



FORMAS KÁRSTICAS COMUNES DE LOS CENOTES DEL ESTADO DE QUINTANA ROO (MÉXICO)

Itziar Ordóñez Crespo

Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio
iordonez@alum.uax.es

Manuel García Rodríguez

Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio
manugaro@uax.es

Recibido: 8 de noviembre de 2010

Aceptado: 9 de diciembre de 2010

RESUMEN

Se estudian los cenotes del Estado de Quintana Roo (península de Yucatán), término que reciben en México dolinas o uvalas que conectan la superficie del terreno con cavidades subterráneas, generalmente con la presencia de un nivel freático muy próximo a la superficie del terreno. Con frecuencia los cenotes tienen conexión hidráulica entre sí a través de cuevas y galerías subterráneas, que en muchos casos tienen salida directa al mar. La abundancia de formas endokársticas que se encuentran en el interior de las cuevas, hacen de esta zona un museo natural donde pueden observarse e interpretarse muchos de los procesos que han actuado y continúan actuando en su interior. Todas las características que presentan los cenotes de Quintana Roo, hacen de la zona un escenario extraordinario para la práctica del espeleobuceo y buceo científico, disciplina que contribuye a la comprensión del complejo proceso de karstificación en una región con mezcla de aguas dulces continentales y salinas marinas.

Palabras clave: Hidrogeología cenotes, karst y cenotes, Quintana Roo, península de Yucatán, espeleotemas cenotes, Dos Ojos, Chac Mool, Eden, Manati, Pet cemetery, Tajma-Ha.

COMMON KARSTIC FORMS OF THE CENOTES IN THE STATE OF QUINTANA ROO (MÉXICO)

ABSTRACT

The present paper studies several of the cenotes located in the state of Quintana Roo (Yucatan peninsula), term used by Mexicans to explain the subterranean cavities which are permanently flooded and connected to the surface. Frequently, cenotes are connected to each other through a series of subterranean galleries and passageways that often end up into the ocean. The abundance of karst forms found on the inside of these galleries, make this area a natural museum where many of the processes that have occurred and keep occurring on its inside may be observed and interpreted. All the features showed on these

cenotes in Quintana Roo, make up an extraordinary scenario for the practice of cave diving, helping to understand the complex process of karst formation on a region where fresh continental and salt water is often found mixed.

Keywords: Cenotes hydrogeology, karst and cenotes, Quintana Roo, Yucatán Península, speleothems cenotes, Dos Ojos, Chac Mool, Eden, Manati, Pet cemetery, Tajma-Ha.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

El trabajo que se presenta se localiza en la zona sureste de la península del Yucatán (México), en el estado de Quintana Roo, concretamente entre las localidades de Playa del Carmen y Tulum (ver figura 1).

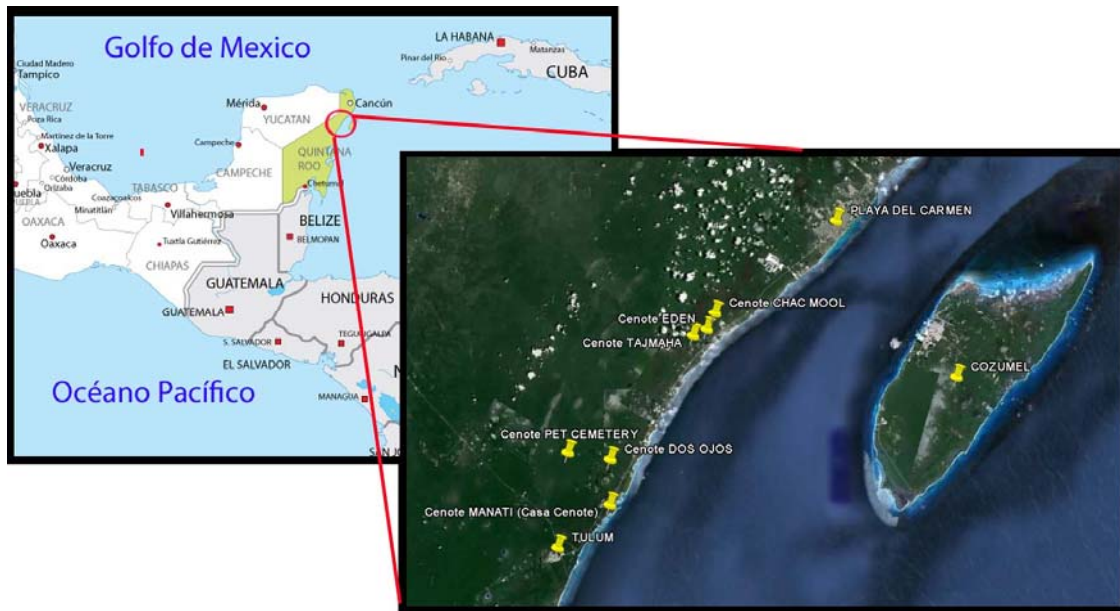


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio (fuente: Google Earth).

Cenote es el término que recibe en México el hundimiento del terreno que conecta la superficie con cavidades subterráneas. En otras regiones del mundo estas formas kársticas se denominan dolinas y uvalas. La proximidad del nivel freático a la superficie del terreno en el interior de los cenotes y el gran tamaño de los conductos kársticos y galerías subterráneas, hace de estas formas un escenario extraordinario para la práctica del espeleobuceo, constituyendo un museo natural donde pueden observarse e interpretar muchos de los procesos pasados y actuales, que actúan dentro de las cuevas. El interés científico y didáctico de la zona seleccionada tiene que ver con la alta karstificación del sistema, que ha sido posible por la confluencia de una serie de factores; un substrato formado por materiales carbonatados, una morfología del terreno plana que favorece una rápida y abundante infiltración, elevada precipitación sobre una superficie cubierta con abundante vegetación, un nivel freático actual muy próximo a la superficie del terreno que ha tenido grandes oscilaciones en los últimos 20.000 años, y la proximidad al mar, con quien existe conexión hidráulica.

En la zona se han descrito un total de 205 cenotes según el inventario de Quintana Roo Speleological Survey (2010). En particular, en este artículo se describen las formas

comunes y procesos de formación del karst de los sistemas y/o cenotes: Dos Ojos, Manatí, Chac Mool, Edén, Tajma-Ha y Pet Cemetery incluidos en dicho inventario, cuyas características se presentan en la tabla 1. Según la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Yucatán, todos ellos se localizan en la Región n° VI, Oriente, Municipio 060: Quintana Roo.

Tabla 1. Características de los cenotes estudiados según el inventario de Quintana Roo Speleological Survey (2010).

| Sistema/ cenote | Nº de Cenotes | Longitud (m) | Profundidad | Reportado | Actualizado |
|--------------------------------|------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| <i>Dos Ojos</i> | 25 | 64.611 | -119,1 | Starnawski/Zens | 5/2010 |
| <i>Ponderosa</i> | 19 | 15.019 | -20,4 | Bertoni/Korytko | 9/2009 |
| <i>Chac Mool</i> | 9 | 9.193 | -28,3 | A. Matthes | 1/2000 |
| <i>Tajma-Ha</i> | 8 | 5.463 | -24,4 | A. Formstone | 06/2010 |
| <i>Manatí</i> | 1 | 5.937 | -28,0 | Yaxchen Project | 02/2007 |
| <i>Cenote Pet Cemetery</i> | 135 (¿?) | 180.445 | -71,6 | R. Schmittner | 10/2010 |

Los objetivos particulares del artículo son dos, el primero de carácter general y divulgativo y el segundo más específico y científico. Estos objetivos son:

- Ofrecer un documento didáctico sobre morfología kárstica de los cenotes de Quintana Roo.
- Contribuir en el conocimiento hidrogeológico y geomorfológico de los cenotes estudiados.

2. MÉTODO

Para la elaboración de este artículo se ha seguido la metodología de trabajo que se expone a continuación:

- Recopilación bibliográfica sobre la geología e hidrogeología de la región.
- Recopilación de inventarios de cenotes de la zona de estudio y selección de aquellos más representativos para los objetivos perseguidos en este artículo.
- Campaña de campo realizada entre el 1 y 15 de octubre de 2010. La información recopilada durante la campaña de campo ha consistido la obtención de información geológica e hidrogeológica suficiente, que permitiera elaborar una ficha de inventario de cada cenote que contemplara la siguiente información: descripción del perfil litológico de la boca del cenote, morfología de la boca, medida del nivel freático, descripción de formas endokársticas presentes en los cenotes, localización de bloques resultantes de colapsos del techo de las cavidades, determinación de la profundidad a la que aparece la haloclina en el interior del cenote y otras observaciones de carácter general.

En relación con la toma de datos en campo, resaltar la dificultad de esta labor por las condiciones subacuáticas y escasez de luz. La autoría de las fotos realizadas en la campaña de campo se debe al primer firmante del presente artículo.

Por la particularidad de las condiciones de trabajo en un medio subacuático, seguidamente se enumeran algunas características del equipo e instrumentación empleadas:

Equipo pesado formado por dos tanques de aluminio de aproximadamente 11 litros de capacidad, conteniendo aire comprimido a 220 bares de presión, doble regulador

independiente para cada botella, chaleco compensador tipo alas y arnés hogartiano, elemento de corte para cabos, manómetro, lámpara primaria y dos secundarias cuyo rendimiento total sea superior al tiempo de buceo. Cabo guía, varios carretes, mosquetones, flechas y galletas con el nombre del buceador y sistema de lastre.

Equipo ligero: traje de neopreno largo de 5 mm, capucha, escafpines y aletas.

Equipo fotográfico empleado: cámara Canon G9, carcasa, flash DS125 y soporte doble Ikelite, dos tramos de extensión y rótulas Aquatica y gran angular Inon.

- La última fase de trabajo ha consistido en la descripción e interpretación de las formas kársticas reconocidas en campo y su integración en el contexto hidrogeológico y geomorfológico de Quintana Roo.

3. GEOLOGÍA

3.1. Contexto geológico

La península de Yucatán está formada por una gran plataforma de calizas, con elevaciones máximas de unos 250 m sobre el nivel del mar en la zona oeste, que descansan sobre metasedimentos del Paleozoico, que hacen de basamento, a profundidades que exceden los 2.400 m (Ward and Weidie, 1978; Weidie, 1985). En la tabla 2 se presenta una síntesis de la estratigrafía de la península de Yucatán y en la figura 2, el mapa geológico simplificado del estado de Quintana Roo.

Durante el Cretácico tuvieron lugar una serie de transgresiones marinas que permitieron la formación de estratos de caliza de hasta 1.300 m de espesor. Posteriormente, durante el Terciario se sedimentaron otros 1.000 m de carbonatos, que incluyen la Formación Puerto Carrillo del Mioceno-Plioceno, de unos 15 m de espesor y que forma la parte más superficial de muchos de los sistemas de cuevas en la zona de estudio en Quintana Roo.

Tabla 2. Estratigrafía de la península de Yucatán, zonas norte, y sureste y central (Fuente: modificado de Villayuso M.J. y Méndez Ramos, 2000).

| Estratigrafía de la península de Yucatán | | | | |
|--|----------------------|--------------------|--|--|
| Cronoestratigrafía y cronología glacial | | Zona norte | | Zonas sureste y central |
| Cuaternario | Holoceno | Holoceno | Calizas con moluscos Arenas y suelos | Suelos |
| | Wisconsin | Pleistoceno | | |
| | Sangamon Illinois | | | |
| Terciario | | Plioceno | Formación Puerto Carrillo | Indiferenciado |
| | | Mioceno | Formación Franco Estero Formación Bacaral | |
| | | Oligoceno | Lutitas y calizas | Indiferenciado |
| | | Eoceno | Miembro Chumbec (calizas) Miembro Pisté (calizas) Miembro Xbacal (calizas) | Miembro Chumbec (calizas) Miembro Pisté (calizas) |
| | | Paleoceno | | Formación Icaiché (calizas, dolomías y evaporitas) |
| Mesozoico | | Cretácico superior | | Peten (calizas) |



Figura 2. Mapa geológico del Estado de Quintana Roo (Fuente: inegi.org.mx).

La mayoría de los depósitos pleistocenos son el resultado de transgresiones marinas sobre la zona este de Quintana Roo durante la edad de hielo de Illinoian (0,2 - 0,1 millones de años) y Wisconsin (0,08 a 0,01 millones de años). Las fluctuaciones del nivel del mar durante el Wisconsin y su influencia sobre el nivel freático, favorecieron periodos en los que proliferó la formación de sistemas kársticos. Ford (1965), establece para otras regiones kársticas que tienen como nivel de base el nivel del mar, un modelo multifase en función de las variaciones eustáticas de descenso del nivel del mar en el que se profundizan las cavidades y otras se quedan colgadas y desconectadas. El modelo de Ford explica bastante bien el karst en la zona costera de Quintana Roo.

El periodo glacial del Wisconsin fue el último que hubo en la edad de hielo actual en América, equivalente a la glaciación del Würm en Europa, que fue la última de la Tierra y con la que se considera terminado el Pleistoceno. Tras el último máximo glacial hace unos 18.000 años, comenzó un periodo de progresivo ascenso termométrico y menor nivación, culminado hace unos 6.000 – 5.000 años en el llamado “óptimo climático postglacial” para el que se han calculado temperaturas medias del orden de 2 a 3 °C superiores a las actuales (de Pedraza, 1996).

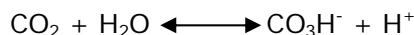
Los depósitos cuaternarios presentes en la zona de estudio que son de poco espesor y no consolidados, están restringidos en las márgenes de la península y se extienden una longitud de entre 1 y 3 km por la costa caribeña en la línea de orilla (figura 2).

En contraste con la estabilidad tectónica de la plataforma carbonatada de la península de Yucatán, formada por materiales en disposición mayoritariamente horizontal, se ha desarrollado una intensa actividad endokárstica que constituye el principal rasgo geológico y geomorfológico de la zona sobre el que centra el presente artículo.

En el apartado siguiente se definen las bases y principios que rigen el desarrollo de la red de drenaje subterránea.

3.2. Origen del endokarst y de la red de drenaje subterránea

El área de estudio en el estado de Quintana Roo es extraordinariamente plana, con altitudes que oscilan entre unos 5 y 15 metros sobre el nivel del mar. Recibe en torno a 1.200 mm de precipitación anual, sobre una superficie fuertemente arbolada y con suelos bien desarrollados. El contacto del agua de lluvia con el CO₂ atmosférico, y sobre todo con el CO₂ del suelo, forma ácido carbónico que ataca a la caliza disolviéndola. Cuando esa solución rica en CO₂ llega a una cavidad aireada, con una atmósfera que contenga menor cantidad de dióxido de carbono que la solución, la presión de CO₂ tiende a igualarse en ambas y precipita en forma de calcita según las siguientes reacciones:



La disolución se produce por la adición de H⁺, resultante de la disociación de CO₃H₂. La adición de H⁺ por otros ácidos incrementa la solubilidad (Gutiérrez – Elorza, M., 2008). Las cantidades más importantes de dióxido de carbono se encuentran en los suelos debido a la respiración de las raíces de las plantas y a la desintegración bacteriana de la materia orgánica. En suelos ricos en humus pueden alcanzarse valores de CO₂ de hasta 700 veces mayores que el contenido de la atmósfera normal (Trombe, 1952). En zonas de costa con calizas intermareales, la actividad biológica de moluscos o litófagos, pueden disolver las calizas por la secreción de ácidos orgánicos y dióxido de carbono.

La temperatura juega un papel muy importante en la reacción de carbonatación; con el aumento de la temperatura se incrementa la solubilidad del dióxido de carbono y por el contrario disminuye la solubilidad de la calcita, y viceversa. Por tanto, si una disolución en equilibrio se enfría, disolverá más caliza, y si se calienta, precipitará algo de carbonato cálcico.

La alta permeabilidad de la superficie terciaria y cuaternaria, favorece una rápida infiltración del agua y disolución de los conductos hasta que se alcanza el nivel freático.

La presencia de cuevas inundadas en la actualidad, donde hay estructuras kársticas constructivas, nos hablan de una época geológica anterior en la que el nivel freático se localizaba a mayor profundidad, dejando galerías aireadas (no inundadas) que permitían la formación de estalactitas, estalagmitas y columnas, como estructuras más significativas.

La retirada del nivel del mar durante la actividad glacial produjo un descenso de la cota del nivel freático hasta igualarse con el nivel del mar, facilitando la formación de conductos kársticos con un sentido de drenaje preferencial hacia el mar, y la aparición de espeleotemas allí donde el agua de infiltración llegaba a una cavidad aireada que ahora quedaba situada por encima del nivel freático (figura 3). Hace unos 18.000 años el nivel del agua del mar se localizaba unos 120 m por debajo del nivel actual (Ward and Weidie, 1978; Coke and Perry, 1991) profundidad que coincide en rango con las profundidades máximas descritas en algunas cuevas y galerías como por ejemplo en el sistema "Dos Ojos" (Quintana Roo Speleological Survey, 2010).

Después de la máxima expansión del hielo durante el Wisconsin, el calentamiento y deshielo de los glaciares provocó una subida del nivel del mar que fue rellenando los conductos kársticos haciendo que subiera el nivel freático en toda la península de Yucatán. En la actualidad, muchas de las cavidades del sistema kárstico de la zona este de Quintana Roo contiene agua dulce en la parte superior y agua salada en la parte inferior, separada por una franja más o menos neta definiendo una haloclina (Holthuis, 1973, Iliffe, 1992). La

profundidad a la que se encuentra esta interfase se incrementa a medida que nos adentramos hacia el interior de la península (figura 4).

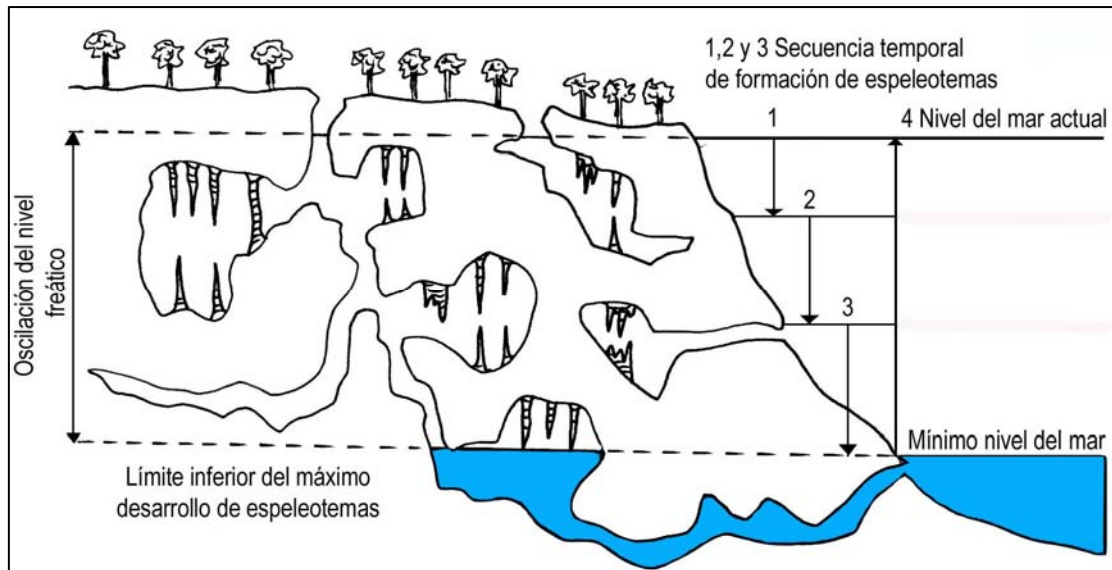


Figura 3. Esquema interpretativo de la variación del nivel freático durante los últimos 20.000 años y su relación con la formación de espeleotemas, simplificado en cuatro secuencias temporales.

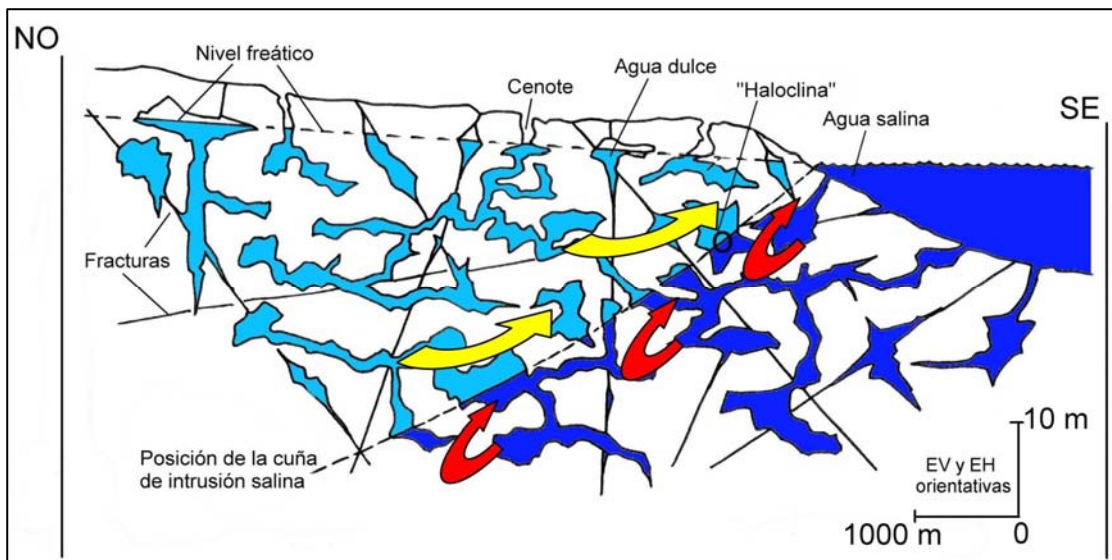


Figura 4. Perfil hidrogeológico esquemático de la zona de estudio con representación de la intrusión salina y posición de la "haloclina". Escala vertical exagerada 100 veces con respecto a la vertical. Las flechas amarillas representan el flujo de agua dulce y las rojas el flujo de agua salada.

Puntualmente, periodos de intensas precipitaciones pueden desplazar ligeramente la haloclina hacia zonas más profundas. En la zona próxima a la costa, la profundidad de la interfase agua dulce – agua salada está influenciada por las mareas pudiendo presentar flujos complejos y variaciones puntuales en cortos espacios de tiempo.

Los resultados de trabajos de investigación de varios autores (Back *et al.*, 1986) indican que en la zona de mezcla se produce una disolución preferencial de las calizas que añade complejidad al sistema de cavidades. Además, la entrada de nutrientes orgánicos en el interior de las cavidades en varios puntos enriquece todavía más el sistema en lo referente a la hidrogeoquímica.

4. HIDROGEOLOGÍA

4.1. Contexto hidrogeológico de la Península de Yucatán

La península de Yucatán tiene un clima tropical húmedo. La temperatura media anual es de 25 °C que se mantiene bastante estable a lo largo de todo el año, siendo los meses más cálidos Julio y Agosto, y los más fríos Diciembre y Enero. La combinación de la elevada temperatura junto con la abundante vegetación da como resultado una evapotranspiración del orden del 85 % de la precipitación. El 15 % restante de la precipitación se infiltra y pasa a formar parte de las aguas subterráneas. La precipitación media anual en la costa este es en torno a 1.200 mm, teniendo lugar el 90% de esta entre los meses de Mayo y Octubre (Villasuso M. J. y Méndez Ramos, 2000).

Según la Subdirección General de Programación Hidrológica, la península de Yucatán abarca la totalidad de la Región Hidrológico Administrativa n° XII de México, que incluye un total de cuatro acuíferos entre los que existe transferencia de flujo subterráneo.

Debido a la alta permeabilidad del terreno y al escaso o nulo relieve, la mayor parte de la península de Yucatán no tiene cursos superficiales. Prácticamente todo el agua se infiltra pasando a los acuíferos, siendo el agua subterránea la única fuente de agua dulce como recurso para actividades humanas. La mayor parte de la recarga de toda la Región n° XII tienen su máxima representación en el estado de Quintana Roo. Las salidas de agua del acuífero tienen lugar por evapotranspiración desde la superficie y por descarga directa en el litoral marino, además de por bombeos desde los pozos de abastecimiento a las poblaciones.

El esquema conceptual de funcionamiento hidrogeológico en la península de Yucatán se caracteriza por un flujo subterráneo radial, desde la zona interior continental hacia las zonas de borde a lo largo de toda la costa por donde es drenado (Dohering y Butler, 1974).

La aplicación de modelos matemáticos ha sido escasa en la península de Yucatán, dada la falta de información detallada sobre topografía, piezometría y parámetros hidráulicos (CNA, 2001).

4.2. El acuífero de Quintana Roo

4.2.1. Delimitación

Administrativamente el acuífero de Quintana Roo se localiza en el borde noreste de la Región Hidrológico Administrativa n° XII. En el área de estudio, las principales aportaciones en el campo de la hidrogeología se deben a (CNA, 1995 a, 1995 b, 2001).

4.2.2. Balance hídrico

Las entradas al sistema se producen por precipitación directa y aportes subterráneos desde otras cuencas. Las salidas tienen lugar por evapotranspiración en su mayoría, flujo subterráneo hacia el acuífero de Yucatán y descarga al río Hondo y mar. Las extracciones para abastecimiento representan tan sólo el 1,1 %. El nivel freático se mantiene prácticamente constante durante todo el año, por lo que la variación en el almacenamiento resulta imperceptible, estando en equilibrio las entradas y las salidas. Según los datos que se muestran en la tabla 3, la renovación anual de agua subterránea procedente de la precipitación, es en números redondos de unos 14.000 hm³, lo que representa algo más de un 20% de la precipitación.

Tabla 3. Balance hídrico en el estado de Quintana Roo aplicado a una superficie de 50.843 km². Cifras según Villasuso y Méndez Ramos, (2000).

| Entradas (hm³/año) | | Salidas (hm³/año) | |
|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|
| <i>Precipitación</i> | 62.888 | <i>Evapotranspiración</i> | 48.902 |
| <i>Flujo subterráneo</i> | 2.485 | <i>Flujo hacia Yucatán</i> | 1.350 |
| | | <i>Descarga al Río Hondo</i> | 1.500 |
| | | <i>Descarga al mar</i> | 13.471 |
| | | <i>Extracción agua subterránea</i> | 150 |
| <i>Total</i> | 65.373 | | 65.373 |

4.2.3. Modelo conceptual de flujo

El acuífero de Quintana Roo, se ha desarrollado en un suelo joven y poroso, de origen calcáreo formado durante el Cenozoico (Lesser y Weidie, 1988). En la zona de estudio el flujo subterráneo coincide con el descrito para la Región n° XII, con una descarga con sentido de flujo perpendicular a la costa. A partir de algunos datos piezométricos determinados en 30 pozos de la región Tulum – Cobá - Nuevo Xcan, se ha obtenido que el gradiente hidráulico en la zona es de $3,9 \times 10^{-5}$, o lo que es equivalente a 3,9 cm/km (Gutiérrez-Aguirre M.A. y Cervantes-Martínez, A., 2008). Este gradiente indica una superficie freática prácticamente horizontal (García Rodríguez, M y Fdez. Escalante, A.E., 2008).

Los trabajos hidrogeológicos realizados hasta la actualidad en la zona estudio muestran cierta complejidad, denotando un medio altamente dinámico, tanto en lo que a la calidad química del agua se refiere como al volumen y la dirección preferencial de los flujos de agua subterránea, que presentan variaciones diurnas, estacionales, anuales e incluso, hipercíclicas (Villasuso - Pino, 2006; González- Hita y Gutiérrez- Ojeda, 2006).

4.2.4. Calidad química del agua subterránea. Intrusión salina

En lo que se refiere a la calidad química del agua subterránea, según (CNA, 2001), se ha determinado que el contenido iónico del agua subterránea en pozos de la región sur del área de estudio, muestran intrusión de agua marina, hasta a 50 km tierra adentro. Durante el trabajo de campo se ha determinado la haloclina a una profundidad de 12 en los cenotes Chac Mool, Dos Ojos, Tajma – Ha, de 6 metros en Manatí dependiendo de la marea.

En las inmediaciones a la costa el flujo subterráneo costero es muy complejo, incluso con entrada y salida de agua dulce y salada simultáneamente, que mantienen corrientes de diferente dirección e intensidad (Beddows, 2007): mientras que las aguas dulce y salina somera fluyen hacia la costa, existe una contracorriente de agua salina que entra hacia el interior de la Península (observaciones realizadas por Beddows, en el sistema de cavernas Ox Bel-Há, al sur de Tulum). En la región de Carwash y Mayan Blue (Sánchez et al., 2002; Beddows, 2003) se ha determinado una velocidad de flujo es de 1-3 cm/s, que concuerda con el bajo gradiente observado en la zona.

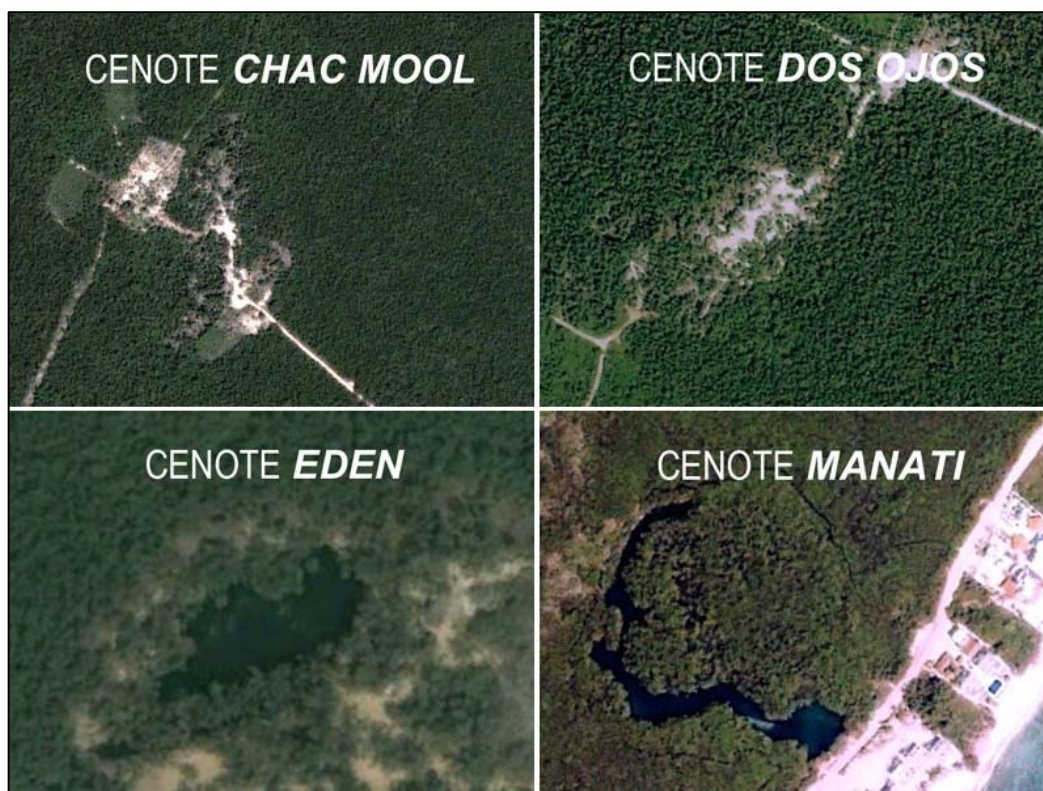
El parámetro más representativo para determinar la intrusión salina es la conductividad eléctrica (CE) del agua, que depende de la concentración de sodio (Na^+) y cloro (Cl). En la zona estudiada de la costa caribeña, la CE del mar es de 54.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Según el estudio hidrogeoquímico realizado por Matthers (en Gutiérrez - Aguirre M. A. y Cervantes-Martínez, A., 2008), la CE del agua subterránea de los cenotes estudiados varía de 102 a 53.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, según la profundidad y cercanía al mar. Según los mismos autores, la conductividad eléctrica del agua en el Cenote Chemuyil (en septiembre de 2007) era entre 0 y 15 m de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de los 15 a 20 m se incrementa hasta 4.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor 53.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 29 m de profundidad. El techo de la haloclina se definía a 15 m de profundidad, cifra acorde con las observaciones realizadas por nosotros en octubre de 2010 en los cenotes de Chac Mool, Dos Ojos y Tajma - Ha, próximos a Chemuyil.

5. MORFOLOGÍA KÁRSTICA DE LOS CENOTES

5.1. Introducción

Las observaciones particulares sobre el karst que se describen se han realizado en los cenotes Dos Ojos, Chac Mool, Tajma-Ha, Edén, Manatí y Pet Cemetery. En la figura 5 se presentan las ubicaciones de cuatro de ellos, a través de imágenes por satélite de Google Earth.

Figura 5. Localización de los cenotes Chac Mool, Dos Ojos, Edén y Manati (Imágenes Google Earth).



En la tabla 4 se resumen las principales características de cada cenote observadas durante las inmersiones.

Tabla 4. Resumen datos inmersión.

| Nombre del Cenote | Profundidad máxima alcanzada (m) | Tiempo de inmersión (minutos) | Temperatura del agua (°C) | Profundidad del agua desde la superficie (m) | Profundidad Haloclina |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|-----------------------|
| <i>Dos Ojos</i> | 12,7 | 80 | 25 | 2,7 | 12 |
| <i>Chac Mool</i> | 13,7 | 32 | 25 | 2,3 | 12 |
| <i>Tajma-Ha</i> | 12,5 | 62 | 25 | 2,6 | 12 |
| <i>Eden</i> | 16,2 | 53 | 25 | 2,8 | No encontrada |
| <i>Manatí</i> | 8,8 | 67 | 26 | 1,2 | 6 |
| <i>Pet - Cemetery</i> | 10,3 | 89 | 25 | 5,2 | No encontrada |

5.2. Formas de disolución

5.2.1 Cuevas y galerías

Las *cuevas* y *galerías* se forman por disolución de las rocas carbonatadas por el ataque del agua subterránea ligeramente ácida. El agua subterránea que se infiltra a través de la zona de aireación, va circulando por conductos preexistentes haciéndose más ácida y disolviendo lentamente la roca carbonatada, agrandando las fracturas y planos de estratificación por donde circula. Cuando el agua alcanza la zona saturada, continúa disolviendo la roca creando un sistema de galerías subterráneas y red de drenaje subterránea, buscando puntos de descarga naturales. En general, la mayoría de las cuevas se crean en el nivel freático o en la zona saturada inmediatamente por debajo de este. En consecuencia, oscilaciones del nivel freático producen modificaciones de la morfología de las paredes de la cueva. Como se explicaba en el apartado 3.2, los procesos endokársticos se favorecen en condiciones climáticas húmedas y frías. Las bajas temperaturas posibilitan la disolución de CO₂, acidificando el agua y favoreciendo la disolución. Las variaciones de precipitación y de temperaturas desde el Pleistoceno, han debido afectar considerablemente el desarrollo del karst a diferentes niveles de profundidad en la región.

En el interior de las galerías de los cenotes estudiados, se han descrito conductos kársticos con orígenes diferentes, unos formados sólo por disolución y otros por disolución y colapso (figura 6):

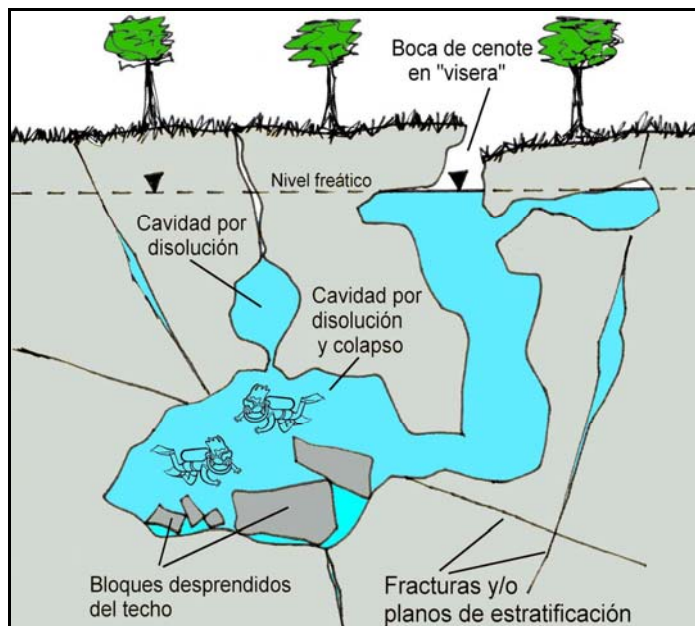


Figura 6. Esquema del aspecto de los conductos kársticos según su origen, sólo por disolución o por disolución más colapso.

- *Conductos por disolución:* se forman por disolución de la caliza a favor de un plano de debilidad que permita la circulación del agua subterránea. En la figura 7 se observa un conducto de este tipo, de perfil ojival, desarrollado a partir de una fractura vertical. La máxima anchura del conducto kárstico debió formarse en una etapa en la que se producían variaciones del nivel freático justo en esa franja.
- *Conductos por disolución y colapso:* el origen de estos conductos debe atribuirse a un proceso de disolución, que avanza a favor de planos de debilidad según se ha explicado anteriormente. Una vez iniciado el ensanche de las cavidades, se facilita la caída de bloques del techo de las galerías, cuyo desarrollo tiene mucha relación con el tipo, con la competencia y con el espesor de los estratos que corte. Cuanto menor sea el espesor de los estratos, habrá más caída de pequeños bloques que agilizarán el desarrollo de los conductos. Estratos muy masivos y potentes crean galerías más estables.

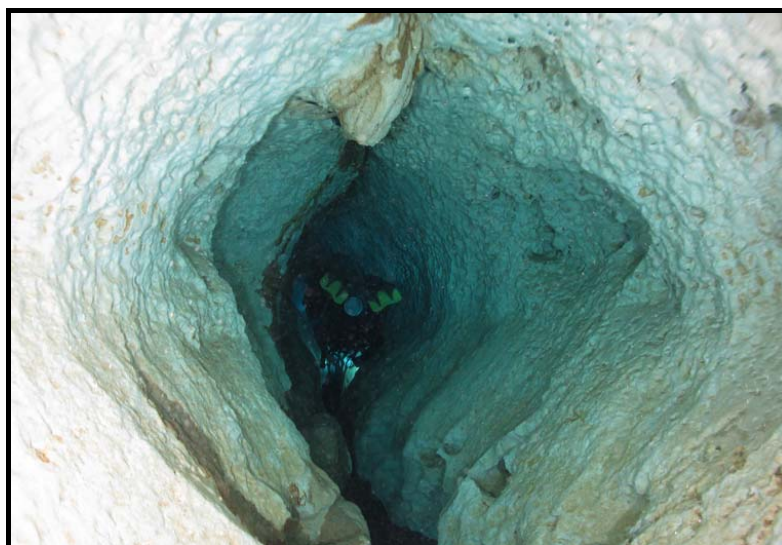


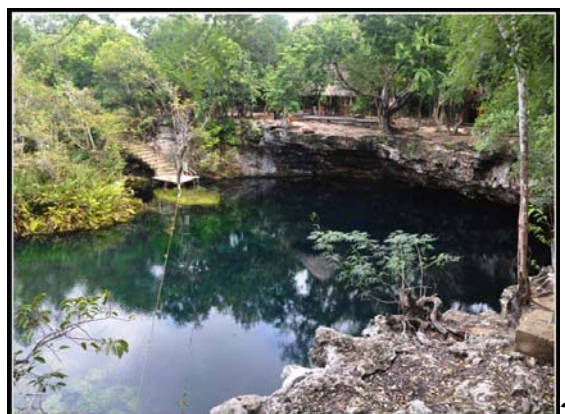
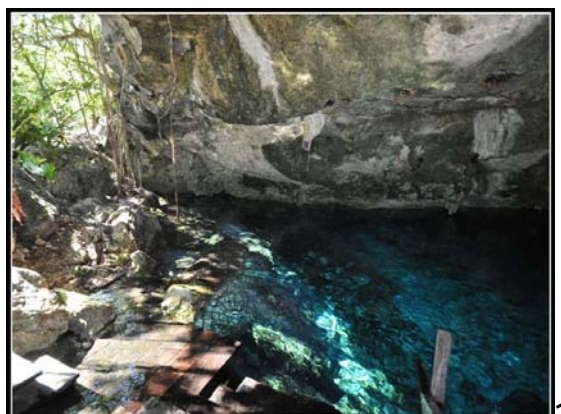
Figura 7. Conducto kárstico por disolución (cenote Dos Ojos, profundidad aproximada 8 m, temperatura del agua 25 °C).

- *Lapiaces*: Son pequeños surcos que se forman por disolución de la roca debido a la circulación del agua. Existe una gran variedad de tipos, dependiendo de su localización y de su geometría. Los lapiaces reconocidos en las paredes de algunos cenotes son del tipo "Rundkarren", caracterizado por tener forma de regueros con crestas redondeadas y suavizadas. Su desarrollo tiene relación con la naturaleza de la reacción química. La etapa más efectiva por tener más capacidad de disolución es justo en el momento en el que el agua cargada de CO₂ se pone en contacto con la roca. En los lapiaces observados, gran parte del dióxido de carbono que interviene es de carácter biogénico.

5.2.2. Los cenotes

Con el paso del tiempo y por efecto de la circulación de agua subterránea, las galerías se van interconectando entre si, en la vertical y horizontal, creando zonas inestables en las que se producen desplomes del techo. Cuando el desplome del techo de la cavidad afecta a la superficie del terreno se forman los *cenotes*. El factor desencadenante del hundimiento y desplome del techo de las cuevas es la fuerza de la gravedad, cuya efectividad aumenta: con el peso de los materiales que tenga por encima, por la presencia de fracturas o planos de debilidad (p. ej. estratificación) y por el descenso del nivel freático, que actúa disminuyendo la presión hidrostática sobre el techo de la cavidad.

En términos generales, para explicar la morfología de la boca de los cenotes, puede hablarse de dos orígenes: por disolución desde la superficie o "sumidero", o por colapso de la superficie del terreno cuando debajo hay una cueva subterránea. Cuando el proceso de formación es el colapso, si la forma de la boca es circular se habla de dolinas y si es ovalada y con formas irregulares de uvalas. En relación con el proceso de colapso es frecuente encontrar una boca con aspecto de fisura con "visera", que deja dos niveles topográficos distintos a ambos lados de la fractura. Este tipo de entradas puede interpretarse como el colapso de una gran superficie sobre una cavidad poco profunda (figura 6). En la figura 8 se muestran imágenes de la boca de cada uno de los cenotes visitados.



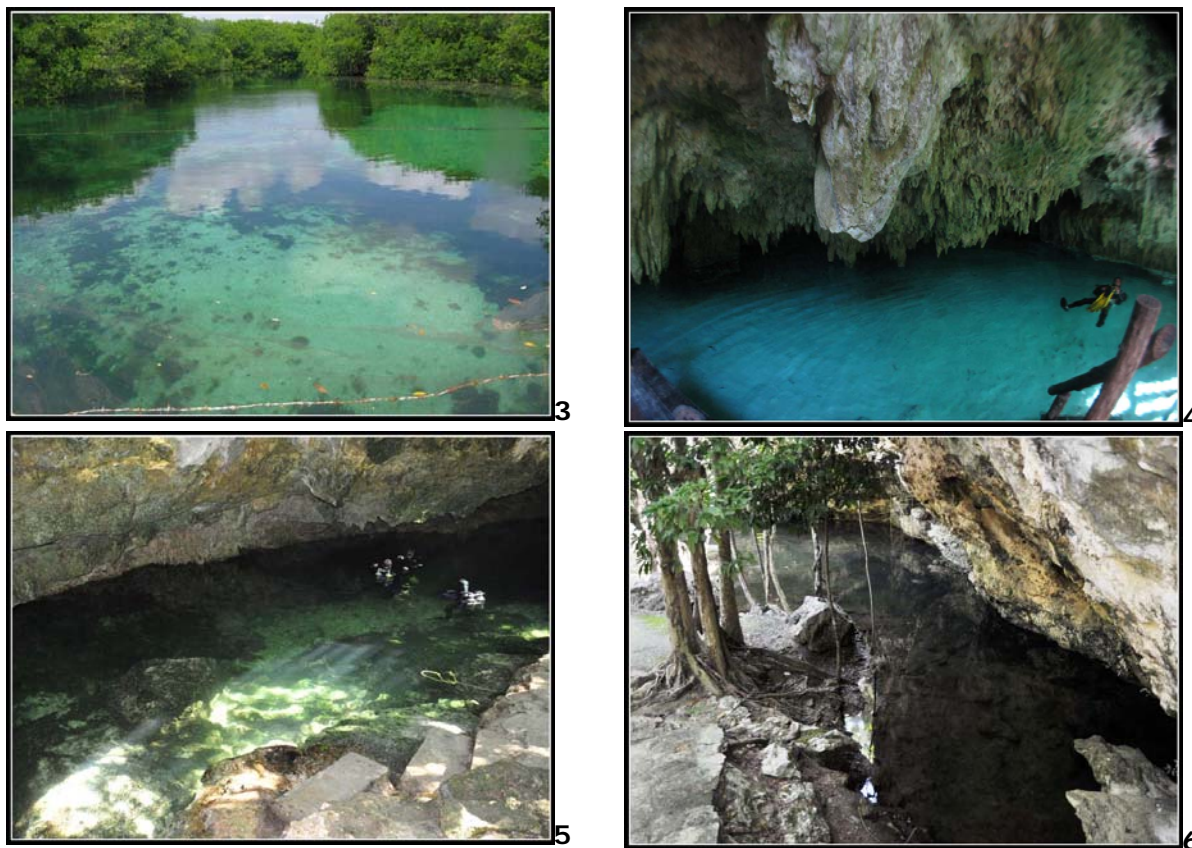


Figura 8. Fotografías de las bocas de los cenotes. 1. Cenote Dos Ojos: tipo dolina y visera, 2. Cenote Edén: tipo dolina, 3. Cenote Manatí: tipo uvala, 4. Cenote Pet Cemetery: tipo visera, 5. Cenote Tajma-Ha: tipo visera, 6. Cenote Chac Mool: tipo visera.

5.2.3. Depósitos en las cavidades

En el interior de las galerías además de producirse procesos de erosión y disolución que agrandan los conductos, también se produce relleno o sedimentación por la caída de bloques o por sedimentación química.

- *Caída de bloques:* El estudio de la localización y tipología de los bloques encontrados en el suelo de las galerías y en la base de los cenotes, nos habla de varias etapas de desplomes de las que no se dispone de dataciones, que abarcarían el periodo desde el Wisconsin, que afectaría principalmente a cavidades profundas, y otro u otros episodios más recientes hasta la época actual, responsables de muchos de los cenotes existentes (figura 9). Algunos colapsos recientes que dan origen a cenotes, se identifican fácilmente por tratarse de bloques con una superficie recubierta de vegetación que se desarrolló en la superficie topográfica.
- *Sedimentación y precipitación química:* La precipitación de calcita produce decoraciones muy peculiares en el interior de las cuevas (figura 10 A). El CO_3Ca se genera por láminas de agua en régimen laminar y por precipitación en régimen turbulento. Otro tipo de sedimentación son los depósitos de flujo, que se depositan a partir de un flujo uniforme (figura 10 B). Estos depósitos suelen acumularse en el fondo y en las paredes de suave pendiente.

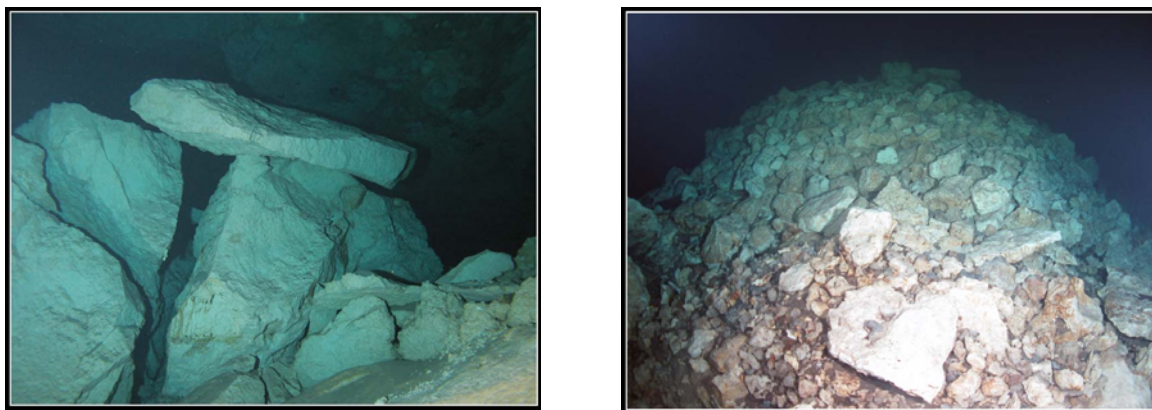


Figura 9. Derrumbes de tamaños variables en los Cenotes Chac Mool y Cenote Tajma-Ha. El tamaño de los bloques tiene relación con el tipo y número de discontinuidades presentes en la formación geológica.

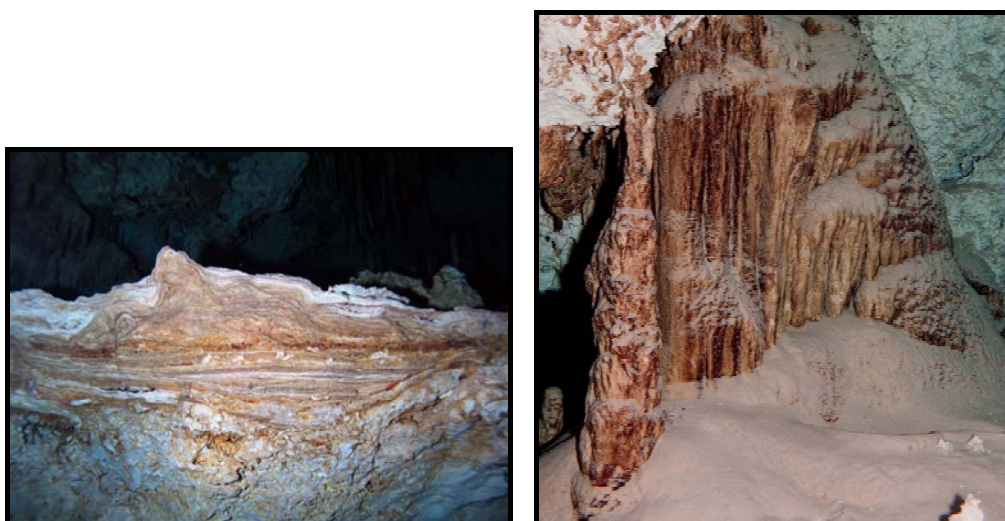
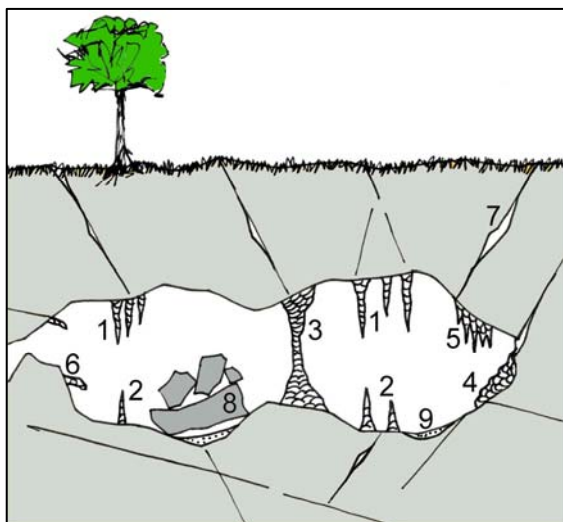


Figura 10. **A.** Sección de un bloque con laminación de diferentes colores, formada por precipitación de CO_3Ca . Espesor de las láminas con escala centimétrica, **B.** Depósito de limos en zonas de baja energía.

5.3. Formas constructivas endokársticas

5.3.1. Espeleotemas

El término de espeleotemas se utiliza para denominar las formas constructivas endokársticas. El proceso de formación de todos los espeleotemas es muy similar; cuando el agua se infiltra y alcanza una cueva o cavidad (libre de agua), parte del dióxido de carbono disuelto en el agua escapa, favoreciendo la precipitación de una pequeña cantidad de calcita que poco a poco dará lugar a estructura de mayor tamaño. En principio, cuanto más aireada esté la cavidad más efectivo será el proceso de precipitación. Las principales formas identificadas en los cenotes estudiados han sido: estalactitas, estalagmitas, columnas y cortinas, además de otras menores (figura 11). Todas estas formas presentes en los cenotes y en las galerías subterráneas, tuvieron su origen en condiciones aéreas y/o freáticas (zona de oscilación del nivel freático), cuando el nivel piezométrico se localizaba a más profundidad, y antes del último ascenso del nivel del mar del último periodo glaciario.



1. Estalactitas.
2. Estalagmitas.
3. Columnas.
4. Terrazas travertínicas y gours.
5. Cortinas.
6. Discos.
7. Conducto de disolución.
8. Bloques desprendidos.
9. Depósitos de decantación.

Figura 11. Clasificación de espeleotemas y otros rasgos característicos del endokarst.

- *Estalactitas*: Son estructuras que cuelgan del techo de las cavidades con aspecto de carámbano (figura 12 A). Se forman por precipitación de calcita gota a gota y capa a capa, creciendo desde el techo hacia abajo. Inicialmente el depósito se produce en forma de anillo alrededor del borde de la gota de agua, pudiendo llegar a formar conductos huecos en el eje central.
- *Cortinas*: Otra forma kárstica muy típica es la cortina, presentando un aspecto de lámina de roca que cuelga del techo, con un origen muy similar al de las estalactitas (figura 12 B).

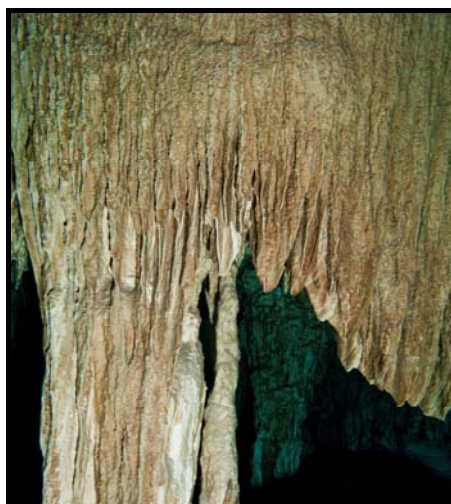


Figura 12.A. Estalactitas. Cenote Chac Mool. **B.** Cortina. Cenote de Dos Ojos.

- *Estalagmitas*: Cuando el flujo de agua que viene desde el techo de la cueva circula con cierta energía, algunas gotas de agua pueden escurrir por la estalactita y caer al suelo, donde precipita una pequeña cantidad de calcita. Si este proceso continúa en el tiempo, se repetirá el proceso descrito para las estalactitas pero en sentido opuesto, creciendo desde el suelo hacia el techo y formando las *estalagmitas* (figura 13 A).

- *Columns*: Si una estalactita y una estalagmita crecen y se juntan, forman otro tipo de estructura kárstica denominada columna, que une el techo y el muro de la cueva (figura 13 B).

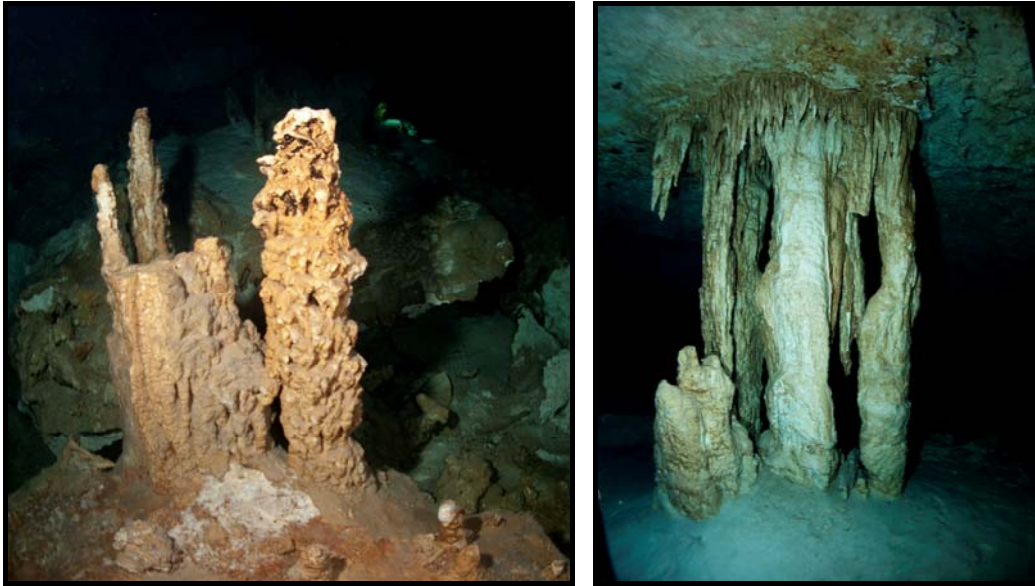


Figura 13. A. Estalagmitas. Cenote Tajma-Ha. B. Columnas. Cenote Dos Ojos: altura aproximada 2 m.

- *Discos*: Son estructuras de precipitación que crecen en las paredes de las cavidades perpendicularmente a ellas (figura 14).
- *Los gours*: Son pequeñas balsas con los borde constituidos de calcita, dando lugar a pendientes de aspecto escalonado. Se forman cuando el agua que circula por ellas se ventila por el flujo y precipita la calcita. A veces se localizan a pie de columnas, y si son de pequeño tamaño de denominan microgours. Pueden estar asociados a terrazas travertínicas.



Figura 14. Formación de discos superpuestos en el cenote de Dos Ojos.

6. RESUMEN

Los cenotes del litoral costero de Quintana constituyen un extraordinario escenario para el estudio de formas endokársticas, actuales y antiguas. Los cenotes estudiados han sido: Dos Ojos, Chac Mool, Eden, Manati, Pet cemetery, Tajma-Ha, localizados todos ellos entre playa del Carmen y Tulum.

La profundidad alcanzada en las inmersiones ha sido de entre 8 y 16 m de profundidad, dependiendo del cenote.

La superficie de todos los cenotes estudiados se han desarrollado sobre calizas cuaternarias, presentando un grado de karstificación muy elevado. El origen de la boca de los cenotes en la mayoría de los casos es de tipo dolina y uvala, o en cualquier caso originados por colapso del techo de una cavidad. Cuando la abertura (entrada) tiene aspecto lineal, con dos niveles topográficos distintos, se ha denominado boca en visera.

El nivel freático en la zona se encuentra a una profundidad variable de entre 1 y 5 metros, medido desde la superficie. La dirección y sentido del flujo subterráneo es perpendicular a la costa, de componente NO - SE. En los cenotes estudiados la haloclina se localiza entre 6 y 12 metros de profundidad, dependiendo de la proximidad al mar y de la distribución y forma de las galerías subterráneas que comunican el acuífero y el mar. El flujo subterráneo en la zona costera es complejo, con variaciones estacionales e incluso diarias dependiendo de las mareas.

Las cuevas y galerías visitadas responden a dos procesos, disolución o disolución y colapso. El interior de las cuevas contienen casi toda la variedad de espeleotemas descritos en la bibliografía, formando estructuras de gran belleza. La presencia de espeleotemas freáticos permite reconocer varias fases de desarrollo, que pueden relacionarse con las oscilaciones del nivel del mar durante la glaciación de Wisconsin. No se han realizado dataciones absolutas.

El interés científico y didáctico de la zona, debería ser razón suficiente para garantizar la protección y preservación de los cenotes estudiados así como de muchos otros de la región.

El artículo ofrece un documento didáctico sobre el karst de la zona costera comprendida entre playa del Carmen y Tulum, poniendo de manifiesto la interacción y apoyo que pueden tener dos disciplinas muy diferentes pero a la vez sumamente complementarias; la práctica deportiva del espeleobuceo, y la geología como disciplina científica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de buceo Playadivecenter todos sus buenos consejos y a Alma J. Chan, Wilberth Barrera, Amaya Mendiluce y Alvaro Ojeda su compañía y ayuda durante toda la campaña de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- BACK, W., B. B. HENSHAW, J. S. HERMAN, and J. N. VAN DRIEL. (1986). Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground - water mixing zone of coastal Yucatán, México. *Geology* 14:137-140.
- BEDDOWS, P., P.L. SMART, F.F. WHITAKER AND SMITH (2007). Decoupled fresh – saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial pattern of temperature and specific electrical conductance. *Journal of Hydrology* 345: 18-32.
- BUTTERLIN, S., and BONNET, F., (1963). Mapas geológicos de la Península de Yucatán, Bol. A.M.P.G., Vol. X, Nos. 9 –10, México, in R. Orellana, *El Clima de la Península de Yucatán: Presente, Pasado y Futuro*.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, CNA, (1995 A). Resumen Técnico de las Condiciones Geohidrológicas del Estado de Campeche, Comisión Nacional del Agua, Subgerencia Técnica, Gerencia Regional del Sureste, Mérida, Yucatán, México.
- CNA (1995 B). Resumen Técnico de las Condiciones Geohidrológicas del Estado de Quintana Roo, Comisión Nacional del Agua, Subgerencia Técnica, Gerencia Regional del Sureste, Mérida, Yucatán, México.
- CNA (2001). Actualización Geohidrológica del Acuífero de la Zona Norte Estado de Quintana Roo, (Poligonal comprendida entre Cancun, Nuevo Xcan, Coba y Tulum); Informe Final: Gerencia Regional de la Península de Yucatán; Subgerencia Regional técnica.
- COKE, J. G. IV, E.C. PERRY, and A. LONG. (1991). Sea level curve. *Nature* 353:25.
- DE PEDRAZA, J. (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*. Rueda, España, 414 págs.
- DOHERING, D.O. AND J.H. BUTLER (1974). Hydrogeologic constraints on Yucatán´s development. *Science*, 186: 591-594
- FORD D.C. (1965). The origin of limeston caves: a model from the central Mendip Hills, England. *National Espeleological America Society Bulletin*, 27. 109-132.
- GONZÁLEZ- HITA, Y C. GUTIÉRREZ OJEDA (2006). Definición de las reglas de operación del acuífero costero de de la Península de Yucatán. *Memorias del foro estatal de investigación Científica y Desarrollo Tecnológico. "El sistema hidrológico de Quintana Roo"*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal de Quintana Roo. Chetumal, México, 48 págs.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson. Prentice Hall. 898 págs.
- GUTIÉRREZ-AGUIRRE M.A., Cervantes-Martínez, A. (Editores) (2008). *Estudio Geohidrogeológico del norte de Qintana Roo, México*. Universidad Quintana Roo (UQROO), Unidad Cozumel. 100 págs.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M y FDEZ. ESCALANTE, A.E. (2008). *Hidrogeología básica: Las aguas subterráneas y su flujo*. Ediciones Fiec. 135 págs.

- HOLTHUIS, L. B. (1973). Caribbean shrimps found in land-locked saltwater pools at four Indo-West Pacific localities (Sinai Península, Funafuti Atoll, Maui and Hawaii Islands), with the description of one new genus and four new species. *Zoologische Verhandelingen* 128:1-48.
- ILIFFE, T. M. (1992). An annotated list of the troglobitic anchialine and freshwater fauna of Quintana Roo. In D. Navarro and E. Suarez, eds. *Diversidad Biologica en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an Quintana Roo, México*. Comisión Nacional para la Biodiversidad y CIGRO, México. 2:197-215.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS (2010). <http://www.inegi.org.mx>.
- LESSER ILLADES, J.M. and A.E. WEIDIE (1988). Region 25, Yucatán Península; Chapter 28; *The Geology of North America*. Vol. O-2. Hydrogeology; The Geological Society of America.
- PERRY, E., L. MARIN, J. MCCLAIN AND G. VELÁZQUEZ. (1995). Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatán, México: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geology* (23): 17-20.
- QUINTANA ROO SPELEOLOGICAL SURVEY (2010). Inventario de sistemas y cenotes <http://www.caves.org>.
- SÁNCHEZ, M., J. ALCOCER, E. ESCOBAR y A. LUGO (2002). Phytoplankton of cenotes and anchialine caves along a distance gradient from the northeastern coast of Quintana Roo, Yucatán Península. *Hidrobiología*, 467: 79-89.
- TOMBE, F. (1952). *Traité de Spéléologie*. Payot. Paris, 376 págs.
- VELAZQUEZ AGUIRRE, L. (1986). Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán. *Ingeniería hidráulica en México*, pp 21-29.
- VILLASUSO M. J. y MÉNDEZ RAMOS (2000). A Conceptual Model of the Aquifer of the Yucatan peninsula. En "Population, Development, and Environment on the Yucatán peninsula" Lutz W. and Prieto L. Editors.
- VILLASUSO – PINO M.J. (2006). Estudios geohidrogeológicos en los acuíferos kársticos costeros del norte de Quintana Roo. *Memorias del Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico. "El sistema hidrológico de Quintan Roo"*. Comisión Nacional de Agua. Chetumal, México, 48 págs.
- WARD, W. C., and WEIDIE A.E., EDS. (1978). *Geology and hydrogeology of northeastern Yucatán*. New Orleans Geological Society. New Orleans, LA.
- WARD, W. C. (1985). Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula, Part 2. Pages 23 - 53 in Ward, W. C., A. E. Weidie, and W. Back, eds. *Geology and hydrogeology of the Yucatán and Quaternary Geology of northeastern Yucatán Peninsula*. New Orleans Geological Society. New Orleans, LA.
- WEIDIE, A. E. (1985). Geology of the Yucatan Platform, Part 1. Pages 1-19 in Ward, W. C., A.E. Weidie, and W. Back, eds. *Geology and hydrogeology of the Yucatán and Quaternary Geology of northeastern Yucatan Peninsula*. New Orleans Geological Society. New Orleans, LA.