



Los cenotes de la península de Yucatán

PATRICIA BEDDOWS, PAUL BLANCHON,
ELVA ESCOBAR, OLMO TORRES-TALAMANTE

La península de Yucatán es una de las cinco zonas fisiográficas de la República Mexicana y representa 2% de la superficie del país, con 39 340 km². El número de cenotes en el estado de Yucatán es de entre 7 000 a 8 000; la gran extensión de bosque ha hecho más difícil el cálculo para los estados de Campeche y Quintana Roo.

La península de Yucatán corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental de Yucatán, que abarca una extensión de 300 000 km² y que separa al Mar Caribe del Golfo de México. En la península, los rasgos orogénicos (formación de montañas) están prácticamente ausentes, lo que es singular en el contexto nacional; 90% de su superficie está a menos de 200 msnm y la Sierrita de Ticul es la única elevación prominente. Topográficamente se puede dividir en planicie norte, Sierrita de Ticul y planicie del sur. Cabe mencionar que de norte a sur la elevación aumenta ligeramente, lo cual se explica más adelante. Esta zona abarca, como unidad fisiográfica/geológica, tanto el territorio mexicano, el Petén guatemalteco

Cenote Dzitnup,
Valladolid, Yucatán.

FOTO: CLAUDIO CONTRERAS KOOB

y el norte de Belice. La península carece de drenaje superficial debido a la litología (relativo a las rocas), y el río Hondo en la frontera con Belice es el único sistema fluvial de la península.

El clima de la península de Yucatán es cálido-subhúmedo con lluvias en verano, sin embargo, presenta un gradiente de precipitación que aumenta de noroeste a sureste, lo cual se refleja en la vegetación, desde la de zonas áridas en el noroeste, pasando por selvas bajas y medianas subcaducifolias y caducifolias (es decir, que pierden en parte o totalmente las hojas en la estación de secas), hasta selvas altas en el sur, cerca de Chiapas. En verano se presentan huracanes y en invierno, “nortes”.

GEOLOGÍA

El Bloque Yucatán es un bloque tectónico único, sin plegamientos, del Paleozoico, cuyo límite es la falla Motagua. Este basamento metamórfico de origen pangeico continental se separa del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México; su posición actual viene desde finales del Triásico (~ 200 millones de años). Sobre este basamento se ha acumulado una capa gruesa de sedimentos marinos del Paleozoico Tardío, seguido por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen a un depósito extenso de evaporitas (rocas sedimentarias formadas a partir de los residuos de antiguos mares o lagos evaporados) que corresponden a una cuenca carbonatada limitada por arrecifes del Cretácico Temprano. Sobre éstas se encuentran calizas (rocas sedimentarias porosas formadas por carbonatos) depositadas en plataforma durante el Cretácico Tardío; la frontera entre el Cretácico y el Terciario presenta la estructura de impacto Chicxulub. La plataforma de Yucatán, conformada por calizas de periodos del Cretácico (144 a 165 millones de años) al Cenozoico-Cuaternario (65 millones de años al reciente), refleja un gradiente temporal en sentido norte-sur, lo cual indica una emergencia paulatina de la plataforma durante el Plioceno (5.2 a 1.8 millones de años). Esta emergencia paulatina explica la asimetría, que se extiende solamente unos 10 km en el margen del Caribe y hasta 200 km del lado del Golfo de México.

El tercio norte y la mitad oriental de la península están formados por karst (paisaje propio de terrenos calizos, por el efecto que la disolución del agua tiene sobre ellos) más reciente de planicie, con elevación máxima de 10 m, compuesta por secuencias de capas horizontales de calizas y dolomitas del Terciario Tardío (Plioceno) de la formación Carrillo Puerto, limitada por los depósitos periféricos del Cuaternario. La formación Carrillo Puerto tiene un espesor de entre 163 y 240 m, con la presencia del foraminífero (orden de microfósiles marinos) *Archaia angulatus*, que actualmente se asocia a algas endosimbiontes (que viven en simbiosis con su huésped dentro de sus células) en aguas someras muy claras de plataformas continentales. Los depósitos del Cuaternario están restringidos a una franja periférica angosta a lo largo de la costa. A lo largo de la costa norte estos depósitos constan de calizas compuestas por conchas de bivalvos, compactadas densamente. En la costa noreste los depósitos del Cuaternario son del Pleistoceno y su extensión y topografía en la costa se interpretan como carbonatos supramareales (formados por encima del nivel de las mareas) que reflejan los movimientos de la línea de costa, lo cual es consistente con la formación de cavidades extensas de la disolu-



La plataforma y la península de Yucatán, y las zonas de fallamiento.

El término cenote (del maya *ts'ono'ot* o *d'zonot*, "caverna con depósito de agua") se refiere a cualquier espacio subterráneo con agua, con la única condición de que esté abierto al exterior en algún grado.



Geología de los carbonatos de la península de Yucatán. Se muestran las secuencias de depósitos carbonatados más jóvenes.

ción subterránea asociada a la haloclina (capas de agua en donde la salinidad del agua cambia rápidamente con la profundidad) y su profundidad en relación con el nivel del mar en esa época, como se explica más adelante.

La topografía de la península presenta como rasgo más importante a los cenotes. Éstos se concentran en la parte norte, a lo largo de una línea imaginaria situada entre Tulum, Quintana Roo y Campeche, y disminuyen hacia el sur de la península. La roca kárstica se caracteriza por su alta permeabilidad y un gradiente hidráulico casi nulo; el agua de origen meteórico se infiltra y acumula en el subsuelo, formando una lente de agua dulce delgada que flota sobre una masa de agua salina, más densa, cuyo origen es la intrusión marina natural. El contacto entre ambas masas de agua, dulce y marina, forma una zona de mezcla o haloclina que en conjunto conforman un componente geológico importante del acuífero. La lente de agua dulce constituye la única fuente de agua dulce en la península de Yucatán, desde tiempos prehistóricos, renovable solamente por la lluvia estacional.

Este acuífero es, por sus características, intrínsecamente vulnerable a la contaminación. La masa de agua marina ingresa por la costa a la península y llega hasta los 110 km tierra adentro en el estado de Yucatán. En estudios recientes, realizados por Patricia Beddows, se ha propuesto la existencia de una circulación salina profunda transpeninsular, derivada de las diferencias en el nivel del mar entre el Mar Caribe —más elevado— y el Golfo de México, con menor elevación.

ORIGEN Y FORMACIÓN DE CENOTES

El origen de los cenotes se debe al proceso geomorfológico denominado karst, que consiste en la combinación de los mecanismos de disolución, colapso y construcción de la caliza. Estos procesos están gobernados por factores intrínsecos y extrínsecos, los

cuales actúan en diferentes escalas de tiempo y espacio, generando una amplia gama de formas y grados de karstificación. Los factores intrínsecos incluyen la litología, el grado de porosidad de la matriz y la fractura de la roca; los extrínsecos, el clima, la temperatura, la vegetación, la mezcla de agua dulce y salada y el tiempo de duración de la exposición al proceso en cuestión.

El resultado es la disolución de rocas solubles (yeso, caliza, dolomita y halita) por corrosión química con base en las condiciones hidrológicas imperantes, que resultan en formas negativas del terreno e incremento de la permeabilidad debido al desarrollo de grandes sistemas de drenaje subterráneo.

Disolución. La disolución consta de tres procesos:

1) La disolución inicial se debe a la ligera acidificación del agua de lluvia. Ésta se da en parte por la absorción de CO₂ de la atmósfera, formando ácido carbónico; el agua de lluvia acidificada absorbe más ácido carbónico al entrar en contacto con el suelo, donde la descomposición de la materia orgánica por medio de los microorganismos produce el ácido y aumenta la agresividad del agua.

2) La mezcla del agua salada y dulce aumenta en los cambios y en la haloclina la agresividad del agua sobre la roca y es considerado el proceso más potente de disolución.

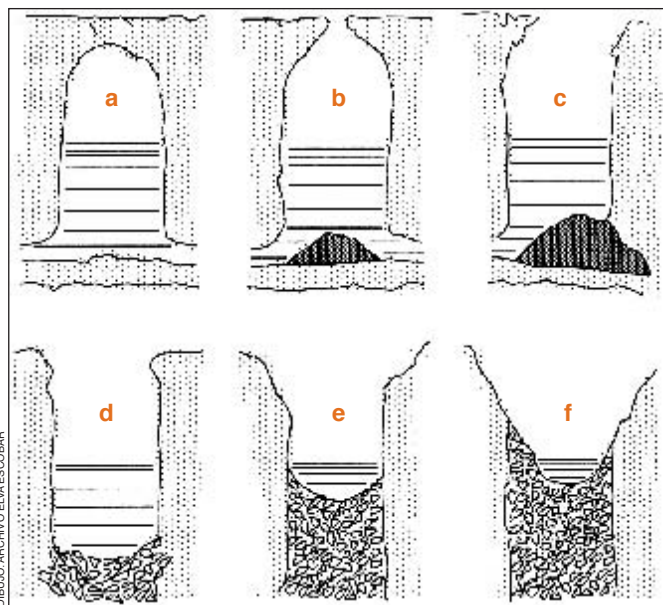
3) La disolución mediada biológicamente puede ocurrir en el suelo o dentro del sistema de flujo subterráneo, donde el ácido sulfhídrico (H₂S) se genera por la descomposición microbiana de la materia orgánica y disuelve la roca desde la masa de agua.

Colapso: El segundo mecanismo vinculado al karst es la fluctuación del nivel del mar en los periodos glacial e interglacial. Cuando el nivel del mar ha bajado en periodos glaciares desciende el acuífero y deja una cavidad o cueva aérea tras de sí, donde secciones del techo se pueden desplomar por falta de soporte, formando una dolina o depresión (cenote). Al final del periodo glacial el mar regresa e inunda la cueva.

Construcción: El tercer mecanismo del karst es el responsable de las formaciones de estructuras constructivas o de acumulación, también denominadas espeleotemas (estalactitas, estalagmitas y columnas), del material disuelto en el proceso del karst. Las cuevas secas originadas por los dos primeros mecanismos continúan recibiendo agua de lluvia acidificada que lleva en solución a los minerales de la roca disuelta. Al llegar a la cavidad aérea el CO₂ abandona el equilibrio acuoso y los minerales se precipitan y crean las espeleotemas. El crecimiento de las espeleotemas se detiene cuando la cueva se inunda por un incremento en el nivel del mar en un periodo interglacial.

Entendiendo los mecanismos y procesos del “karst tropical” de la península podemos decir que la formación de cenotes se genera a través de una secuencia de eventos. Partiendo de un sistema de circulación horizontal (cueva inundada) se puede formar una gruta o bien un cenote tipo cántaro por derrumbe o hundimiento parcial del techo. El proceso avanza desde arriba, por infiltración pluvial, y desde abajo por circulación subterránea. Posteriormente, la totalidad del techo se derrumba dando lugar a un cenote cilíndrico; del cenote cilíndrico se puede generar un cenote tipo aguada por azolve y por hundimiento lento de la zona adyacente

Como se mencionó anteriormente, la disolución mayor ocurre en la zona de contacto entre el agua dulce y salada o halo-



Evolución geológica en la formación de los cenotes y tipos de cenotes. **a)** Cueva anquihalina, **b)** cenote tipo cántaro lótico, **c)** cenote de paredes verticales, **d)** cenote tipo léntico, **e)** azolve y hundimiento de paredes, **f)** cenote tipo aguada.

clina, la cual sube o baja dependiendo del nivel del mar. A lo largo de la costa del sector norte del Caribe los exploradores mexicanos y extranjeros han cartografiado más de 600 km de galerías y túneles inundados, usando técnicas de espeleobuceo y reconociendo diferentes niveles y pasajes verticales, que incluyen las cinco cuevas sumergidas más grandes del mundo, resultado de la disolución de volúmenes grandes de roca disuelta por la mezcla y haloclina. Esta disolución se asocia a las variaciones del nivel del mar a lo largo de miles de años. Los ríos subterráneos de dimensiones inmensas drenan la lluvia que cae al interior de la península. El agua transportada drena en la costa a través de caletas como Xel Ha y Xcaret y manantiales submarinos en las rías.

En contraste, la zona de Mérida y la costa norte no presentan un desarrollo tan extenso de flujos subterráneos, aunque tiene el mayor número de cenotes de la península, en lo que se ha denominado el anillo de cenotes, el cual coincide con el diámetro externo del cráter Chicxulub. Los descensos en el nivel del mar durante el Holoceno obligaron tanto a humanos como a parte de la fauna a ingresar a las cuevas para acceder al acuífero, lo cual explica los registros paleontológicos y antropológicos que hoy encontramos en el subsuelo de la península. El nivel actual del mar se alcanzó hace 5 000 años aproximadamente.

CLASIFICACIÓN Y TIPO DE CENOTES

La palabra cenote viene del vocablo maya *ts'ono'ot* o *d'zonot*, que significa “caverna con depósito de agua”. Este término se ha generalizado para designar a la mayoría de las manifestaciones kársticas en la península de Yucatán. Los cenotes, como se describió anteriormente, son sistemas complejos y dinámicos. Por su origen se clasifican como lagos de disolución o generados por la actividad del agua sobre la roca soluble. El lago kárstico elemental

es la dolina-colapso. El término cenote denota cualquier espacio subterráneo con agua, con la única condición de que esté abierto al exterior en algún grado. Es decir, incluye toda manifestación kárstica que alcance el nivel freático.

El número aproximado de cenotes en la península no se ha estimado dada la dinámica existente en su formación. El número considerado en el estado de Yucatán va de los 7 000 a los 8 000 cenotes; la cobertura de bosque ha hecho más difícil el cálculo para los estados de Campeche y Quintana Roo.

Por su morfología, los cenotes se clasifican de acuerdo con la etapa del proceso de apertura que comunica el acuífero subterráneo con la selva y la luz solar en superficie como se describió en el proceso de formación. Por sus características hidrobiogeoquímicas, los cenotes se clasifican como jóvenes y viejos. Los jóvenes o lóticos –del griego *lotus*, “rápido, veloz” (Schmitter-Soto *et al.*, 2002)– se conectan libremente con el acuífero a través de los túneles de las cuevas. El flujo del agua es horizontal y el tiempo de residencia del agua es corto. Los cenotes más viejos o lénticos presentan un bloqueo de la conexión principal con el acuífero, debido al colapso del techo o las paredes y la sedimentación, con lo cual el intercambio con el agua subterránea es restringido y el recambio del agua es más lento. En éstos el agua acumula materia orgánica disuelta, particulada, detrito orgánico y organismos vivos. La materia orgánica particulada y el detrito se remineralizan en nutrientes por vía microbiana, modificando las características fisicoquímicas del agua y reflejadas en el pH, la turbidez y el contenido de oxígeno disuelto, que inciden en la generación de gradientes químicos verticales marcados, por lo cual se presentan aguas anóxicas (sin oxígeno) y ácidas en el fondo.

El tamaño de la apertura del cenote determina, hasta cierto grado, cuánta materia orgánica puede introducirse desde los terrenos adyacentes del suelo de la selva en épocas de lluvia. La producción de materia orgánica *in situ* depende, entre otros factores, de la presencia de luz. Los cenotes tipo cántaro están menos expuestos a la luz solar, los cenotes totalmente expuestos como los cilíndricos y aguadas presentan una cantidad mayor de materia orgánica: alóctona y autóctona, procedente esta última de plantas acuáticas y algas, e influyen en el tipo de vida que en ellos se encuentra. 🌿

- Patricia Beddows. Doctora por la Universidad de Bristol (Inglaterra), con un estudio sobre la hidrogeología de los sistemas de cuevas y cenotes de la península de Yucatán.
- Paul Blanchon. Investigador de la Unidad Académica Puerto Morelos del ICML, UNAM y tutor del posgrado en ciencias del mar.
- Elva Escobar. Investigadora del ICML, UNAM. Jefa de la Unidad Académica de Sistemas Oceánicos y Costeros y responsable del laboratorio de biodiversidad y macroecología. Miembro del Foro Consultivo Científico de la AMC y designada científico experto en investigación científica marina ante Naciones Unidas.
- Olmo Torres-Talamante. Biólogo egresado de la Facultad de Ciencias, UNAM. Actualmente realiza su posgrado en ciencias del mar y limnología, UNAM, con un estudio de relaciones ecológicas y biogeoquímicas en cuevas y cenotes de Quintana Roo.

PARA LEER MÁS...

SCHMITTER-SOTO J.J., E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, L.E. Marín, “Los cenotes de la península de Yucatán”, en G. de La Lanza y J.L. García Calderón (comps.), *Lagos y presas de México*, AGT, México, 2002.



Cenote Xlakah, Dzibilchaltún, Yucatán.