las rocas sedimentarias calizas con algunas partes de menor tamaño con rocas intrusivas; así mismo, son representativos los climas cálido húmedo y subhúmedo, semicálido húmedo y templado. En cuanto a la vegetación, es la única zona de karst donde domina la selva alta perennifolia, seguida de bosques y vegetación secundaria; por su parte, los Luvisols, Phaeozems y Leptosols son los grupos de suelos dominantes, mientras que las principales topoformas son las sierras con lomeríos y mesetas.

Zonas de karst aislado. Esta zona de karst corresponde al País físico-geográfico: Sistemas Orogénicos y de Cuencas Costeras Transgresivas del Pacífico Central de América del Norte, y a las provincias físico-geográficas Península de Baja California, Llanura Sonorense y Sierra Madre Occidental. Son incrustaciones de pequeñas zonas kársticas en una matriz de territorio no kárstico. Se puede diferenciar el karst correspondiente a:

- la Península de Baja California, caracterizado por pequeñas zonas de karst discontinuo de rocas sedimentarias, donde dominan climas muy secos con matorral como el principal tipo de vegetación. Como topoformas dominantes podemos encontrar lomeríos y mesetas, con Calcisols y Regosols como principales grupos de suelo.

- la Llanura Sonorense, donde hay karst continuo y discontinuo asociado principalmente a rocas sedimentarias y con pequeños parches de rocas extrusivas, dominan los climas muy secos y semisecos, con matorral y selva baja caducifolia como principales tipos de vegetación. Las topoformas principales son sierras y bajadas y en menor proporción valles, mientras que los principales grupos de suelos son Calcisols, Leptosols y Regosols.
- la Sierra Madre Occidental es una zona con pequeña porción de karst continuo, dominado por rocas metamórficas y en menor proporción extrusivas. La mayor parte de este territorio tiene clima cálido húmedo y templado húmedo, con vegetación de bosques y selva baja caducifolia, sierras como topoforma dominante casi en la totalidad del terreno, con suelos de los grupos Regosols y Leptosols.

Discusión

Gunn (2004) publicó el primer cálculo de la superficie kárstica de México, el cual fue de 391 700 km², lo que equivale al 19.85% de la superficie nacional. Como resultado de la reclasificación de las unidades cartográficas a partir del Mapa Litológico Global para la generación del WOKAM realizado por Chen *et al.* (2017), se obtuvo que el karst de México abarca 499 000 km², lo que equivale al 25.5% de la superficie nacional (Goldscheider *et al.*, 2020). En este trabajo solo se contempló la superficie continental del país, con un total de 493 523 km² de karst, por lo que la diferencia corresponde a la superficie insular de México (≈4500 km²). De lo anterior se infiere que la mayoría del territorio insular de México es kárstico. Como ejemplo de lo anterior, podemos mencionar a las tres islas con mayor superficie de México: la Isla Tiburón (1200 km²), la cual es una isla no habitada, conformada por rocas sedimentarias marinas y continentales, así como volcánicas (Gastil *et al.*, 1999); la Isla Ángel de la Guarda, otra isla no habitada, conformada por un lecho rocoso de andesita con placas subyacentes de corteza carbonatada (931 km²) (Backus & Johnson, 2014); y la Isla Cozumel (477 km²), la isla habitada de mayor superficie de México, conformada por un basamento calcáreo (Frausto-Martínez *et al.*, 2018).

Como se ha descrito con anterioridad, el karst en México está distribuido en casi todo el territorio nacional y posee características distintivas según la región y paisaje en el que se encuentra (Tabla 3), siendo el clima uno de los principales factores que posiblemente ha contribuido a esta diversidad de ambientes kársticos que presenta el país, considerando que el clima es uno de los factores más determinantes para este tipo de ambientes, puesto que factores climáticos como la precipitación y la temperatura contribuyen de manera directa en la intensidad de los procesos de karstificación y, por consiguiente, en la evolución del karst (Veress, 2020).

Tabla 3. Características del medio físico dominantes en el karst de cada estado.

Estado	Geología		Clima	Vegetación	Topoforma	Suelos
	Tipo Roca	Litología				
Aguascalientes	Extrusiva	Riolita	SsT	Matorral	Meseta	LP, RG
Baja California Sur	Sedimentaria	Arenisca	MSSc	Matorral	Lomerío	CL, RG
Campeche	Sedimentaria	Caliza	CSH	SMSp	Lomerío	LP, VR, PH
Chiapas	Sedimentaria	Caliza	CH	SAP	Sierras	LV, LP, PH
Chihuahua	Sedimentaria	Caliza	MST	Matorral	Bajada	LP, CL
Coahuila	Sedimentaria	Caliza	SSc	Matorral	Sierras	LP, CL, RG
Colima	Sedimentaria	Caliza	CSH	SBC	Sierras	LP, RG
Durango	Sedimentaria	Caliza	MSSc	Matorral	Lomerío	LP, CL, PH
Guanajuato	Sedimentaria	Caliza	TSh	Bosque	Sierras	LP
Guerrero	Sedimentaria	Caliza	CSH	SBC	Sierras	LP, RG, PH
Hidalgo	Sedimentaria	Caliza	TSh	Bosque	Sierras	LP, PH
Jalisco	Extrusiva	Andesita	CSH	Bosque	Sierras	LP, RG, CM
México	Sedimentaria	Caliza	ScSh	SBC	Sierras	LP
Michoacán	Sedimentaria	Arenisca	CSH	SBC	Sierras	LP, PH, LV
Morelos	Sedimentaria	Caliza	CSH	SBC	Sierras	LP, VR
Nayarit	Híbrida	Andesita	SMC	SBC	Sierras	RG, LP
Nuevo León	Sedimentaria	Caliza	TSh	Matorral	Sierras	LP, CL, PH
Oaxaca	Sedimentaria	Caliza	TSh	Bosque	Sierras	LP, LV, PH
Puebla	Sedimentaria	Caliza	TSh	Bosque	Sierras	LP, LV
Querétaro	Sedimentaria	Caliza	TSh	Bosque	Sierras	LP, LV
Quintana Roo	Sedimentaria	Caliza	CSH	SMSp	Llanura	LP, VR, PH
San Luis Potosí	Sedimentaria	Caliza	SSc	Matorral	Sierras	LP, CL, CH
Sinaloa	Metamórfica	MS	CSH	SBC	Sierras	RG
Sonora	Sedimentaria	Coluvial	MSSc	Matorral	Bajada	LP
Tabasco	Sedimentaria	Caliza	CH	Pastizal	Lomerío	VR, LP, LV
Tamaulipas	Sedimentaria	Caliza	TSh	Matorral	Sierras	LP, PH
Veracruz	Sedimentaria	Caliza	CH	Pastizal	Sierras	VR, LV
Yucatán	Sedimentaria	Caliza	CSH	VS	Llanura	LP, PH, LV
Zacatecas	Sedimentaria	Conglomerados	ST	Matorral	Bajada	LP, CL

Nota. Tipos de roca: MS = Metalovolcano-sedimentaria; Tipos de clima: SsT = Semiseco templado, MSSc = Muy Seco Semicálido, CSH = Cálido subhúmedo, CH = Cálido húmedo, MST = Muy seco templado, SSc = Seco semicálido, TSh = Templado subhúmedo, ScSh = Semicálido subhúmedo, SMC = Seco muy Cálido, TSh = Templado subhúmedo, ST = Seco templado. Tipos de vegetación: SMSp = Selva Mediana Subperennifolia, SAP = Selva Alta Perennifolia, SBC = Selva Baja Caducifolia, VS = Vegetación secundaria; Principales grupos de suelos: CH = Chernozems, CL = Calsisols, CM = Cambisols, LP = Leptosols, LV = Luvisols, PH = Phaeozems, RG = Regosols, VR = Vertisols.

Fuente: Elaboración propia a partir de las tablas de atributos de los mapas obtenidos.

En cuanto a su geología, el karst de México está constituido, en su mayoría, por rocas carbonatadas y, en segundo lugar, por rocas evaporitas. Esto es importante porque estas últimas (anhidrita y halita) tienen una mayor solubilidad en comparación con rocas carbonatadas (Johnson, 1997), lo que influye en el tiempo de desarrollo de las geoformas características del karst, mientras que litológicamente está conformado casi en su totalidad por rocas calizas puras o asociadas con otro tipo de roca. Las rocas calizas puras o con algún tipo de impureza están constituidas principalmente por calcita, el cual es un mineral que se caracteriza por un bajo coeficiente de solubilidad ($KSP = 8.30$) y baja gravedad específica (2.72 g cm^{-3}) (Sjöberg & Rickard, 1984).

Así mismo, las topoformas son otro factor del medio físico que influye en los procesos de karstificación, ya que la elevación del terreno, la amplitud del relieve y la disección vertical son algunos de los factores más importantes para este proceso. Por ejemplo, en las costas marinas se favorece la deposición de materiales, pero también dominan procesos de erosión y disolución (Mylroie, 2013). En el caso del karst de sierras-bajadas va a variar la intensidad de los procesos de karstificación con respecto a la altitud, ubicándose la zona de recarga de los acuíferos en las depresiones (poljes y dolinas), así como en las planicies que rodean las montañas (Elhatip, 1997), mientras que las zonas de karst de sierra y bajada serían más susceptibles a la erosión en comparación de las zonas de karst de planicie. Este tipo de erosión que se presenta en estos paisajes se denomina "erosión kárstica", en la que se dan fenómenos de corrosión, erosión, arrastre, acumulación y disolución-lavado-gravedad como resultado de la morfogénesis (Febles-González *et al.*, 2012), lo cual puede llegar a acentuarse según el tipo del suelo. A mayor altitud se modifican algunas condiciones ambientales (como la precipitación, temperatura media anual y diaria, días con heladas), actividad biológica (microorganismos del suelo) y condiciones del acuífero como el espesor de la zona vadosa (Veress, 2020).

En el caso del karst de México, los suelos dominantes son los Leptosols, Calcisols y Phaeozems. Los Leptosols se caracterizan por ser muy delgados (25 cm o menos de profundidad) y por encontrarse sobre roca continua dura o suelos más profundos, pero ricos en fragmentos rocosos (>80% en volumen); los Calcisols se caracterizan por acumulaciones de carbonatos secundarios, ampliamente extendidos en ambientes áridos y semiáridos. Los Phaeozems se caracterizan por sus colores oscuros y por ser ricos en materia orgánica (FAO, 2015). Los Leptosols y Calcisols se caracterizan por su susceptibilidad a la erosión hídrica/eólica. Los Leptosols, debido a la dominancia de fragmentos pedregosos y rocosos, así como a su poco espesor (≤ 25 cm), facilitan la movilidad de los materiales finos; mientras que los Calcisols, debido a la baja cobertura vegetal de la vegetación xerófila, facilitan el arrastre de las partículas de suelo, ya sea por erosión hídrica o eólica.

Otro factor importante relacionado con el karst es la recarga de los acuíferos y puede ser de dos tipos: recargas autogénicas, que es cuando se da una lenta infiltración a través de los poros de la roca, e infiltración alogénica, que es cuando se da una rápida infiltración a partir de las grietas y fisuras de la roca (Lorette *et al.*, 2021). En algunos sistemas kársticos pueden presentarse ambos procesos. El flujo terrestre y superficial de agua es raro en ambientes kársticos en comparación con terrenos no kársticos (Bonacci, 2015), reduciéndose generalmente a pequeños cuerpos permanentes de agua superficial o cuerpos y corrientes perennes, por lo que el abastecimiento de agua para las actividades humanas depende casi en su totalidad del agua subterránea.

Debido a lo anterior, una de las principales problemáticas asociada a los acuíferos kársticos es su vulnerabilidad a la contaminación relacionada a las actividades humanas, la salinización y la intrusión salina. La intrusión salina es un proceso mediante el cual desciende el nivel freático, lo que altera la interfaz agua dulce/agua de mar, facilitando la mezcla de ambas capas de agua. Este fenómeno puede darse por sobreexplotación de los acuíferos, y las zonas de costa son las más susceptibles (Frollin *et al.*, 2022). Por otro lado, la salinidad se da principalmente por la permeabilidad y porosidad del suelo y roca que conforman los ambientes kársticos, lo que permite la penetración de agua salina (Ouarani *et al.*, 2023). Este es un problema importante, ya que puede provocar la degradación de la calidad del agua dulce, particularmente en las regiones kársticas costeras (Basack *et al.*, 2022), lo cual tiene un fuerte impacto, ya que en las zonas de karst los acuíferos son la principal fuente de abastecimiento de agua dulce (Eftimi *et al.*, 2023).

Algunos factores para considerar al momento de estudiar los acuíferos kársticos son el volumen y el flujo hidrológico, la dirección del flujo (unidireccional) y la presencia de depósitos de sedimentos clásticos (que incrementan la conductividad del agua), así como la naturaleza de los contaminantes (Vesper *et al.*, 2001). En México, las zonas de karst continuo representan las principales reservas de agua subterránea del país. La recarga media anual de los acuíferos del país asciende a 92 404.00 millones de m³ al año (DOF, 2023), de los cuales 38 776.70 m³ (41.96%) corresponden a los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Chiapas (DOF, 2023), que conforman la zona de karst continuo más extensa del país, donde también se tiene la mayor cantidad de agua disponible del país.

Finalmente, para el análisis e identificación de zonas kársticas del país es importante recalcar que en este trabajo únicamente se consideró la superficie continental de México, ya que los territorios insulares presentan características particulares y es recomendable su estudio de manera individual. La superficie correspondiente a los territorios insulares del país es de 4529.7 km², distribuidos en 1203 islas en aguas oceánicas (INEGI, 2014). Para el territorio insular se sugiere realizar estudios detallados, al menos para todas las islas habitadas del territorio nacional o las de mayor superficie, como se ha hecho con la Isla Cozumel, de la cual se ha estudiado más a profundidad su geomorfología y morfometría del relieve kárstico (Frausto-Martínez *et al.*, 2018; Frausto-Martínez *et al.*, 2021), así como su hidrología (Hernández-Flores *et al.*, 2021).

La identificación y descripción de zonas kársticas en México ha sido previamente abordada por varios autores. Por ejemplo, Espinasa-Pereña (2007), en el Nuevo Atlas de México, elaboró un mapa basado en una clasificación morfo-climática del karst de México para dividir el karst mexicano en dos categorías principales: karst de plataforma y karst de montañas plegadas o falladas. El primero se localizó principalmente en la Península de Yucatán, donde también se identificaron las principales depresiones; por otro lado, el karst de montañas plegadas se distribuyó en el resto del país. Para esta segunda categoría, se utilizó el clima como un segundo criterio de clasificación, identificando cinco subtipos: karst tropical, karst de bosque lluvioso, karst cálido subhúmedo, karst fósil o inactivo, y calizas no karstificables. Aunque estos criterios ofrecen una base esencial para la clasificación del karst, en términos de caracterización del medio físico de las zonas determinadas, presentan poco detalle respecto a otras características físicas que influyen en los procesos y dinámicas kársticas.

Más recientemente, Bautista *et al.* (2023) realizaron un trabajo en el que describen el karst de México considerando su continuidad, describen de manera general la geología y geomorfología del karst de México e identifican y describen las principales cuevas y formaciones kársticas en México.

El trabajo que aquí se presenta amplía el conocimiento aportado por estos trabajos previos al brindar una descripción detallada de la continuidad del karst en México a nivel estatal, así como una caracterización del medio físico tanto de los estados como de las diversas zonas kársticas del país. Sin embargo, este estudio se enfrenta principalmente a limitaciones relacionadas con las escalas de trabajo, ya que el WOKAN se encuentra a una escala 1:10 000 000 y los insumos cartográficos nacionales se encuentran en escala 1:1 000 000 y 1:250 000, esto hace que la información presentada sea una generalización que no representa a detalle la información en esta escala de trabajo. Para mejorar esto es necesario realizar la cartografía nacional del karst a la misma escala de trabajo que el resto de la cartografía nacional, lo que requiere trabajo de campo detallado para delimitar de mejor manera las áreas del karst de México.

Desarrollar trabajos a escalas más detalladas es primordial para conocer la distribución real del karst en México y describirlo de manera más precisa. A nivel nacional, los estados de la Península de Yucatán son los que más se han estudiado, con alrededor del 73% de todos los trabajos relacionados con el karst de México (Álvarez-Rivera & Estrada-Medina, 2023). En cuanto a la identificación de ambientes kársticos y su estudio a nivel estatal, está el mapa digital de entornos geomórficos del estado de Quintana Roo (Fragoso-Servón *et al.*, 2019), el mapa de paisajes geomorfológicos de Campeche (Palma-López *et al.*, 2022) y la actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán, en el que se considera la clasificación de ambientes geomorfológicos (Bautista *et al.*, 2015). Así mismo, en el estudio realizado por Estrada *et al.*, (2019) se realiza una caracterización detallada del origen y morfología del karst del estado de Yucatán.

Fuera de la Península de Yucatán, son escasos los estudios dedicados a la caracterización del karst a nivel estatal. Un ejemplo es el trabajo de Palacio (2023), quien realizó una tipificación y caracterización detallada de los paisajes kársticos en San Luis Potosí, México. Además, se han llevado a cabo investigaciones que abordan el karst desde una perspectiva físico-geográfica provincial. En este contexto, destaca el estudio de Hernández-Vergara (2023), quien analiza la estructura interna de la Sierra Madre del Sur basándose en datos geológicos, con el propósito de identificar y describir sus características genéticas. Estos enfoques complementan de manera significativa los estudios a nivel nacional al proporcionar un nivel de detalle más profundo.

Conclusiones

El karst de México representa una cuarta parte del territorio nacional y podemos encontrarlo en 29 de los estados del país. Se identificaron cinco zonas kársticas: (1) La zona Centro y Norte de México, karst de climas secos y semisecos, caracterizada por una mezcla de karst continuo y discontinuo, con mayor presencia de Calcisols; (2) la zona Sur, caracterizada por una mayor proporción de rocas extrusivas e híbridas; (3) la zona Península de Yucatán, dominada por karst continuo con llanuras y lomeríos; (4) la zona Sierras de Chiapas, karst continuo dominado por sierras y lomeríos; (5) y el karst aislado, un grupo de porciones de territorio kárstico inmersos en una matriz de territorio no kárstico.

Este es el primer análisis a nivel nacional de identificación de zonas de karst utilizando el WOKAM como insumo cartográfico. Es la única fuente de información reciente acerca de los acuíferos kársticos y que además distingue entre karst continuo y discontinuo; sin embargo, su escala y la de los insumos existentes en México obliga a que en el futuro cercano se realice un trabajo de campo detallado, complementado con la generación de insumos cartográficos de mayor resolución para delimitar mejor las zonas kársticas del país.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés en el presente trabajo.

Referencias

- Álvarez-Rivera, O., & Estrada-Medina, H. (2023). Estudio y perspectivas en la investigación del karst de México. En F. Bautista (ed.), *El karst de México* (pp. 12-30). México.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., & Ihl, T. (2016). Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave & Karst Studies*, 78(2), 51-60. https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Bautista-2/publication/306847020_Density_of_karst_depressions_in_YucatAn_state_Mexico/links/57bfa17708ae2f5eb32e9c9c/Density-of-karst-depressions-in-YucatAn-state-Mexico.pdf

- Backus, D. H., & Johnson, M. E. (2014). Stromatolitic mats from an uplifted Pleistocene lagoon at Punta Chivato on the Gulf of California (Mexico). *Palaios*, 29(9), 460-466. <https://doi.org/10.2110/palo.2013.114>
- Basack, S., Loganathan, M. K., Goswami, G., Baruah, P., & Alam, R. (2022). Review of risk assessment and mitigation measures of coastal aquifers vulnerable to saline water intrusion. *Polish Journal of Environmental Studies* 31(2), 1505-1512. <https://doi.org/10.15244/pjoes/142382>
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., & Aguilar, Y. (2015). Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: Enfoque geomorfoedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2(6), 303-315. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000300006
- Bautista, F., Aguilar, Y., Palacio, G., & Gijón-Yescas, N. (2023). The karst landscapes of Mexico. En F. Bautista (ed.), *El karst de México* (pp. 142-153). México.
- Bollo, M., Hernández, S. J. R., Priego, A., Zaragoza, R., Ortiz, A., Espinoza, A., & Ruíz, R. (2015). Una propuesta de regionalización físico-geográfica de México. Universidad Nacional Autónoma de México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Bonacci, O. (2015). Surface waters and groundwater karst. En Z. Stevanović (ed.), *Karst aquifers—characterization and engineering* (p. 149-169.). Springer, Cham.
- Bosák, P. (2008). Karst processes and time. *Geologos*, 14(1), (19-36).
- Calò, F., & Parise, M. (2006). Evaluating the human disturbance to karst environments in southern Italy. *Acta Carsologica*, 35(2-3), 47-56. <https://doi.org/10.3986/ac.v35i2-3.227>
- Chen, X., Zhang, Z., Chen, X., & Shi, P. (2009). The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 59(4), 811-820. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>
- Chen, Z., Auler, A. S., Bakalowicz, M., Drew, D., Griger, F., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Richts, A., Stevanovic, Z., Veni, G., & Goldscheider, N. (2017). The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*, 25(3), 771-785. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2020). *Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpest20gw.html>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2017). *Áreas Naturales Protegidas Federales de México*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2024). *Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación*. <https://advc.conanp.gob.mx/descargables/>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021a). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Condición de los acuíferos 2020*. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=acuiferos>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021b). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Acuíferos con intrusión salina o fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres 2020*.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (9 de noviembre de 2023). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023#gsc.tab=0
- Eftimi, R., Shehu, K., & Sara, F. (2023). Hydrogeological aspects of the municipal water supply of Albania: situation and problems. *Hydrology*, 10(10), 193. <https://doi.org/10.3390/hydrology10100193>
- Elhatip, H. (1997). The influence of karst features on environmental studies in Turkey. *Environmental Geology*, 31(1-2), 27-33. <https://doi.org/10.1007/s002540050160>
- Espinasa-Pereña, R., & Nieto-Torres, A. (2015). *Análisis de la vulnerabilidad a fenómenos kársticos: México* [Reporte Técnico]. Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred).
- Espinasa-Pereña, R. (2007). El Karst de México, Mapa NA III 3. En A. Coll-Hurtado (coord.), *Nuevo Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.igeograf.unam.mx/Geodig/nvo_atlas/index.html/5_naturaleza_ambiente/3_geomorfologia/NA_III_3.jpg

- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2017). *ArcGIS Desktop: Release 10.5* [Software]. Redlands.
- Estrada, H., Jiménez, J. J., Álvarez, O., & Barrientos, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta universitaria*, 29, e2292. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2292>
- Febles-González, J. M., Vega-Carreño, M. B., Tolón-Becerra, A., & Lastra-Bravo, X. (2012). Assessment of soil erosion in karst regions of Havana, Cuba. *Land Degradation & Development*, 23(5), 465-474. <https://doi.org/10.1002/ldr.1089>
- Fragoso-Servón, P., Pereira-Corona, A., & Bautista, F. (2019). The karst and its neighbors: digital map of geomorphic environments in Quintana Roo, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 81(2), 113-122. <https://doi.org/10.4311/2018ES0112>
- Frausto-Martínez, O., Colín, O., & Rodríguez, J. F. (2021). Karst en la ciudad: planificación del espacio urbanístico de la ciudad de Cozumel, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24, 1-17.
- Frausto-Martínez, O., Zapi-Salazar, N. A., & Colin-Olivares, O. (2018). Identification of karst forms using LiDAR technology: Cozumel Island, Mexico. *Trends in Geomatics - An Earth Science Perspective*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79196>
- Frollini, E., Parrone, D., Ghergo, S., Masciale, R., Passarella, G., Pennisi, M., Salvadori, M., & Preziosi, E. (2022). An integrated approach for investigating the salinity evolution in a Mediterranean coastal karst aquifer. *Water*, 14(11), 1725. <https://doi.org/10.3390/w14111725>
- Gastil, R. G., Neuhaus, J., Cassidy, M., Smith, J. T., Igle, J. C., & Krummenacher, D. (1999). Geology and paleontology of southwestern Isla Tiburón, Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 16(1), 1-34.
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A. S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., & Veni, G. (2020). Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1661-1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Gunn, J. (2004). *Encyclopedia of caves and karst science*. Taylor & Francis Group.
- Gutiérrez, R. (2008). *Compilation and production of a karst map of Mexico*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFM.H21D0854G/abstract>
- Hartmann, J., & Moosdorf, N. (2012). The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12), 1-37. <https://doi.org/10.1029/2012GC004370>
- Hernández-Flores, G., Gutiérrez-Aguirre, M. A., Cervantes-Martínez, A., & Marín-Celestino, A. E. (2021). Historical analysis of a karst aquifer: recharge, water extraction, and consumption dynamics on a tourist island (Cozumel, Mexico). *Annals of Limnology*, 57(16), 1-17. <https://doi.org/10.1051/limn/2021013>
- Hernández-Vergara, R. (2023). Características genéticas del karst de la Sierra Madre del Sur. En F. Bautista (ed.), *El karst de México* (pp. 45-57). Asociación Mexicana de Estudios Sobre el Karst.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001a). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001b). *Diccionario de datos fisiográficos. (Vectorial). Esc. 1:1000000*. Sistema Nacional de Información Geográfica. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825223892>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250000 Serie II (Continuo Nacional)*. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Catálogo del Territorio Insular Mexicano*. https://datos.abiertos.inecc.gob.mx/Datos_abiertos_INECC/CGACC/DocumentosRIslasMarias/Eje2_InstumentosDelTerritorioInsularMexicano/CatalogoInsularDelTerritorioMexicano.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *División política estatal 1:250000*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/dest2019gw.html>

- Jemcov, I. (2007). Water supply potential and optimal exploitation capacity of karst aquifer systems. *Environmental Geology*, 51(5), 767-773. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0389-8>
- Jennings, J. N. (1985). *Karst geomorphology*. Blackwell Inc.
- Johnson, K. S. (1997). Evaporite karst in the United States. *Carbonates and Evaporites*, 12, 2-14. <https://doi.org/10.1007/BF03175797>
- Jones, W. K., & White, W. B. (2019). Karst. En W. B. White, D. C. Culver & T. Pipan (eds.), *Encyclopedia of caves* (pp. 609-618). Academic Press.
- Kaufmann, G., & Braun, J. (1999). Karst aquifer evolution in fractured rocks. *Water Resources Research*, 35(11), 3223-3238. <https://doi.org/10.1029/1999WR900169>
- Klimchouk, A. (2004). Towards defining, delimiting and classifying epikarst: its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2(5), 1-13. https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/5335/
- Lorette, G., Viennet, D., Labat, D., Massei, N., Fournier, M., Sebilo, M., & Crancon, P. (2021). Mixing processes of autogenic and allogenic waters in a large karst aquifer on the edge of a sedimentary basin (Causses du Quercy, France). *Journal of Hydrology*, 593, 125859. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125859>
- Mylroie, J. E. (2013). Coastal karst development in carbonate rocks. En M. J. Lace, & J. E. Mylroie (eds.), *Coastal karst landforms (Vol. 5)* (pp. 77-109). Springer Science & Business Media.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. FAO.
- Ouarani, M., Brahim, Y. A., Mulla, D., Rafik, A., Azennoud, K., Bouchaou, L., & Chehbouni, A. (2023). A comprehensive overview of groundwater salinization and recharge processes in a semi-arid coastal aquifer (Essaouira, Morocco). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49, 101501. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101501>
- Palacio, A. G. (2023). Paisajes kársticos en San Luis Potosí, México: tipificación y caracterización ambiental. En F. Bautista (ed.), *El karst de México* (pp. 31-44). Asociación Mexicana de Estudios Sobre el Karst.
- Palma-López, D. J., Shirma-Torres, E. D., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., & Palma, D. J. (2022). Geopedological transects in karst landscapes in Campeche, Mexico. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i12.2291>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2021). *Capas compartidas en datos abiertos*. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Sjöberg, E. L., & Rickard, D. T. (1984). Calcite dissolution kinetics: surface speciation and the origin of the variable pH dependence. *Chemical Geology*, 42(1-4), 119-136. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(84\)90009-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(84)90009-3)
- Veress, M. (2020). Karst types and their karstification. *Journal of Earth Science*, 31(3), 621-634. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1306-x>
- Vesper, D. J., Loop, C. M., & White, W. B. (2001). Contaminant transport in karst aquifers. *Theoretical and Applied Karstology*, 13(14), 101-111.