



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DESCRIPCIÓN LIMNOLÓGICA DE UN CENOTE MEROMÍCTICO:
NOHOCH HOL, QUINTANA ROO, MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G O

P R E S E N T A

OLMO TORRES TALAMANTE

TUTOR: DR. JAVIER ALCO CER DURAND

2006





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Descripción limnológica de un cenote meromictico: Nohoch Hol Quintana Roo, México"

realizado por Olmo Torres Talamante

con número de cuenta 40009710-1, quien cubrió los créditos de la carrera de:
Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario Dr. Javier Alcocer Durand

Propietario Dra. Elva Guadalupe Escobar Briones

Propietario Dr. Luis Ernesto Marín Stillman

Suplente Dra. Margarita Caballero Miranda

Suplente Dr. Alfonso Lugo Vázquez

Elva Escobar-Briones

Luis E. Marín Stillman

Consejo Departamental de Biología

M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia al Dr. Javier Alcocer Durand por haberme brindado la oportunidad de realizar la tesis de licenciatura en el tema de mi interés y por el cual llegué a “tocar la puerta”. Le agradezco que me haya proporcionado algunos documentos muy selectos que fueron fundamentales en para la tesis. Finalmente, agradezco la paciencia, dimensión y conducción de mis ideas para una tesis de licenciatura, sin embargo algunas ideas no quisieron esperar el futuro. Así mismo se agradece a todos integrantes del PILT que participaron de alguna manera.

Así mismo a la Dra. Elva Escobar Briones quién impulsó el proyecto académico, que entre los años 1996-1998, incursionó en el NE de la península de Yucatán, para estudiar cenotes y sistemas anquihalinos.

Se agradece al proyecto PAPIIT 203894 “Ecología y biodiversidad de un sistema anquihalino basado en la producción quimioautotrófica”. Que sustentó el trabajo en campo. Así como a todos los que colaboraron en los trabajos de campo y laboratorio.

Al Dr. Luis Marín Stillman quien me facilitara documentos con información que fue fundamental para enriquecer mi tesis.

A mis profesores y profesoras de la Facultad de Ciencias...los buenos y los malos. En especial a la Dra. Ana Barahona, por ser una especie de consejera a mi paso por la Facultad, y al Dr. Antonio Lazcano por enseñar el pensamiento evolutivo como lo enseña y por su interés en mi trayectoria que apenas comienza.

Agradezco a Fernando Dávila Nelson de DIVETULUM por haberme llevado a bucear primero cavernas y luego el cenote Angelita, experiencias decisivas, que me condujeron a buscar en la UNAM a las personas que sabían sobre cenotes, a bucear los sistemas de cuevas sumergidas mas grandes, complejos, decorados y biodiversos del mundo, y a querer dedicarme a estudiarlos.

DEDICATORIAS

A Cecilia Talamante Díaz, mi madre, por la vida, amor y respeto. Por tu fuerza, coraje y carácter con que vives la vida y afrontas los puntos de quiebre, ese es el mayor ejemplo. Por el soporte, por las sobremesas y tantos otros momentos en los que hablamos del Universo, la Vida, la Mente-Espíritu, la Biología y la Sociedad. Por escucharme siempre y aconsejarme en los ires y venires del Amor. Porque de ti aprendí a leer literatura. Gracias también por una educación con equidad de Género. Gracias por el buceo prenatal y el intra-uterino.

A Alejandro Torres Abed, mi padre, por la vida, amor, amistad y respeto. Por tu inagotable capacidad de asombro y megadiversidad de intereses. Por todos los domingos felices de mi infancia en los miles de parques y museos de la Ciudad de México. Por aquel concierto del Tri y las idas al Chopo. Por la observación del cielito lindo. Por las sobremesas y tantos otros momentos en los que me platicas tus conocimientos, análisis y teorías sociales, aprendo mucho. Gracias por el buceo prenatal y el intra-uterino.

A Jorge Nieto Montesinos por todo el amor y cariño de una paternidad extra, sin miras de autoridad e incondicional. Por las sobremesas y charlas que sierre amplían mi contexto sociocultural. Por la oportunidad de experimentar lo que es tener un hermano.

A Jorge Carlos Nieto Villavicencio, por crecer "un rato" juntos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me ha dado todo. A los PUMAS UdeM, por ser el equipo mas grande en la historia del fútbol americano en México, a todas las generaciones 1927- ∞ . En especial a los equipos de Pumas del 2000 al 2004 y # 9, 24, 5, 50, 55, 74, 53, 83, 42, 43. A mis coaches. A la organización Cóndores y el Programa Infantil ORO porque en 1987 cambiaron mi vida. A Martín Lanz L.

A todas y todos mis amigos de la H.H. Facultad de Ciencias— los que no menciono también-- Alejandra García Naranjo y todos los de la primera etapa. A Fernanda Adame (Gran ejemplo), MariaJose V. Eduardo Najera (otro ejemplo), Kim (sí podemos cambiar Q.Roo y más), Yvette (*Damisela en peligro*, que la fiesta y la alegría no pare). Fabricio. Ismael. A toda la banda del pulpo.

A todas y todos mis amigos de épocas presentes y pasadas, los del Madrid, Revueltas y mas Paulina Lasa, Michel Acosta, Leonardo Costantini, Huerta, Nava, Santiago Cordera MDJ' s c/ J....etc...etc.

Al Colegio Madrid.

A Ernesto Anaya Adalid, por toda la trayectoria y la interacción de sistemas autopoieticos. Deep Down you want the best...buddy, 240 Ft³ a 3100 psi.

Long Hose Brothers. Busca la Luz del Sol!!!. El mapa no es el territorio. 1+1=3

A Jack Baron Tapia el mejor instructor de buceo en México.

A Marisol Cal y Mayor M. por acompañarme en buena parte de este proceso y soportar sus vicisitudes y las mías. Por tus Nebulosas multicolor, por el amor y el complemento físico, intelectual y emocional.

ÍNDICE GENERAL

- Resumen/Abstract
- 1. INTRODUCCIÓN
- 2. JUSTIFICACIÓN: ¿POR QUE ESTUDIAR CENOTES?

- 3. MARCO CONCEPTUAL
 - 3.0 Karst
 - 3.1 Cenotes
 - 3.1.1 Formación de los cenotes
 - 3.1.2 Tipos de cenotes
 - 3.1.3 Cenotes lóticos y lénticos
 - 3.2 Holomixis y meromixis
 - 3.2.1 Tipos de meromixis
 - 3.2.2 Relevancia de la picnoclina asociada a la quimioclina
 - 3.3 Sistemas anquihalinos
 - 3.3.1 Relevancia de la haloclina
 - 3.3.2 Los cenotes como sistemas meromícticos y anquihalinos

- 4. ÁREA DE ESTUDIO
 - 4.1 Península de Yucatán y Plataforma
 - 4.2. NNE de la Península de Yucatán
 - 4.3 Nohoch Hol, un cenote en el NNE de la Península de Yucatán.

- 5. ANTECEDENTES
 - 5.1 Lagos meromícticos en México
 - 5.1.1 Isabela, Nayarit
 - 5.1.2 Rincón de Parangueo, Guanajuato
 - 5.2 Cenotes meromícticos
 - 5.2.1 Cenote Grande y cenote Chico, Q. Roo
 - 5.2.2 Cenote Angelita, Q. Roo
 - 5.2.3 Cenote Verde, Q. Roo
 - 5.2.4 Cenote Xkolac, Yucatán
 - 5.3 Cenotes holomícticos y lóticos
 - 5.4 Meromixis en otras regiones kársticas del mundo

- 6. OBJETIVO

- 7. METODOLOGÍA

- 8. RESULTADOS
 - 8.1 Variables Ambientales
 - 8.2 Nutrientes
 - 8.3 Fitoplancton

- 8.3.1 Índices Ecológicos
- 8.4 Bacterioplancton
- 8.5 Resultados Físicos, Químicos y Biológicos Condensados

- 9. DISCUSIÓN

- 10. CONCLUSIONES

- 11. PERSPECTIVAS

- 12. REFLEXIÓN TEÓRICA: *Gedanken Experiment*

- 13. ANEXO 1
- 14. ANEXO 2
- 15. ANEXO 3
- 16. ANEXO 4

LITERATURA CITADA

RESÚMEN

Los cenotes son el rasgo del paisaje más característico de la península de Yucatán, no obstante nuestro conocimiento, es escaso y disperso. Los cenotes son ventanas al acuífero, única fuente de agua dulce disponible en la península.

La clasificación que mejor permite entender la relación entre estructura y función de estos sistemas es la clasificación hidrobiogeoquímica (Schmitter-Soto *et al.* 2002 a y b). Los cenotes en los que ocurre la interacción entre el agua dulce del acuífero y el agua marina que penetra el continente de manera subterránea, presentan fuerte influencia de los ecosistemas terrestres por un lado y de los ecosistemas marinos por el otro, lo cual es definición de sistema anquihalino. Los cenotes anquihalinos con régimen de flujo léntico desarrollan meromixis. La meromixis es un fenómeno poco común en lagos, comparado con la holomixis, por tanto, es una condición menos estudiada. En México sólo se conocen dos lagos meromícticos, en contraste la península de Yucatán presenta al menos ocho cenotes meromícticos, ninguno ha sido estudiado en detalle.

Nohoch Hol es un cenote meromíctico a 4 km tierra adentro en la costa del Caribe mexicano. Presenta inversión térmica y tres masas de agua, el mixolimnion ($2.77 \pm 0.43 \text{ g L}^{-1}$), quimiolimnion ($25.5 \pm 9.82 \text{ g L}^{-1}$), monimolimnion ($36.6 \pm 0.09 \text{ g L}^{-1}$). El quimiolimnion a 10 m de profundidad presenta el máximo de temperatura (26.7°C) y clinas de conductividad, pH, Eh, turbidez y oxiclina que conduce a la anoxia. La concentración máxima de P total es $0.611 \mu\text{M}$ valor de ultraoligotrofia. Los perfiles de las formas de nitrógeno son bimodales en el quimiolimnion, el intercalado de máximos y mínimos de NO_3 y NH_4 , empata con la distribución vertical de los morfotipos de bacterioplancton (máximo $35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y las variables ambientales, lo que sugiere que se está realizando nitrificación y denitrificación. El mixolimnion presenta una sucesión de clases de fitoplancton con un dominio alternado entre chloroficeas y bacillarioficeas, destaca un máximo a 10 m con 99% de *Scenedesmus* ($20.7 \times 10^6 \text{ cel L}^{-1}$), la máxima profundidad del fitoplancton fue 11 m. La diversidad (Shannon-Wiener) del fitoplancton es baja 0.27. Nohoch Hol se compara cuantitativa y cualitativamente con cenotes lénticos y lóticos de la península de Yucatán, tanto la zona de Mérida como la costa de Quintana Roo. Nohoch Hol presenta un monimolimnion típico, anóxico y estancado, a diferencia de cenote Grande y Verde que presentan un monimolimnion

atípico, hipóxico y con flujo. También se comparó con sistemas de la península de Florida, Bahamas, España y Australia, con los que se encontraron similitudes funcionales.

ABSTRACT

Cenotes (sinkholes) are the most conspicuous features of the Yucatan peninsula, nevertheless our knowledge of this peculiar aquatic ecosystem, is scarce, fragmentary and scattered. Cenotes are windows to the aquifer, which is the only source of fresh water available at the peninsula. Hydrobiogeochemical classification (Schmitter-Soto *et al.* 2002 a y b) is the best approach to understand the relationship between structure and function in this systems. The cenotes, in which fresh water from the aquifer interacts with the salt water coming underground from the ocean, show on the one hand, a strong influence from the land ecosystems and, on the other, influences from the marine ecosystems. That is anchialine system's definition. Anchialine cenotes with lentic flow develop meromixis. It is a non common phenomenon in lakes, compared to holomixis, therefore it has been less studied. In México there are just two meromictic lakes, however there are at least eight meromictic cenotes in Yucatan's peninsula. None were studied before. Nohoch Ho is a meromictic cenote 4 km inland on the Mexican Caribbean coast. In the cenote Nohoch Hol exists a thermal inversion and three water masses, mixolimnion ($2.77 \pm 0.43 \text{ g L}^{-1}$), chemolimnion ($25.5 \pm 9.82 \text{ g L}^{-1}$), and monimolimnion ($36.6 \pm 0.09 \text{ g L}^{-1}$). Besides, there is a thermal anomalie (26.7°C), and clines of conductivity, pH, Eh, turbidity and dissolved oxygen at 10 m in the chemolimnion. The total P maximum $0.611 \mu\text{M}$ is an ultraoligotrophic data. Nitrogen species show a bimodal profile in the chemolimnion, NO_3^- and NH_4^+ alternate maximums and minimums and it matches with both, the bacterioplankton morphotype profiles (maximum $35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) and with environmental data, and all together suggest nitrification and denitrification. The mixolimnion presents a succession of phytoplankton classes where chlorophytes and diatoms alternate the dominance. A mayor feature is a *Scenedesmus* ($20.7 \times 10^6 \text{ cel L}^{-1}$) monoculture at 10 m. Phytoplankton reach at 11m their maximum depth. Phytoplankton diversity (Shannon-Wiener) is low $H' = 0.27$. Quantitative and cualitative comparisons were made between Nohoch Hol and lentic and lotic cenotes from Merida area as well as the Caribbean area. Nohoch Hol shows a typical monimolimnion, anoxic and stagnant, which is very different from Cenote Grande and Verde both with hypoxic and flowing monimolimion. We also compared them with

systems from the Florida Peninsula, Bahamas, Spain and Australia founding functional similarities.

1. INTRODUCCIÓN

La península de Yucatán es una planicie kárstica tropical sujeta a intensa disolución, carece de drenaje superficial, el acuífero flota sobre agua marina debido a intrusión, y su principal característica geomorfológica son los cenotes. Los cenotes son manifestaciones kársticas –disolución de roca caliza-- que alcanzan el nivel freático y algunos incluso la masa de agua marina. Los cenotes pueden presentar flujo léntico, lótico o algún punto entre ambos, la diferencia en la condición de flujo determina hidrobiogeoquímicamente a los sistemas (Schmitter- Soto *et al.*, 2002 a y b). El contacto entre el acuífero y la masa de agua marina genera una zona de mezcla o haloclina la cual potencia la disolución de la roca caliza (Stoessell *et al.*, 1989) y puede generar meromixis. La meromixis –mezcla parcial de una columna de agua-- es un fenómeno menos común en comparación con la holomixis, por lo que los trabajos limnológicos en este tópico son menos numerosos (Wetzel, 2001). En México se han descrito dos lagos meromícticos Isabel y Rincón de Parangueo Guanajuato –hoy completamente desecado debido a sobreexplotación-. En contraste en la península de Yucatán la meromixis es más común debido a la intrusión salina, sin embargo, ninguno ha sido objeto de una descripción limnológica.

Una descripción limnológica destaca las principales características de una columna de agua en términos de la variación vertical de parámetros físicos, químicos y biológicos.

Este trabajo de investigación describe limnológicamente un cenote léntico meromíctico (Nohoch Hol) del NE de la Península en términos de la distribución vertical de los parámetros fisicoquímicos -temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, pH, potencial de oxido reducción y turbidez-, nutrimentos -nitrógeno, fósforo y sílice-; fitoplancton -abundancia y diversidad- y bacterioplancton – abundancia y morfotipos-. Los resultados se comparan cuantitativa y cualitativamente con cenotes lénticos, lénticos meromícticos y lóticos del NW y NE de la Península, también se compara con lagos y dolinas de la península de Florida, así como dolinas de Bahamas, España y Australia.

El NE de la península presenta el crecimiento urbano más rápido de América Latina. El acuífero es la única fuente de abastecimiento de agua y se caracteriza por su

alta vulnerabilidad a la contaminación (Doehring y Butler, 1974). Dado el estado actual de presión que el desarrollo turístico y urbano ha venido ejerciendo en los ecosistemas de la región, los cenotes y el resto de acuífero se consideran en riesgo (Schmitter- Soto *et al.*, 2002 a y b).

El uso sustentable de los ecosistemas únicamente se puede lograr si conocemos como funcionan y elaboramos planes de manejo acordes.

2. JUSTIFICACIÓN ¿POR QUE ESTUDIAR CENOTES?

El corredor Cancún-Tulum fue objeto de uno de los primeros cinco Ordenamientos Ecológicos del Territorio; sin embargo, al parecer se ha hecho caso omiso a las recomendaciones emitidas dado el estado actual de presión que el desarrollo turístico y urbano ha venido ejerciendo en los ecosistemas de la región. La Península de Yucatán está siendo urbanizada de forma acelerada, especialmente el corredor turístico Cancún-Tulum. El desarrollo económico de la región deriva primordialmente del turismo, aunque cerca de Mérida la expansión de la industria es notoria. El acuífero es la única fuente de abastecimiento de agua para la Península de Yucatán y se caracteriza por su alta vulnerabilidad a la contaminación. En contraste, el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales es escaso o nulo mientras que la demanda del recurso sigue creciendo. En consecuencia, estos factores han degradado ambientalmente los cenotes por lo que se consideran sistemas en riesgo (Schmitter-Soto *et al.*, 2002a).

El uso adecuado de los ecosistemas únicamente se puede lograr mediante planes de manejo comprometidos con la sustentabilidad. Por todo lo anterior resulta social, política y económicamente importante el estudio de los cenotes. Sin embargo, es de fundamental importancia que este estudio sea realizado con bases estrictamente científicas ya que estos ecosistemas peculiares, además de estar en regiones limnológicas inexploradas (Gopal y Wetzel, 1995; Wetzel y Gopal, 1999), deben ser clasificados y tipificados con relación al conocimiento científico que ya se tiene (Hutchinson, 1975). Los cenotes presentan diferencias limnológicas respecto de otros cuerpos epicontinentales, especialmente aquellos meromícticos. Ecológicamente su importancia se incrementa, considerando el elevado número de endemismos que se han reconocido en ellos.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.0 Karst

El karst es un ambiente de depósito continental acuoso. Ocurre en donde hay rocas solubles como yeso, caliza, dolomita y halita aflorando en la superficie del terreno. La corrosión en el sentido geomorfológico, es la destrucción de las rocas por disolución química y remoción de la sustancia mineral (Espinaza-Pereña 1990). Estos paisajes y sus componentes subsuperficiales son generados por la disolución química, del estrato rocoso, como agente geomorfológico. Las formas características de las regiones kársticas son: depresiones cerradas de diferentes tamaños y arreglos; drenajes superficiales interrumpidos; cuevas y sistemas de drenaje subterráneos.

De acuerdo con Espinaza-Pereña (1990) el karst es una facie¹ diagenética², formas negativas del relieve en cuerpos de roca soluble expuestos subaereamente, producidos y controlados por la disolución y migración del producto soluble en aguas meteóricas, que ocurren en una gran variedad de escenarios climáticos y tectónicos, que generan un paisaje característico. Según Espinaza-Pereña (1990), siguiendo a Llopis (1970), las formas kársticas se han clasificado en seis grandes grupos:

- 1) Formas superficiales o lapiaz,
- 2) Formas de absorción,
- 3) Formas de conducción,
- 4) Formas de emisión,
- 5) Formas de colapso y
- 6) Formas reconstructivas.

El origen y desarrollo de las formas kársticas son el resultado de la interacción de procesos gobernadas por factores intrínsecos y extrínsecos, que generan una amplia gama de formas y grados de karstificación. Dentro de los factores intrínsecos, los más importantes son la litología general, la evolución del relieve superficial en el área circundante, la permeabilidad del estrato o grado de porosidad de la matriz, y el fracturamiento. Dentro de los factores extrínsecos, los cruciales son el clima, la vegetación, mezcla de agua dulce y salada, así como el tiempo de duración de la exposición.

¹ Conjunto de características litológicas y paleontológicas que definen una unidad estratigráfica.

² Diagenesis: reacciones geoquímicas que ocurren en el sedimento una vez enterrado en escalas de tiempo menores de mil años y a temperaturas entre 0 °C y 150 °C.

Las principales variables de las condiciones climáticas como factor extrínseco son cuatro la precipitación, la temperatura, la vegetación y en karst costero la mezcla de agua dulce y salada.

La primera, debido a que el agua es el agente que transporta, en solución o como carga clástica, los productos de la corrosión y erosión de los procesos kársticos. A mayor cantidad de agua precipitada, mayor será el desarrollo kárstico.

La segunda es importante ya que influye en la solubilidad de los gases en agua de manera inversamente proporcional, a menor temperatura la solubilidad de los gases aumenta y el agua aumenta su concentración de dióxido de carbono, forma más ácido carbónico y es más agresiva.

La tercera produce cambios en la composición y acidez del suelo, y como el agua debe atravesar el suelo esta se carga de dióxido de carbono y otros ácidos aumentando la agresividad del agua sobre la roca.

La cuarta aumenta la agresividad del agua sobre la roca y actúa como una lija sobre el plano de mezcla.

Con base en los factores anteriores, la clasificación del karst de la Península de Yucatán resulta en "Karst tropical"; debido a la combinación de alta precipitación, temperatura y cobertura vegetal la alteración procede rápido, resultando en suelo bien desarrollado, abundantes dolinas y brechas de colapso por disolución subsuperficial (Espinaza-Pereña 1990), lo cual ha sido potenciado por la mezcla del agua dulce y salada generando las cuevas mas grandes del mundo.

3.1 Cenotes

La palabra cenote viene del vocablo maya Ts'ono'ot y significa "caverna con deposito de agua" (Diccionario Maya, 1980). Este término se ha generalizado para designar la mayoría de las manifestaciones kársticas en la Península de Yucatán. Para Gaona-Vizcayno (1980) existen cinco tipos de manifestaciones kársticas en la península

de Yucatán: disolución cercana a la superficie, cavernas secas, cavernas inundadas, aguadas y cenotes.

Los cenotes son sistemas complejos y dinámicos conformados por la interacción natural del agua de mar, el agua intersticial y la lluvia, a través de la roca caliza. Por su origen se clasifican como lagos de disolución (Cole, 1979) o por la actividad del agua sobre la roca soluble (Margalef, 1983). El lago kárstico elemental es la dolina – colapso-, designación aplicada a nivel mundial a estos cuerpos de agua (Hutchinson 1975). El termino cenote denota cualquier espacio subterráneo con agua, con la única condición de que éste esté abierto al exterior en algún grado. Es decir, incluye toda manifestación kárstica que alcance el nivel freático (Gaona-Vizcayno et al. 1980).

3.1.1. Formación de los cenotes

Hall (1936) propuso una hipótesis sobre el origen de los cenotes a través de una secuencia de eventos (ver 3.1.3.) (Fig.1). 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; 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 (Fig. 1).

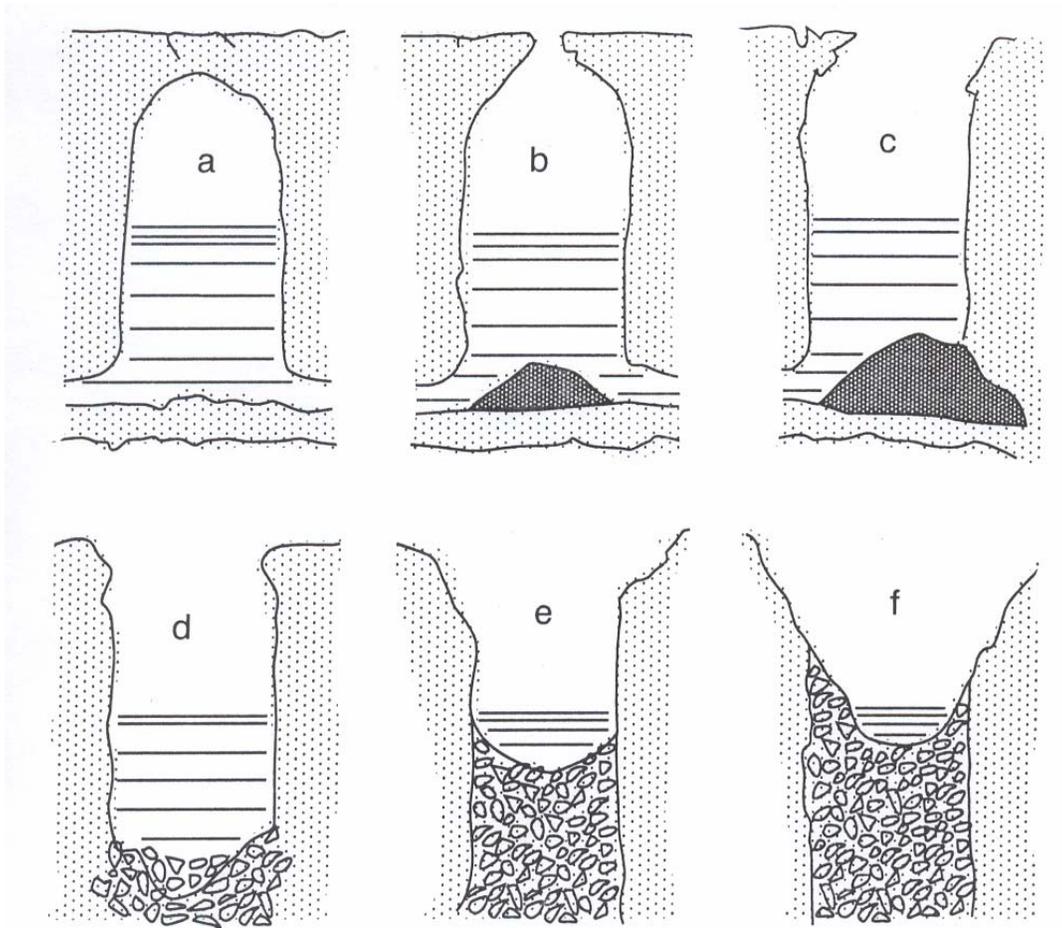


Fig 1. Secuencia de formación y desarrollo de cenotes (Tomado de Schmitter-Soto *et al.* 2002 a)

Existe una diversidad de mecanismos y procesos acoplados y complementarios en tiempo y espacio, que actúan en diferentes escalas para originar los cenotes. El proceso avanza desde arriba, por infiltración pluvial, y desde abajo por circulación subterránea (Wilson 1992).

El primer mecanismo está acoplado con el clima local y consta de tres procesos. El proceso principal para la formación de los cenotes es la disolución de la roca caliza por el ácido carbónico que se forma de la reacción entre agua y dióxido de carbono. Los conductos y pasajes subterráneos son el resultado del flujo de la lluvia que conforma un acuífero, su drenaje subterráneo que se descarga en el mar a través de fallas y fracturas (Espinaza-Pereña, 1990; Saltsman, 1995).

El segundo proceso que puede contribuir a la disolución de las rocas calizas es la mezcla del agua salada y dulce, lo cual potencia la reactividad en la aragonita y calcita (Stoessel *et al.*, 1989).

El tercer proceso es local. El ácido sulfhídrico (H₂S) disuelve la roca en el horizonte de la columna de agua en el que se acumula. Ha sido detectado H₂S en importantes concentraciones en el agua de varios cenotes como consecuencia de la reducción de materia orgánica acumulada (Stoessel *et al.*, 1993). La actividad microbiana asociada a estos tres procesos contribuye a la formación de cenotes (Gaona-Vizcayno *et al.* 1980; Martín y Brigmon, 1994).

El segundo mecanismo es la fluctuación del nivel del mar en periodos glaciario-interglaciario que ha producido regresiones marinas que son las responsables del colapso de techos de galerías, lo cual genera apertura o "ventanas" del acuífero desde el piso de la selva. Al descender el nivel del mar, desciende el acuífero, aumentando la profundidad de la disección kárstica y deja una cavidad o cueva aérea tras de sí, donde secciones del techo se pueden desplomar por falta de soporte, formando un cenote. Al final del periodo glaciario el mar regresa inundando las cavidades aéreas (Saltsman, 1995).

Finalmente, el tercer mecanismo es responsable de la formación de espeleotemas. Los espeleotemas son estructuras de acumulación y depósito del material disuelto en el proceso del karst. Secciones de túneles, pasajes y fracturas conectados entre sí en sistemas de cuevas secas -originadas por los dos primeros mecanismos- continúan recibiendo agua de lluvia cargada con dióxido de carbono por percolación. Al llegar a la cavidad aérea el dióxido de carbono abandona el equilibrio acuoso y el carbonato de calcio, la calcita y aragonita precipitan creando espeleotemas. El crecimiento se detiene cuando la cueva se inunda por un incremento en el nivel del mar en un periodo interglaciario (Saltsman, 1995).

3.1.2 Tipos de cenotes

Dependiendo del área de investigación desde el que se estudien los cenotes, se encuentran distintas formas de clasificación de los mismos. La primera clasificación se podría denominar morfológica, fue documentada por Hall (1936), recopilando el conocimiento local, de acuerdo con la etapa del proceso de apertura de la ventana que comunica el acuífero subterráneo con la selva y la luz solar en superficie: cueva, cántaro, cilindro y aguada (ver 3.1.2) (Fig.1).

Con base en sus características hidrogeoquímicas, Schmitter-Soto *et al.* (2002a) mencionan que los cenotes más jóvenes son lóticos, el agua está bien conectada con el acuífero a través de fracturas lo que hace que ésta fluya de manera horizontal y el tiempo de residencia sea corto. Los cenotes más viejos tienen condición léntica, donde el flujo y recambio de agua es lento debido a que existe un bloqueo de la conexión principal con el acuífero, con lo cual el intercambio con el agua subterránea es restringido, pero se da a través de los poros de la roca. Dos procesos pueden restringir el flujo subterráneo entre el acuífero y el cenote: el colapso del techo o paredes y la sedimentación.

En éste trabajo se usa la clasificación por diferencias hidrogeoquímicas (Schmitter-Soto 2002a) ya que está basada en las marcadas diferencias geoquímicas entre unos y otros así como la gama de condiciones de flujo entre los dos extremos léntico y lótico.

3.1.3 Cenotes lénticos y lóticos

Los cenotes lóticos tienen un flujo horizontal, mientras los lénticos circulan convectivamente, lo que genera diferencias en los tiempos de residencia, tanto del agua, como de sustancias disueltas (Schmitter-Soto *et al.* 2002a). Los cenotes lénticos desarrollan gradientes verticales más marcados que los que pudieran desarrollar los cenotes lóticos. La materia orgánica determina el equilibrio químico y la actividad biológica de los cenotes (Schmitter-Soto *et al.* 2002a). En cenotes con baja actividad

orgánica, se encuentran recristalizaciones de carbonato de calcio por debajo del nivel freático lo que no ocurre en los cenotes con alta actividad orgánica (Gaona-Vizcayno et al.1980). La cantidad de materia orgánica de un cenote (disuelta, particulada, detrito orgánico y organismos vivos) depende de diversos factores. Las corrientes de agua pueden transportar el material orgánico e impedir su sedimentación en los cenotes. Por lo anterior los de flujo restringido tenderán a presentar una mayor concentración de material orgánico que los de flujo abierto. Así, debido a la actividad del agua y de la materia orgánica entre cenotes lénticos y lóuticos, existen diferencias en las tasas de disolución y mezcla.

El tamaño de la apertura del cenote determina, hasta cierto grado, cuanta materia orgánica puede introducirse desde los terrenos adyacentes del suelo de la selva en épocas de lluvias. 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 cilíndricos y aguadas presentan una mayor cantidad de materia orgánica procedente de macrofitas, perifiton, epifiton y microbentos. Los cenotes de flujo restringido acumularán más nutrientes, lo cual incrementa el estado trófico del sistema, este fenómeno implica incremento de pH, turbidez y contenido de oxígeno disuelto superficial, así como la presencia de anoxia y acidez en el fondo (Schmitter-Soto *et al.* 2002b).

3.2 Holomixis y meromixis

Holomixis es la mezcla homogénea y completa de la columna de agua de un lago por corrientes convectivas, que provocan una circulación vertical. Existen diferentes factores que generan la mezcla completa de una columna de agua como el viento y el geotermalismo. Los lagos holomícticos se clasifican de acuerdo a la frecuencia de la circulación en un ciclo anual en monomícticos, dimícticos y polimícticos (Wetzel 2001).

La meromixis es la mezcla parcial o nula de toda la columna de agua. En los lagos que se mezclan parcialmente o meromícticos, la capa profunda no se mezcla con

el resto de columna debido a su mayor densidad derivada de la presencia de sustancias disueltas o bien porque el lago está protegido de factores que generan circulación (i.e. viento). En un sistema meromítico se distinguen dos masas de agua principales en la columna: mixolimnion y monimolimnion (Wetzel, 2001). La masa de agua de fondo aislada permanentemente es el monimolimnion, mientras que la capa superior de agua que está circulando acoplada al clima de la región es el mixolimnion. Las dos masas de agua están separadas por un fuerte gradiente de salinidad, éste estrato es el quimiolimnion y el plano donde cambia la densidad se denomina quimioclina, el quimiolimnion de grosor variable es considerado por algunos autores como tercera masa de agua (Lampert y Sommer, 1997; Wetzel, 2001) (Fig.2). La meromixis se desarrolla cuando el agua profunda se vuelve tan “pesada” (densa) por la presencia de sustancias disueltas o finamente particuladas que su densidad no puede ser igualada por el agua a menor temperatura o salinidad en la superficie, pero también cuando el agua superficial se vuelve muy “ligera” por dilución. Hay que reconocer que un incremento de 10 mg L^{-1} de sal produce el mismo incremento en densidad como el descenso de temperatura de 5° C a 4° C (Lampert y Sommer, 1997).

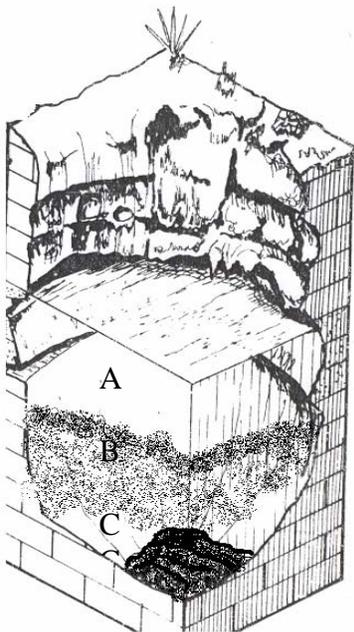


Fig. 2. Cenote Meromítico, A. mixolimnion, B. quimiolimnion, C. monimolimnion (Modificado de Gaona-Vizcayno et al. 1980)

3.2.1 Tipos de meromixis

Según Wetzel (2001) la meromixis por su origen se puede dividir en tres categorías: meromixis producida por un evento externo al sistema (ectogénica), meromixis inducida por el aporte de sales desde el fondo (crenogénica) y un incremento en salinidad derivada de procesos biológicos (biogénica).

La meromixis ectogénica es la condición que resulta cuando un evento externo trae agua salada al reservorio de agua dulce o agua dulce a un reservorio de agua salada. El resultado en ambos casos es una capa superficial de agua con menor salinidad y por ende menor densidad encima de un monimolimnion de agua salina con mayor densidad. Estos eventos son frecuentes a lo largo de las zonas costeras donde se pueden dar intrusiones catastróficas de agua salada por tormentas asociadas con actividad mareal inusual o estacional. La entrada de agua dulce en gran cantidad de forma natural en los periodos húmedos, o artificialmente como resultado de irrigaciones circundantes, genera meromixis que perdura varios años.

La meromixis crenogénica resulta de, por ejemplo, la presencia de manantiales salinos sumergidos que aportan agua densa a la porción profunda del embalse. El agua salada del manantial desplaza el agua del mixolimnion, generando un monimolimnion. El quimiolimnion se estabilizará a una profundidad relacionada al grado de influjo, diferencias de densidades y del grado de mezcla por viento del mixolimnion. La meromixis crenogénica puede entrar como una subcategoría de meromixis ectogénica.

La meromixis biogénica o endógena se da cuando se acumula sal en el monimolimnion por la descomposición en el sedimento de la materia orgánica que libera iones que modifican la salinidad y en consecuencia la densidad del agua. La inversión de temperatura es característica del monimolimnion. La meromixis biogénica es común en lagos muy profundos pero también es común encontrar el fenómeno en lagos de reducida área superficial y profundidad moderada y que están resguardados del viento.

3.2.2 Relevancia de la pycnoclina asociada a la quimioclina

La pycnoclina es el plano donde se da un cambio drástico en la densidad, en una columna de agua. De acuerdo con Margalef (1983) el desarrollo de pycnoclinas como zonas de fuerte gradiente y relativa discontinuidad genera la división del ecosistema en estratos o compartimentos superpuestos cada cual con una dinámica particular de los ciclos de los elementos entre factores bióticos y abióticos.

La generación de gradientes verticales generalmente es consecuencia de la sedimentación de la materia orgánica y la difusión molecular o turbulenta del oxígeno. En un medio en reposo relativo, el estado final resultaría del equilibrio entre los distintos transportes verticales. De no mediar la agitación inducida por energía externa, los ecosistemas acuáticos se enfrentarían a sí mismos a meromixis permanente y un nivel de producción primaria baja. La concentración de diversas especies químicas, en cada nivel, depende de los transportes de entrada y salida: difusión, sedimentación, movimiento activo de los organismos y reacciones locales. Entre el mixolimnion y el monimolimnion la difusión turbulenta vertical es muy pequeña (Margalef, 1983).

3.3 Sistemas anquihalinos

Etimológicamente anquihalinidad proviene del griego *agkhi* cerca y *hals* sal, esto es, cercano al mar. Holthuis (1973) acuñó el término "anquialino" (sin "h"), sin embargo, Stock *et al.* (1986) justifican la modificación a "anquihalino" con base primero en la traducción directa del griego que provee de la "h", y segundo en la convención internacional de clasificación de aguas saladas (Sistema Venecia, 1959). La definición original de Holthuis (1973) se modificó con criterios ecológicos en el Simposio Internacional de Biología de Cuevas Marinas (Bermuda, 1984) (Stock *et al.* 1986) como sigue: "Los hábitats anquihalinos consisten en cuerpos de agua halina, usualmente con una exposición restringida al aire de la atmósfera, siempre con conexiones subterráneas con el mar más o menos extensas, y mostrando notable influencia tanto marina como terrestre".

El encuentro e interacción entre el agua epicontinental dulce que fluye hacia el mar por gravedad y el agua marina por intrusión al continente impulsada por mareas y vientos de tormenta forma una zona de transición o ecotono entre ambas masas acuáticas, que fluyen en dos direcciones opuestas dentro de los mismos conductos. La interacción entre las dos masas de agua genera un sistema dinámico, en el que el grosor de cada masa de agua varía a lo largo del sistema subterráneo, del día y del ciclo estacional (Álvarez et al., 2000).

El estudio de los sistemas anquihalinos es relativamente reciente si se considera que su descubrimiento data de 1966 por Riedl. Los hábitats anquihalinos están restringidos a substratos altamente porosos como lavas recientes o calizas adyacentes al mar (Holthuis, 1973; Maciolek, 1983). La geología de la Península de Yucatán es propicia para el desarrollo de una variedad de sistemas anquihalinos del segundo tipo. Sin embargo no todos los cenotes son sistemas anquihalinos.

Al parecer, la abundancia de sistemas anquihalinos en regiones tropicales es mayor que fuera de ellas, ya que muchos de los sistemas anquihalinos, se desarrollan en roca caliza originada en ambientes de arrecife de coral, los cuales están restringidos a las regiones tropicales. Y son las regiones tropicales, las que tienen periodos de estabilidad climática prolongada en escala geológica, que permiten la evolución y sobrevivencia para la fauna troglobia (Iliffe com. pers.).

Los hábitats anquihalinos se generan de diferentes maneras: por inundación marina debida a cambios en el nivel medio del mar en periodos interglaciares, por disolución de roca caliza en agua dulce por largo tiempo para formar un embalse o por el colapso de cuevas o dolinas (Martin, 1991). En los sistemas anquihalinos las características varían con el tamaño del embalse, la naturaleza de la conexión marina y el clima (Martin, 1991; Iliffe, 2000).

Debido a su densidad, el agua dulce continental es mas ligera que la salada marina, por ello es que la primera se desplaza por encima de la segunda, a manera de

una lente (Fig.4). Para mantener el equilibrio hidrostático en una columna de agua dulce de un metro por encima del nivel del mar, se necesita aproximadamente 40 m de agua dulce por debajo del nivel del mar. Sin embargo el equilibrio no se da bajo la capa freática debido a que la acción de las mareas perturba el equilibrio creando un gradiente por la filtración de agua dulce hacia el mar y una zona de mezcla a lo largo de la superficie de separación entre las dos masas de agua (Cooper, 1959).

La separación entre las dos masas de agua es una barrera física de densidad o pycnoclina. La densidad del agua está determinada por tres factores: salinidad, temperatura y presión. Una haloclina es una barrera de densidad generada principalmente por diferencias de salinidad, que se manifiesta por un cambio brusco de salinidad en pocos metros. El grosor de la haloclina es variable y depende de la distancia a la costa, siendo más delgada tierra adentro y de mayor grosor conforme se acerca al mar. La razón de este engrosamiento es la mezcla proporcionada por la fricción entre las masa de agua dulce que va del continente al mar, con la marina que se desplaza del mar hacia el interior del continente. Adicionalmente, al incrementarse la distancia al mar, la oscilación por marea es menor reduciendo la mezcla y adelgazando la haloclina (Iliffe, 2000).

3.3.1 Relevancia de la haloclina

La densidad del agua está determinada por tres factores: salinidad, temperatura y presión. En la mayoría de los lagos, la estratificación o separación de capas de agua por diferencia de densidad es inducida por diferencias de temperatura, esto es, por la presencia de una termoclina. Sin embargo, en el caso de los cenotes, frecuentemente es la haloclina lo que genera una barrera en la columna de agua entre una capa superficial de agua dulce a salobre y una profunda salada (Schmitter-Soto *et al.* 2002a). De acuerdo con los mismos autores, la haloclina funciona como una barrera física o "tapón" que separa el agua dulce de la salada en un cenote, lo que incrementa el tiempo de residencia del agua; la haloclina es más eficiente como barrera que una termoclina.

Se puede presentar una doble estratificación con la presencia de dos clinas, una haloclina y una termoclina. La estratificación primaria es establecida por una haloclina que separa una capa superior y dulce o salobre (epiclina *sensu* Sánchez *et al.* 2002), de una capa inferior de agua marina (hipoclina). La estratificación secundaria se da por temperatura en la capa de la epiclina o mixolimnion que se subdivide en epi, meta (en donde se presenta la termoclina) e hipolimnion (Schmitter-Soto *et al.* 2002 a).

La haloclina es importante porque aísla las capas de agua de forma más eficiente que la temperatura e impide o dificulta el flujo de materia orgánica, así como también porque separa comunidades de organismos dulceacuícolas de marinos. Sin embargo, se ha visto que algunos organismos pueden traspasar esta barrera en busca de alimento y regresar o esperar en ella a una presa del otro lado.

La haloclina, al ser una zona de mezcla de agua dulce y salada potencia la reactividad de la aragonita y la calcita (Stoessel *et al.* 1989) resultando en una mezcla corrosiva. La disolución de la roca en el horizonte de la haloclina puede ser más intensa. Así, puede haber sistemas anquihalinos (cuevas) cuyo principal desarrollo se debe a la haloclina (Back *et al.* 1986). Esto es importante en el contexto de los sistemas anquihalinos de la Península de Yucatán ya que de manera general el grosor de la lente de agua dulce (acuífero) en la Península es de varios metros y en consecuencia el grosor de la haloclina es importante. La haloclina en la Península de Yucatán sube y baja con relación a los ciclos de marea funcionando como una "lija" sobre las paredes de los cenotes y las cuevas.

3.3.2 Los cenotes como sistemas meromícticos y anquihalinos

En los cenotes se presenta una zona de encuentro e interacción entre aguas dulces (epicontinentales) y salinas (marinas) lo que podría ser clasificado como un caso de meromixis ectogénica. Sin embargo, el término anquihalinidad implica una dinámica intensa entre las masas de agua dulce y salada que los cuerpos lénticos generalmente no presentan. Por lo anterior el caso de los cenotes representa un caso peculiar en

donde se combinan los conocimientos que se tienen tanto de sistemas meromíticos como de sistemas anquihalinos.

4 ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Península de Yucatán y Plataforma

La Península de Yucatán es la porción emergida de la plataforma continental de Yucatán (300,000 km²) (López Ramos, 1975). En el extremo este-sureste de México, separa el Mar Caribe del Golfo de México. Es una de las cinco zonas fisiográficas de la República Mexicana. Corresponde a una planicie importante dada su extensión (39,340 km²) ya que representa el 2% de la superficie de la República Mexicana. Su contraste altitudinal es singular en el contexto nacional ya que casi no presenta rasgos orogénicos y el 90% de su superficie está a menos de 200 m snm.

Es una unidad fisiográfica/geológica que abarca territorio mexicano, el Petén Guatemalteco y el norte de Belice. Dicha unidad se encuentra dividida en 14 distritos fisiográficos de los cuales 8 se encuentran en México (Wilson, 1980) (Fig. 3).

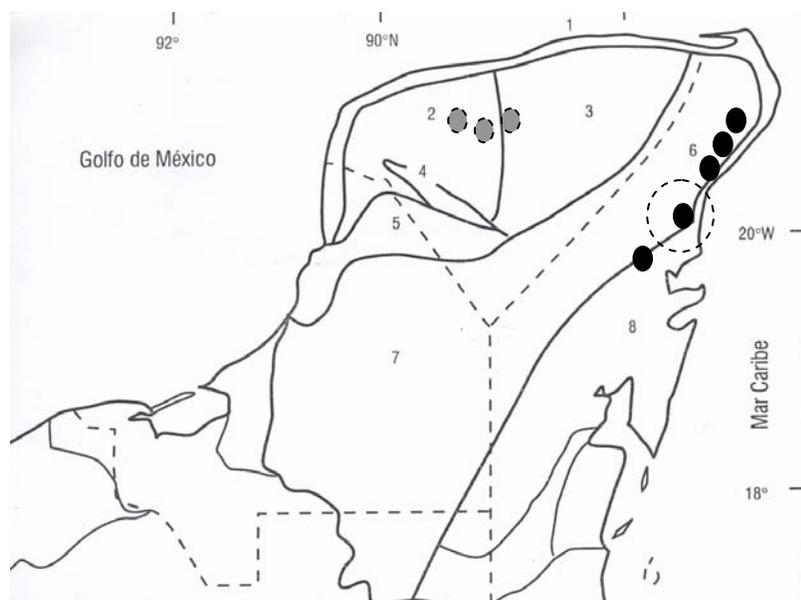


Fig. 3 Península de Yucatán, distritos fisiográficos. 1, zona costera. 2, Mérida. 3, Chichén Itza. 4, Puuc. 5, Bolonchén. 6, Cobá. 7, Río Bec. 8, Río Hondo. (Modificado de Schmitter-Soto *et al.* 2002 a). Puntos grises cenotes Ixin-Ha, Xlaká y Xtogil. Puntos negros, cenotes Angelita, Grande, Chico y Verde. Punto negro encerrado en círculo Nohoch Hol. Localizaciones aproximadas.

La geología general consta de depósitos de roca caliza (dolomita y evaporitas) de edad Cretácica a Cenozoica-Cuaternaria (Fig.8) que forman una placa, con gradiente temporal en sentido norte-sur, lo que indica la emergencia paulatina de la plataforma durante el Plioceno. Lo cual explica la asimetría en la extensión de la plataforma, que se extiende ~10 km en el margen del Caribe y ~200 km del lado del Golfo (Fig.9). Su

topografía es kárstica y su rasgo más importante es la presencia de cenotes, principalmente en la porción norte. La zona de mayor abundancia de cenotes empieza al norte de una línea imaginaria situada entre Tulum, Quintana Roo y Campeche, Campeche (Schmitter- Soto *et al.*, 2002a).

El acuífero de la Península de Yucatán es costero, con un sistema kárstico maduro caracterizado por su alta permeabilidad y bajo gradiente hidráulico, con dos tipos de porosidad, la primaria que es la porosidad de la roca y la secundaria que son las fallas y fracturas en la misma. El flujo de agua subterránea está determinado por la porosidad secundaria (Steinich y Marín, 1997). El acuífero se encuentra confinado únicamente en una franja paralela a la costa (Perry *et al.*, 1989). Este acuífero es una delgada lente de agua dulce que flota encima de una masa de agua salina, más densa. El agua salada tiene dos orígenes, la intrusión marina y la disolución de evaporitas. El agua salada se ha encontrado hasta a 110 km tierra adentro (Steinich y Marín, 1996; Perry *et al.*, 1995; Velásquez, 1995). El modelo tradicional para explicar los acuíferos costeros estratificados por densidad, es el modelo de Dupuit-Ghyben-Herzberg (Fig.4). En tanto cuando el modelo usado para acuíferos kársticos es el Eogenético. Beddows (2004) considera que el acuífero costero kárstico de Yucatán requiere nuevas consideraciones, por lo que los anteriores modelos no son explicación suficiente.

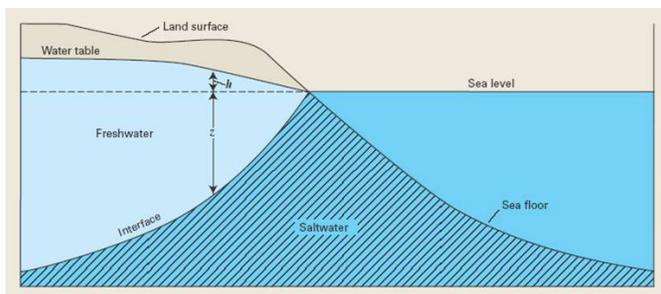


Fig.4. Modelo de acuífero costero Ghyben-Herzberg (Freeze y Cherry, 1979)

En la península de Yucatán, por ser una planicie kárstica, resulta sumamente complejo definir cuencas hidrológicas. De manera tradicional se han propuesto tres cuencas hidrológicas principales: una cuenca criptorréica –subterránea-- sobre el estado de Yucatán y norte de Quintana Roo; la del río Hondo en el sur de Quintana Roo; y la del río Champotón en Campeche (Fig.5). La cuenca criptorréica, presenta subcuencas y parte aguas (Fig.6 y 7) (Marín, 2005), que empiezan a ser estudiadas.

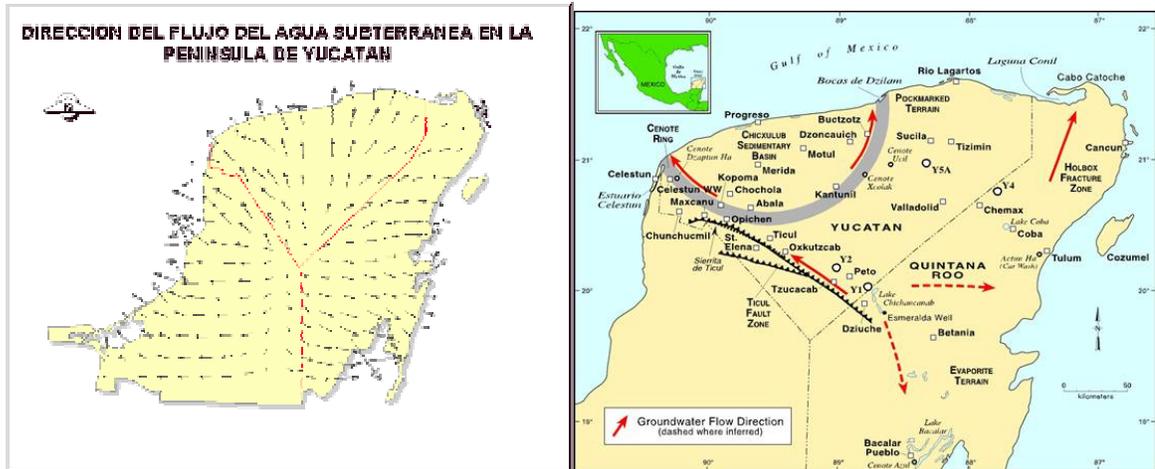


Fig. 5. Cuencas y direcciones de flujo (www.cna.gob.mx). Fig.6 Direcciones de flujo de agua subterránea de acuerdo a Perry et al. (2002).

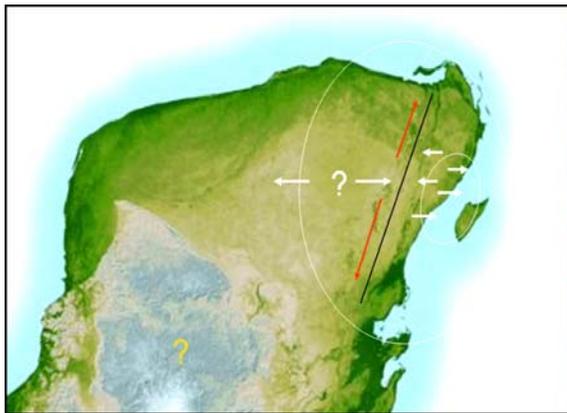


Fig.7. Parteaguas subterráneos (tomado de Marín et al. 2005)

Los climas de la Península de Yucatán se incluyen principalmente al grupo Aw, esto es, los cálidos subhúmedos con lluvias en verano (de fines de mayo a principios de octubre). El clima resulta de la interacción entre el aire marítimo tropical del Caribe, los vientos Alisios y las masas de aire polar continental que en invierno conforman los “nortes” (Suárez-Morales, 1996). Se reconoce una estacionalidad marcada por lluvias, nortes y secas. Existe un gradiente en la precipitación en sentido NO-SE (García, 1973), siendo el extremo NO el más seco. La evapotranspiración se ha estimado a *grosso modo* en 85% (Lesser, 1976), sin embargo, con base en dicho cálculo, no pueden ser explicadas las descargas costeras del acuífero. La recarga del acuífero debe ser $\geq 30\%$, (Beddows, 2004).

La Península de Yucatán constituye una provincia florística dentro de la región Caribe, coincidente con la fisiografía. Muestra relación con la flora de las Antillas y los elementos de la región biogeográfica Neotropical son dominantes. La selva mediana subperenifolia y selva baja subcaducifolia, conforman mayoritariamente la vegetación de la Península, aunque se reconoce un empobrecimiento de la flora hacia el noroeste, debido al decremento de la humedad en ese sentido, como se mencionó anteriormente. Presenta gran similitud con la provincia de la costa del Golfo de México, pero destaca un número considerable de endemismos, como los géneros *Asemnanthe*, *Beltrania*, *Goldmanella*, *Harleya* y *Plagiolophus* (Rzedowski, 1981).

4.2. NNE de la Península de Yucatán

El desarrollo del NNE se inició durante el Terciario Superior, con la emersión de una secuencia carbonatada, que ha estado sujeta a una intensa disolución. El área se modificó durante el Cuaternario por la formación de lagunas y áreas pantanosas y por la acumulación y litificación de depósitos eólicos, así como por la construcción reciente de dunas y depósitos de litoral (INEGI, 1987).

El NNE de la zona fisiográfica Península de Yucatán corresponde a la provincia fisiográfica de "llanura con dolinas" (SARH, 1989), la cual contiene dos distritos fisiográficos (fig. 3): zona costera y Cobá, que a su vez se dividen en geoformas. La zona costera, es el distrito fisiográfico más joven geológicamente con edad Cuaternaria, se distingue por playas amplias, lagunas costeras y humedales. Presenta dos geoformas, llanura rocosa inundable (Chiquila) y llanura lacustre inundable (Tulum) (SARH, 1989). El relieve es de planicie ligeramente ondulada, donde destacan numerosas cavidades de disolución. El drenaje es subterráneo (INEGI, 1987).

En el NNE el promedio de los depósitos del Terciario es de 100 a 150 m (Weidie, 1985). Se identifican dos unidades de rocas sedimentarias que corresponden a ésta edad cuyo ambiente de depósito es el de plataforma de aguas poco profundas y morfológicamente constituyen lomeríos de poca elevación paralelos a la línea de costa, con depresiones que generalmente corresponden a zonas de mayor disolución. La

primera unidad del Terciario Inferior (Eoceno-Oligoceno), la segunda unidad es la Formación Carrillo Puerto (Mioceno Superior- Plioceno) que va de los 5 a los 10 m de espesor a lo largo de la costa (Weidie, 1985; INEGI, 1987) (Fig.8).

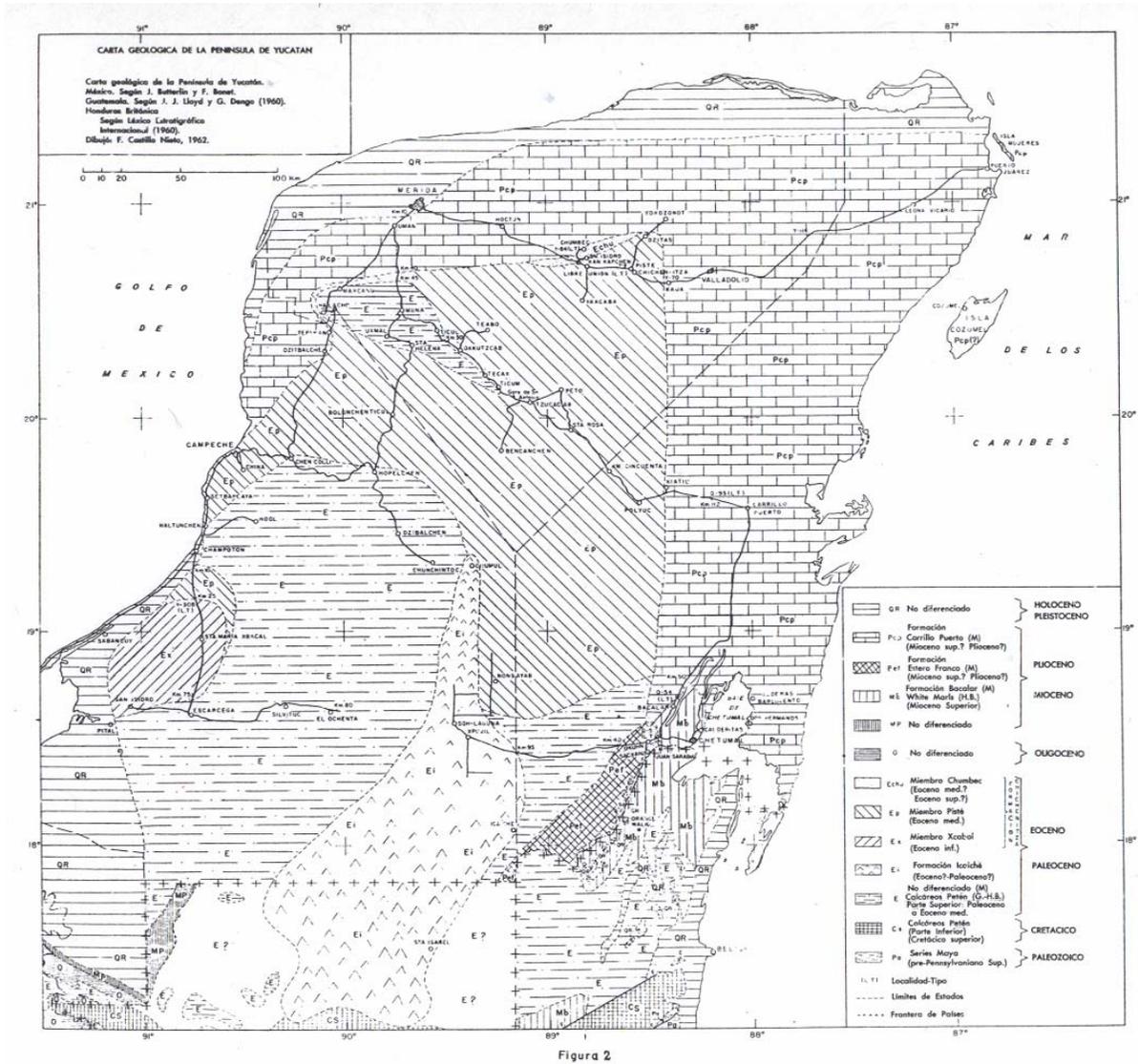


Fig. 8 Península de Yucatán, Carta Geológica. (Tomado de Butterlin y Bonet, 1963)

El Cuaternario consta de cuatro unidades de suelos y depósitos no consolidados del Reciente. Las rocas más jóvenes son del Pleistoceno, representan depósitos correspondientes a periodos interglaciares, cuando el nivel del mar incrementó e inundó grandes extensiones de la Península (Ward, 1985). Las fases marinas son calizas de tipo arenas de playa y costeras, arenas y arcillas lagunares (unidad litoral y palustre) y carbonato de calcio de arrecifes coralinos. Las fases no marinas son arenas eolianitas

(dunas) y micritas de lagos de agua dulce (unidad eólica y lacustre) (Ward, 1985; INEGI, 1987).

La geología estructural muestra que ésta porción, así como el resto de la plataforma de Yucatán, se encuentra prácticamente sin deformar, en comparación con las otras cuatro zonas fisiográficas del país. Sin embargo, las deformaciones que existen en la región facilitan el desarrollo del karst (Fig. 9). La estructura conocida más vieja es el Arco X-Can con dirección NNE, basamento de rocas del Paleozoico con unos 200 km de largo (Weidie, 1985) (Fig. 9). Es muy probable que ajustes posteriores al origen de este gran pliegue hayan ocasionado otros eventos estructurales en rocas más jóvenes (Weidie, 1985).

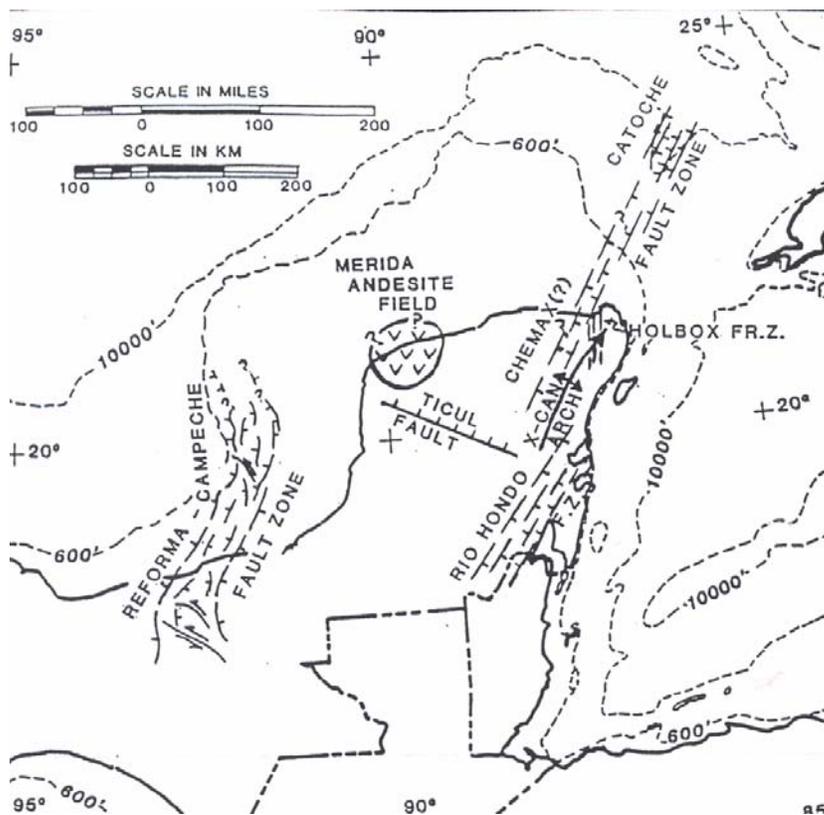


Fig. 9 Península de Yucatán, Mapa Tectónico (Tomado de Weidie, 1985)

Hay dos grupos de zonas de falla *en-echelon* (i.e., dos fallas que se mueven en direcciones diferentes, formando un pliegue) que se superponen cerca del área de estudio. Una al sur, la zona de falla Río Hondo; la otra zona de falla es Chemax-Catoche que data del Cenozoico y se extiende desde el continente, al suroeste de la isla Cozumel en dirección noreste fuera de la plataforma continental; ésta está relacionada con la

orogénesis Mio-Pliocénica con la que se explican las deformaciones recientes de la península (Butterlin y Bonet, 1963; Weidie, 1985). En ambos grupos de fallas se reconocen pilares y fosas tectónicas (HORST y GRABEN), cuyos límites son fallas normales perpendiculares a la costa. Incluso la isla Cozumel en sí, es un gran pilar tectónico.

El grupo de fracturas más joven es la Zona de Fractura Holbox que corta diagonalmente a través del Arco X-Can y la Zona de Falla Chemax. Se cree que este sistema de fracturas podría estar relacionado con el sistema Río Hondo (Marín et al. 2004).

La vegetación dominante en la porción del distrito Cobá es la selva mediana subperenifolia, donde los elementos arbóreos más comunes son *Manilkara zapota* ("chicozapote"), *Ficus continifolia* ("matapalo") y *Brosimum alicastrum* ("ramon"). Otro elemento importante es *Cnidocolus chayamansa*. La porción del distrito zona costera muestra franjas de selva baja subcaducifolia cuyo elemento dominante es el árbol *Vitex gaumeri* ("ya'axnik") seguido de *Brosimum alicastrum*. Esta vegetación está en contacto con manglares, pantanos y ciénegas en las zonas de los humedales, donde abunda *Rhizophora mangle* y *Conocarpus erecta*. La flora acuática de la región NNE está constituida por *Thypha domingensis*, *Nymphaea ampla*, *Sagittaria lancifolia* y *Acrostichum danaefolium*. (Rzedowski, 1981).

4.3. Nohoch Hol, un cenote en el NNE de la Península de Yucatán.

El cenote Nohoch Hol se encuentra en el rancho "El Manatí", propiedad de Don Mateo Mejía Ojeda, a 9.6 km al norte de Tulum por la carretera federal 307, a 1 km selva adentro y aproximadamente a 4 km de la costa (Fig. 3).

Es un cenote circular con un diámetro promedio de 33 m, con paredes verticales. La diferencia entre la superficie del agua y el terreno circundante es de 1 m. La pared este presenta un volado de 7 m a menos de medio metro de la superficie del agua, la máxima profundidad del cenote es 17.8 m. El cenote está rodeado de elementos de

selva baja subcaducifolia, excepto en el costado este del cenote que es una explanada sin vegetación, que conecta con el camino de terracería que viene de la carretera. Dicho camino pasa por bancos de caliza que actualmente son explotados para la industria de la construcción. En el pasado se extraía agua del cenote mediante bombeo y una pipa, actualmente no se hace uso del cenote.

Tabla 1. Parámetros morfométricos del cenote Nohoch Hol

Diámetro promedio	33 m
Área	855 m ²
Volumen	15219 m ³
Volumen/Área	17.8 m
Profundidad máxima (Zmax)	17.8 m
Profundidad relativa (Zr)	54%
Profundidad media (Zm)	17.8 m



Fig.10 Nohoch Hol enero 2005.



Fig.11.Nohoch Hol julio 2005.



Fig. 12.Banco de material cerca de Nohoch Hol.



Fig.13 Bomba de agua en Nohoch Hol

5. ANTECEDENTES

5.1 Lagos meromícticos de México

La literatura existente sobre cuerpos de agua meromícticos tropicales es todavía escasa; este punto es particularmente cierto para México, en donde solo se han reportado dos casos de lagos meromícticos: Lago Isabela y Rincón de Parangueo.

5.1.1 Lago Isabela, Nayarit

Se encuentra en la isla volcánica Isabel a 32 km de la costa del estado de Nayarit en el Pacífico mexicano. El lago cráter es de forma casi circular con un diámetro de 270 m y profundidad máxima de 71.5 m La altura de las paredes del cráter protege al lago del viento lo que inhibe la mezcla por dicho factor (Alcocer *et al.* 1998). El lago Isabela es meromíctico, hipersalino y no presenta inversión térmica (Alcocer *et al.*1998)

5.1.2 Lago Rincón de Parangueo, Guanajuato.

Rincón de Parangueo es uno de los lagos maar (lagos cráter) del Valle de Santiago, Guanajuato México. Pertenece a un agrupamiento de siete conos volcánicos principales de los cuales Rincón de Parangueo, San Nicolás de Parangueo, La Alberca y Cíntoran son del tipo maars (Alcocer *et al.*, 2002).

La morfometría del lago tiende a ser triangular y la profundidad máxima es 7 m. Rincón de Parangueo es meromíctico, sódico hipersalino y heliotérmico. La capa profunda atrapa la energía solar incidente generando una inversión térmica (Alcocer *et al.*, 2002).

5.2 Cenotes meromícticos

En los cenotes de la Península de Yucatán la meromixis parece ser un fenómeno común, debido a la intrusión salina. Sin embargo ningún cenote meromíctico ha sido objeto de un estudio específico.

5.2.1 Cenote Grande y Cenote Chico, Quintana Roo.

Ambos cenotes se encuentran dentro de la propiedad de CALICA S.A de C.V. en el estado de Quintana Roo, unos 3 km adentro de la selva, y a una distancia de la costa de 4.4 km (Fig.3). La exploración de estos cenotes fue realizada en 1997 por Karst Environmental Services, Inc. a petición de la empresa, con el fin de explotar industrialmente al máximo la roca madre.

El Cenote Grande tiene una forma aproximadamente circular con 70 m de diámetro en la superficie del agua y la máxima profundidad del embalse es 36.6 m y alcanza la masa de agua marina (Skiles et al. 1997) (Anexo 1).

Por el otro lado, el Cenote Chico presenta una forma cercana a un óvalo de 70 m de largo por 52 m de ancho, en un eje norte-sur, la máxima profundidad es 31 m. (Skiles et al. 1997) (Anexo 1).

5.2.2 Cenote Angelita, Quintana Roo.

Se encuentra a 17 km al sur de Tulum por la carretera federal Cancún-Chetumal y está a 11.7 km de la costa (Fig.3). Es propiedad de Don Pablo Canche Balam, ejidatario de Tulum. Tiene uso comercial para buceo deportivo, pero también es utilizado para ceremonias de los mayas de Tulum. La morfometría es casi circular con 25-30 m de diámetro, con paredes verticales y una profundidad máxima de 60 m (Anexo 1).

5.2.3 Cenote Verde, Quintana Roo.

Se localiza a 9 km de Playa del Carmen, Quintana Roo, por la carretera 307 y 4 km dentro de la selva (Fig.3). La morfometría es casi circular con un diámetro de 90 m. La máxima profundidad del cenote es de 49 m (Wilson & Morris, 1994) (Anexo 1).

5.2.4 Cenote Xkolac

Se localiza en el centro-este del estado de Yucatán a 15 km al este de Izama (Fig.3). Es un cenote circular de 70 m de diámetro y 130 m de profundidad; la vegetación es densa alrededor. Es el cenote más profundo conocido. (Lazcano, 1995).

5.3 Cenotes holomícticos y lóuticos

Estudios detallados en el estado de Yucatán se han enfocado en un cenote lóutico, Xlaká (Díaz-Arce *et al.* 2001) y dos lénticos, Xtogil e Ixin-Ha (López –Adrian y Herrera-Silveira 1994, Díaz-Arce *et al.* 2001) (Fig.3), mientras en Q. Roo los cenotes que se han estudiado en detalle son lóuticos (Sánchez *et al.* 2002) (ver anexo1).

5.4 Meromixis en otras regiones kársticas del mundo

En la Península de Florida Jewfish Sink es una dolina litoral, subtropical (Garman y Garey, 2005) (Anexo2).

En las Bahamas Cottage Pond y Devil`s Hole son dolinas tierra adentro (Garvin,2005; Goehle y Store, 1978) (Anexo2).

En España el lago La Cruz es meromíctico biogénico (Rodrigo, 2001).

En Australia NW Bundera Sinkhole es una dolina subtropical en clima semidesertico (Humphreys, 1999) (Anexo3).

6. OBJETIVO

El objetivo de la presente investigación fue hacer una descripción limnológica del cenote meromítico Nohoch Hol, en Quintana Roo con el fin de contar con la primera caracterización física, química y microbiológica de un cenote meromítico que constituya una bases limnológicas, *línea base (baseline)* necesarias para desarrollar planes para el uso sustentable de cenotes meromíticos, condición limnológica que se presenta frecuentemente en los cenotes costeros de la Península de Yucatán.

Las metas planteadas en éste trabajo de investigación son:

- 1) Realizar el análisis del comportamiento vertical de las principales variables ambientales -- conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, pH, Eh y turbidez.
- 2) Realizar el análisis del comportamiento vertical de nutrientes - nitrógeno, fósforo y sílice.
- 3) Realizar el análisis del comportamiento vertical fitoplancton –densidad, contribución relativa e índices ecológicos- y bacterioplancton – densidad y morfotípos.
- 4) Recopilar información bibliográfica referente a cenotes de la Península de Yucatán, y sistemas acuáticos en otras regiones kársticas.
- 5) Partiendo del reconocimiento limnológico de un cenote léntico meromítico (Nohoch Hol) del NE de la Península de Yucatán y la información bibliográfica recopilada, comparar los resultados cuantitativa y/o cualitativamente con cenotes lénticos, lénticos meromíticos y lóticos del NW y NE de la Península y sistemas acuáticos en otras regiones kársticas, con el objetivo de encontrar similitudes y diferencias entre sistemas.

Debido a que el objetivo de la presente investigación es exploratorio y de naturaleza descriptiva no pone a prueba ninguna hipótesis.

7. METODOLOGÍA

La descripción limnológica constó de análisis del comportamiento vertical de las principales variables ambientales, nutrientes, fitoplancton y bacterioplancton.

Posteriormente se procedió al análisis de la información y la comparación con otros sistemas acuáticos.

Para la caracterización ambiental se evaluaron *in situ* (discretización = 1 m) las siguientes variables: conductividad (K_{25}), temperatura, oxígeno disuelto, pH, Eh y turbidez. Se ubicaron tres estaciones en las zonas centro (CE), noreste (NE) y suroeste (SW) del cenote, todas ellas en la zona limnética de Nohoch Hol (i.e., profundidad máxima 17.8 m, 12.5 m y 14.1 m, respectivamente) debido a que, por la forma cilíndrica característica de este tipo de cenotes, no presenta zona litoral.

Las variables arriba descritas se evaluaron con una sonda multiparamétrica de monitoreo de calidad de agua marca Hydrolab, modelo DS3 acoplado a un sistema de captura y almacenaje de información marca Hydrolab modelo SVR3.

La conversión de conductividad a salinidad se realizó en forma automática por el SVR3 de acuerdo al algoritmo incluido en el USGS Water Supply Paper 2311 (Hydrolab, 1991). El cálculo del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto se llevó a cabo en forma automática por el SVR3 considerando los datos de solubilidad del oxígeno proporcionados en el Standard Methods y la temperatura medida (1985 en Hydrolab, 1991).

En respuesta de la homogeneidad ambiental horizontal observada en el cenote, se seleccionó la estación central más profunda para llevar a cabo la determinación de nutrimentos (amonio – $N-NH_4^-$, nitritos – $N-NO_2^-$, nitratos – $N-NO_3^-$, nitrógeno inorgánico disuelto, , fósforo reactivo disuelto - $P-PO_4^-$, fósforo total y sílice reactivo – $Si-SiO_2^-$), así como la caracterización microbiológica (fitoplancton y bacterioplancton).

Para lo anterior, las profundidades de muestreo seleccionadas respondieron a la heterogeneidad vertical revelada por los perfiles ambientales -- estratificación. Estos indicaron la clara presencia de dos masas de agua, una superior dulceacuícola (i.e. STD < 3 g L¹) y la otra inferior salina (i.e. STD = 34-36 g L¹), separadas por una haloclina/quimioclina que se extiende de 9 a 12 m. Con base en lo anterior, se eligieron siete profundidades de muestreo que representaran las tres capas del cenote haciendo especial énfasis en la haloclina/quimioclina: 2, 8, 10, 11, 12, 13 y 16 metros.

Las muestras para nutrimentos y las biológicas fueron obtenidas directamente a las profundidades indicadas usando técnicas SCUBA. Se colectaron 500 ml de agua en botellas Nalgene para nutrimentos y fitoplancton y 75 ml de agua en frascos estériles de vidrio marrón para el bacterioplancton. Las muestras para fitoplancton fueron inmediatamente fijadas con acetato de lugol a una concentración final de 1% y para el bacterioplancton con formaldehído filtrado (0.22 µm) a una concentración final del 2%.

Las muestras para nutrimentos se preservaron en hielo y en oscuridad hasta su posterior análisis en el laboratorio siguiendo los protocolos descritos en Strickland y Parsons (1972), Parsons *et al.* (1984) y Stirling (1985).

El fitoplancton fue contado siguiendo el protocolo de Utermöhl (1958), usando un microscopio invertido Leica a 40X y 100X. Para asegurar significancia estadística se contaron un mínimo de 400 individuos de la especie más abundante para alcanzar un intervalo de confianza media de 10%.

El análisis de índices ecológicos -- diversidad Shannon-Wiener (H'), dominancia de por índice de Simpson, equitabilidad e índice de similitud entre ensamblados -- se realizó asumiendo que cada muestra de fitoplancton (2m, 8m, 10m, 11m, 12m, 13m, 16m) fuera un ensamblado. La formula utilizada para el índice de similitud fue $2c(a+b)^{-1}$. Donde "c" es el número de taxones compartidos entre comunidades, "a" es la riqueza de la comunidad 1, y "b" es la riqueza de la comunidad 2.

En el laboratorio, las muestras de bacterioplancton fueron teñidas con DAPI (4',6'-diamino-2-phenylindole) y 30ml fueron filtrados a través de filtros de membrana teñidos de negro, marca Millipore de 47mm de diámetro y 0.22µm de apertura de poro (Porter y Feig, 1980). Las bacterias fueron contadas usando un microscopio de epifluorescencia marca Zeiss a 1250X. Para asegurar significancia estadística se contaron un mínimo de 1000 bacterias para alcanzar un intervalo de confianza media de 6% (Wetzel y Likens, 1979).

Los valores de las variables ambientales, nutrientes, fitoplancton y bacterioplancton obtenidos fueron graficados contra los valores de profundidad respectivos, usando el programa Microsoft Office Excel 2003, para construir perfiles que describan los cambios en las variables en la columna de agua.

En el análisis de los datos se uso estadística descriptiva e inferencial. Para determinar si las variables presentaban diferencias significativas entre masas de agua se uso ANOVA y Kruskal-Wallis (Statistica6 y SigmaStat2.3). Se usaron pruebas para comparación múltiple Tukey y Dunn (Statistica6 y SigmaStat2.3).

La comparación con otros sistemas encontró dificultad en términos de la calidad y cantidad de información disponible, por lo tanto se hicieron comparaciones cualitativas y cuantitativas.

8. RESULTADOS

8.1 Variables ambientales

Nohoch Hol es un cenote meromítico ya que está estratificado principalmente por salinidad (fig.14 y 15). La masa de agua de fondo no se mezclan con el resto de columna, debido a su mayor densidad, la cual no puede ser igualada por la masa de agua superior y la mezcla total de la columna de agua está inhibida (ver Sección 3.2). El mixolimnion se extiende de la superficie hasta los 8.5 m-9 m de profundidad (fig.14 y 15). El monimolimnion abarca de 16 m hasta el fondo (fig.14 y 15). Finalmente, la masa de agua intermedia donde se presenta la haloclina, también muestra las clinas de todas las demás variables, por lo cual es más adecuado denominarla quimiolimnion. El quimiolimnion abarca de los 8.5-9 m a los 16 m (fig.14). El promedio del mixolimnion es 8.75 m y el monimolimnion tiene 1.8 m, en tanto la zona de transición tiene, en promedio, 8.25 m.

Salinidad y conductividad

El mixolimnion es una masa de agua dulce (i.e. $STD \leq 3 \text{ g L}^{-1}$), menos densa, con un promedio de $n= 56$, $5.04 \pm 0.43 \text{ mS cm}^{-1}$ ($n= 56$, $2.77 \pm 0.43 \text{ g L}^{-1}$). Ésta "flota" sobre una masa de agua con salinidad y densidad intermedia, que es la haloclina, cuyo promedio es de $n= 32$, $41.65 \pm 11.84 \text{ mS cm}^{-1}$ ($n= 32$, $25.5 \pm 9.82 \text{ g L}^{-1}$), y va de 8.5 m a 15.5 m. El monimolimnion muestra la mayor conductividad y salinidad con $n= 3$, $55.09 \pm 0.11 \text{ mS cm}^{-1}$ ($n= 3$, $36.6 \pm 0.09 \text{ g L}^{-1}$), asociado a una mayor densidad y se extiende únicamente en la porción central del cenote desde los 15.5 m y hasta el fondo. El monimolimnion no se alcanza en los perfiles NE y SW por su menor profundidad.

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.22) $H=64.331$ $p < 0.001$, $n=91$, El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $Q=3.899$ $p < 0.05$, y también del monimolimnion $Q= 1.064$ $p < 0.05$. En tanto no existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $Q=7.465$ $p > 0.05$

Temperatura

El mixolimnion muestra un incremento de la temperatura de 25°C en la superficie hasta 26.7°C en el techo del quimiolimnion, revelando una inversión térmica (Fig.16). El incremento en la variable muestra una tendencia escalonada, hasta los 8 m, lo que tal vez sugiere la ocurrencia de estratificaciones secundarias en el mixolimnion inducidas por periodos alternados de viento-enfriamiento y calma-calentamiento que generan estratificaciones y mezclas sucesivas con alcance diferencial de profundidad tal y como lo menciona Lewis (1973). A 8 m la termoclina se aprecia con mayor claridad en el perfil aumentando de 25.7°C hasta el máximo 26.7°C, temperatura que se alcanza en el interior del quimiolimnion a los 10 m (Fig.16).

La temperatura en el quimiolimnion continúa aumentando alcanzando los valores máximos de 26.5 °C en NE, de 26.7 °C en CE y 26.5 °C en SW, a 10.8 m, 10.5 m y 9.5 m, respectivamente. Por debajo del máximo de temperatura, se da un descenso constante con la profundidad, hasta los 14 m con un valor de 26°C.

El monimolimnion es térmicamente homogéneo con temperatura de 26°C, condición que se extiende desde los 14 m hasta el fondo del cenote.

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.23) $H=58.59$ $p<0.001$, $n=91$. El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $Q=7.510$ $p<0.05$, y también del monimolimnion $Q= 2.396$ $p<0.05$. En tanto no existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $Q=0.425$ $p>0.05$

Oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de OD

El mixolimnion es una masa de agua bien oxigenada. En la superficie del centro del cenote se tiene la mayor concentración con 7.3 mg L⁻¹ y hacia los lados es ligeramente menor 6.3 mg L⁻¹ NE y 6.9 mg L⁻¹ SW (Fig.17). Por debajo de los máximos de oxígeno superficiales, los tres perfiles muestran una caída drástica en los primeros dos metros reduciéndose aproximadamente en un 50% (Fig.18), a menos de 4 mg L⁻¹ constituyendo una clara oxiclina en el mixolimnion. De los dos metros a la base del mixolimnion es una zona hipóxica (i.e. < 3 mg L⁻¹), sin embargo se distinguen dos

fases. La primera de los dos metros hasta aproximadamente seis metros continúa el descenso de forma escalonada. La segunda de 6 m a la base del mixolimnion, al menos en los perfiles CE y SW, la concentración de OD se estabiliza en $n= 6, 1.56 \pm 0.06 \text{ mg L}^{-1}$ ($n= 6, 19.6 \pm .74\%$) y $n= 5, 0.98 \pm 0.04 \text{ mg L}^{-1}$ ($n= 5, 13.1 \pm 0.75\%$).

En el quimiolimnion los tres perfiles entre 9 y 9.5 m muestran una oxiclina (oxiclina del quimiolimnion) cuya máxima profundidad en todos los casos es 10 m (Fig. 17 y 18). Este nuevo descenso lleva a la columna de agua de la hipoxia (i.e. $< 3 \text{ mg L}^{-1}$) a la anoxia (i.e. 0 mg L^{-1}). Finalmente, en el monimolimnion el oxígeno disuelto no muestra cambios y permanece anóxico.

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.24) $H=66.386$ $p=<0.001$, $n=91$. El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $Q=7.711$ $p=<0.05$, y también del monimolimnion $Q= 2.940$ $p=<0.05$. En tanto no existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $Q=0.034$ $p=>0.05$

pH

En el mixolimnion, en superficie y hasta 1 m, los valores de pH son ligeramente básicos (7.6-7.5); sin embargo, por debajo de esta profundidad hay un cambio brusco de media unidad de pH a valores cercanos a la neutralidad (7.1-6.8), mismos que se mantienen hasta la base del mixolimnion (Fig. 19).

En el quimiolimnion se da un cambio brusco de 6.8 a 7.4 que aumenta nuevamente el pH, alcanzando picos de 7.15 (NE), 7.24 (SW) y 7.41 (CE). Seguido a este incremento se presenta un decremento, igualmente brusco, que desciende hasta valores ligeramente ácidos (6.71 unidades a una profundidad de 12 m). Por debajo de los 14 m se registra un nuevo cambio brusco en el perfil que regresa a valores neutros (6.7-7.1) a una profundidad de 15.5 m. Finalmente, el monimolimnion muestra un ligero cambio de 7 a 7.1 pero dentro de valores cercanos a la neutralidad (6.9-7.1).

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.25) $H=17.419$ $p=<0.001$, $n=91$. El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $Q=3.665$

$p = <0.05$, sin embargo no difiere del monimolimnion $Q = 1.463$ $p = >0.05$. En contraste existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $Q = 2.786$ $p = <0.05$

Potencial de Óxido-Reducción

El potencial de óxido-reducción o potencial redox (Eh) se comportó en forma homogénea a lo largo del mixolimnion (Fig.20). Sin embargo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tres perfiles del dicha masa de agua $H = 49.939$ $p = < 0.001$. El NE es muestra diferencia estadística con el CE $Q = 7.056$ $p = <0.05$ y también con el SW $Q = 3.528$, el CE y el SW también muestran diferencia $Q = 3.528$ $p = 0.05$. De manera general, el valor promedio más alto está en el perfil NE ($n = 18$, 361 ± 5.2 mV), seguido del SW ($n = 17$, 312 ± 5.2 mV) y finalmente el CE ($n = 18$, 283 ± 5.4 mV).

En el quimiolimnion se presenta un gradiente fuerte, disminuyendo hasta valores de -118 mV en la base. En esta zona también se presentaron diferencias estadísticamente significativa entre los perfiles $H = 10.207$ $p = 0.006$. Sin embargo únicamente entre el NE y el CE hay diferencia estadística $Q = 3.178$ $p = <0.05$, el NE con el SW no muestra diferencia ($Q = 1.806$ $p = >0.05$) y el CE con el SW tampoco difiere ($Q = 1.348$ $p = >0.05$). Por debajo de 10 m de profundidad el descenso del potencial se da con menor pendiente hasta el límite inferior del quimiolimnion. En el monimolimnion, se registran $n = 3$, -111 ± 3.5 mV pero en términos generales se puede decir que es una masa de agua homogénea.

Se encontraron diferencias significativas entre las masas de agua (Fig.26) $H = 8.206$ $p = <0.001$, $n = 91$. El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $Q = 6.543$ $p = <0.05$, y también del monimolimnion $Q = 3.270$ $p = <0.05$. En tanto no existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $Q = 0.788$ $p = >0.05$

Turbidez

Los perfiles de turbidez muestran que por arriba y por debajo del quimiolimnion las masas de agua presentan una turbidez menor y similar entre si (Fig.21). El mixolimnion es una masa de agua con un promedio de $n = 58$, 8.5 NTU ± 1.8 , sin

embargo existen diferencias horizontales, principalmente de la zona NE respecto de las otras dos zonas (el NE difiere estadísticamente del CE $Q=5.097$ $p=<0.05$, así como del SW $Q= 5.488$ $p=<0.05$, en contraste el CE y el SW no muestran diferencia significativa $Q=0.391$ $p=>0.05$). La turbidez promedio para cada perfil es $n= 19$, 11 NTU ± 0.1 para NE, $n= 18$, 7.1 NTU ± 0.5 en SW y $n= 19$, 7.1 NTU ± 0.2 en CE, siendo el NE el de mayor turbidez.

El quimiolimnion presenta un pico de turbidez entre 9-9.5 y 11.5 m. Por debajo de los 12.5 m y hasta la base del quimiolimnion, la turbidez no cambia y muestra un promedio de $n= 29$, 6.5 NTU ± 0.3 . Dentro del quimiolimnion existen diferencias con significancia estadística entre los perfiles (el NE difiere estadísticamente del CE $Q=2.512$ $p=<0.05$, así como del SW $Q= 2.924$ $p=<0.05$, en contraste el CE y el SW no muestran diferencia significativa $Q=0.672$ $p=>0.05$).

El monimolimnion presentó un valor promedio de $n= 4$, 6.2 NTU ± 0.04 .

Las diferencias observadas entre las tres masas de agua son significativas $H=8.206$, $p=0.0165$, $n=91$ (Fig.27). El mixolimnion no es significativamente diferente del quimiolimnion $Q=0.327$ $p=>0.05$, sin embargo si lo es respecto del monimolimnion $Q=2.863$ $p=<0.05$. En tanto entre quimiolimnion y monimolimnion también hay diferencia $Q=2.686$ $p=<0.05$

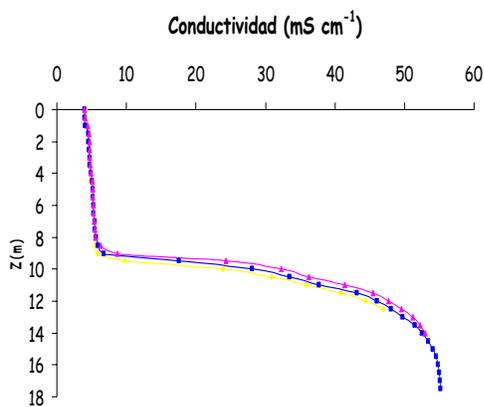


Fig.14. Perfiles de conductividad (mS cm⁻¹)

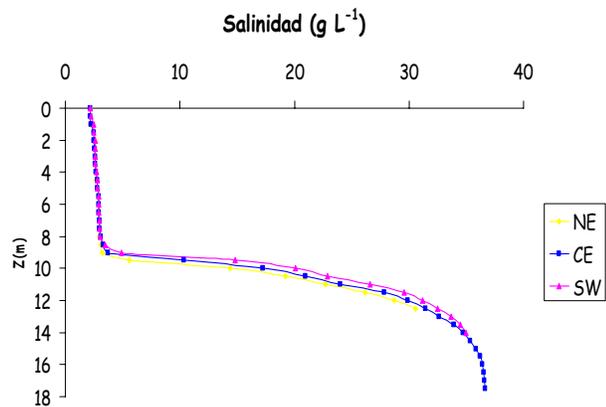


Fig. 15. Perfiles de salinidad (g L⁻¹)

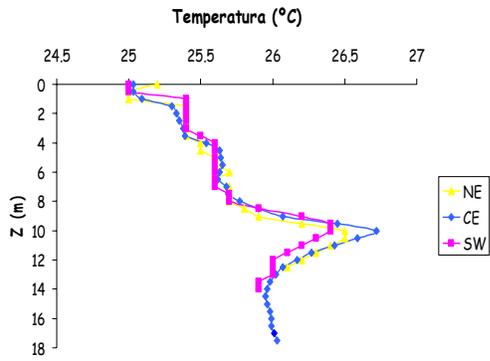


Fig. 16. Perfiles de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

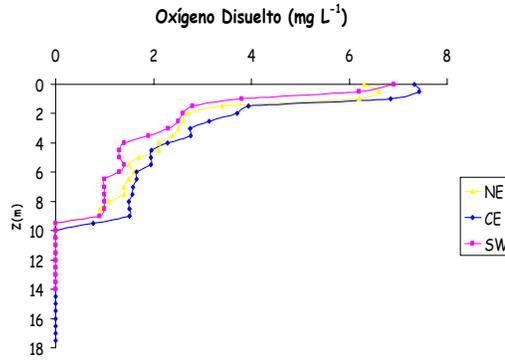


Fig. 17. Perfiles de oxígeno disuelto (mg L^{-1})

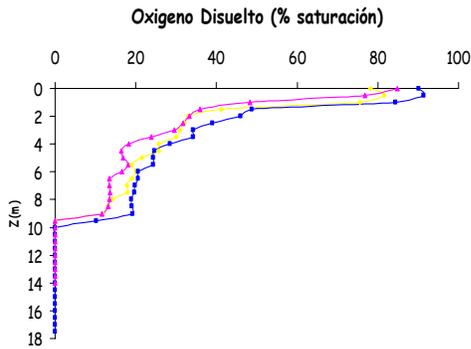


Fig. 18. Perfiles del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en (%)

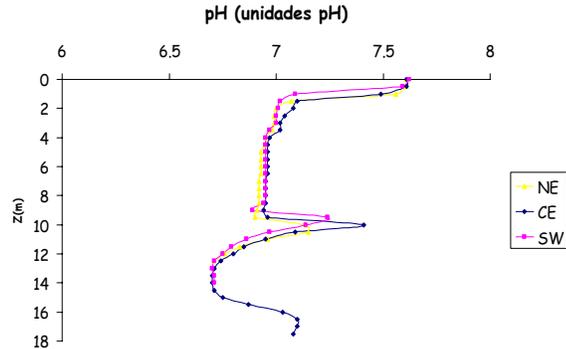


Fig. 19. Perfiles de pH (unidades de pH)

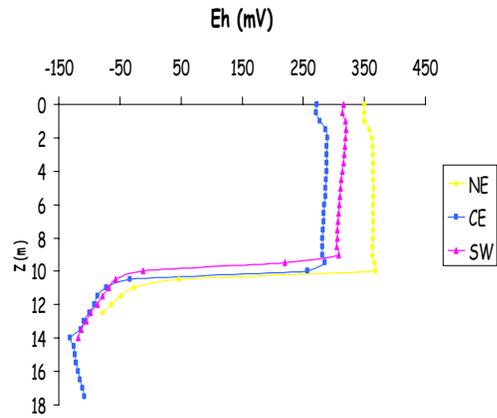


Fig. 20. Perfiles de potencial redox (mV)

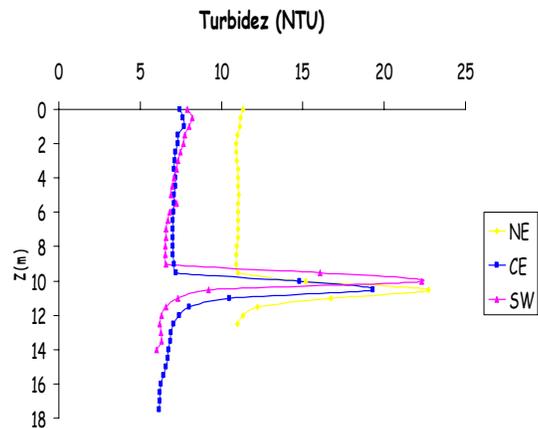


Fig. 21. Perfiles de turbidez (NTU)

Nota: Z = profundidad. Estaciones noreste = NE, centro = CE y suroeste = SW del cenote Nohoch Hol.

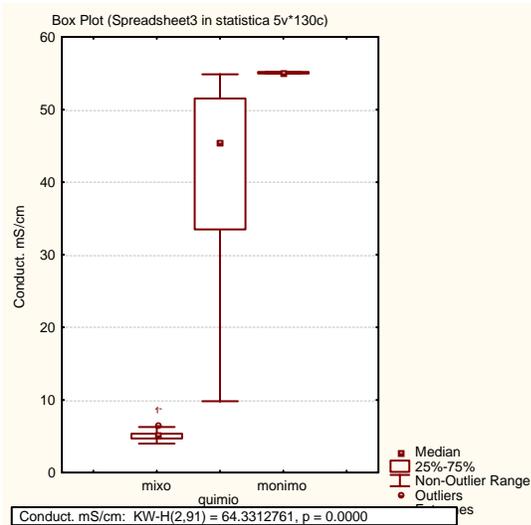


Fig. 22. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para conductividad.

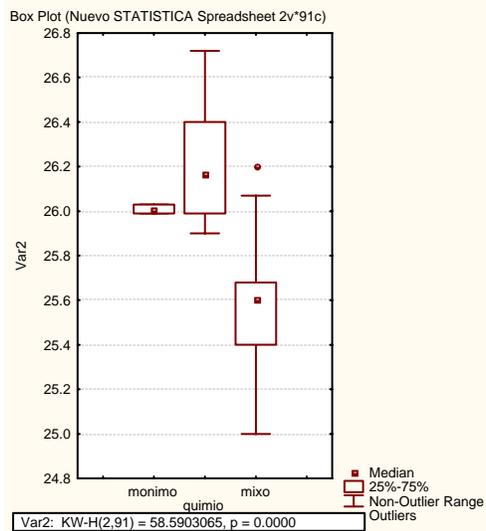


Fig. 23. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para temperatura.

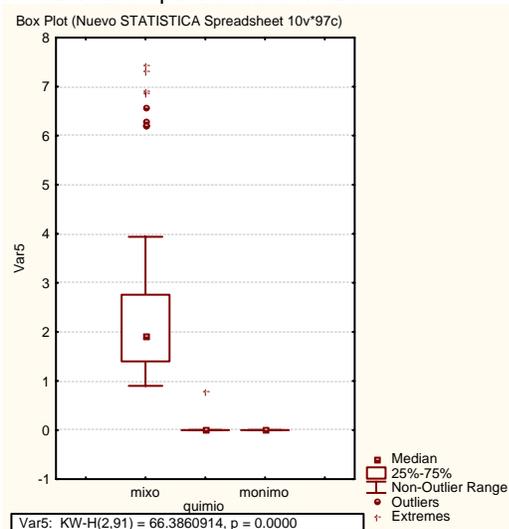


Fig.24. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para oxígeno disuelto.

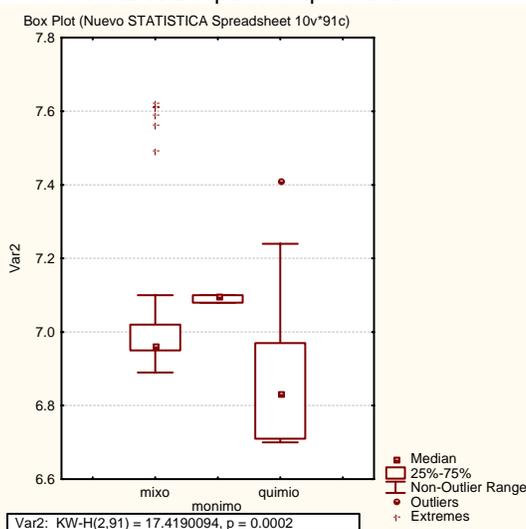


Fig. 25. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para pH.

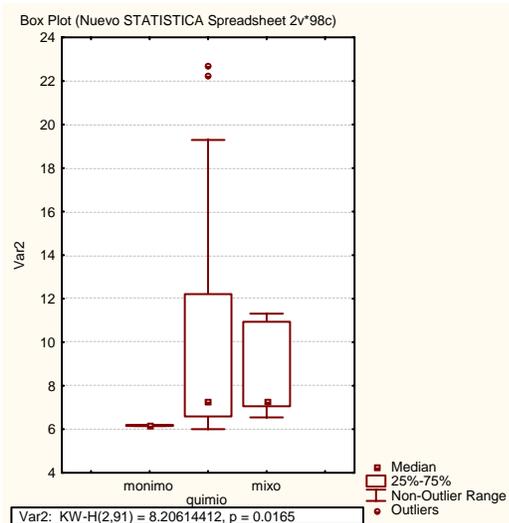


Fig. 26. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para potencial redox.

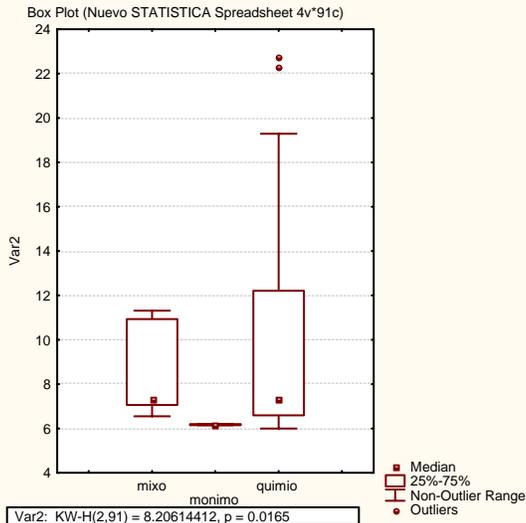


Fig. 27. Gráfico de bigotes de caja de la para prueba Krusal-Wallis para turbidez.

8.2 Nutrientes

El nitrato es la forma de nitrógeno más abundante en el mixolimnion (34.8 μM) mientras que el amonio (16.7 μM) lo es tanto en el quimolimnion como en el monolimnion (fig.28). El nitrito como forma intermedia entre nitrato y amonio presenta concentraciones reducidas (0.11-0.67 μM), pero con un máximo cerca de la base del mixolimnion (fig.28). El fósforo en general es escaso y en el mixolimnion esta por debajo del límite de detección (0.02 μM). El sílice es abundante en el quimolimnion (364.2 μM).

N-NH₄

El N-NH₄ en superficie registra la menor concentración en el perfil con 0.8 μM y mantiene este valor hasta 2 m de profundidad, profundidad a partir de la cual comienza a aumentar progresivamente hasta la base del mixolimnion (9 m) donde registra un valor de 7.486 μM (fig.28). En el quimolimnion se encuentran máximos en 10 m y 12 m ya que el perfil tiene un forma bimodal (fig.28). A los 10 m de profundidad alcanza 12.5 μM , que en el perfil aparece como el primer pico, coincidente con una disminución de nitrato (2.0 μM). Por debajo de esta profundidad se registra un decremento hasta 6.9 μM (11 m), coincidente con un máximo de nitrato (15.7 μM) (fig.28). Más abajo, a 12 m se observa un segundo pico de mayor magnitud con 16.7 μM . A partir del segundo máximo se registra la caída progresiva en relación a la profundidad en 13 m con 13.6 μM y en la base del quimolimnion con 10.749 μM . La tendencia continúa en el monolimnion hasta alcanzar 9.284 μM . Las concentraciones promedio y desviación estándar de N-NH₄ en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch se muestran en la tabla 2.

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.29) $H=13.05$ $p=0.001$. El mixolimnion difiere significativamente del quimolimnion $Q=3.41$ $p= <0.05$. En tanto no existe diferencia estadística con el monolimnion $Q= 1.667$ $p=>0.05$, ni entre quimolimnion y monolimnion $Q=0.574$ $p=>0.05$.

N-NO₂

El N-NO₂ es la forma de nitrógeno presente en menor cantidad 0.1-0.7 µM y, de forma similar al patrón del amonio (fig.28), tiene valor constante de la superficie hasta los dos metros en la columna de agua 0.2 µM, profundidad en la que empieza a aumentar alcanzando el máximo a 8 m con 0.7 µM máxima concentración para ésta forma de nitrógeno (fig.28). En el quimiolimnion continúa el decremento de 0.7 µM a 0.6 µM que se registra por debajo del máximo (0.7 µM) cerca de la base del mixolimnion y a 12 m alcanza 0.1 µM concentración mínima del nutrimento. A partir de los 13 m hay un ligero y progresivo aumento hasta el monimolimnion, en forma contraria a lo observado para las otras formas de nitrógeno, a pesar de mantenerse en concentraciones muy bajas 0.2 µM. Las concentraciones promedio y desviación estándar de N-NO₂ en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch se muestran en la tabla 2.

No existen diferencias estadísticas entre las tres masas de agua $F= 0.7$ $p=0.5$ (Fig.30).

N-NO₃

El N-NO₃ de la superficie hasta 8 m tiene una concentración prácticamente constante de 34-35 µM, disminuyendo ligeramente de 34.8 a 33.9 µM (fig.28). En la transición del mixolimnion al quimiolimnion, decae drásticamente alcanzando a los 10 m una concentración mínima (2.0 µM), En el interior del quimiolimnion a los 11 m aumentar hasta 15.7 µM (fig.13). Por debajo de 11 m, el nitrato disminuye drásticamente hasta 0.1 µM en la base del quimiolimnion 16 m (fig.28). En el monimolimnion, de 16 m al fondo, la concentración es de 0.1 µM. Las concentraciones promedio y desviación estándar de N-NO₃ en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch Hol se muestran en la tabla 2.

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.31) $H=13.966$ $p=<0.001$, El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $Q=2.9$ $p=<0.05$, y también del monimolimnion $Q= 2.9$ $p=<0.05$. En tanto no existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $Q=0.918$ $p=>0.05$

Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID)

El perfil del nitrógeno inorgánico disuelto (NID) refleja principalmente la distribución del nitrato, que es la forma más abundante. De 0 a 2 m el valor es constante en 40.4 μM , para alcanzar a los 8 m un máximo de 48.8 μM (fig.28), sin embargo a partir de los 8 m comienza una disminución. La disminución en el NID en la parte inferior del mixolimnion continúa en el quimiolimnion de forma tal que a los 10 m el NID disminuye hasta 22.4 μM . A los 11 m muestra un aumento, asociado al máximo de nitrato (15.7 μM), con 24.6 μM . A los 12 m hay un aumento en el NID (34.4 μM) asociado ahora al máximo de amonio (16.7 μM), forma dominante bajo el mixolimnion (fig.28). Por debajo este pico el NID la concentración decrece hasta la base del quimiolimnion con 15 m 21.2 μM . En el monimolimnion continúa la tendencia a la baja de 21.2 μM a 20.5 μM . Las concentraciones promedio y desviación estándar de NID en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch se muestran en la tabla 2.

Se encontraron diferencias significativas entre las capas (Fig.32) $F=39.7$ $p<0.001$. El mixolimnion difiere significativamente del quimiolimnion $q=12.0$ $p<0.05$, y también del monimolimnion $q=9.7$ $p<0.05$. En tanto no existe diferencia estadística entre quimiolimnion y monimolimnion $q=1.62$ $p=0.5$

Fósforo Reactivo Disuelto (FRD)

El *fósforo reactivo disuelto (FRD)* de 0 a 8 m está en concentraciones por debajo del rango de detección para las técnicas analíticas utilizadas en esta investigación (0.02 μM). Sin embargo, en la base del mixolimnion, a los 9 m, se detecta con 0.07 μM . A los 10 m la concentración aumenta a 0.11 μM generando un pico que coincide con el del amoniaco (fig.28), para volver a disminuir a los 11 m hasta 0.02 μM . A partir de esta profundidad, comienza a aumentar nuevamente hasta los 13 m en donde se presenta la máxima concentración con 0.13 μM (fig.33). El FRD por debajo del pico profundo del perfil muestra un decremento sucesivo hasta el monimolimnion con 0.09 μM . Las concentraciones promedio y desviación estándar de FRD en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch se muestran en la tabla 2.

Se encontraron diferencias significativas entre las masas de agua $H=13.08$ $p=0.001$ (Fig.34). El mixolimnion muestra diferencia estadística del quimiolimnion $Q=3.192$ $p<0.05$, pero no con el monolimnion $Q=1.886$ $p>0.05$. Tampoco existe diferencia entre quimiolimnion y monolimnion $Q=0.229$ $p>0.05$.

P-TOTAL

De 0 a 2 m el fósforo total es bajo y homogéneo con $0.01 \mu\text{M}$ (fig.33). A los 9 m comienza a aumentar hasta una concentración es $0.34 \mu\text{M}$ lo que genera un pico en el perfil (fig.33). Después del pico, se presenta una disminución brusca hasta $0.249 \mu\text{M}$ a los 11 m para que a los 12 m vuelva a aumentar hasta mostrar un segundo pico a los 13 m con $0.61 \mu\text{M}$, que representa la máxima concentración del perfil. Ambos máximos a los 10 y 13 m coinciden con los máximos de FRD y le dan la misma forma bimodal. El fósforo total decae a partir de los 14 m y hasta el monolimnion con $0.44 \mu\text{M}$. Las concentraciones promedio y desviación estándar de P-Total en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch Hol se muestran en la tabla 2.

Se encontraron diferencias significativas entre las masas de agua $H=12.69$ $p=0.001$ (Fig.35). El mixolimnion muestra diferencia estadística del quimiolimnion $Q=3.265$ $p<0.05$, pero no con el monolimnion $Q=2.176$ $p>0.05$. Tampoco existe diferencia entre quimiolimnion y monolimnion $Q=0.0$ $p>0.05$.

Si-SiO₂

El Si-SiO₂ como los otros nutrientes mantiene una concentración homogénea en los primeros dos metros, en este caso con $90.9 \mu\text{M}$ (fig.36). Por debajo de esta profundidad, el sílice aumenta hasta alcanzar $101.9 \mu\text{M}$ a los 8 m. En el quimiolimnion el SiO₂ es abundante y tiene un perfil bimodal (fig.36). A los 10 m muestra un pico de $330.9 \mu\text{M}$, el cual coincide con los picos de dicha profundidad de las formas del fósforo y amonio. Por debajo del máximo hay una disminución hasta alcanzar a los 12 m una concentración es $264.8 \mu\text{M}$; posteriormente, a los 13 m registra un segundo pico que representa la concentración máxima en la columna de agua con $364.2 \mu\text{M}$ (fig.36), que coincide con el máximo de las formas del fósforo. Por debajo del máximo, la

concentración decae con la profundidad hasta el monimolimnion en donde alcanza 160.130 μM . Las concentraciones promedio y desviación estándar de Si-SiO₂ en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch Hol se muestran en la tabla 2.

Se encontraron diferencias significativas entre las masas de agua $H=13.02$ $p=0.001$ (Fig.37). El mixolimnion muestra diferencia estadística del quimiolimnion $Q=3.569$ $p<0.05$, pero no con el monimolimnion $Q=1.393$ $p>0.05$. Tampoco existe diferencia entre quimiolimnion y monimolimnion $Q=0.97$ $p>0.05$.

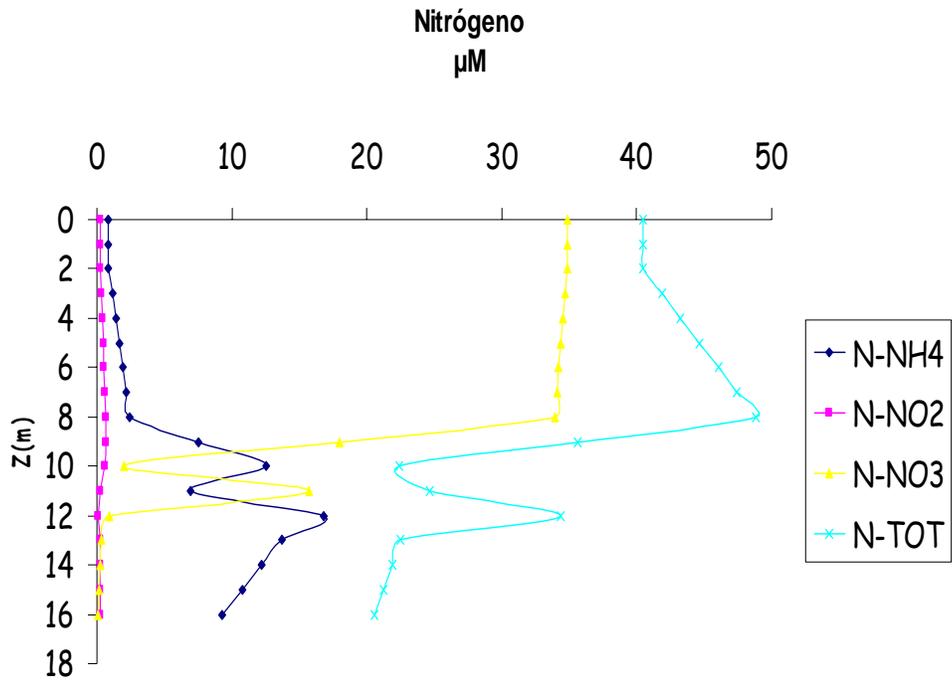


Fig. 28. Perfiles de la concentración de las distintas formas de nitrógeno (μM) del cenote Nohoch Hol. (z = profundidad).

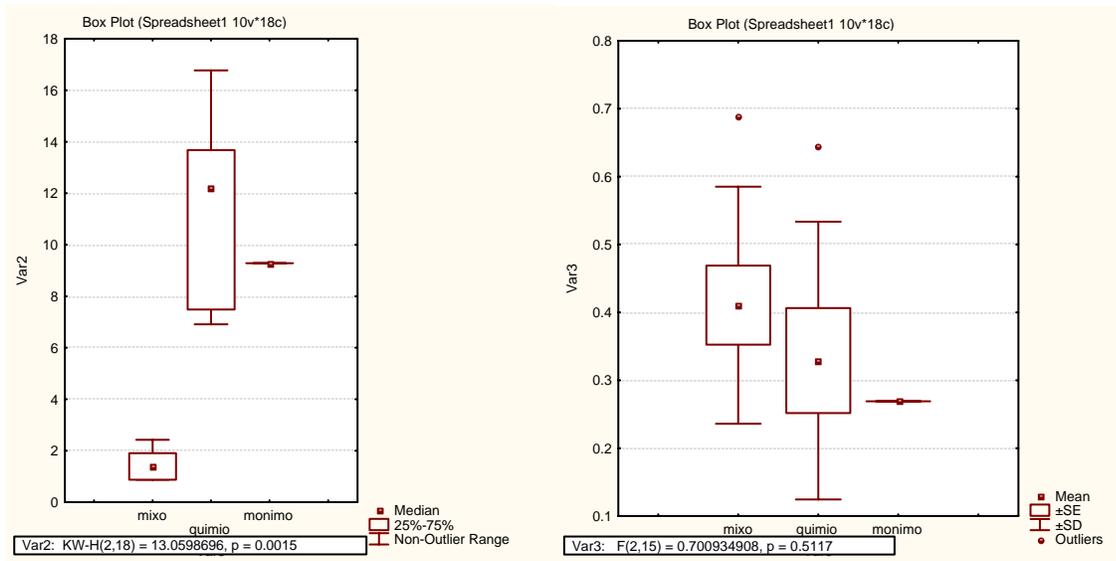


Fig. 29. Gráfico de bigotes de caja de la prueba para Kruskal-Wallis amoníaco.

Fig. 30. Gráfico de bigotes de caja de la prueba ANOVA para nitrato.

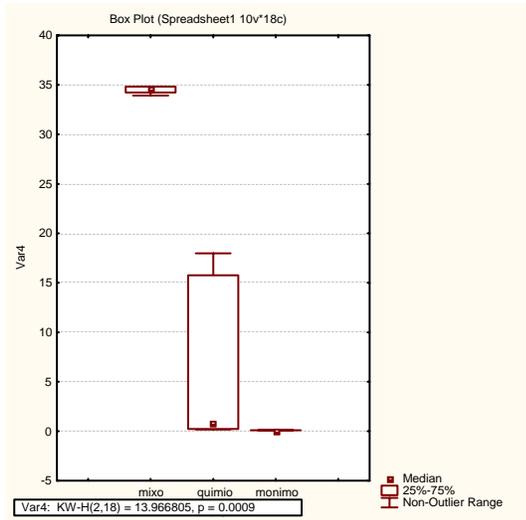


Fig. 31. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para nitrato.

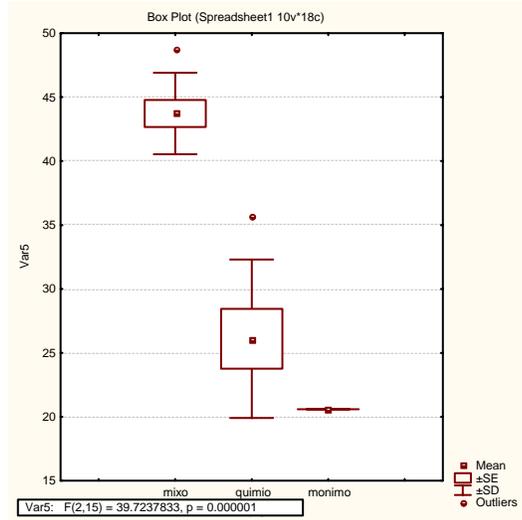


Fig. 32. Gráfico de bigotes de caja de la prueba ANOVA para N-Total

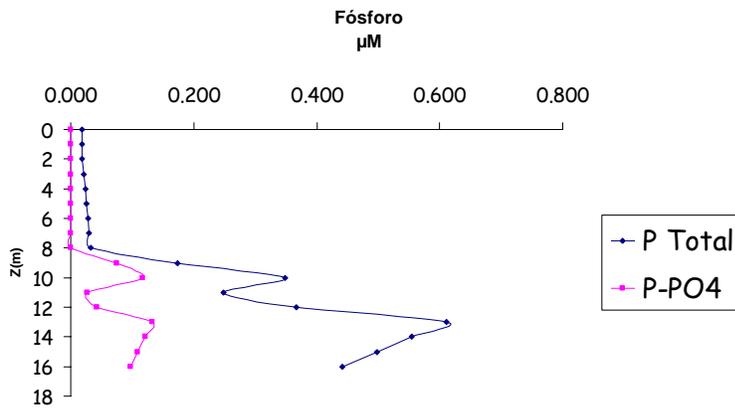


Fig. 33. Perfil de concentración de las distintas formas de fósforo (μM) del cenote Nohoch Hol. (z = profundidad). Uniformiza con demás gráficas.

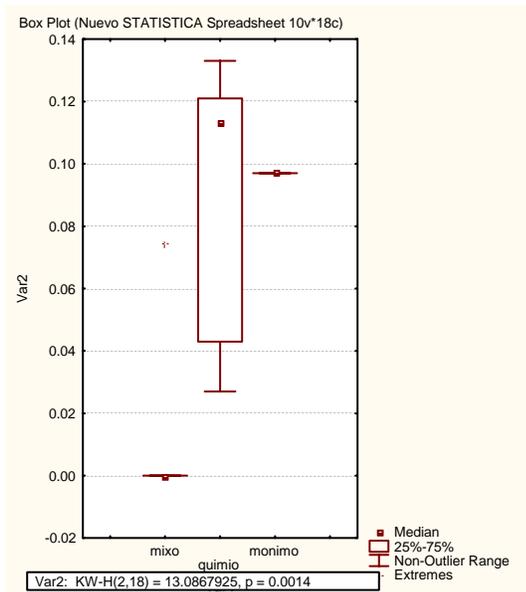


Fig. 34. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para FRD.

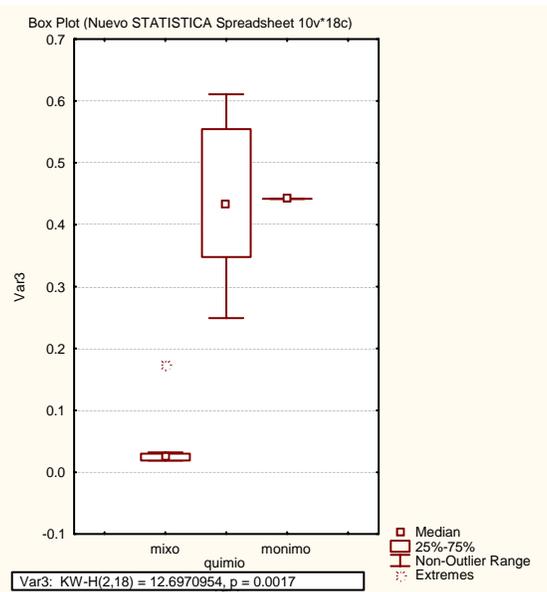


Fig. 35. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para P-Total.

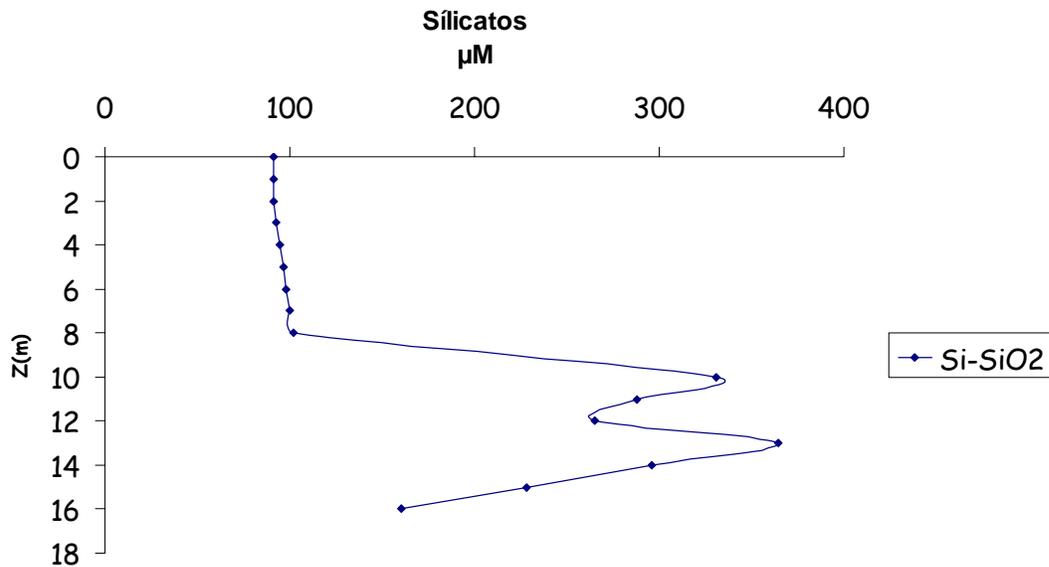


FIG.36. Perfil de la concentración de silicatos (μM) del cenote Nohocho Hol. (Z = profundidad).

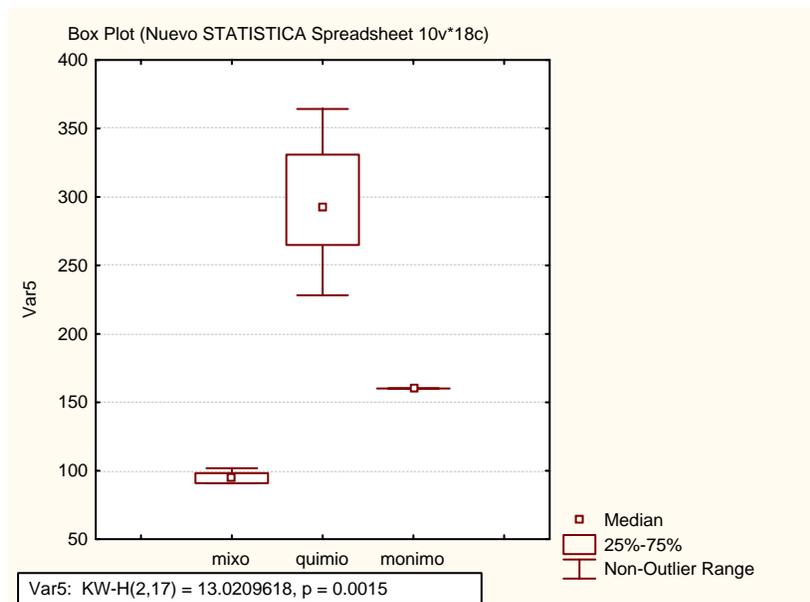


Fig. 37. Gráfico de bigotes de caja de la prueba Krusal-Wallis para sílice.

Tabla 2. Concentraciones (μM) promedio (X) y desviación estándar (SD) de nutrientes en cada una de las tres masas de agua del cenote Nohoch Hol. Mixolimnion=Mix, $n=3$, Quimiolimnion=Qui, $n=4$, Monimolimnion=Mo, $n=1$. Nota. Debajo del límite de detección=dld

	NH_4		NO_2		NO_3		NID		FRD		P-T		SiO_2	
	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD
Mix	1.3	0.8	0.3	0.2	34.5	0.5	43.2	4.8	dld	--			94.6	6.3
Qui	12.4	4.1	0.2	0.2	4.7	7.3	26.0	5.6	0.0	0.0	0.3	0.1	312.0	44.2
Mo	9.2	0	0.2	0	0.1	0	20.5	0	0	0	0.4	0	160.1	0

8.3 Fitoplancton

COMPOSICIÓN Y DENSIDAD

En Nohoch Hol se encontraron 11 taxa de fitoplancton (Tabla 3), constituidos por tres especies de clorofitas (algas verdes), seis de bacilariofitas (diatomeas) y dos de cianofitas (cianobacterias).

Tabla 3. Taxa de fitoplancton registrados en el cenote Nohoch Hol.

CLOROFITAS	BACILARIOFITAS	CIANOFITAS
<i>Chlorella</i>	<i>Cyclotella</i>	<i>Chroococcus</i>
<i>Monoraphidium</i>	<i>Navicula</i> sp. 1	<i>Phormidium</i>
<i>Scenedesmus</i>	<i>Navicula</i> sp. 2	
	<i>Nitzchia</i> sp. 1	
	<i>Nitzchia</i> sp. 2	
	<i>Nitzchia</i> sp. 3	

Los organismos del fitoplancton fueron encontrados desde 2 m hasta una profundidad de 11 m; por debajo de ésta no se encontró este tipo de organismos (Tabla 4). El número mayor de organismos se ubicó a los 10 metros (20.7×10^6 cel L⁻¹), con un predominio (93.3%) de *Scenedesmus* (Tabla 5)

Tabla 4. Conteos de organismos fitoplanctónicos en el perfil vertical del cenote Nohoch Hol. (Mix = mixolimnion, Qui = quimiolimnion, Mon = monimolimnion).

Profundidad (m)	Fitoplancton (cel L ⁻¹)	%	Capa
2	486,439	2.2	Mix
8	700,569	3.2	Mix
10	20,728,754	94.3	Qui
11	58,381	0.3	Qui
12	0	0	Qui
13	0	0	Qui
16	0	0	Mon

Los taxa más importante por su abundancia por profundidad fueron los siguientes. A los 2 metros: *Chlorella* (clorofita) y *Cyclotella* (diatomea); a los 8 metros:

Cyclotella (diatomea) y *Chlorella* (clorofita); a los 10 metros: *Scenedesmus* (clorofita) y *Cyclotella* (diatomea); y a los 11 metros: *Cyclotella* (diatomea) (Tabla 5).

Tabla 5. Contribución en porcentaje, con base en la abundancia, de los diferentes taxa de fitoplancton por profundidad en el cenote Nohoch Hol.

Taxa	Profundidad			
	2m	8m	10m	11m
Clorofitas:				
<i>Chlorella</i>	67	20	0	0
<i>Monoraphidium</i>	2.2	6.9	0	1.7
<i>Scenedesmus</i>	0	0	99.35	0
%	69.2	26.9	99.35	1.7
Bacilariofitas:				
<i>Cyclotella</i>	18.2	61.7	0.6	90
<i>Navicula</i> sp. 1	8.2	5.9	0.03	6.7
<i>Navicula</i> sp. 2	4.4	0	0.005	0
<i>Nitzchia</i> sp. 1	0	0.2	0.005	0
<i>Nitzchia</i> sp. 2	0	0	0.005	0
<i>Nitzchia</i> sp. 3	0	0	0	1.6
%	30.8	67.8	0.645	98.3
Cianofitas:				
<i>Chroococcus</i>	0	5.3	0	0
<i>Phormidium</i>	0	0	0.005	0
%	0	5.3	0.005	0

La contribución relativa muestra que en la parte superior (2 m) dominan las Chlorophytas (69.2%), en la parte media (8 m) la dominancia es de Bacillariophytas (67.8%) y en la base del mixolimnion dominan nuevamente las Chlorophytas (99.35%). La densidad del fitoplancton en el mixolimnion aumenta con la profundidad (fig. 38). La densidad más alta se registra a los 10 m con el predominio de *Scenedesmus* (20.7×10^6 cel L⁻¹) (Fig.39). Dentro del quimiolimnion el fitoplancton únicamente se encuentra hasta los 11 m, con dominancia de Bacillariophytas, donde el fitoplancton presenta su menor

densidad (5.8×10^4 cel L^{-1}). El resto del quimiolimnion así como el monimolimnion carecen de fitoplancton.

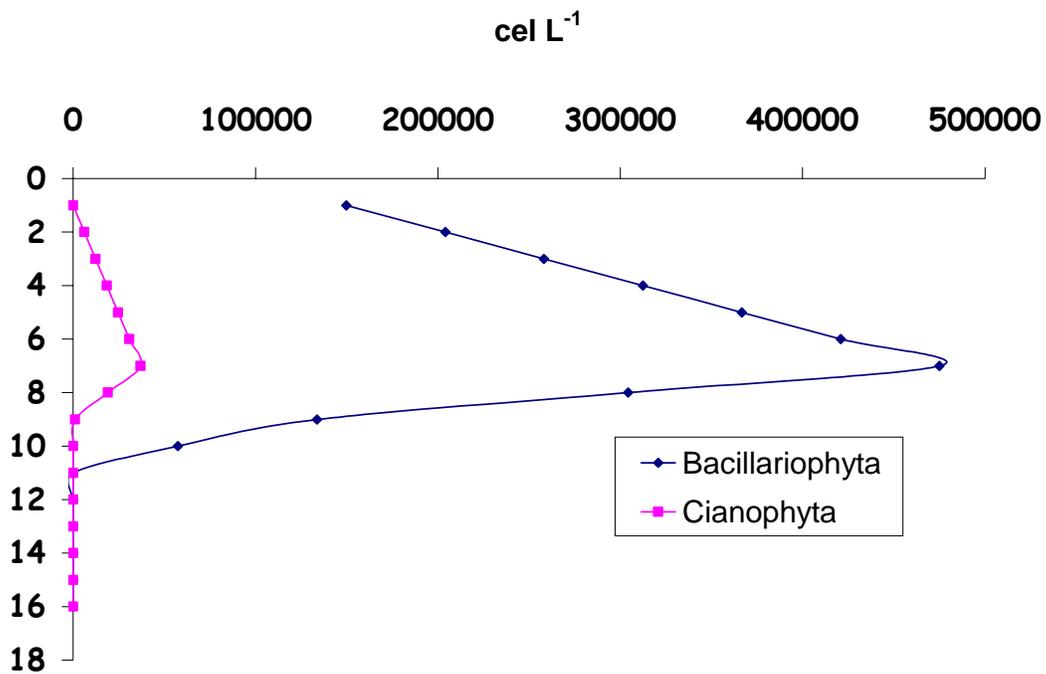


Fig. 38. Distribución vertical de la densidad de bacilariofitas y cianofitas ($cel L^{-1}$) del cenote Nohoch Hol. (z = profundidad).

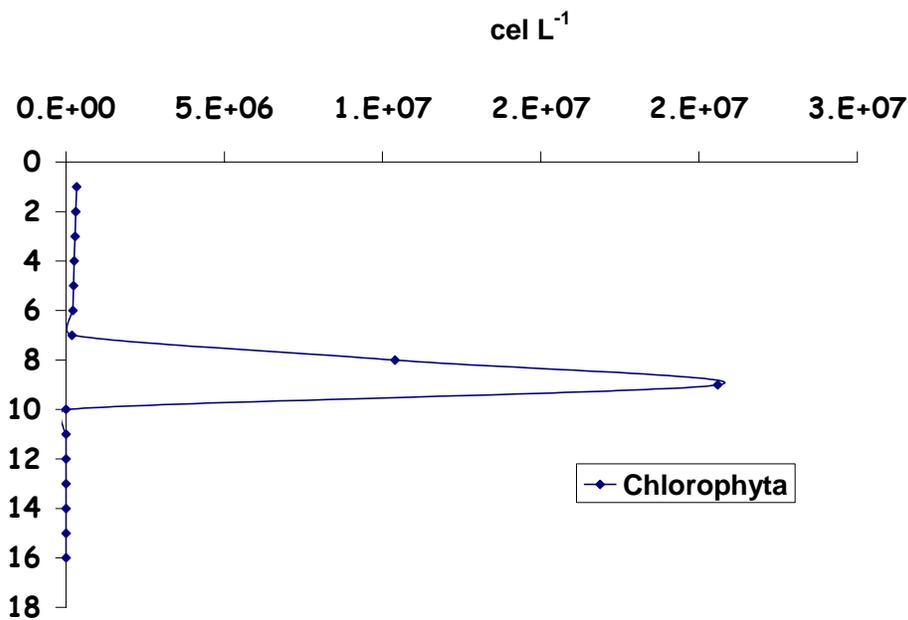


Fig. 39. Distribución vertical de la densidad de clorofitas ($cel L^{-1}$) del cenote Nohoch Hol. (z = profundidad).

8.3.1 Índices ecológicos.

El mixolimnion presenta la mayor diversidad, en tanto el quimiolimnion muestra la mayor dominancia. La diversidad total de fitoplancton para el cenote Nohoch Hol es $H' = 0.27$ (Tabla 6).

Evaluando cada ensamblado se encuentra que la comunidad de 8 m presenta la mayor diversidad (H') con 1.125, seguido de la de 2 m con 1.0, el de 11 m con 0.4 y finalmente el de 10 m con 0.093. Los resultados de dominancia por índice de Simpson, son congruentes con los resultados mostrados por la diversidad, de tal forma que el ensamblado de 10 m presenta la mayor dominancia con 98.6, seguida del de 11 m con 81.4, el de 2 m con 48.9 y finalmente el de 8 m con 43.

La comparación entre ensamblados mostró que a 8 m se presenta la mayor equitavilidad (1), seguida de 2 m con 0.88, posteriormente 11 m 0.356 y finalmente el ensamblado de 10 m con 0.082. Resultados en concordancia con la diversidad y la dominancia.

El índice de similitud entre ensamblados arrojó los siguientes resultados. Los ensamblados con mayor similitud son 2 y 8 m (0.72), seguido de 2 y 11 m (0.66), posteriormente 8 y 11 m (0.60), en tanto la menor similitud se encontró entre 10 y 11 m (0.36), seguido de 8 y 10 m (0.46) y finalmente 2 y 10 m (0.5).

Tabla 6. Comparación de los ensamblados fitoplanctónicos de diversos cenotes de la Península de Yucatán. (* Información promedio de época de lluvias y secas). [Bacillariophyta (B), Chlorophyta (Chl), Cyanophyta (Cy), Euglenophyta (E), Cryptophyta (Cryp), Chrysophyta (Chrys), Pyrrophyta (Pyro), Rhodophyta (Rhodo)]. Para Nohoch Hol se especifican los porcentajes menores de 5 por ser el objeto de estudio principal de este trabajo. Los signos de interrogación indican que no existen datos.

CENOTE	RIQUEZA TAXONÓMICA	DENSIDAD (cel/L)	Composición (%)	H'	
NOHOCH HOL meromóctico	11	21.9x10 ⁶	B	3.7	0.2
			Chl	96	
			Cy	0.17	
CASA* lótico	50	¿?	B	¿?	¿?
			Chl	¿?	¿?
			Cy	¿?	¿?
NNC* lótico	41	¿?	B	¿?	¿?
			Chl	¿?	¿?
			Cy	¿?	¿?
ESCONDIDO* lótico	46	¿?	E	¿?	¿?
			B	¿?	¿?
			Chl	¿?	¿?
CRISTAL* lótico	33	¿?	Cy	¿?	¿?
			E	¿?	¿?
			B	¿?	¿?
AKTUN-HA* lótico	32	¿?	Chl	¿?	¿?
			Cy	¿?	¿?
			B	< 5	¿?
XLAKÁ lótico	¿?	5.9x10 ⁶ -2.5x10 ⁷	Chl	< 5	¿?
			Cy	92.85	¿?
			E	< 5	¿?
			Cryp	5.23	¿?
			Chrys	<5	¿?
			B	< 5	¿?
IXIN-HA lótico	¿?	1.6x10 ⁷ -7.9x10 ⁸	Chl	31.7	¿?
			Cy	66.6	¿?
			Pyro	< 5	¿?
			Cryp	< 5	
			Chrys	< 5	
			B	79	0.9
XTOGIL lótico	88	1.9x10 ⁴	Chl	13.2	
			Cy	5.3	
			E	< 5	
			Cryp	<5	
			Rhodo	<5	

8.4 Bacterioplancton

En Nohoch Hol se encontraron representados tres morfotipos, bacilos, filamentos y cocos. Los tres morfotipos estuvieron presentes en todas las profundidades muestreadas. El bacterioplancton muestra una distribución bimodal cuyos máximos se registran a 10 m ($35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y 12 m ($23.1 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$). El morfotipo "bacilos" fue el más abundante en todas las profundidades (Fig. 40). La contribución relativa de cada morfotipo en cada masa de agua se presenta en la Tabla 9.

En el mixolimnion hay un aumento progresivo en la densidad de bacterias con la profundidad, pero de 8 a 9 m, en la base del mixolimnion, aumenta drásticamente.

La densidad de bacilos aumenta en la base del mixolimnion hasta una densidad de $10.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$. La densidad de células filamentosas de 2 m a 8 m decae alcanzando un valor mínimo con 107 cel ml^{-1} . En tanto los cocos muestran un aumento gradual en relación a la profundidad (Fig. 40). La composición muestra que el mixolimnion está dominado por bacilos con una contribución relativa ~80% (Tabla 9).

La densidad total de bacterias en el quimiolimnion muestra un perfil bimodal cuyos máximos se registran a 10 m ($35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y 12 m ($23.1 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$), así como dos mínimos en 11 m ($12.1 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y 13 m ($10.1 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$). Los tres morfotipos muestran máximos a 10 m, bacilos $26.7 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$, filamentos $5.8 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$ y cocos $2.7 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$ (Fig. 40). Bajo el segundo mínimo, la densidad total de bacteria muestran una recuperación modesta ($12.9 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) en la base del quimiolimnion. El comportamiento bimodal refleja las variaciones de los bacilos principalmente, morfotipo con una contribución relativa de 75-90% (Tabla 9).

En el monimolimnion se registró una densidad total de $12.9 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$ que muestra la continuación de la recuperación mencionada para la base del quimiolimnion. Al igual que en las masas de agua superior e intermedia, la contribución relativa está dominada por el morfotipo bacilos (84%) (Tabla 9).

Al comparar la densidad del bacterioplancton en las masas de agua no se encontraron diferencias significativas $F=0.97$ $P=0.43$ (Fig. 41).

La comparación estadística entre morfotipos mostró diferencias significativas $H=13.4$ $P=0.001$. El morfotipo bacilo mostró diferencias significativas tanto con filamentos como con cocos ($Q=3.27$ $P<0.05$ y $Q=3.05$ $P<0.05$) respectivamente. En contraste filamentos y cocos no muestran diferencia $Q=0.21$ $P>0.05$

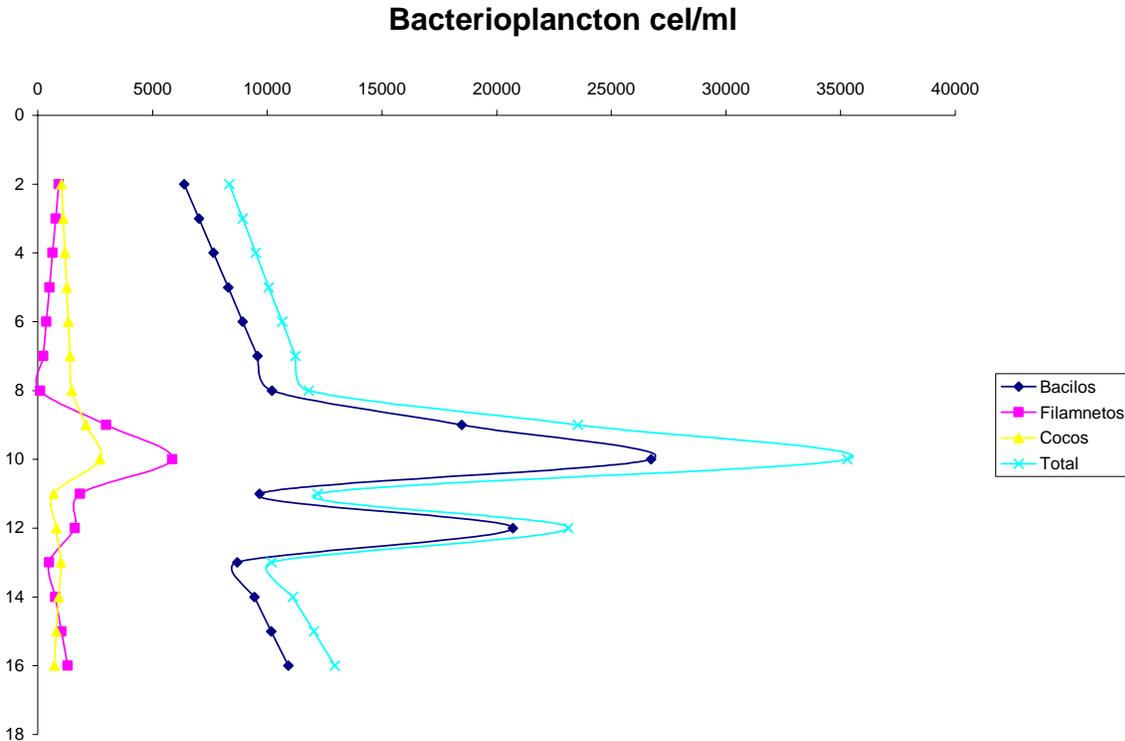


Fig. 40. Distribución vertical de la densidad de bacterioplancton (cel ml^{-1}) por morfotipo en el cenote Nohoch Hol. (z = profundidad).

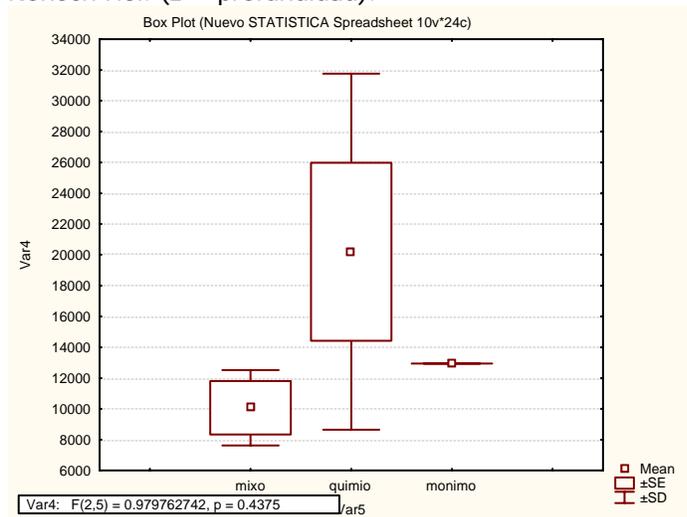


Fig. 41. Gráfico de bigotes de caja de la prueba ANOVA para cel ml^{-1} bacterioplancton.

8.5 RESULTADOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS CONDENSADOS

El mixolimnion se caracteriza por ser una masa de agua con poca salinidad (2.77 g L^{-1}); presenta un incremento en temperatura con relación a la profundidad (25°C en superficie y 26°C en la base); un decremento en la concentración de oxígeno disuelto en relación con la profundidad (7.3 mg L^{-1} en superficie y 0.98 mg L^{-1} en la base); potencial redox positivo (300 mV); pH de ligeramente básico en superficie (7.5) a neutro en la base; y poca turbidez (8.5 NTU). El nitrato es el nutriente con mayor concentración (cerca a $35 \text{ }\mu\text{M}$) mientras que el fósforo y el sílice tienen concentraciones menores. El fitoplancton alcanza su mayor densidad a los 8 metros (700.5×10^3) y muestra alternancia en la dominancia entre clorofitas y bacilariofitas, aunque también se presentan cianofitas; en tanto el bacterioplancton está dominado por el morfotipo bacilos $10.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$ (86%).

El quimiolimnion se caracteriza por presentar todas las clinas tales como el máximo de temperatura de la columna de agua (10 m , 26.7°C); la salinidad se incrementa (25.5 g L^{-1}); el oxígeno disuelto disminuye de condiciones cerca de la saturación hasta condiciones cercanas a la anoxia (0.3 mg L^{-1}); el pH es ligeramente básico (7.41); el potencial redox varía de oxidante a reductor (257 a -119 mV); y se caracteriza por una elevada turbidez (22 NTU). Nitrato y amonio muestran una alternancia de máximos y mínimos entre los 10 y 12 m . En este estrato se alcanza la máxima densidad de fitoplancton ($20.7 \times 10^6 \text{ cel L}^{-1}$) con una dominancia de la clorofita *Scenedesmus* (99.35%), y el bacterioplancton también alcanza su máxima densidad (10 m , $35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) con una dominancia del morfotipo bacilos (75.7%).

El monimolimnion está caracterizado por una elevada salinidad (36.6 g L^{-1}), inversión térmica (25 a 26°C), anoxia, potencial redox negativo (-107 mV) y pH neutro. Para los nutrientes, domina NH_4 ($9.28 \text{ }\mu\text{M}$) sobre nitrato ($0.116 \text{ }\mu\text{M}$) relación inversa respecto del mixolimnion, en tanto el FRD ($0.097 \text{ }\mu\text{M}$) y fosfora total ($0.442 \text{ }\mu\text{M}$) están en mayor concentración en relación al mixolimnion, el sílice ($160 \text{ }\mu\text{M}$) por su parte también muestra mayor concentración respecto del mixolimnion. El monimolimnion carece de fitoplancton y tiene una densidad bacteriana de $12.9 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$, dominada por bacilos (84.3%) (Tabla 9).

9 DISCUSIÓN

Masas de Agua

Los autores de los reportes sobre Cenote Grande y Cenote Verde (Skiles et al., 1997; Willson y Morris 1994) hacen una interpretación o uso de nomenclatura inadecuada de la estratificación de estos cenotes meromícticos como a continuación se explica. Para el Cenote Grande se describen epilimnion, metalimnion e hipolimnion, términos relativos a la estratificación por temperatura, siendo que la estratificación en Cenote Grande se da por salinidad. Para el Cenote Verde se describen mixolimnion y monimolimnion, omitiendo el quimiolimnion (ver anexo 1). Con base en lo anterior, de los reportes antes mencionados para el Cenote Grande el mixolimnion va de 0 a 15.5 m, el quimiolimnion de 15.5 a 30 m y el monimolimnion de 30 a 36 m. Por otro lado, el Cenote Verde presenta un mixolimnion de 0 a 21 m, un quimiolimnion de 21 a 30 m y un monimolimnion de 30 a 49 m.

Comparando Nohoch Hol con Cenote Grande y Cenote Verde se encuentra que cada una de las tres masas de agua de Nohoch Hol presenta mayor conductividad que los registros de Cenote Grande y Cenote Verde (Fig.42).

El porcentaje que representa cada masa de agua –volumen- en los cenotes difiere como se muestra en la Tabla 7, lo cual en primera instancia, probablemente depende de la profundidad máxima del cenote, del grado de aislamiento de cada cenote respecto del acuífero en relación a la porosidad de la matriz de la roca y la obstrucción de los conductos (Schmitter-Soto *et al.* 2002). Un segundo factor que interviene es el grado de mezcla que se presenta debido a la circulación salina (Beddows et al. 2002).

Tabla 7. Comparación de la contribución porcentual de las tres masas de agua en tres cenotes meromícticos.

Cenote	Mixolimnion	Quimiolimnion	Monimolimnion
Nohoch Hol	50.5%	36.5%	12.9%
Cenote Grande	39.7%	42.4%	17.8%
Cenote Verde	42.8%	18.3%	38.7%

En comparación con el lago meromítico español La Cruz ($Z_{max}=24$), donde el monimolimnion ocupa 8% del volumen del lago (Rodrigo, 2001), los cenotes Nohoch Hol, Grande y Verde muestran mayor volumen del monimolimnion. En el lago La Cruz la morfometría determina los gradientes abruptos de conductividad, temperatura y oxígeno disuelto que generan la quimioclina y en consecuencia el volumen del monimolimnion (Rodrigo, 2001).

Si bien existe una diferencia importante entre la profundidad máxima de los cenotes Nohoch Hol, Grande y Verde (17.8 m, 36.5 m y 49 m), la distancia a la costa es similar para los dos primeros (4 y 4.75 km respectivamente) en tanto Verde es el más alejado (5.49 km). La diferencia de profundidades que presentan los techos de las haloclinas de Cenote Grande y Nohoch Hol están dentro del rango de variación que se observa en los perfiles de Beddows (com. per. y 2004) para dicha distancia a la costa (9-12 m). El techo de la haloclina de Cenote Verde se encuentra a una profundidad mayor de lo esperado por los datos de Beddows (2004). Estas variaciones, como se mencionó arriba, tal vez pudieran deberse a el grado de oclusión de cada cenote, al intercambio de agua a través de la matriz de la roca, tanto del agua dulce, como del agua salada y a la mezcla entre el agua dulce y marina, que de manera local, se puede incrementar por fricción entre la parte superior de la masa marina que retorna al mar arrastrada por la masa de agua dulce que fluye en esa dirección (Beddows et al. 2002, Beddows 2004). Tal vez este mecanismo pueda engrosar el quimiolimnion y contribuir en su carácter salobre; la intensidad de la mezcla debe estar en función de la velocidad de los flujos. En tanto el efecto de mareas y tormentas es mínimo (Beddow com. pers., Beddows 2004, Stoessell et al. 2002). Al interior del quimiolimnion probablemente los procesos que actúan son la difusión molecular y térmica, de acuerdo con lo que se conoce teóricamente en los modelos de capa límite (Libes, 1992). Se debe señalar que la variación del techo de la haloclina en los cenotes de Quintana Roo respecto de la distancia a la costa no es una función lineal y tampoco responde como función de potencia (Beddows com. pers.; Beddows, 2004), al menos con los datos que se tienen hasta el momento, y probablemente no sea igual para cenotes lénticos que para cenotes lóticos por lo que es necesario ahondar en este tema.

Teniendo en cuenta las diferencias en las profundidades máximas de cada cenote, las diferencias en distancia a la costa y que las resoluciones de los perfiles no son comparables, de manera cualitativa se puede decir que Nohocho Hol y Cenote Grande se parecen más entre sí que a Cenote Verde ya que los primeros muestran mixolimnion homogéneo y el techo de la haloclina a profundidades similares (9 m y 12.5 m respectivamente), en tanto que Cenote Verde tiene un mixolimnion heterogéneo con una capa reductora de azufre y presenta el techo de la haloclina a 20 m (fig. 42). Nohocho Hol y Cenote Grande presentan un incremento de conductividad al aumentar la profundidad de la haloclina hasta alcanzar el fondo, en tanto Cenote Verde presenta una haloclina delgada (brusca), y una masa de agua profunda de conductividad homogénea.

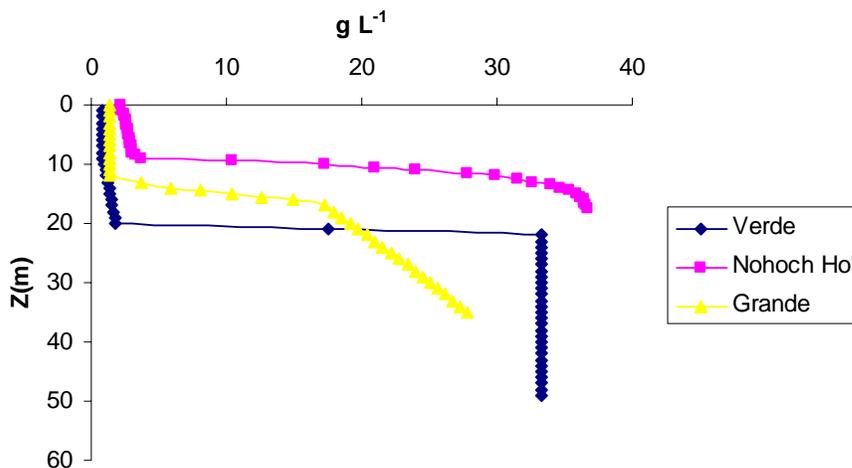


Fig. 42 Perfiles de salinidad registrados en tres cenotes meromórficos en Q. Roo. Nota. No se cuentan con datos para reconstruir el perfil de Cenote Chico.

Temperatura

Comparando Nohocho Hol con cenotes meromórficos del NE de la península de Yucatán, de los que se disponen datos, encontramos que los cenotes meromórficos Cenote Grande, Chico y Verde presentan estratificación térmica, al igual que Nohocho Hol, aunque existen diferencias en la profundidad de la termoclina (Fig. 43). Nohocho Hol presenta la termoclina a 10 m al igual que Verde, Grande a 15 m y Chico a 14.3 m.

Los cenotes Nohocho Hol, Grande y Chico muestran el fenómeno de inversión térmica, es decir, que la temperatura del agua de fondo es mayor que la de superficie,

en tanto Cenote Verde no presenta dicha inversión térmica (fig. 43). Para Nohoch Hol la temperatura de superficie es 25°C y la de fondo 26°C, en tanto que Cenote Grande presenta 24.5°C en superficie contra 25.3°C en el fondo. El reporte para Cenote Chico menciona el incremento de temperatura a 14.3 m pero no proporciona los datos. Cenote Verde no presenta inversión térmica ya que su temperatura de superficie (29.7°C) es mayor que la de fondo (25°C).

Tanto Nohoch Hol como los cenotes en la propiedad CALICA (Grande y Chico) presentan máximos de temperatura a media agua, 26.7°C es el máximo en la termoclina, tanto para Nohoch Hol como para Cenote Grande (Fig. 43). Finalmente hay que señalar que las temperaturas de Nohoch Hol y Cenote Grande son muy parecidas, en tanto que la temperatura de superficie de Cenote Verde es casi cinco grados centígrados mayor que las de los otros dos cenotes meromícticos.

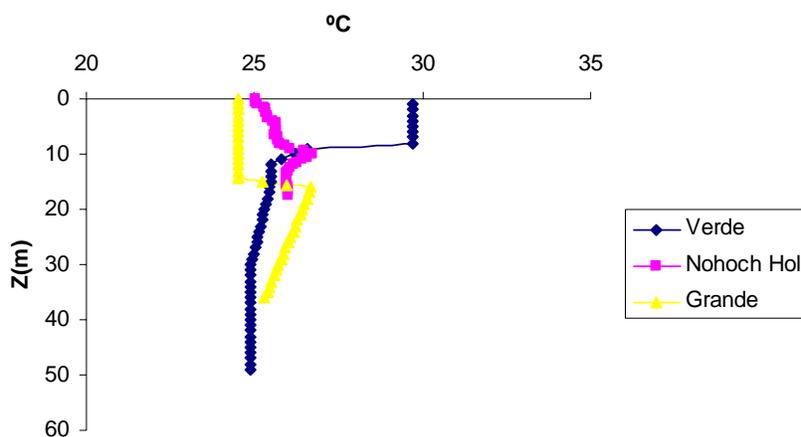


Fig. 43. Perfiles de temperatura registrados en tres cenotes meromícticos en Q. Roo. Nota. No se cuentan con datos para reconstruir el perfil de Cenote Chico.

La anomalía térmica, es un máximo de temperatura a media agua, desarrollando un perfil donde el gradiente de temperatura por arriba del máximo es lineal, en tanto que por debajo es cóncavo (fig.43). La diferencia entre anomalía térmica e inversión de temperatura radica en el máximo de temperatura que le confiere la forma distintiva al perfil. Dichos fenómenos, se reportaron por primera vez en la literatura, para la península de Yucatán, por Stoessell et al. (2002), quien estudio los cenotes Angelita, Chemuyil, Grande y Chico de Calica, así como un cuerpo de agua artificial provocado por la explotación de caliza por debajo del nivel freático, conocido como "Calica sumergido".

En el trabajo se confrontan cuatro explicaciones: a) absorción de radiación luminosa en la haloclina, b) oxidación de formas reducidas de azufre por fotosíntesis anaeróbica de bacterias púrpuras y verdes, c) reducción de formas oxidadas del azufre por bacterias anaerobias y d) celda geotermal convectiva de agua marina. Stoessell et al. (2002) propone la explicación de una celda convectiva geotermal de agua marina, y señala que las anomalías térmicas observadas son posiblemente mediciones de instantes del “brazo de regreso” de la celda moviéndose hacia el mar. A continuación se retoma y se revisa la discusión planteada por Stoessell et al. (2002).

a) Absorción de radiación luminosa en la haloclina.

Independientemente de qué cause el tipo de meromixis, en los lagos que exhiben diferencias marcadas en temperatura, la quimioclina se encuentra a una profundidad en que funciona como trampa de calor (Wetzel, 2001). Los lagos que presentan un estrato calentado solarmente, con incremento en temperatura y salinidad bajo una capa de agua superficial, con menor densidad y temperatura, se denominan heliotérmicos, y la temperatura aumente dentro y/o por debajo de la quimioclina. La inversión de temperatura es característica del monimolimnion (Wetzel, 2001).

Los procesos que generan este fenómeno son tres:

1) La luz que penetra la quimioclina es transformada a calor y no puede escapar por radiación, ya que el agua es opaca al infrarrojo y no puede ser liberado por convección.

2) La gravedad específica del agua densa del monimolimnion bajo la quimioclina no se reduce significativamente por el incremento de la temperatura.

3) La pérdida de calor hacia el aire por conducción es lenta.

Stoessel et al. (2002) señala que la explicación de la trampa de calor que arguye Wetzel es inconsistente con las siguientes observaciones de su trabajo en campo: primero, no hay decremento alguno durante la noche y segundo, que los cenotes Angelita y Chemuyil deberían presentar la anomalía térmica, ya que presentan una quimioclina, y sin embargo no presentan anomalía térmica.

Stoessel et al. (2002) desestima que la transmisión de calor al exterior sea muy lenta o nula, y no contemplan que la temperatura en el exterior puede ser mayor o igual que la del agua.

b) y c) Reacciones de oxidación y reducción asociada a actividad bacteriana.

El calor puede ser generado *in situ* por reacciones químicas exotérmicas, causadas por la reducción de sulfatos y/o la oxidación de H₂S dentro de la haloclina y en la capa marina subyacente, reacciones de oxidación y reducción asociada a actividad bacteriana (Stoessel *et al.* 1993, Stoessel et al. 2002). Sin embargo, las anomalías térmicas no se extienden a toda la capa marina sino únicamente en las proximidades de la haloclina; hay cenotes que presentan reducción de sulfatos no presenta anomalía térmica; y "Calica sumergido" presenta anomalía térmica y no presenta actividad bacteriana conspicua (Stoessel et al. 2002).

d) Celda geotermal convectiva de agua marina.

La celda penetra las calizas de la península desde el Mar Caribe, a una profundidad cercana a 500 m de profundidad, donde la temperatura por geotermia es 530°C. Se postula que el "brazo" asciende por fracturas a una distancia entre 7 y 8 km de la costa. A 200 m de profundidad la temperatura esperada es 31°C. El movimiento ascendente es detenido por la haloclina, ya que la densidad no es menor a la del manto freático. El agua de la celda regresa al Caribe en contacto con la haloclina, arrastrada por la descarga del acuífero, y al calentar la haloclina genera la anomalía térmica (Stoessel *et al.* 2002). Stoessel et al. (2002) proponen la existencia de una celda convectiva en la costa frente a la propiedad Calica S.A.

Esta hipótesis se basa en cuatro observaciones: 1) la capa de agua marina en contacto con la haloclina fluye hacia el mar, 2) el pico de temperatura se presenta únicamente en la haloclina, 3) el gradiente de temperatura por arriba del máximo es lineal, en tanto que por debajo es cóncavo y 4) dicho máximo de temperatura no ocurre en todos los cenotes costeros.

La debilidad de la propuesta según sus autores son dos: 1) la forma y localización de los picos de temperatura requieren de verificarse con modelos numéricos y 2) no se ha localizado anomalías térmicas en cenotes tierra adentro (Stoessel *et al.* 2002).

Bajo el marco explicativo de Stoessel *et al.* (2002) habría que proponer otra celda convectiva que aporte calor geotérmico a la haloclina de Nohoch Hol, frente a la costa de Tulum, a 65 km de Calica. Adicionalmente el trabajo citado anteriormente niega rotundamente -- más no da argumentos -- que la capacidad calorífica del agua pudiera explicar la carencia de decremento por las noches, o que no se de conducción térmica, o que la temperatura en el aire puede ser igual o mayor a la del agua. Para Stoessel *et al.* (2002) la explicación de las anomalías térmicas causadas por radiación calorífica, es inconsistente debido a que no se registra decremento por la noche. Como se mencionó anteriormente es posible explicar anomalías térmicas por radiación calorífica, y que no se de decremento por las noches, debido a que no existe intercambio de calor ni por convección ni por mezcla (Wetzel, 2001).

También llama la atención que Stoessel *et al.* (2002) no se tome en cuenta la variabilidad intrínseca que puede existir entre cenotes debido a factores como morfología del embalse, máxima profundidad, grado de oclusión del embalse, distancia a la costa, así como la variabilidad en la profundidad de la haloclina, la cantidad de radiación que puede penetrar en función de la turbidez, morfología entre otros parámetros, que pueden ser muy distintos entre cenotes, modificando el efecto de los parámetros involucrados en el presupuesto calórico del sistema acuático. Adicionalmente la cantidad de calor por radiación que recibe la haloclina, también está en función de la máxima penetración de la radiación calorífica (600-700 nm), la cual no excede más de 10 m en una columna de agua. Una haloclina por debajo de dicha profundidad debe de recibir menor calor por radiación.

Otro punto que se debe hacer notar del trabajo y conclusiones de Stoessel *et al.* (2002) es que para el cenote Angelita (Z max 60 m Ver apéndice 1) las mediciones de temperatura se realizaron en 1992 y 1999 (Stoessel *et al.* 1993) se reporta que la máxima profundidad muestreada fue 31.1 m, y que no se pudo muestrear a mayor

profundidad debido a que ese era el máximo alcance del cable de la sonda YSI 3000 con la que se midió temperatura y conductividad. De tal forma que existe la incertidumbre de que el perfil de temperatura del cenote Angelita en Stoessell *et al.* (2002) sea incompleto ya que en la base del perfil hay un incremento de un grado centígrado, el cual cabe la posibilidad continúe a una profundidad mostrando inversión térmica y simplemente no la midieran.

Finalmente, Stoessell *et al.* (2002) no toma como anomalía térmica la diferencia que es apreciable en el perfil del Cenote Angelita en la figura 3 del citado trabajo, pero si considera anomalía térmica una diferencia de 0.2 °C en el cuerpo de agua artificial de Calica S. A. Beddows *et al.* (2002) señalan que después de estudiar anomalías térmicas (i.e $\geq 0.1^\circ\text{C}$ de diferencia con la temperatura superficial) en localidades de acuíferos kársticos costeros, tanto en la isla Andros en Bahamas (seis localidades), como en la Península de Yucatán (cuatro localidades), proponen que la explicación de las anomalías térmicas reside en el calentamiento heliotérmico, lo cual coincide con la explicación de Wetzel (2001), mencionada anteriormente. En tanto la inversión de temperatura es evidencia de la intrusión salina. En la anomalía térmica el agua salada tiene menor capacidad de calor específico que el agua dulce, por lo que el agua en la haloclina incrementa su temperatura en mayor grado que el agua en la capa superior, para una determinada cantidad de insolación. A pesar del calentamiento subsuperficial, la columna de agua continua estratificada, ya que es la salinidad la que domina el control del perfil de densidad. Gran parte de la luz que penetra la quimioclina es transformada a calor que no puede escapar por radiación, porque el agua es opaca al infrarrojo y no puede ser liberado por convección, ya que la gravedad específica del agua densa del monimolimnion bajo la quimioclina no se reduce significativamente por el incremento de la temperatura. La pérdida de calor hacia el aire por conducción es lenta. Como resultado, la temperatura aumenta dentro y/o por debajo de la quimioclina (Wetzel, 2001; Beddows et al. 2002). Aquellos cenotes cuya haloclina se encuentre por debajo del coeficiente de extinción lumínica no presentarán anomalía térmica. Partiendo de estos argumentos se concluye que el calentamiento heliotérmico es explicación suficiente para las anomalías térmicas en los cenotes de la costa de Quintana Roo. El

calentamiento geotermal pudiera estar involucrado en la circulación salina de los acuíferos costeros (Beddows *et al.* 2004).

pH

Para explicar el perfil de pH se debe tomar en cuenta que los equilibrios químicos actúan diferente en el agua dulce y en el agua marina, debido a que el agua marina es una solución amortiguadora y que la fuerza iónica es mayor. Lo anterior genera que la curva de distribución de los sistemas CO₂-carbonatos tenga un desplazamiento en la escala de pH respecto del agua pura. Sin embargo, no solo los carbonatos participan en este equilibrio, también lo hacen los hidróxidos, boratos, silicatos, fosfatos y sulfatos que aunque generalmente en pequeñas cantidades en sistemas naturales, pueden ser fuentes mayores de alcalinidad en ciertas aguas salinas (Wetzel, 2001), así como los boratos y bisulfuros (HS⁻) en aguas anóxicas (Rosales, 1980).

De manera general los cenotes tienen una gran reserva alcalina debido al contenido de carbonatos de las rocas calizas, es decir, se esperaría un pH constante en la columna de agua y que los cambios que los procesos biogeoquímicos pueden producir fueran neutralizados. Sin embargo el perfil muestra variación, probablemente la actividad biológica provoca la conversión del carbonato a bicarbonato, y es el bicarbonato el que regula los cambios de pH. Como se mencionó en la sección 3.1.1, el proceso anterior incrementa la disolución de la roca en los cenotes, al consumirse el carbonato y bajar el pH la roca adyacente se disuelve aportando nuevo carbonato que es consumido en la columna debido a que predomina la respiración sobre la fotosíntesis.

En Nohoch Hol el máximo de pH en las aguas superficiales deriva por lo menos en parte de la fotosíntesis. El máximo de pH a 10 m probablemente sea el resultado de la acidificación que a 9 m alcanza la constante de solubilidad, disuelve la roca, aumenta la alcalinidad permitiendo que la fotosíntesis basifique ligeramente dicha zona debido al consumo de CO₂. Por debajo de la quimioclina actúa la solución amortiguadora –agua marina- desplazando los equilibrios en la escala de pH pero el proceso debe ser el mismo que se describió arriba. Simultáneamente, la turbidez disminuye la fotosíntesis, la

respiración genera CO_2 y reduce el pH. La acidificación avanza hasta que se alcanza la constante de solubilidad, donde la roca se disuelve y aporta carbonato al sistema, en consecuencia el pH se neutraliza y bajo la ausencia de fotosíntesis en el monimolimnion, el pH no muestra la ligera basificación que se observa a los 10 m, sino que oscila en la neutralidad.

Otros procesos que reducen el pH en los sistemas acuáticos son la nitrificación del NH_4 y la oxidación de H_2S , en contraste con procesos que incrementan el pH y la alcalinidad como la desnitrificación de NO_3 a N_2 , la reducción de H_2SO_4 a H_2S y la reducción de hierro y manganeso (Wetzel, 2001). Adicionalmente, existe la disolución de las rocas calizas con composiciones mineralógicas diferentes como calcita, aragonita y dolomita lo cual genera equilibrios complejos que dificultan el entendimiento de la capacidad amortiguadora de la gran reserva alcalina de los cenotes (Stoessell *et al.*, 1993).

Existen pocos datos de pH de cenotes y en general no existen perfiles de pH. En el quimiolimnion del Cenote Verde se reporta un rango de pH entre 6.86 y 7.01 (Wilson y Morris, 1994). Stoessell y colaboradores (1993) reportan para el Cenote Chico un pH entre 7.12 y 7.15 en el mixolimnion y 6.8 a 6.9 en la quimioclina, en tanto que para el cenote Angelita entre 22.9 y 31.1m el pH varía entre 6.95 y 6.86, con un mínimo a 30.2m de 6.77. De manera general, los valores de pH de Nohoch Hol se encuentran dentro del intervalo de valores de pH registrados en los cenotes meromícticos mencionados anteriormente y es probable que los procesos que ocurren en Nohoch Hol sean similares a los abordados por Stoessell *et al.* (1993). Estos autores señalan que la reducción de sulfatos produce incremento en alcalinidad y descenso en pH, sin embargo el pH puede aumentar con el incremento en profundidad debido a la precipitación de sulfatos de hierro o puede volver a acidificarse por la oxidación de H_2S a H_2SO_4 . El desplazamiento en uno u otro sentido del equilibrio ácido-base puede ser mediado por la sucesión de bacterioplancton y los diferentes metabolismos oxidantes y reductores como por ejemplo, *Thiobacillus* que oxida azufre en la parte superior de la haloclina que tiene contacto con el mixolimnion oxigenado, o la presencia de bacterias fotosintéticas

de azufre púrpuras y verdes en la haloclina anóxica, que oxidan H_2S ó *Desulfovibrio* que realiza la reducción anaerobia en el fondo.

Nutrientes

El nitrato es la forma de nitrógeno más abundante en el mixolimnion $34.8 \mu M$ (fig.28), que es incluso más bajo que los valores para áreas no habitadas y no contaminadas por nitrógeno en Yucatán (Pacheco y Cabrera, 1997, Marín y Perry, 1994) y menor también que la concertación reportada por Soessel *et al.* (1993) $150 \mu M$ y $170 \mu M$ en el mixolimnion de Cenote Chico y Angelita, respectivamente. Cenotes con evidencia de concentraciones de nitrato producto de contaminación han sido reportados por Marín y Perry (1994), Pacheco y Vázquez (1992), $1129 \mu M$ y $1343 \mu M$ respectivamente, por lo que se descarta que Nohoch Hol presenta contaminación. En cuanto al amonio que es la forma predominante tanto en quimiolimnion como monolimnion, se presenta un máximo a 12 m ($16.7 \mu M$) (fig. 28) que es el doble de la concentración reportada por Alcocer y colaboradores (1999) en cenotes lóticos. El nitrito como forma intermedia presenta concentraciones reducidas ($0.11-0.67 \mu M$) (fig. 28), pero con máximo cerca de la base del mixolimnion (Fig. 12), lo cual coincide con cenotes lóticos de la región (Alcocer *et al.* 1998). El nitrógeno total $48.8 \mu M$ también es bajo para la región, según Alcocer *et al.* (1999), quien reporta un rango de $34.8-250.9 \mu M$.

El fósforo reactivo disuelto (FRD) y el fósforo total ($0.019-0.611 \mu M$), se encuentra en concentraciones bajas, al igual que lo han mostrado otros estudios en la zona (Alcocer *et al.* 1999, Alcocer *et al.* 1998) debido a la presencia de altas concentraciones de carbonato de calcio disociado en iones Ca^{2+} y CO_3^{2-} que favorece su coprecipitación. Por tal motivo el fósforo es el nutriente limitante en sistemas kársticos (Margalef, 1983) y de acuerdo con Schmitter-Soto *et al.* (2002) y Alcocer *et al.* (1999), los cenotes de la península de Yucatán se encuentran en un rango de ultraoligotrofia a oligotrofia. El sílice de manera general es abundante al igual que en otros sistemas acuáticos de la península de Yucatán (Alcocer *et al.* 1998, Herrera-Silveira *et al.* 1998

Si bien las concentraciones de nutrimentos corresponden a sistemas oligotróficos (Alcocer *et al.* 1999, Herrera-Silveira *et al.* 1998), la forma de los perfiles de las especies de nitrógeno inorgánico en Nohoch Hol no corresponde a la esperada para un sistema

oligotrófico, sino a las de uno eutrófico (Wetzel, 2001). Como se menciona mas adelante, en la discusión de fitoplancton y bacterioplancton, los perfiles fisicoquímicos y biológicos sugieren la ocurrencia de procesos relacionados con niveles tróficos altos.

Fitoplancton

La flora fitoplanctónica de los cenotes de la península de Yucatán ha sido poco estudiada, al día de hoy, el conocimiento que se tiene del fitoplancton está basado en once publicaciones (Ávila *et al.* 1995, Cabrera-Cano y Sánchez-Vázquez 1994, Díaz-Arce *et al.* 2001, Esquivel, 1991, Herrera-Silveira *et al.* 1998, Hernández y Pérez 1991, López-Adrian *et al.* 1993, López-Adrian y Herrera-Silveira 1994, Sánchez-Molina 1985, Sánchez *et al.* 2002, Zetina *et al.* 1995), aunque los trabajos de Zetina *et al.* (1995) y Ávila *et al.* (1995) son estrictamente de productividad primaria y respiración, el trabajo de Schmitther-Soto *et al.* (2002a) compila dichos estudios y señala las siguientes generalidades del fitoplancton de los cenotes de la península de Yucatán. La flora fitoplanctónica se conoce muy poco en relación a otros sistemas limnológicos en el mundo. De aproximadamente 150 especies, los géneros más comunes son, *Monoraphidium* dentro de las algas verdes; *Chroococcus* y *Aphanocapsa* en cianofitas; y *Achnantes*, *Amphora* y *Gomphonema* entre las diatomeas, siendo éste el grupo mas rico. En cenotes lénticos las mayores densidades de clorofitas y cianofitas se dan en la temporada de tormentas de invierno y temporada de lluvias. Euglenofitas y Dinofitas son grupos poco representados. Con base en concentraciones de clorofila *a*, se clasificó el estado trófico de 30 cenotes, donde 15% fue eutrófico (20-150 mg Chl *a* m⁻³).

Estudios detallados en el estado de Yucatán se han enfocado en un cenote lótico, Xlaká (Díaz-Arce *et al.* 2001) y dos lénticos, Xtogil e Ixin-Ha (López -Adrian y Herrera-Silveira 1994, Díaz-Arce *et al.* 2001), mientras en Q. Roo los cenotes que se han estudiado en detalle son lóticos (Sánchez et al. 2002) (ver anexo1).

La densidad de fitoplancton de Nohoch Hol (21.9×10^6 cel L⁻¹) es mayor que la de Xtogil (1.9×10^4 cel L⁻¹) pero menor que la de Ixin-Ha (7.9×10^8 cel L⁻¹). Nohoch Hol comparte con Xtogil por lo menos dos géneros de diatomeas (*Cyclotella* y *Navicula*) y

para las algas verdes comparten a *Scenedesmus*, pero una diferencia entre cenotes es que en Nohoch Hol se da una alternancia, primero dominan las Chlorophyceae y luego las Bacillariophyceae. La comparación con Ixin-Ha muestra que comparten la clorofita *Monoraphidium*, pero difieren en que Ixin-Ha presenta un florecimiento de *Microcystis aeruginosa* --bioindicador de contaminación-- en tanto Nohoch Hol presenta un florecimiento de *Scenedesmus* (Tabla 6). En términos de diversidad (H') Xtogil es más diverso que Nohoch Hol (Tabla 6). Las contribuciones relativas de cada clase para cada cenote se presentan en la Tabla 6.

López-Adrian y Herrera-Silveira (1994) concluyen que Xtogil es un cenote con tendencia a la eutrofización debido a contaminación química (agroquímicos) y por materia orgánica derivados del incremento de los asentamientos humanos y del uso de fertilizantes en la zona aledaña.

El caso de Nohoch Hol parece ser diferente de Xtogil a pesar de algunas características compartidas. Nohoch Hol parece encontrarse en un proceso de eutrofización natural derivado de su condición meromíctica como se explicará mas adelante. El hecho de que la diversidad de fitoplancton de Xtogil sea mayor que la de Nohoch Hol, podría sugerir que el estado trófico de Nohoch Hol es mayor que el de Xtogil (Tabla 6).

El cenote lótico Xlaká tiene un rango de densidad fitoplanctónica reportada de 5.9×10^6 - 2.5×10^7 cel L^{-1} , cuyo valor mínimo es cercano al máximo de Nohoch Hol (21.9×10^6 cel L^{-1}). Las cianofitas dominaron la comunidad seguidas por criptofitas (Tabla 6) adifeencia de Nohoch Hol que está dominado por clorofitas. Dentro de las cianofitas de Xlaká, se reporta como dominante a *Chroococcus sp.*, taxa también encontrado en Nohoch Hol. (Tabla 6).

Comparando la composición de fitoplancton con los cenotes de Quintana Roo, Nohoch Hol presenta tres clases, al igual que Aktun-Ha (Car Wash), Cristal (Naharon), y

Casa, difiriendo de Nohoch Nah Chich (entrada principal) y Escondido (Mayan Blue) que presentaron adicionalmente la clase Euglenophyta.

Nohoch Hol mostró dominancia de Chlorophyta, específicamente *Scenedesmus* sp., y el resto de cenotes presentó dominancia de Bacillariophyta. La riqueza taxonómica de los cenotes lóticos de Q. Roo es entre tres y cuatro veces mayor que Nohoch Hol (Tabla 6). La comparación de géneros compartidos entre Nohoch Hol y los cenotes lóticos de Q. Roo se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Matriz de presencia ausencia de géneros de fitoplancton de agua dulce entre Nohoch Hol y cenotes lóticos de Q. Roo. NNCh EP= Nohoch Nah Chich (entrada principal).

	NohochHol	NNCh EP	Casa	Escondido	Cristal	Aktun-Ha
Clorofíceas						
<i>Chlorella</i>	x			x	x	x
<i>Monoraphidium</i>	x				x	x
<i>Scenedesmus</i>	x	x	x			
Bacillariofíceas						
<i>Cyclotella</i>	x	x	x	x	x	x
<i>Navicula</i>	x	x	x	x	x	x
<i>Nitzschia</i>	x	x	x	x	x	x
Cianofíceas						
<i>Chroococcus</i>	x	x	x		x	x
<i>Phormidium</i>	x	x		x	x	x

Los trabajos sobre fitoplancton en los cenotes de la Península de Yucatán no han sido planeados para ser comparativos, mucho menos para analizar diferencias entre cenotes lénticos y lóticos. Esto es debido en parte al reciente reconocimiento (Schmitter-Soto *et al.* 2002a) de ambos tipos de sistemas, lo que genera que se desarrollen procesos diferentes. Por el motivo anterior no es posible hacer aún generalizaciones.

Al comparar el fitoplancton de Nohoch Hol con otros sistemas kársticos encontramos diferencias importantes. En la península de Florida los lagos eutróficos presentan densidades de fitoplancton entre 32×10^6 cel L⁻¹ - 88×10^6 cel L⁻¹ y están dominados por cianofitas (*Microcystis*, *Lyngbya* y *Spirulina*), seguidas por clorofitas (*Scenedesmus* y *Pediastrum*), en tanto Nohoch Hol (21.9×10^6 cel L⁻¹) es oligotrófico. En los lagos de Florida la eutroficación es producto de la actividad antropogénica principalmente (Shannon y Brezonik, 1972). En la península de Florida los oligotróficos

presentan densidades de 36×10^3 cel L⁻¹ y usualmente no presentan dominancia, lo cual es muy diferente al caso de Nohoch Hol que con 21.9×10^6 cel L⁻¹ es oligotrófico y está dominado por *Scenedesmus*. En Florida en general las diatomeas no son abundantes, aunque se encuentran géneros como *Navicula* (Shannon y Brezonik, 1972), en contraste con los cenotes de la península de Yucatán donde las diatomeas son un grupo importante. Los lagos kársticos de la península de Florida estudiados por Shannon y Brezonik (1972) de manera general no son comparables con los cenotes de la península de Yucatán, como se menciona en la sección **Sistemas acuáticos de la Península de Florida**. Ya que fisicoquímicamente los sistemas de la península de Florida comparables con los cenotes son los "sinkholes" o dolinas, desafortunadamente su literatura es escasa y no fue posible obtener información de fitoplancton.

En relación a otros sistemas meromícticos, Nohoch Hol se diferencia por ejemplo del lago kárstico La Cruz (España) ya que éste está dominado por bacilariofitas en el mixolimnion (Rodrigo, 2001) en tanto Nohoch Hol es dominado por algas verdes; sin embargo, comparten la presencia del género *Cyclotella*. También hay coincidencia con el lago español con la presencia de cianofíceas con morfotipo de coco y bacterias púrpuras del azufre en la interfase entre la capa oxigenada y la capa anóxica, más difieren en los géneros, ya que La Cruz presenta *Synechococcus*, en tanto Nohoch Hol presenta *Chroococcus*. Se debe señalar que de manera general La Cruz presenta mayores concentraciones de nutrientes. La Cruz es una dolina meromíctica biogénica, mesotrófica (Rodrigo, 2001).

Bacterioplancton y Nutrientes

Desafortunadamente, el contar solo con el conocimiento de los morfotipos del bacterioplancton presentes en Nohoch Hol, especialmente para el caso de bacilos y cocos, no permite hacer una investigación más profunda. En cuanto a los filamentos existe menos incertidumbre, ya que solo existen dos bacterias filamentosas reportadas en los cenotes meromícticos -*Beggiatoa* y *Thiothrix* - y en Nohoch Hol coinciden con las características fisicoquímicas de la columna de agua. Si bien la oxidación o reducción de especies químicas son reacciones favorecidas termodinámicamente en uno y otro

sentido por la presencia o ausencia de oxígeno, en general son reacciones mediadas por microorganismos. En sistemas estratificados, la masa de agua de fondo está dominada por microorganismos heterótrofos que descomponen la materia orgánica por respiración (Fig.44). En dichos ambientes el crecimiento de bacterias quimiosintéticas es común en las capas de transición entre los ambientes acuáticos aerobios y los anaerobios, lo que permite llevar a cabo los ciclos completos de elementos como el nitrógeno y el azufre (Margalef, 2002; Wetzel, 2001). En los sistemas meromícticos -como Nohoch Hol-, cuando el perfil de potencial de oxidación-reducción tiene una pendiente con gran ángulo, la producción secundaria quimiosintética es importante, (Margalef, 2002; Wetzel, 2001).

En Nohoch Hol se asume que la materia orgánica en el fondo del cenote es degradada por bacterias heterótrofas anaerobias obligadas, o incluso facultativas, involucradas en la etapa de desasimilación del ciclo del azufre (Stoessell et al., 1993, 2002; Wilson y Morris, 1994; Skiles et al., 1997) y del ciclo del nitrógeno. El metabolismo heterótrofo consume el oxígeno sea cual sea la forma en la que se encuentre; primero se consume el oxígeno molecular disuelto, pero una vez que se agota éste, el equilibrio químico de las reacciones de oxidación-reducción son dominadas por la pérdida de electrones y la demanda de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica es solventada por los sulfatos, nitratos, nitritos (Margalef, 1983), como se puede apreciar en los perfiles de OD, Eh, y formas de nitrógeno (Fig 17, 20 y 28).

Desulfovibrio, es un bacilo heterótrofo, anaeróbico obligado, que podría presentarse en el fondo del cenote ya que reduce el SO_4 de las proteínas presentes en la materia orgánica primero a S^0 y después a H_2S , mediante la siguiente reacción: $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} \Rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{HS}^-$. Dadas las condiciones de fondo y las generalidades que se ha presentado mas arriba se esperaría una mayor abundancia de bacterias cerca del fondo anóxico del cenote del tipo *Desulfovibrio*, sin embargo el pico más profundo de bacterias se encuentra a 12 m coincidiendo con el pico de amonio (Fig. 28 y 40).

El contacto entre el mixolimnion y quimiolimnion al ser un cambio drástico de densidad actúa como una barrera física estable, detiene parte de la materia orgánica

alóctona --procedente de la selva— y autóctona --producida en el mixolimnion; al mismo tiempo sirve de “soporte” tanto para fitoplancton como para el bacterioplancton (Fig. 38, 39 y 40); y también retiene y acumula parcialmente el H₂S producido bajo condiciones de anaerobiosis (Stoessell et al. 1993), lo cual es congruente con el modelo de capa límite (Libes, 1992). En consecuencia el máximo de turbidez (Fig.21), coincide con el techo del quimiolimnion (9.5-10 m). Dicha interfase es una región hipóxica debido al contacto con la base del mixolimnion, y a la fotosíntesis del máximo de fitoplancton (Fig. 39). La oxidación de ácido sulfhídrico a ácido sulfúrico ($\text{HS}^- + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$), se da por la interacción con el oxígeno disuelto y/o por el metabolismo de bacterias oxidadoras del azufre como los filamentos *Beggiatoa* y *Thiothrix*, que encuentran condiciones ideales para su establecimiento. Dichas bacterias son quimiorganotróficas y la fuente de energía es H₂S, que primero oxidan a S⁰ y después a SO₄.

En el quimiolimnion se da un cambio generalizado en las variables químicas, debido a la conjunción de procesos físicos químicos y biológicos, la oxiclina y las nutriclinas de nitrógeno y fósforo ocurren en dicha masa de agua (Fig. 28 y 33). De acuerdo con Stoessell et al. (1993) bajo dichas condiciones se puede presentar *Thiobacillus*, anaeróbica facultativa, que tal vez se ubique por debajo de los filamentos *Beggiatoa* y *Thiothrix*. Las especies de *Thiobacillus* se han dividido en dos grupos: las que como producto de su metabolismo excretan SO₄²⁻ y las que reducen nitrógeno como *T. thioparus* que realiza la reacción $\text{N-C-S} + 2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{NH}_4^+ + \text{CO}_2$. *T. denitrificans* se caracteriza por la siguiente reacción $2\text{NO}_3^- + \text{S} + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{N}_2$. El bacilo *Chromatium* es una bacteria púrpura del azufre que realiza fotosíntesis anoxigénica que usa S⁰ y H₂S como donadores de electrones y los oxida a SO₄. En la misma región puede estar bacterias de la familia Rhodospirillaceae con morfotipos de cocos o bacilos que también son fotoautotróficas anaerobias y muchas de ellas son capaces de fijar nitrógeno.

Entre 10 y 12 m la alternancia de máximos y mínimos de amonio y nitrato sugiere un remplazamiento entre bacterias nitrificantes y denitrificantes, donde las bacterias como

Pseudomonas, *Bacillus*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Escherichia* e incluso *Thiobacillus denitrificans*, podrían llevar a cabo la desasimilación o remineralización del nitrato (Fig. 28). Parte del decremento de nitrato debe estar también relacionado con el crecimiento del alga *Scenedesmus*. En tanto que a 11 m, el oxígeno disuelto es 0.3 mg L^{-1} límite mínimo para que se lleve a cabo la nitrificación (Wetzel, 2001) y donde *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* deben estar desarrollando. Pero también entre 10 y 12 m probablemente se presente *Chromatium* realizando fotosíntesis anoxigénica y oxidando los productos reducidos derivados del metabolismo de *Desulfovibrio* que se desarrolla en el monimolimnion. El máximo de cocos ubicado a los 10 m podría pertenecer a organismos de la familia Rhodospirillaceae. Las condiciones en esta zona también podrían desarrollarse bacterias púrpuras de la familia Thiorethodaceae (Skiles *et al.* 1997). Familia con miembros capaces de realizar reacciones tales como: 1) $\text{N-C-S} + 2 \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{NH}_4^+ + \text{CO}_2$, ó 2) $2\text{NO}_3^- + \text{S} + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{N}_2$. Las reacciones presentadas anteriormente permitirían explicar en Nohoch Hol la alternancia de máximos y mínimos en el perfil de formas de nitrógeno. No existe reporte alguno sobre bacterias denitrificantes en los cenotes de Quintana Roo, pero dadas las condiciones de Nohoch Hol especialmente los máximos y mínimos de las formas del nitrógeno en condiciones de hipoxia/anoxia, probablemente se encuentren bacterias denitrificantes como los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y/o *Thiobacillus denitrificans* entre otras. Al parecer este sería un ejemplo más de cómo ecosistemas que al acumular nutrientes que incrementan su estado trófico, pueden desarrollar procesos para autorregular el exceso de nutrientes.

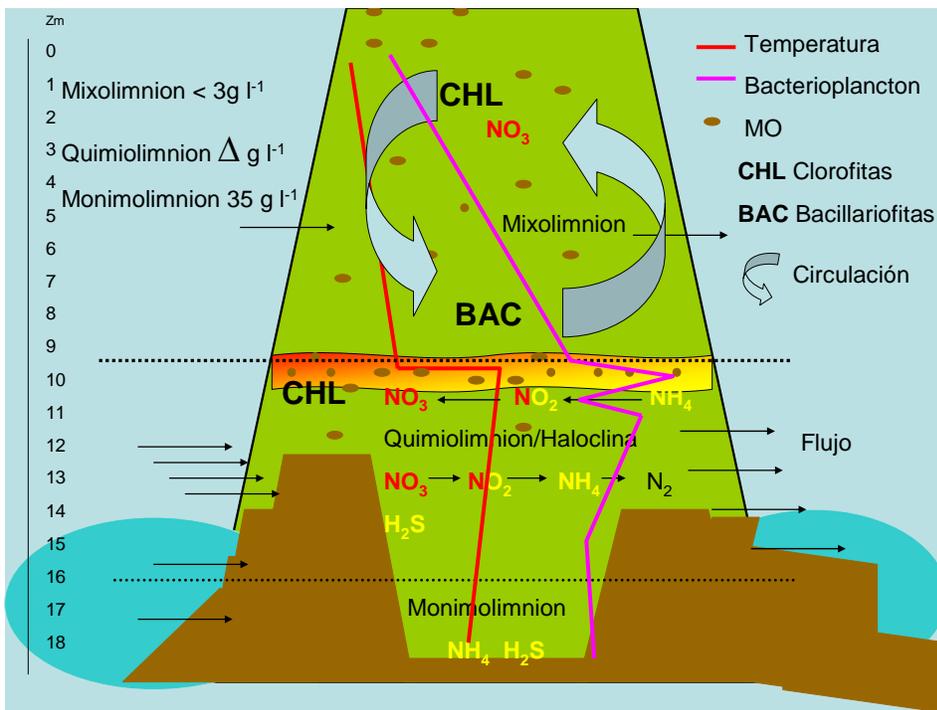


Fig. 44. Esquema de un cenote meromítico ideal.

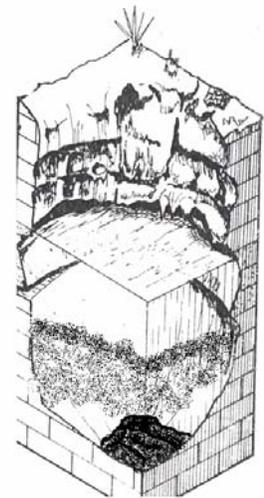


Fig. 45. Cenote Meromítico (Modificado de Gaona-Vizcayno et al. 1980)

Bacterioplancton en Nohoch Hol y cenotes lóticos

La densidad total de bacterias muestra dos máximos, a 10 m ($35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y 12 m ($23.1 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$), sin embargo estas densidades son menores a lo esperado cuando se tienen densidades de fitoplancton del orden de 10^6 cel L^{-1} , como es el caso de *Scenedesmus* en Nohoch Hol. El estudio del bacterioplancton en los cenotes en la península de Yucatán es escaso, sin embargo se sabe que las densidades de bacterioplancton presentan dilución al final de la temporada de lluvias – octubre/noviembre— (Alcocer *et al.* 1999), cuando el presente estudio fue realizado. Cabe mencionar que Alcocer *et al.* (1999) comparando cenotes lóticos y cuevas anquihalinas asociadas, encontró mayor densidad de bacterioplancton en las cuevas ($8 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$), que en los cenotes lóticos ($3.4 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) para la temporada de lluvias, contrario a lo esperado en función de la mayor exposición a la luz y aporte de materia orgánica alóctona, en los cenotes que en las cuevas. Nohoch Hol ($35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) presenta mayor densidad de bacterioplancton que las cuevas anquihalinas ($8 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y que los cenotes lóticos ($3.4 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$), estudiadas por Alcocer *et al.* (1999).

Las bajas densidades de bacterioplancton probablemente se deban a la concentración de FRD que limitan la productividad bacteriana (Alcocer *et al.* 1999).

La tabla 9 muestra la comparación del bacterioplancton de Nohoch Hol con cenotes lóticos del NE de la Península de Yucatán. De manera general, se puede decir que con excepción de cenote Escondido y Aktun-Ha -los cuales tiene una composición semejante entre sí- todos están dominados por bacilos entre un 64 y 80%. Nohoch Hol y Nohoch Nah Chich son los que se parecen más entre sí. El flujo principal del sistema Nohoch Nah Chich pasa cerca de Nohoch Hol, por lo que la semejanza quizás se deba a una conexión a través del poro de la roca, lo cual probablemente no es una limitante para la dispersión de las bacterias. Sin embargo, puede haber otros factores que generaran dicha semejanza sin que exista una interacción entre las poblaciones de bacterioplancton.

Tabla 9. Comparación de la composición porcentual y densidad del bacterioplancton por morfotipos en diferentes cenotes en época de lluvias. Nota. Casa cenote fue muestreado en tres niveles debido a que presenta estratificación por densidad. Superficie 12.5 g L⁻¹, Fondo 34.6 g L⁻¹ (Sánchez et al.2002)

CENOTES	Bacilos%	Filamentos%	Cocos%	Cel ml ⁻¹
Nohoch Hol (mixolimnion)	81.39	6.99	11.61	11.7x10 ³
Nohoch Hol (quimiolimnion)	82.15	11.18	6.65	17.3x10 ³
Nohoch Hol (monimolimnion)	84.38	10.1	5.51	12.9x10 ³
Casa (Superficie)	64.1	35.9	0	7.8x10 ²
Casa (haloclina)	Sin datos	Sin datos	Sin datos	~7.8x10 ²
Casa (fondo)	64.8	35.2	0	~9x10 ²
Nohoch Nah Chich	81.8	18.2	0	<1.5x10 ³
Cristal	83.5	5.9	10.6	2 x10 ³
Escondido (Superficie)	27.7	66.8	5.5	3.4 x10 ³
Escondido (fondo)	16.2	83.8	0	<3x10 ³
Aktun-Ha	19.4	80.6	0	~9x10 ²

Bacterioplancton y Cenotes Meromíticos

La columna de agua tanto de Cenote Grande como de Cenote Chico (ver anexo 1) ha sido caracterizada por mostrar un incremento en la conductividad, un máximo de temperatura (Fig. 42 y 43) condiciones que también presenta Nohoch Hol. Por lo cual es muy probable que Cenote Grande y Cenote Chico presenten una zona de transición óxica-hipóxica en el contacto entre la base del mixolimnion y el techo del quimiolimnion, como ocurre en Nohoch Hol. En el quimiolimnion de Cenote Grande y Cenote Chico se reportan las bacterias filamentosas *Beggiatoa alba* y/o *Thiothrix* sp. (Skiles *et al.* 1997); hacia el interior del quimiolimnion éstas son remplazadas por bacterias púrpura, probablemente de la familia Thiorhodaceae (Skiles *et al.* 1997), que viven en la zona de transición entre condiciones aerobias y anaerobias, pero dentro de la zona fótica. Al parecer Nohoch Hol, Cenote Grande y Chico presentan una sucesión vertical de bacterioplancton, probablemente determinada por la concentración de oxígeno disuelto. Nohoch Hol, Cenote Grande y Cenote Chico presentan similitudes en el mixolimnion y quimiolimnion.

En contraste Cenote Verde exhibe una sucesión diferente de bacterioplancton ya que presenta un mixolimnion heterogéneo (ver anexo 1), asociado con un descenso brusco de temperatura, que constituyen una capa de alta turbidez donde presenta actividad de *Chromatium* sp. y/o miembros de la familia Rhodosperillaceae. En la quimioclina se reportan *Beggiatoa* y/o *Desulfovibrio* (Wilson y Morris, 1994). Entre el piso del quimiolimnion y el techo del monolimnion se observaron concentración de H₂S mayor de 25 mg L⁻¹ (Wilson y Morris, 1994).

Si se compara el monolimnion entre los cenotes antes mencionados encontramos dos grupos, Nohoch Hol y Chico son mas parecidos entre si, en tanto Cenote Grande y Cenote Verde forman otro grupo.

En Cenote Grande y Verde el monolimnion debe ser al menos hipóxico, ya que se reportó la presencia de *Thyphliasina pearsei* y *Creaseria morleyi* en abundancia (Skiles *et al.*, 1997, Wilson y Morris, 1994) y *Beggiatoa* y/o *Thiothrix* recubren el detrito del fondo. Dichas observaciones sugieren, de manera indirecta, un cambio en las

condiciones de oxígeno disuelto, de anoxia a por lo menos en un rango hipóxico (2-3 mg L⁻¹). La presencia de un monimolimnion con una base hipóxica, también es evidencia indirecta de diferencias en el grado de oclusión e intercambio del agua de los cenotes con el acuífero, pero también con el mar. Existen otros indicadores que muestran la naturaleza móvil del monimolimnion. En el cenote Angelita se midió una velocidad de 0.3 cm s⁻¹ (Stoessell et al. 2002). Por tanto el tiempo que tarda el agua en atravesar un cenote de 30 m de diámetro es 2.7 hrs. y 6.5 hrs. para un cenote de 70 m de diámetro. Un monimolimnion relativamente oxigenados y con flujo puede clasificarse como atípico, ya que la limnología tradicional define dicha masa de agua como anoxia y estancada (Wetzel, 2001, Margalef, 1983, Lampert y Sommer, 1997).

En particular la concentración de oxígeno determina que en aquellos monimolimnions anóxicos la materia orgánica en el fondo sea descompuesta por *Desulfovibrio*, *Chromatium* o miembros de la familia Rhodospirillaceae. En tanto en aquellos fondos donde el monimolimnion es hipóxico puedan desarrollarse *Beggiatoa* y/o *Thiotrix*.

La comparación entre los cenotes meromíticos costeros de Quintana Roo muestra en primera instancia mayor similitud entre Nohoch Hol, cenote Grande y Chico que con cenote Verde, debido a que cenote Verde presenta un mixolimnion heterogéneo, y carece de inversión térmica; sin embargo la temperatura (26°C) es similar a la que se presenta en las capas de los cenotes Grande, Chico y Nohoch Hol que al parecer presentan bacterias oxidadoras y reductoras del azufre. Bajo una segunda aproximación, cenote Verde y cenote Grande son más parecidos entre sí ya que el monimolimnion o parte de él presenta condiciones al menos hipóxicas por lo que se pueden establecer bacterias oxidantes y reductoras de azufre como *Beggiatoa alba* o *Thiotrix* sp., situación que no se presenta ni en Nohoch Hol ni en cenote Chico. A pesar de las diferencias en las dos aproximaciones anteriores, se puede decir que -de manera general- en los cenotes meromíticos de la franja costera de Quintana Roo los ensambles bacterianos están determinados por las variaciones en la concentración de oxígeno disuelto, por el rango de temperatura (24.9-29°C) y la cantidad de materia orgánica alóctona y autóctona que favorecen el establecimiento de los ensambles. En el

techo del quimiolimnion, interfase óxica-hipóxica, las condiciones son óptimas para el desarrollo de bacterias oxidantes y reductoras de azufre como *Beggiatoa* y/o *Thiotrix* ya que la picnoclina sirve de soporte físico al bacterioplancton, lo cual se puede interpretar como una función estructural de la picnoclina.

Cenotes no meromícticos de la península de Yucatán

Los cenotes son sistemas acuáticos que ha recibido poca atención por parte de los investigadores mexicanos, en consecuencia información básica, como las variables ambientales, son escasas lo cual dificulta el hacer una comparación.

Los cenotes del NW de la península de Yucatán deben ser considerados una zona de estudio aparte de la del NE, principalmente por que presentan un contexto de deformación geológica diferente; el NW esta influenciado por la estructura de impacto "crater Chicxulub" y fracturamiento radial (Urrutia-Fucugauchi com.per., Beddows com.per), en tanto el NE presenta fracturamiento paralelo y perpendicular a la costa (fig.3).

Comparando Nohoch Hol con el cenote léntico Ixin-Ha, el cual se ubica en el NW de la península de Yucatán (ver anexo1), encontramos que la conductividad de Nohoch Hol en el mixolimnion es mayor que la de Ixin-Ha ($0.9-1.2 \text{ mS cm}^{-1}$). En octubre presenta estratificación por temperatura con 26°C de superficie hasta 15m de la columna, mostrando un decremento progresivo con la profundidad hasta 22°C en el fondo a 30m. El drástico decremento en el oxígeno de Nohoch Hol, arroja un promedio para el mixolimnion de $n=19$, $2.58 \text{ mg L}^{-1} \pm 1.85$, siendo similar al cenote yucateco Ixin-Ha en el periodo de máxima estratificación 3 mg L^{-1} (ver anexo 1). El pH tiene rango parecido 7.6 unidades en superficie y 6.9 en la base del mixolimnion en Nohoch Hol. Las concentraciones de oxígeno disuelto que resultan similares podría indicar que el balance fotosíntesis- respiración de los dos cenotes es parecido en la zona de actividad fotosintética. Sin embargo Díaz-Arce y colaboradores (2001) remarcan en su estudio que la producción de oxígeno en Ixin-Ha, se da en los primeros 7.5 m de a columna de agua, ya que mas abajo no hay luz suficiente y dos terceras partes de la columna de agua funciona como un intenso sistema respiratorio (Díaz-Arce et al. 2001), situación que bajo condiciones de meromixis también esta presentando Nohoch Hol.

Xlaká es un cenote lótico con menor conductividad ($1.3-1.5 \text{ mS cm}^{-1}$), que Nohoch Hol, en octubre presento estratificación por temperatura variando de $29-26 \text{ }^\circ\text{C}$ en los dos primeros metros de la columna de agua (ver anexo1), presentando estratificación térmica durante época de lluvias. El oxígeno disuelto fue el mismo reportado para Ixin-Ha, al igual que el pH. Ixin-Ha y Xlaká se parecen mas entre si, a pesar de tener diferente régimen de flujo, que Nohoch Hol con Ixnin-Ha, siendo los dos lénticos. Las principales diferencias se derivan de la meromixis ectogénica de Nohoch Hol, que incrementa su salinidad y contribuye en la inversión térmica.

Sistemas acuáticos en la península de Florida

La península de Florida tiene un origen e historia similar a la de Yucatán. Sin embargo no todos los lagos de disolución de la península de Florida se pueden compara con los cenotes, como se muestra a continuación.

Existen diferencias importantes entre los sistemas kársticos subtropicales del norte y centro de la Península de Florida, estudiados por Shannon y Brezonik (1972), y los cenotes de la Península de Yucatán. Los 55 sistemas están rodeados de bosque de pino y situados en terrenos de areniscas depositadas sobre la roca caliza, por lo que hidráulicamente no están conectados al acuífero principal, sino que están insertados dentro de una tabla de agua subsuperficial o acuífero secundario, en consecuencia la entrada de agua a los sistemas es principalmente pluvial, en consecuencia todos presentan baja conductividad y son someros ($Z \text{ max} < 10\text{m}$). Los lagos del centro y norte de Florida, presentan agua suave ("soft water"), en tanto los cenotes de la península de Yucatán son de aguas. Por lo anterior dichos lagos son mas parecidos a las aguadas que a los cenotes.

Únicamente ocho de los 55 lagos tienen profundidad suficiente para presentan estratificación térmica y de estos ninguno presenta inversión de temperatura ni anomalías térmicas y ninguno es meromíctico.

En la península de Florida las dolinas (*sinkholes*) son comunes tierra adentro, así como en la zona litoral y presentan semejanzas con los cenotes de la península de Yucatán. Por ejemplo, Jewfish Sink localizado a un kilómetro de la costa centro-oeste de

la península en las planicies de pastos marinos del Golfo de México (ver anexo2), hasta la década de los sesentas descargaba agua del acuífero de la península. Sin embargo, debido a la sobreexplotación del acuífero el flujo se detuvo en los años setentas y el sistema se estancó desarrollando condiciones anaeróbicas y de reducción de sulfatos debido a actividad bacteriana (Garman y Garey, 2005). El sistema se encuentra estratificado en cuatro capas (ver anexo2) y la masa de agua de fondo con una salinidad de 33-35 no se mezcla con el resto de la columna de agua (ver anexo 2), es decir es meromíctico. En la zona donde se da la transición entre agua oxigenada y la anóxica se desarrollan tapetes de bacterias oxidantes del azufre y en la zona anóxica las paredes están recubiertas por tapetes bacterianos.

Los tapetes de bacterias en la transición entre la zona oxigenada y la zona anóxica han sido reportados también para dolinas tierra adentro en la península de Florida que presentan masas de agua de fondo con elevada salinidad (ver anexo 2). De manera general, las dolinas estratificadas de la península de Florida son similares a los cenotes costeros de Q. Roo en la península de Yucatán. Sin embargo, vale la pena hacer algunas anotaciones de mayor detalle entre el cenote Nohoch Hol y Jewfish Sink, dado que el primero es un cenote tropical terrestre y el segundo una dolina subtropical litoral, lo cual determina que en el primero el mixolimnion presenta agua dulce (2.77 g L^{-1}), en tanto el segundo tiene una salinidad de 25 g L^{-1} . Nohoch Hol presenta una inversión térmica y un máximo de temperatura (26.7° C) a media agua (10 m) a finales de la temporada calido húmeda, en tanto el segundo muestra un máximo de temperatura (20° C) a media agua (10 m) en invierno sin inversión térmica. Nohoch Hol al final de la temporada calido-húmeda presenta en el quimiolimnion (10 m) un pH máximo de 7.41 unidades en tanto Jewfish Sink presenta 9.5 en verano en el quimiolimnion (20 m).

Cabe señalar que el agua anóxica de fondo en Jewfish Sink muestra valores de temperatura y salinidad que sugieren la posibilidad de que tenga conexión con el agua del Golfo a través de conductos del acuífero de la última glaciación (Garman y Garey, 2005). La correlación de valores de temperatura y salinidad con distancia a la costa de Florida, muestra a grandes rasgos que la influencia del agua del Golfo de México (16-

17°C y 33-35 g L⁻¹) es menor conforme aumenta la distancia a la costa y domina el agua del acuífero (22-24°C y salinidad < 10 g L⁻¹) (ver anexo 2).

Sistemas acuáticos en Bahamas

Devil 's Hole es una dolina meromítica bien conectada en el fondo con el mar en la Isla Abaco en Bahamas (ver anexo 2), presenta un monimolimnion al menos hipóxico, ya que se reporta fauna troglobia (Goehle y Store, 1978). En el mixolimnion se identificaron diatomeas y otros organismos fitoplanctónicos, al igual que en Nohoch Hol. Otras semejanzas con Nohoch Hol es un máximo de temperatura a media agua (18 m), importante actividad biológica en la quimioclina, pero a diferencia de Nohoch Hol, el quimiolimnion presenta un máximo de oxígeno (16 m) y por debajo el máximo de temperatura a media agua. El bacterioplancton reportado consta de *Chlorobium*, *Chromatium*, *Thiocystis* y bacterias verdes y púrpuras del azufre (Goehle y Store, 1978); si *Chromatium* es la bacteria que interpretamos que se desarrolla en Nohoch Hol, sería la única que compartiría con Devil`s Hole, sin embargo funcionalmente deben ser los mismos grupos actuando en dichos sistemas.

En Cayo Caicos, Bahamas, se encuentra la Poza Cottage a 4 km de la costa (ver anexo 2), la cual muestra similitudes con los sistemas meromíticos de Quintana Roo, México. Presenta un máximo de temperatura (30.7°C) a media agua (15 m) coincidente con la haloclina y la conexión con el mar es a través de pequeñas fisuras; de forma similar a Cenote Verde y Cenote Chico, la presencia de H₂S quema la piel expuesta y ennegrece el metal del equipo de buceo. El techo del monimolimnion tiene una profundidad de 18 m y la temperatura a 40 m es 22°C (Garvin, 2005).

Sistemas acuáticos en Australia

En la península Cape Range en el noroeste de Australia, a 1.7 km del mar Indico, se localiza Bundera Sinkhole (ver anexo3). Este sistema anquihalino muestra similitudes funcionales con Nohoch Hol tales como una inversión térmica, estratificación por salinidad, gradiente de potencial redox, máximo de nitrato subsuperficial, así como bacilos y filamentos bacterianos con metabolismos oxidado-reductores de nitrógeno y azufre (Humphreys *et al.* 1999 a y b).

10. CONCLUSIONES

Nohoch Hol es un cenote léntico, meromíctico ectogénico, estratificado por salinidad, con presencia de una inversión de temperatura y un máximo de temperatura a media agua. Presenta concentraciones bajas de nutrientes que corresponden a un estado oligotrófico como lo sugieren también las densidades reducidas de fitoplancton. Con base en su conductividad se reconocen tres masa de agua: mixolimnion ($5.04 \pm 0.43 \text{ mS cm}^{-1}$, $2.77 \pm 0.43 \text{ g L}^{-1}$), quimiolimnion ($41.65 \pm 11.84 \text{ mS cm}^{-1}$, $25.5 \pm 9.82 \text{ g L}^{-1}$) y monimolimnion ($55.09 \pm 0.11 \text{ mS cm}^{-1}$, $36.6 \pm 0.09 \text{ g L}^{-1}$). La fig. 44 muestra el esquema de un cenote meromíctico ideal.

El mixolimnion representa el 50.5% de la columna de agua y llega hasta los 9m de profundidad. Se caracteriza por ser una masa de agua dulce y menos densa en relación a las otras dos masas de agua. Se encuentra bien oxigenada y presenta una oxiclina marcada, el potencial redox es positivo; el pH va de ligeramente básico en la superficie muy probablemente asociado a la actividad fotosintética (7.5), a neutro en la base; presenta baja turbidez (8.5 NTU). El nitrato es el nutriente con mayor concentración ($\approx 35 \mu\text{M}$) mientras que el fósforo y los silicatos son reducidos. El fitoplancton muestra alternancia vertical en su dominancia entre clorofitas y bacilariofitas; presenta también cianofitas pero en menor cantidad; el máximo fitoplanctónico se ubica a 8 m ($700 \times 10^3 \text{ cel L}^{-1}$). El bacterioplancton se encuentra en baja concentración ($10.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) y dominado por el morfotipo bacilos (86%). Las bajas concentraciones de fósforo total y fósforo reactivo disuelto, así como las densidades de fitoplancton y bacterioplancton, sugieren limitación por fósforo. El mixolimnion "flota" sobre el quimiolimnion.

El quimiolimnion se extiende de los 8.5-9 a los 16 m de profundidad y representa el 36.5% de la columna de agua; es una masa de agua con salinidad y densidad intermedia, en donde se presenta la haloclina, así como las clinas de todas las demás variables medidas. Presenta el máximo de temperatura de la columna de agua (10 m, 26.7°C) debido a que esta capa "atrapa" la energía calorífica del sol. El cambio de densidad funciona como barrera física contra la gravedad y "sostiene" material

particulado, fitoplancton y bacterioplancton, por lo que se registra la máxima turbidez (22 NTU). Como consecuencia de lo anterior, se lleva a cabo *in situ* la remineralización de la materia orgánica retenida, por lo que el oxígeno disuelto, cambia rápidamente de hipoxia (0.98 mg L^{-1}) a anoxia, lo que produce un cambio en el potencial redox, de 257 a -119 mV. El pH a 10 m es ligeramente básico (7.41), probablemente porque, ligeramente por encima de esa profundidad la respiración produce acidez suficiente para alcanzar la constante de solubilidad de carbonatos, reduciendo la alcalinidad y permitiendo que la fotosíntesis basifique ligeramente el agua. Los nitratos y el amonio muestran una alternancia de máximos y mínimos entre los 10 y 12 m, lo cual sugiere que se presenta desnitrificación y nitrificación. El fitoplancton se interna en el quimiolimnion hasta la profundidad de 11 m, presentando la máxima densidad de fitoplancton en la columna de agua a los 10 m ($20.7 \times 10^6 \text{ cel L}^{-1}$) con una dominancia de *Scenedesmus* (99.35 %), en tanto que el bacterioplancton también alcanza su máxima densidad (10 m, $35.2 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) con una dominancia del morfotipo bacilos (75.7 %) con un perfil bimodal, que respalda la interpretación de los máximos de nitratos y amonio.

Finalmente, el monimolimnion muestra la mayor conductividad y salinidad, asociado a una mayor densidad y se extiende únicamente en la porción central del cenote desde los 15.5 m y hasta el fondo. Presenta una inversión térmica (26°C), es anóxico, con potencial redox negativo (-107 mV) y pH neutro. Domina el amonio ($9.28 \mu\text{M}$) sobre el nitrato ($0.116 \mu\text{M}$); el fósforo ($0.097 \mu\text{M}$), el fósforo total ($0.442 \mu\text{M}$) y el sílice ($160 \mu\text{M}$) están en mayor concentración con relación al mixolimnion, debido a que la fotosíntesis está segregada verticalmente y la respiración es el metabolismo imperante, dando lugar a la remineralización ya que es una masa de agua "estancada", carente de circulación. La densidad bacteriana ($12.9 \times 10^3 \text{ cel ml}^{-1}$) es menor a lo esperado y está dominada por bacilos (84.3 %). En sistemas estratificados, la masa de agua del fondo acumula materia orgánica en forma de detrito, debido a la exportación de la columna de agua y aportes alóctonos. La actividad de los heterótrofos que descomponen el detrito agota el oxígeno y generan condiciones anóxicas, así las masas de agua de fondo son típicamente un intenso sistema respirador, presentando dichas características, aunado a

la inversión térmica (26° C), era de esperarse un máximo profundo en la densidad del bacterioplancton, el cual no se presentó.

El fitoplancton está representado por clorofitas, cianofitas y diatomeas en una sucesión vertical dentro de la zona fótica y la dominancia alternada entre diatomeas y algas verdes; la diversidad ($H' 0.27$) y la riqueza taxonómica (11) son bajas en comparación con otros cenotes de la península de Yucatán ($H' 0.9$ y 88 respectivamente). La densidad máxima se encuentra en el quimiolimnion 20.7×10^6 cel L^{-1} , sin embargo las densidades son bajas incluso para sistemas tropicales, indicando oligotrofia, lo cual es consistente con las bajas concentraciones de nutrientes.

Los taxa de fitoplancton encontrados en Nohoch Hol son comunes en cenotes lóticos, lénticos y sistemas meromícticos, incluso de sistemas kársticos subtropicales. Como en otros cenotes lénticos dominan las clorofitas.

El bacterioplancton presenta tres morfotipos: bacilos, filamentos y cocos. La máxima concentración se encuentra en el quimiolimnion y las densidades son bajas. El bacterioplancton alterna ensamblas que por su posición en la vertical muy probablemente posean metabolismos oxidantes y reductores. Aparentemente el bacterioplancton encuentra las condiciones mas favorables para su desarrollo en la picnoclina/quimioclina, tanto por el "soporte" físico, como por la transición entre el ambiente hipóxico y anóxico, así como por el acúmulo de materia orgánica que es su alimento, como lo sugiere el máximo en el quimiolimnion y la carencia de un máximo en el monimolimnion.

Los nutrientes y el bacterioplancton muestran una distribución bimodal en el quimiolimnion lo cual sugiere que se presentan procesos de nitrificación y desnitrificación. Los perfiles de oxígeno disuelto y potencial redox apoyan dicha suposición.

El máximo de temperatura a media agua se ha reportado en otros cenotes e incluso en dolinas del archipiélago de las Bahamas, sin embargo, no todos los cenotes meromícticos presentan dicha característica. Tal vez depende de la cantidad de materia orgánica que es atrapada o retenida en la picnoclina y que esto tiene relación con la capacidad de retención de energía solar.

La anóxia del monimolimnion no es común a todos los cenotes meromícticos ya que el grado de asilamiento con el resto del acuífero varía e incluso se da intercambio a través de los poros de la roca, como lo indican las observaciones de fauna troglobia en esta zona. Los cenotes cuya masa de agua de fondo esta oxigenada se considera que presentan un monimolimnion atípico (Schmitter-Soto et al. 2002 b).

Los cenotes meromícticos muestran variación entre sí, como queda de manifiesto con las diferencias claras con los cenotes Verde y Grande, ubicados en zonas cercanas a Nohoch Hol.

La meromixis en la península de Yucatán parece ser un fenómeno común (al menos 8 cenotes se han registrado) si se compara con el resto del país (2 lagos). Lo anterior es producto de la penetración subterránea de la masa de agua marina.

Al comparar los sistemas meromícticos estudiados en la península de Yucatán con otras regiones kársticas del planeta se encontraron similitudes y diferencias.

La península de Florida tiene un origen e historia similar a la de Yucatán. Sin embargo no todos los lagos de disolución de la península de Florida se pueden compara con los cenotes, los sistemas mas parecidos son únicamente las dolinas (*sinkholes*). Existen dolinas tierra adentro y litorales estratificados por salinidad que presentan bacterias del azufre en forma similar a los cenotes costeros de NE de la península de Yucatán sin embargo hay diferencias en los descriptores ambientales debido al clima tropical de la península de Yucatán y subtropical de Florida. La diferencia en el clima probablemente también genere diferencias químicas y biológicas (géneros iguales pero

especies diferentes), sin embargo funcionalmente puede que las diferencias sean menores.

El archipiélago de las Bahamas también comparte origen e historia similar con las penínsulas de Florida y Yucatán. Las dolinas son denominadas *Holes* y *Ponds*, son similares a los cenotes y algunas presentan estratificación por salinidad. Al ser pequeñas islas el grosor del lente de agua dulce es menor y la mezcla es mayor que en las penínsulas. Sin embargo, también hay coincidencias funcionales entre sistemas estratificados en Bahamas y las penínsulas de Yucatán y Florida.

En el área kárstica de Cuenca (España) se ha reconocido al menos una dolina meromíctica, con similitudes fisicoquímicas y biológicas al compararla con las dolinas de Bahamas y las penínsulas de Yucatán y Florida. Cuenca (España) se encuentra a una altitud de 1000 m s.n.m. y bajo un clima mediterráneo lo que genera diferencias con las dolinas de Bahamas y las penínsulas de Yucatán y Florida, principalmente por carecer de influencia marina.

En el oeste de Australia como en el NE de la península de Yucatán la intrusión salina genera sistemas meromícticos ectogénicos con similitudes funcionales. Las elevadas temperaturas y la baja precipitación del clima semiárido, generan marcadas diferencias respecto de los sistemas de Bahamas y las penínsulas de Yucatán y Florida.

11. Perspectivas

Dado que los cenotes lóticos son el tipo de cenote más numeroso del NE de la península de Yucatán, los cenotes lénticos – donde puede desarrollarse la meromixis- son un caso especial, por lo que resulta fundamental tener una visión mas completa de estos ecosistemas y sus particularidades. Para así conocer su relación y función con el resto del acuífero, tanto presente como pasado, y poder diseñar planes de aprovechamiento sustentable del acuífero, que es la única fuente de agua potable en la región. Y que en el corto, mediano y largo plazo incrementará su demanda, uso, intrusión salina y contaminación, debido a los desarrollos urbanos planeados en función a la industria turística en crecimiento.

La importancia de los cenotes como ecosistemas radica en que son parte integral del acuífero y una forma de acceso a éste, comunicación entre selva, acuífero y arrecife; hábitat de especies endémicas, raras y amenazadas. Los cenotes son ecosistemas intrínsecamente vulnerables a la contaminación, debido a la naturaleza kárstica del acuífero. La materia orgánica es fundamental en el delicado balance hidrobiogeoquímico de los cenotes y el incremento de materia orgánica puede modificar el equilibrio del sistema y desplazándose hacia un estado eutrófico en el que la biota original no puede sobrevivir, y que eutrófica también el arrecife.

Las actividades antropogénicas actuales conllevan una importante destrucción del hábitat y un aprovechamiento no sustentable de los recursos, principalmente por extraer más agua del acuífero de la que se repone por precipitación, lo que propicia la salinización, por manejo inadecuado o nulo del drenaje doméstico e industrial, que es principalmente materia orgánica, al igual que las filtraciones de los tiraderos de basura a cielo abierto. Dicha descarga de materia orgánica es la principal fuente de contaminación del acuífero de los cenotes y del arrecife. Otra actividad que impacta directamente el acuífero es la minería dedicada a la explotación de la roca caliza, principalmente para elaborar cemento y rellenos para la industria de la construcción. La explotación ocupa explosivos lo cual puede tener un impacto sobre las fracturas de origen tectónico, adicionalmente, esta actividad utiliza agua para el lavado del material

pétreo. En ocasiones la explotación se da por debajo del nivel freático lo cual potencialmente podría incrementar la zona de mezcla entre el agua dulce y el agua marina, modificar los intercambios entre cuevas sumergidas, cenotes y el resto del acuífero.

Los cenotes son ecosistemas particulares de la península de Yucatán de los cuales tenemos un conocimiento aún escaso, donde la *línea base (baseline)* no existe debido a que no se ha realizado un esfuerzo académico y gubernamental con tal propósito y a que los sistemas ya están impactados.

El manejo sustentable del acuífero y la conservación de cenotes y arrecife, requiere para lograrse, limitar los desarrollos urbanos, principalmente en el número de habitantes, restringir la densidad de cuartos por hectárea de la industria hotelera, instalar redes de drenaje industrial y doméstico acopladas a plantas de tratamiento, programas educativos para la población en general sobre una cultura de uso racional del agua, así como un programa de monitoreo de calidad de agua en acuíferos, cenotes y arrecife. Como estrategias para lograr el objetivo, se deben considerar decretar reservas del acuífero, pago por servicios ambientales, proteger un número mayor al actual (6) de especies que habitan en cenotes mediante la inclusión en la NOM-059, implementación de Unidades de Manejo Ambiental (U.M.A.) (Ver Anexo 4).

Habiendo efectuado el reconocimiento limnológico de un cenote meromíctico, se pone en evidencia que es necesario caracterizar la variación estacional de los descriptores ambientales, nutrientes y plancton, así como determinar el patrón de circulación del mixolimnion --el cual probablemente sea monomíctico calido, circulando en la temporada de "nortes"—.

La determinación de la alcalinidad – en el estudio de cenotes en general- es una variable ambiental fundamental que se debe tomar en cuenta para entender las variaciones del pH y el proceso de disolución. Así mismo la medición de formas del azufre, cuyo ciclo biogeoquímico es relevante en los procesos de remineralización

conducidos por reacciones redox, tanto en el quimiolimnion como en el momimolimnion, y que también está involucrado en el desarrollo del karst, permitirá una aproximación complementaria de la circulación del carbono y el nitrógeno en dichos sistemas.

Algunos aspectos relevantes para entender el contexto regional de los cenotes lénticos y meromícticos del NE de la península de Yucatán, son la medición del flujo a través del poro de la roca, tiempo de residencia de cada masa de agua. Medir la variación de la profundidad de la haloclina por mareas, tormentas y huracanes, así como la mezcla producidos por estos fenómenos.

Normalmente los lagos presentan un control morfométrico en el desarrollo de circulación, estratificación y procesos relacionados (p.e. atelomixis). Dado que a los cenotes lénticos y meromícticos se les ha comenzado a estudiar desde una aproximación limnológica, se debería evaluar el papel de la morfometría en la circulación del mixolimnion, así como en variaciones de la profundidad de la haloclina y si es que esta variación tiene algún efecto en el suministro de nutrientes al mixolimnion.

Algunos aspectos biológicos relevantes en estudios futuros son la identificación específica de fitoplancton y de ser posible de bacterias, consorcios fúngicos y zooplancton, así como sus interacciones o relaciones tróficas ya que permitiría revelar algunos aspectos del circuito microbiano, el cual debe jugar un papel importante en los sistemas dada la limitación por fósforo. En ese mismo sentido la evaluación del flujo de energía o la red trófica, usando la técnica de isotopía estable ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{34}\text{S}$), podría arrojar resultados importantes.

Continuando con preguntas relacionadas con el estado trófico del sistema, sería útil medir productividad primaria. Por ejemplo los experimentos de botellas claras y oscuras serían un complemento del balance fotosíntesis respiración. Debería determinarse de forma directa la ocurrencia de quimiosíntesis y su aporte a la producción del sistema usando isotopía estable ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{34}\text{S}$).

Desde un punto de vista holístico, evaluar el papel funcional de cada masa de agua, así como conocer si la variabilidad interna de cada masa de agua modifica la dirección de los procesos de producción, descomposición y reciclado del sistema como un todo, sería relevante para estimar los efectos de la eutrofización.

Los estudios de reconstrucción paleoclimática tienen un gran potencial en los cenotes meromícticos con monimolimnion anóxico, así como en los sistemas anquihalinos en general. Como se menciona en el Apéndice 1, en el cenote Angelita, el sedimento superficial de la montaña de detrito en el monimolimnion contiene foraminíferos, ostrácodos y bivalvos, por lo que núcleos de sedimento pueden arrojar información relevante, que permita complementar la información paleoclimática y arqueológica que existe sobre la región.

La comparación con petenes también puede arrojar información relevante en estudios de cambio climático ya que los petenes pueden ser un escenario futuro para zonas inundables y los efectos en el acuífero.

12. Reflexión teórica: *Gedanken Experiment*

Dado que la literatura de sistemas meromícticos es escasa, aún no existen generalidades consensuadas que sirvan de marco de referencia a las descripciones de cenotes meromícticos. Por ejemplo, Schmitter-Soto et al. 2002 a y b, hace generalizaciones donde mezcla o asume los mismos procesos para cenotes lénticos y lénticos meromícticos. Schmitter-Soto et al. 2002 a y b, sugiere que los cenotes lénticos pueden incrementar fácilmente su estado trófico, debido al tiempo de residencia del agua que permite la acumulación de materia orgánica. Habría que aclarar que el mecanismo que incrementa en el estado trófico sería la circulación anual, que aporta los nutrientes remineralizados en el hipolimnion, al resto de la columna de agua. No solo Schmitter-Soto et al. 2002 a y b no es explícito sino que esto nunca se ha medido, ya que no existen trabajos que evalúen estacionalidad, proceso de eutrofización ni una serie de tiempo de un cenote léntico. Por su lado los cenotes lénticos meromícticos --al menos Nohoch Hol-- aparentemente presentan una resistencia al incremento de estado trófico, debido a que la estratificación es permanente lo cual aísla al monimolimnion, donde la mayor parte de la remineralización se lleva a cabo.

Cabe preguntar, ¿cómo se clasifica tróficamente a un sistema meromíctico?

La clasificación de lagos de Lewis (1983), que es una clasificación basada en la mezcla, propone que los sistemas meromícticos se clasifiquen de acuerdo al patrón de mezcla del mixolimnion. ¿Cómo clasificamos tróficamente un sistema meromíctico? Seguir análogamente a Lewis y usar el estado trófico del mixolimnion, sería una clasificación parcial. Se requiere una aproximación al sistema como un todo. Por lo que se podría hacer un promedio ponderado de las tres masas de agua, la ponderación a mi parecer estaría en función del porcentaje relativo de cada masa de agua.

Los cenotes han sido clasificados por sus concentraciones de nutrientes y densidades tanto de fitoplancton como de bacterioplancton como sistemas predominantemente oligotróficos (Schmitter-Soto *et al.* 2002a) e incluso en el rango de oligotrofia-ultraoligotrofia (Alcocer *et al.*, 1999). Sin embargo, en la clasificación hidrobiogeoquímica se reconoce que los cenotes con flujo restringido pueden aumentar su estado trófico (Schmitter-Soto *et al.* 2002). Debido a que el incremento de estado

trófico en cenotes de flujo restringido esta controlado principalmente por la liberación de nutrientes en los periodos de circulación de la columna de agua, los cenotes lénticos meromícticos deben mantener un mixolimnion con nivel trófico bajo ya que la estabilidad de la estratificación impide el resuministro de nutrientes desde la aguas de fondo. En cenotes meromícticos los mecanismos que pueden propiciar el ingreso de nutrientes son la difusión molecular y la erosión de la quimioclina. La erosión de la quimioclina por oscilaciones forzadas por viento son poco probables ya que en general el área de exposición al viento de los cenotes es pequeña y adicionalmente están protegidos del viento tanto por el dosel de la selva o porque el nivel de la superficie del agua esta por debajo del terreno circundante y las paredes protegen del viento. Sin embargo cambios en la profundidad de la haloclina sea por mareas o vientos de tormenta en el litoral o huracanes, pudieran erosionar la quimioclina, suministrando nutrientes al mixolimnion; también pudiera ser que la circulación del mixolimnion erosione la quimioclina resuspendiendo nutrientes. Otro factor que puede controlar entrada de nutrientes es la materia orgánica particulada que al irse acumulando en el fondo del embalse forma una montaña de detrito la cual puede alcanzar una altura suficiente para emerger del monimolinion y quimiolimnion quedando expuesta al mixolimnion y enriquecer dicha masa de agua cada vez que circule.

Nohoch Hol es el primer cenote meromíctico que se describe con cierto nivel de detalle y si bien las concentraciones de nutrientes y las densidades de fitoplancton y bacterioplancton indican oligotrofia, la riqueza, diversidad y dominancia del fitoplancton no son congruentes con el carácter oligotrófico lo que tal vez es indicador de algún agente estresante que afecta la diversidad y la riqueza; sin embargo quedan descartado como agente estresante la contaminación con nutrientes por actividades antropogénicas.

El sesgo de la limnología hacia la holomixis comparada con la meromixis y el grado de desarrollo de la limnología tropical dificultan el entendimiento de la evolución trófica de los sistemas meromícticos tropicales como es el caso del cenote Nohoch Hol.

Tal vez se requiera una clasificación trófica propia de sistemas meromícticos, que permita entender por un lado los procesos internos de cada masa de agua, el papel funcional de cada masa de agua en el sistema como un todo y el producto de la integración de ambas escalas en una escala superior. Si en un mismo sistema compartimentalizado hay productividad primaria (fotoautotrofia y quimiolitioautotrofia), producción reciclada (quimiorganotrofia) y consumo (heterotrofia) con segregación vertical, clasificar el sistema como un todo basándose únicamente en la fuente dominante de materia orgánica sería igual a simplificar el sistema y eso sería un sesgo muy importante para, su entendimiento. La mejor aproximación sería aquella que no subestime o sobrestime las fuentes productoras de materia orgánica.

Las categorías tróficas fueron construidas con base en los ecosistemas sustentados por la productividad primaria por luz, pero cabe preguntar si la quimiosíntesis requiere un sistema de clasificación trófica propia, y también esclarecer diferencias y puntos intermedios entre fotosíntesis, quimiosíntesis, productividad primaria y productividad secundaria y la posibilidad de que se complementen. La quimiosíntesis es en general subestimada, pero si es que la quimiosíntesis tiene un papel relevante en sistemas kársticos de la península de Yucatán, una clasificación trófica que considere la producción por energía química ayudara a entender el estado y evolución trófica de los sistemas kársticos de la península. Por ejemplo en la península de Florida se realizó un esfuerzo para desarrollar indicadores tróficos propios para sistemas subtropicales (Shannon y Brezonik, 1972).

De acuerdo con la cantidad de materia orgánica alóctona que entra a los cenotes y la producción *in situ* los cenotes se consideran sistemas heterótrofos (Schmitter-Soto et al., 2002), sin embargo la evidencia indirecta de la actividad microbiológica sugiere que se dan todas las formas de producción biótica: fotoautotrofia, quimiorganotrofia y quimiolitioautotrofia. Si a lo anterior agregamos que hay heterotrofia, quizás se pudiera decir que al menos los cenotes meromícticos son sistemas mixotróficos con dominancia heterótrofa.

Otro punto que me gustaría plantear aquí tiene que ver con los Petenes y Agudas. Paralelo a la costa dentro de los humedales y ciénegas, hay otro tipo de cenotes conocidos localmente como petenes. Estos cenotes se formaron cuando el nivel del mar era mas bajo que el actual (Schmitter-Soto *et al.* 2002), en alguna de las transgresiones del último periodo glaciario. Si bien la mayoría de los cenotes se deben haber formado en la última glaciación, es claro que no se formaron al mismo tiempo, sino en fusión a la distancia a la costa, al desarrollo, flujo y descarga del acuífero en esos momentos, y a la alternancia de regresiones y transgresiones.

Los petenes pueden haberse formado en el seno de la selva y en la actualidad al localizarse en la ciénega o manglar tiene un papel funcional diferente, dado que el ambiente es diferente. De tal forma que la evolución individual de los cenotes, debe de conservar un registro local del cambio de ambientes. Así mismo al estudiar el registro histórico de cenotes individuales conoceremos la ontogenia de ese sistema en particular y su contexto local, que mostrará, seguramente, desarrollos no lineales. Es decir que dos cenotes que fueran de la misma edad tendrán historias diferentes, algunas se acoplaran al paradigma limnológico, que nos dice que un sistema al ir envejeciendo se va azolvando e incrementando su estado trófico, pero otros diferirán ya que tal vez han aumentado su profundidad por disolución biogénica, o cambiado su patrón de flujo de lótico a léntico, o regresado a lótico, o ha pasado de estar en una ciénega o manglar a la selva o al litoral. Aquellos que ahora son litorales, dependiendo del diámetro en ingles se les denomina *Blue Holes* o *Sinks*. En México han recibido poca o nula atención académica y es ambigua su denominación. Es claro que de origen son cenotes, ligados a las dinámicas y flujos del acuífero cuando el nivel del mar era menor. Por tanto su relación con el acuífero actual debe de estar en función de la distancia a la costa, las descargas del acuífero y la profundidad (ver anexo 2 Jewfish Sink).

Las Aguadas, de acuerdo con Gaona-Vizcayno y colaboradores (1980), son estanques donde se almacena agua de lluvia en forma natural, con pobre (o nula) conexión con el acuífero, con alta actividad orgánica, diámetros de hasta 100 m y someros (i.e 15 m). Las aguadas permanentes son cenotes azolvados, donde el sellamiento de poros y fracturas se da por el aporte de materia orgánica, y tienden a la desecación (Flores Nava et al. 1989). Las aguadas al parecer si se acoplan al paradigma

limnológico del desarrollo de lagos, que en una etapa senil son someros por azolve y con un estado trófico elevado.

Aquellos sistemas – Petenes, “Hoyos Azules” y Aguadas-- que pierden completamente su relación con el acuífero tal vez podrían denominarse paleocenotes.

Literatura citada

- Alcocer, J., A. Lugo, M.G. Oliva, 2002. Los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato. en: De La Lanza G. y J.L. García Calderón (compiladores). Lagos y Presas de México: paginas 193-211. AGT Editor. México.
- Alcocer J., A. Lugo, Sánchez M.R. y Escobar E, 1998. Isabela Crater-Lake: a Mexican insular saline lake. *Hidrobiología* 381:1-7.
- Alcocer J., A. Lugo, E. Marín, y E. Escobar, 1998. Hydrogeochemistry of water from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, northeastern Yucatán, México. *Hydrogeology Journal*. 6:293-301.
- Alcocer J., A. Lugo, M. R. Sánchez, E. Escobar y M Sánchez, 1999. Bacterioplankton from cenotes and anchialine caves of Quintana Roo, Yucatán Península, México. *Revista de Biología Tropical* 47: 73-80.
- Alvarez F., J. Alcocer, E. Escobar-Briones. 2000. Sistemas anquihalinos en México. *Ciencia y Desarrollo Nov/Dic. Vol. XXVI. N° 155*
- Alcocer J. y E. Escobar, 1996. Limnological regionalization of México. *Lakes Reserv. Res. Mgnt* 2:55-69.
- Back. W., 1995. Hydrogeology of the Yucatán. In Swinehart, J. y D. Loopes (eds), *Yucatán 1990. a Source Book on Coastal Quintana Roo*. México. Univ. Nebraska, Lincoln:25-40
- Beddows P., Smart P.L., Whitaker F.F., Smith S.L. 2002. Density stratified groundwater circulation on the Caribbean coast of the Yucatán peninsula, México. *Karst Waters Institute Special Publication* 7

- Beddows P.A. 2004. Groundwater Hydrology of a Coastal Conduit Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatán Península, México. Universidad de Bristol. Facultad de Ciencias Geograficas, Tesis doctoral. 240 p.
- Butterlin, J. Y F. Bonet, 1963. Las formaciones cenozoicas de la parte mexicana de la península de Yucatán. Ingenieria Hidráulica en México, v. 17, p. 63-71
- Cole G.A. 1979. Textbook on limnology. Mosby, San Luis Missouri.
- Cooper H.H. 1959. A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and SALT water in a coastal aquifer. J. Geophys. Res. Vol.64 pp461-468. April
- Cordemex, 1980, Diccionario Maya Cordemex: Mérida, Yucatán, Cordemex, 360 p. citado por Gaona-Vizcayno et al. 1980.
- Challenger, A., 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO. México.
- De La Lanza G. y J.L. García Calderón (compiladores), 2002. Lagos y Presas de México. AGT Editor. México.
- Espinaza-Pereña R, 1990. Propuesta de clasificación del karst de la republica Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis profesional, 131 p.
- Flores-Nava, A., Valdéz-Lozano D., Sánchez-Crespo M. 1989. Comportamiento fisicoquímico de una manifestación cárstica de Yucatán. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM 16(2):223-230.
- Freeze, A. y Cherry. J., 1979, Ground Water, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 679 p.

- García, E., 1973. Modificación al sistema de clasificación climática de Köeppen (para adptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana), UNAM, M
- Gaona- Vizcayno, S., T. Gordillo A. y M. Villasuso-Pino, 1980. Cenotes, Karst Característico: Mecanismos de Formación. Revista Instituto de Geología. UNAM. Vol. 4. número 1 p. 32-36
- Garman M. y Garey J. 2005. The mysterious Clouds of Jewfish Sink. NACD journal. Vol. 38(2) 7-8. Gainesville, Florida.
- Garvin J. 2005. The beautiful sea monster. NACD journal. Vol. 38(2) 19-21. Gainesville, Florida.
- Goehle K.H. y Storr J.F. 1977. Biological Layering Resulting from Extreme Meromictic Stability, Devil 's Hole, Abaco Island, Bahamas. Proceedings: 20th Congress, Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie; Copenhagen, Vol. 20, Part 1, p 550-555
- Gopal, B. y Wetzel R.G. 1995. Limnology in developing countries. SIL- International Association for Limnology, Vol.1:230 pp.
- Hall, F.G.,1936. Physicl and chemical survey of cenotes of Yucatán. Carneige Inst. Wash. Publ. 457:5-16
- Hydrolab, 1991. Hydrolab DataSonde 3 operating manual. Hydrolab Corporation. Austin.
- Holthuis, L. B. 1973.Caridean shrimps found in land-locked saltwater pools at four Indo-West Pacific localities (Sinai Peninsula, Funafuti Atoll, Maui and Hawaii

Islands), with a description of one new genus and four new species. Zool. Verhand. (Leiden) 128:1-48.

- Humphreys W.F. 1999. Physico-chemical profile and energy fixation in Bundera Sinkhole, an anchialine remiped habitat in north-western Australia. Journal of the Royal Society of Western Australia 82:89-98
- Humphreys W.F., Poole A., Eberhard S.M. y Warren D. 1999. Effects of research diving on the physico-chemical profile of Bundera Sinkhole, an anchialine remiped habitat at Cape Range, Western Australia. Journal of the Royal Society of Western Australia 82:99-108
- Hutchinson. 1957. A treatise on limnology. Geography, physics and chemistry. Vol. 1 Wiley, Nueva York:1015 pp.
- Iliffe, T.M. 2000. Anchialine cave ecology. Paginas 59-76 en: Ecosystems of the world. 30. Subterranean Ecosystems, H. Wilkens, D.C. Culver, y W.F. Humphreys (eds), Elsevier Science. Amsterdam.
- INEGI, 1987. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Hoja escala 1:250, 000 Cozumel F16-11.
- Jiménez B. y Marín L. (eds.) 2004. El agua en México vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F.
- Lampert W. y Sommer U., 1997. Limnoecology: The ecology of lakes and streams. Oxford University Press. Nueva York
- Lazcano Sahún, C. 1985. The Deep cenotes. Association for Mexican Cave Studies, activities Newsletter. Num. 15 p. 70-75.

- Lesser, J.M., 1976. Resumen del estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la península de Yucatán. Boletín de Divulgación Técnica, 10:1-11.
- Lewis, W.M. 1973. The thermal regimen of lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. Limnology and Oceanography. Vol 18(2) Marzo. P200-217.
- Lewis, W.M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. Can. J. Fish Aquat. Sci. Vol. 40:1779-1787
- Lopez- Ramos E., 1975. Geological summary of the Yucatán peninsula. En Nairn A.E.M. y Stehli (eds), The ocean basin and margin. III. The Gula of Mexico and the Caribbean. Plenum, New York:257-282.
- Lugo-Hubp J., Aceves-Quezada J.F. y Espinasa-Pereña R., 1992. Rasgos Geomorfológicos Mayores de la Península de Yucatán. Revista Instituto de Geología. UNAM. Vol. 10 número2 pp. 143-150.
- Maciolek, J.A. 1983. Distribution and biology of Indo-Pacific insular hypogeal shrimps. Bull. Mar. Sci. 33:606-618.
- Margalef R. 1983. Limnología. Omega. Barcelona
- Marín S. L.E. y Perry E.C. 1994. The hydrogeology and contamination potencial of northwestern Yucatán, México. Geofísica Internacional, vol. 33, Num.4, pp619-623.
- Marín S. L.E., Steinich B., Pacheco J. y Escolero O.A., 2000. Hydrogeology of contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, México. Geofísica Internacional, Vol. 39 número 4 pp. 359-365.

- Marín S. L.E., Pacheco A. J.G., Méndez R.R. 2004. Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: Jiménez B. y Marín L. (eds.) 2004. El agua en México vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F.
- Marín S. L.E, Escolero O. A., Rebolledo M. V., Balcazar M., Santillán P., Martínez V. 2005. Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas del Parque Xcaret y sus alrededores, Estado de Quintana Roo. UNAM. I. Geofísica.
- Martin L. H. Thomas, K. Eakin y A. Logan 1991. Physical characteristics of the anchialine ponds of Bermuda. Bulletin of Marine science , 48(1):125-136
- Martin H.W. Morris T.L. y Brigmon R.L. 1994. Bioprospecting in underwater caves. NACD journal, Vol 26 (2):25 Gainesville, Florida.
- Ortega-Gutierrez F. y R. Gonzalez-Gonzalez, 1980. Nódulos de periodotita en la isla Isabel, Nayarit. Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Revista 4:82-83
- Pacheco J. A. y Cabrera S.A. 1997. Groundwater contamination by nitrates in the Yucatán Peninsula, México. Hydrogeology Journal, vol. 5, Num. 2
- Parsons, T.R., Y. Maita y C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods of seawater analysis. Pergamon Press. London. 173 p.
- Perry , E., Swift J. Gamboa J., Reeve R. Marín L. y Vilasuso M. 1989. Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, México. Geology. Vol. 17: 818-821
- Perry E. Marín L. McClain J y Velázquez G. 1995. Ring of cenotes (sinkholes), northwest Yucatán, México: its hydrogeologic characteristics and posible association with the Chicxulub impact crater. Geology. Vol 23:17-20

- Porter, K.G. y Y.S. Feig. 1980. The use of DAP1 for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.* 25: 943-948.
- QRSS 2005. Quintana Roo Spelological Survey. www.caves.org/project/qrss/qrss.htm
- Reddell, J.A. A review of the cavernicole fauna of Mexico, Guatemala and Belice. 1981. *Texas Mem. Mus. Bull.* 27:1-137
- Rosales Hoz M.T.L., 1980. Manual de laboratorio de oceanografía química. CCMYL UNAM. México. D.F.
- Rzedowski J., 1981. *Vegetación de México*. Limusa. México
- Saltsman D., 1995. *The art of safe cave diving*. National Asociation for Cave Diving. Gainesville Florida.
- Sánchez M, Alcocer J., E. Escobar, A. Lugo, 2002. Phytoplankton of cenotes and anchialine caves along a distance gradient from northeastern coast of Quintana Roo, Yucatan Península. *Hydrobiologia* 467: 79-89.
- SARH, 1989. *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Comisión nacional del Agua. Subdirección General de Administración de Aguas. Gerencia de Aguas subterráneas. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Quintana Roo*. México D.F.
- Schmitter-Soto J.J., E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elias-Gutiérrez, L.E. Marín, 2002. a Los cenotes de la península de Yucatán. En: De La Lanza G. y J.L. García Calderón (compiladores). 2002. *Lagos y Presas de México*. AGT Editor. México.

- Schmitter-Soto J.J., F.A. Comin, E. Escobar-Briones, J. Herrera-Silveira, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elias-Gutiérrez, V. Díaz-Arce, L.E. Marin y B. Steinich, 2002. b. Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatán Península (SE México) *Hydrobiología* 467: 215-228
- Skiles W., Butt L. Morris T. Hayes A.W. 1997. A survey of two cenotes and their associated spelean features, Within CALICA property, Quintana Roo, México. Karst Environmental Services, Inc. High Springs, Florida.
- Steinich B. y Marín L.E., 1997. Determination of flor characteristics in the aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatán, México. *Journal of Hydrology* 191: 315-331.
- Steinich B., 1996. Investigaciones geofísicas e hidrológicas en el noroeste de la Península de Yucatán, México. Tesis doctoral, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Stock J.H., T.M. Iliffe y Williams D. 1986. The concept "anchialine" reconsidered. *Stygologia* 2:90-92
- Stoessel R.K, W.C. Ward, B.H. Ford y J.D. Schuffert, 1989. Water chemistry and CaCO₃ dissolution in the saline part of an open-flow mixing zone, coastal Yucatan Peninsula, México. *Bull. Geol. Soc. Am.* 10:159-169.
- Stoessel R.K., Y.H. Moore y J.G. Coke, 1993. The occurrence and effect of sulfide oxidation on coastal limestone dissolution in Yucatan Cenotes. *Ground Wat.* 31:566-575.
- Stirling, H.P. 1985. Chemical and biological methods of water analysis for aquaculturists. Institute of Aquaculture. University of Stirling. Scotland. 118 p.

- Strickland, J.D.H. y T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Bull. Fish. Res. Board. Can. 167: 1-310. Margalef, R. 1983. Limnología. Omega. Barcelona. 1010 p.
- Utermöhl, H., 1958. Zur Vervollkmmnung der quantitativen phytoplaqnkton-Methodik. Mitt. Internat. Verein. Lmnol. 9:1-39
- Velásquez, G., 1995. Estudio geoquímico de anillo de cenotes, Tesis de maestria, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. México:77 pp.
- Ward, W.C., A. E. Weidie y W. Back, 1985. Geology and hydrogeology of the Yucatán Peninsula. New Orleans Geol. Soc., p. 23-95. New Orleans.
- Weidie, A.E. 1985. Geology of the Yucatán Platform; En: Geology and Hydrogeology of the Yucatán and Quaternary Geology of Northeastern Yucatán Peninsula (Part I); Nex Orleans Geological Society, p 1-19. New Orleans.
- Wetzel R.G. 1975. Limnology. Sauders, Filadelfia
- Wetzel, R.G. y G.E. Likens. 1979. Limnological analyses. Saunders. Philadelphia. 375 p.
- Wetzel R.G.y Likens G.E. 1995. Limnological Analyses. Springer-Verlag Nueva York.
- Wetzel R.G. y Gomal B. 1999. Limnology in developing countries. SIL- International Association for Limnology, Vol.2:330 pp.
- Wetzel R.G: 2001. Limnology. Academic Press NY

- Wilson, E.M. 1980. Physical geography of the Yucatán Peninsula. En: Moseley, E. y E. Terry (eds), Yucatán. A World Apart. Univ.
- Wilson W.L. y Morris T.L. 1994. Cenote Verde: a meromictic karst pond, Quintana Roo, México. Proc. Conf. Breakthroughs in Karst Geomicrobiol, Colorado Springs.

13. Anexo 1

CENOTES MEROMICTICOS

Cenote Grande y Cenote Chico

Ambos se encuentran dentro de la propiedad de CALICA S.A de C.V. en el estado de Quintana Roo México. La exploración de estos cenotes fue realizada en 1997 por Karst Environmental Services, Inc.(KES) a petición de la empresa, con el fin de explotar industrialmente al máximo la roca madre.

El documento asegura no haber encontrado restos arqueológicos, sin embargo el INAH realizó un salvamento arqueológico dirigido por el Dr. Luis Alberto Martos (adscrito a la DEA) en esta propiedad principalmente por la presencia de altares adyacentes a los cenotes dentro de la propiedad. (com. per.).

Cenote Grande

Tiene una forma aproximadamente circular con 70 m de diámetro en la superficie del agua. Es un cenote de paredes verticales en el noroeste, en el extremo sureste presenta una saliente de 21 m suspendida a 13 m de la superficie del agua. La máxima profundidad del embalse es 36.6 m.

El fondo del cenote esta cubierto de manera abundante por sedimento orgánico principalmente alóctono que forma una montaña de detrito con dos crestas que se elevan desde 36.6 m hasta 12.2 m de profundidad, sobresaliendo de la capa sulfhídrica.

El mixolimnion está asociado con un espeleosistema en la pared este a 4.5 m de profundidad. El mayor desarrollo se da en dirección *corriente abajo* (595 m). En la pared oeste hay cuatro cuevas con dirección *corriente arriba* poco desarrollada.

Vale la pena mencionarlas siguientes observaciones.

Los buzos presentaron quemaduras en la piel al bucear en la capa sulfhídrica.

Reportan la larva del díptero *Chaoborus* en la zona sulfhídrica.

Los troglobios *Ogilbia pearsei* (*Ogilbia pearsei* es sinónimo de *Typhliasina pearsei*) y *Creaseria morleyi* se observaron en el monimolimnion.

La cueva *corriente abajo* presenta bivalvos vivos y abundantes conchas. El número de bivalvos decrece progresivamente al aumentar la distancia a la entrada hasta 100 m. de la misma. Los organismos troglobios observados: *Typhliasina pearsei* (tres individuos); *Creaseria morleyi*; *Typhlatia sp.*; *Creaseriella anops.*; *Rhamdia guatemalensis*.

El reporte propone que el quimiolimnion actúa como un techo químico generando condiciones de oscuridad generando un nicho para organismos troglobios. El número de individuos de *Typhliasina pearsei* en el monimolimnion fue mayor que el observado en el espelosistema.

Cenote Chico

Tiene una forma cercana a un ovalo de 70 m de largo por 52 m de ancho, en un eje norte-sur. La pared oeste, que es la parte más profunda del embalse, es un "volado" de roca, suspendido 14 m en el aire a 14 m sobre la superficie del cenote. La pared este es casi vertical con una ligera inclinación hacia el agua. En la base de la pared este, una pila de bloques desplomados constituye una orilla fangosa con 18 m colonizada por

vegetación propia del área. El fondo del cenote es una pendiente que desciende de este a oeste hasta 31 m en el punto de mayor profundidad.

Presenta dos espeleosistemas ambos con entrada en el lado oeste del cenote a 4.6 m. de profundidad. El sistema *corriente arriba* tiene un desarrollo de 394 m. El sistema *corriente abajo* tiene entrada a 6m de profundidad y se extiende 421 m.

Cenote Angelita

La morfometría es casi circular 25-30 m de diámetro, con paredes verticales y la profundidad máxima del embalse es 60m. Distacia a la costa 11.67 Km. Carece de conexión con sistemas de flujo horizontal.

El mixolimnion se extiende desde la superficie hasta 30 m. El quimiolimnion va de 30 m a 33 m. Testimonios de buzos locales indican que el grosor del quimiolimnion ha disminuido debido ha que el cenote se usa para buceo recreativo.

El cenote presenta una montaña de detrito que se alza desde el fondo y atraviesa el quimiolimnion.

En el monimolimnion a 58 m de profundidad se encuentra una conexión reminiscente, de un sistema de flujo horizontal, completamente bloqueada.

se abre una entrada de lo que parece fue la conexión con un sistema de flujo horizontal.

El que sustenta esta tesis en diciembre de 2002 colectó, con *coprofrascos*, sedimento superficial de la montaña de detrito en el monimolimnion. La muestra se refrigeró hasta su transportación al laboratorio Ecología del Bentos ICMYL-UNAM, donde se le añadió rosa de bengala y posteriormente fue tamizado. La revisión al microscopio mostró abundancia de foraminíferos y ostrácodos. La identificación de foraminíferos corrió a cargo de M. en C. Elsa Arellano Torres (ICMYL-UNAM), que reportó: *Lubigerinoides ruber*, Sacculíferos y el Truncatulinoide *Globorrotalia*, todos planctónicos.

Cenote Verde

La morfometría es casi circular con diámetro de 90 m. La máxima profundidad del embalse es 49 m, en el fondo se extiende una cueva de 50 m de longitud cuya entrada es 4 m de altura por 20 m de ancho.

En el quimiolimnion se reporta *Chaoborus*.

En el monimolimnion se reporta abundancia de *Typhliasina* y decapados

El reporte de Cenote Verde propone que la cueva está aislada por un techo químico.

CENOTES NO MEROMICTICOS

YUCATAN

Ixin-Ha

De acuerdo con Díaz-Arce *et al.* (2001) es circular y la superficie del agua esta 20 m por debajo del nivel del terreno circundante, tiene 30 m de máxima profundidad y carece de conexión directa con el flujo subterráneo, su conductividad estuvo en el rango 900-1200 $\mu\text{S cm}^{-1}$, la temperatura varia de 21.6-27.5 °C. Presenta estratificación térmica en época de lluvias y secas, circulando en época de "nortes", el oxígeno disuelto en la columna de agua fue mayor a 3 mg L⁻¹ y mayor a 1 mg L⁻¹ en el fondo. El pH varia de 6.68 a 7.8

unidades. La densidad de fitoplancton fue 1.6×10^7 - 7.9×10^8 , cel l⁻¹, dominando cianofitas y luego chlorofitas (ver tabla 4). La cianofita mas abundante fue *Microcystis aeruginosa*, que es ya un típico bioindicador de contaminación (cita), en tanto dentro de las chlorofitas dominantes se determinó a *Monoraphidium cf. minutum*,

Xtogil

De acuerdo con López-Adrian y Herrera-Silveira (1994) es un cenote circular de 30 m de diámetro y 90% de su superficie esta expuesta a la luz, la superficie del agua se encuentra 12.3 m bajo el nivel del suelo circundante y la máxima profundidad de la columna de agua es 10.2 m y carece de conexión directa con el flujo subterráneo. En la tabla 4 se muestra la dominancia por densidades donde Bacillariophyceae aporta 79%, pero la dominancia por numero de taxa recae en las chlorofitas con 34 spp (40%), seguido de diatomeas donde *Synedra ulna* domina. La densidad total 1.9×10^4 cel L⁻¹ (noviembre).

López-Adrian y Herrera-Silveira (1994) concluyen que Xtogil es un cenote con tendencia a la eutrofización debido a contaminación química (agroquímicos) y por materia orgánica derivados del incremento los asentamientos humanos y del uso de fertilizantes en la zona aledaña

Xlaká

Es un cenote abierto de forma elipsoidal y la diferencia entre la superficie del agua y la del terreno es 2 m, la máxima profundidad es 7 m. El fondo del cenote se extiende dentro de una caverna por lo que se asume que tiene conexión directa con el flujo subterráneo (Díaz-Arce *et al.* 2001). La conductividad reportada fue 1350-1550 $\mu\text{S cm}^{-1}$, la temperatura varió entre 26.9 y 29.6 °C, presentando estratificación térmica durante época de lluvias. El oxígeno disuelto fue el mismo reportado para Ixin-Ha, al igual que el pH. La densidad fitoplanctonica reportada fue 5.9×10^6 - 2.5×10^7 cel L⁻¹. Las cianofitas dominaron la comunidad seguidas por cryptofitas (ver tabla 4). Dentro de las cianofitas se reporta como dominante a *Chroococcus sp*

QUINTANA ROO

Casa (mantí o Tank- Ha) cenote o manatí, o Tankah es parte del sistema Nohoch Nah Chich, se encuentra a menos de cien metros del mar y la influencia marina es muy importante, está rodeado de manglar. Los cenotes Cristal y Escondido pertenecen al sistema Naranjal, uno de los sistemas más grandes de la región (21.252 Km); tienen toda su área expuesta a la luz y son de agua dulce. El cenote Aktun-Ha es de agua dulce y tiene prácticamente toda su superficie expuesta a la luz. El cenote Nohoch Nah Chich es la entrada principal de uno de los sistemas más grandes de la región y es un cenote de entrada lateral y es el que presenta menor exposición a la luz.

14. Anexo 2

Sistemas de la península de Florida y archipiélago de Bahamas.

Jewfish Sink

El *sinkhole* en la zona litoral de la península de Florida se localiza a un kilómetro de la costa centro-oeste de la península en las planicies de pastos marinos del Golfo de México, tiene una profundidad máxima de 63 m y el diámetro de la “dolina” en la superficie es de 6 m y en el fondo de 76 m, adquiriendo forma de cántaro, hasta la década de los sesentas el sistema descargaba agua (8 ups) del acuífero de la península, debido al incremento en la explotación del acuífero por las industrias de fosfatos y cítricos, así como doméstica, el flujo se detuvo en los años setentas y el sistema se estanco desarrollando condiciones anaeróbicas y reducción de sulfatos debido a actividad bacteriana (Garman y Garey, 2005). El sistema muestra estratificación, la capa oxigenada tiene una profundidad máxima de 10 m, bajo esta capa, una zona de transición caracterizada por el decremento del oxígeno disuelto hasta cero o casi cero, la profundidad de la zona de transición varía de manera estacional con una profundidad de 13 m en verano y 31 m en invierno cuando agua marina se hunde por decremento en temperatura, bajo la zona de transición, se da una zona anóxica, que se extiende hasta 40 m, con baja concentración de ácido sulfhídrico y tapetes de bacterias anaeróbicas recubriendo la pared, por debajo de esta zona reposa el agua anóxica de fondo, la cual muestra una temperatura constante entre 16-17°C, salinidad de 33-35, elevadas concentraciones de amonio y alcalinidad, con dichas características el agua anóxica de fondo no se mezcla con las capas superiores, sin embargo existe la posibilidad de que tenga conexión con el agua del Golfo a través de conductos del acuífero de la última glaciación (Garman y Garey, 2005). En la transición de condiciones oxicas a anóxicas se reportan bacterias oxidadoras del azufre. En verano la zona anóxica muestra un máximo de pH, situación que no se presenta en invierno (figura A1). La comparación entre una dolina dentro de las planicies de pastos marinos y dolinas tierra adentro que presentan con agua de conductividad alta (Cristal Beach Spring, Horseshoe Crab Sink, Salt Spring Palm Sink y Round Sink, revela que todas presentan en la zona de transición entre aguas oxigenadas y anóxicas “nubes” blancas de materia particulada de grosor variable debido a variaciones estacionales y anuales de eventos probablemente de mezcla y cantidad de detrito.

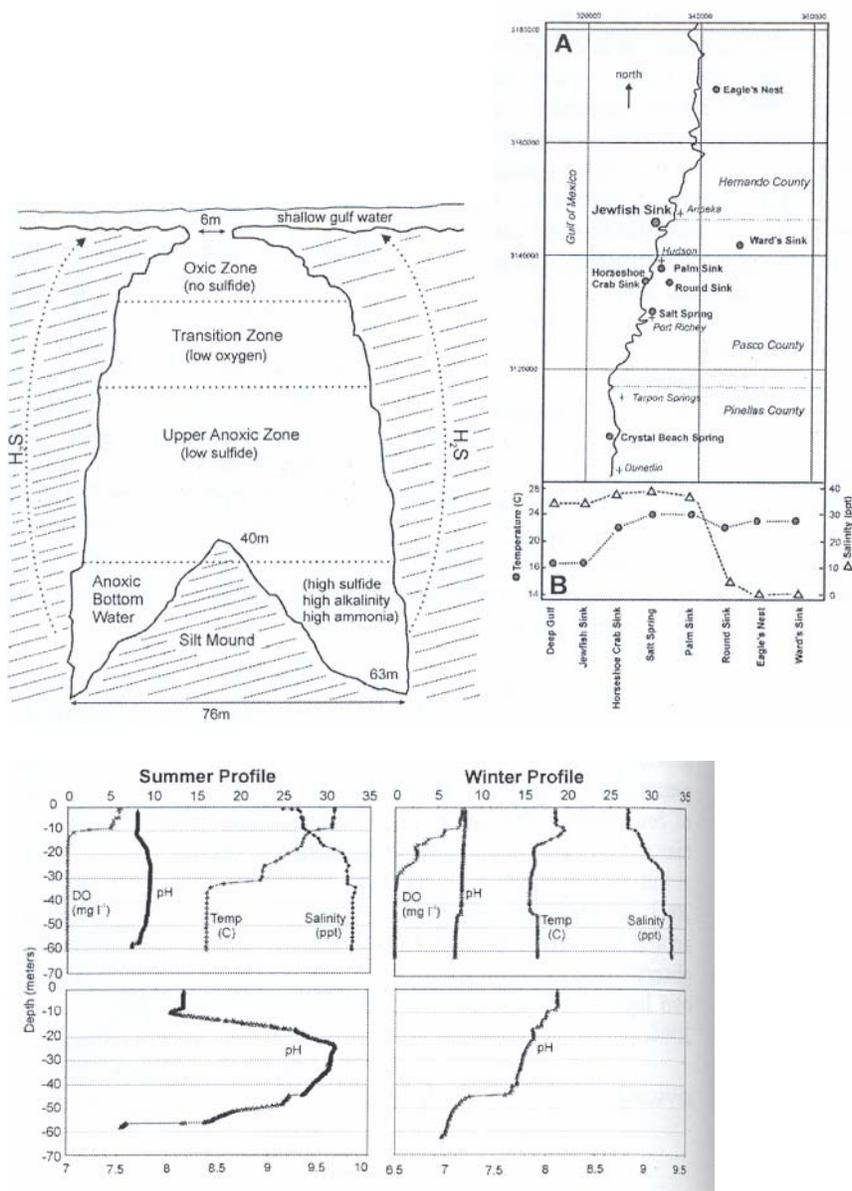


Fig. A1 (tomado de Garman y Garey, 2005)

Cottage Pond

Cayo Caicos, Bahamas

Distancia a la costa 4 Km.

Forma circular 50 de diámetro.

El fondo tiene varias fisuras una de ellas tiene 12 de largo y conduce a una cueva con profundidad de 76 m y diámetro de 70 m que intercambia agua con el mar.

En la cueva se descubrió en 2003 un nuevo genero de la clase Reimpedia: *Kaloketos pilosus*.

Devil`s Hole

Se estudio de 1965-1974. Se encuentra en la isla Great Abaco en el archipiélago de Bahamas es un hoyo de disolución (dolina) y tiene conexión con el mar. Es casi circular 274-30 m de diámetro y 50 m de profundidad; el agua en los primeros 15 m es dulce.

La quimioclina se encuentra en un rango de profundidad de 15-21 m tiene grandes diferencias en las concentraciones de sustancias químicas disueltas en comparación con las capas superior e inferior. La mayor actividad biológica ocurre en la quimioclina entre 15-18 m, coincidiendo con un pico de temperatura (18 m) y un pico de oxígeno a 16 m. La máxima salinidad reportada ocurre entre 17-22 m. El incremento en la temperatura del quimiolimnion se cree que es debido a un efecto invernadero o a actividad bacteriana, probablemente compuesta por bacterias verdes y púrpuras del azufre como *Chlorobium*, *Chromatium* y *Thiocystis*. Bacterioclorofila *d* y pigmentos accesorios le dan a las células el color rosa-magenta, color que es adquirido por el zooplancton debido a la ingesta del bacterioplancton y que el mysido *Eurthrope elegans* también adquiere al alimentarse del zooplancton. Aparentemente los organismos del quimiolimnion reciben exportación del mixolimnion rico en nutrientes. El mixolimnion contiene diatomeas y otros organismos fitoplanctónicos, así como zooplancton, cangrejos, peces pequeños y escarabajos buceadores.

15. Anexo 3

Bundera Sinkhole Australia Noroccidental

De acuerdo con Humphreys (1999) y Humphreys *et al.* (1999) es el único sistema anquihalino profundo en Australia y el único sistema anquihalino continental conocido en el hemisferio sur.

Bandera Sinkhole se localiza en una planicie costera kárstica de la península Cape Range en el noroeste de Australia. La distancia a la costa del mar Indico es 1.7 Km bajo un clima árido, precipitación media anual 280 mm, la temperatura máxima en el día varía entre 27-35°C. Vegetación circundante pastos y arbustos. No esta bajo ningún esquema de conservación.

El colapso tiene 10 X20 m, la superficie del agua esta 5 m por debajo del nivel del terreno y el viento no tiene mucho efecto sobre la superficie. El sistema se extiende con una inclinación de 30° hasta una profundidad e 70 m. El efecto de la marea es de 0.61 ± 0.24 m.

El sistema está estratificado fisicoquímicamente, con una capa superior menos salada (19 g l^{-1}), que flota sobre agua salada ($32-34 \text{ g L}^{-1}$). Presenta inversión térmica, 22° C en superficie y 26° C en fondo. La termoclina (7.5 m) coincide con el techo de la haloclina, sin embargo la haloclina no es planar. El pH va de 7.5 en superficie hasta 6.9 a 10 m y bajo esa profundidad no varía. El oxígeno disuelto presenta un perfil polimodal siendo sobresaturado en superficie $\sim 8 \text{ g L}^{-1}$ y menor a 1 g L^{-1} a 5 m, sin embargo presenta un máximo subsuperficial entre 10 y 15 m $\sim 2 \text{ g L}^{-1}$, el perfil de potencial redox se acopla al perfil de oxígeno variando de +175 mV a -125 mV.

Se reportan dos zonas con H_2S a 5 m y 16 m, el máximo medido fue $15.6 \mu\text{M}$ (equipo CHEMets sulphide R-9510).

EL nitrógeno inorgánico disuelto muestra variaciones asociadas a la termoclina, NH_4 muestra un máximo en la capa de H_2S a 5 m por arriba de la termoclina en tanto el NO_3 incrementa dentro de la termoclina. El máximo de NO_3 fue $24 \mu\text{M}$ a 9m. La relación inversa de NH_4 y NO_3 sugieren nitrificación y coincide con el máximo subsuperficial de oxígeno disuelto.

Arriba de la termohaloclina en la zona fótica se han reportado la clorofita *Rhizoclonium* y la carofita *Lamprothamnium papulosa*.

En la termohaloclina se reportan importantes colonias de bacterias quimioautotróficas/quimiolitotróficas, nitrificantes y del azufre. Se reconocieron bacterias filamentosas y bacilos, mas no se identificaron, sin embargo se propone que pudieran ser asociaciones de *Beggiatoa*, *Thiotrix*, *Sphaerotilus*, *Thioploca*.

Debido a que la capa superior no es dulce ($< 3 \text{ g L}^{-1}$) los autores concluyen que Bundera Sinkhole se parece mas a sistemas de Bahamas que a sistemas en Quintana Roo.

Localidad tipo para el remipedio *Lasionectes exleyi*, y otros troglobios

Se ha evaluado el efecto de la perturbación de la estratificación fisicoquímica por la actividad de buceo, concluyendo que dicha actividad deteriora la estratificación fisicoquímica, tanto por el paso del cuerpo de los buzos, como por la exhalación de burbujas. Dado que el buceo es una herramienta para estudiar los sistemas anquihalinos lo mas adecuado es usar circuitos cerrado, se propone restringir el acceso al turismo.

16. Anexo 4

Dentro del Ordenamiento Ecológico del Territorio Cancún-Tulum se han encontrado hasta la fecha 610 km de pasajes de cuevas sumergidas en 146 sistemas diferentes (QRSS 2005), que forman parte del acuífero y de los cuales los cenotes son ventanas hacia el flujo del acuífero hacia el arrecife de coral Mesoamericano (segundo más grande del mundo), con una densidad de 4.3 km/km² (Beddows com. per.). Cinco de los sistemas más grandes Ox Bel Ha (142.8 km), Sac Aktun (78.2 km), Nohoch Nah Chich (65 km), Dos Ojos (56.7 km) y Naranjal (21 km) se encuentran en las inmediaciones de Tulum. Tres de ellos Ox Bel Ha, Sac Aktun y Naranjal quedan dentro del plan de desarrollo urbano Tulum 2026 (Fig A4). Parte del sistema Ox Bel Ha se desarrolla en la reserva de la biosfera Sian Ka'an. En la figura A4, sobre el mapa del plan de desarrollo he trazado tentativamente una reserva del acuífero, el área de puntos rojos el área núcleo y en puntos amarillos la zona de amortiguamiento. La propuesta a desarrollar de una reserva del acuífero, tiene como objetivo proteger la cueva sumergida más grande del mundo (Ox Bel Ha), una parte del acuífero y la reserva de Sian Ka'an ya que dicho desarrollo pudiera representar una amenaza en cuanto a la descarga de aguas residuales a la reserva, lo cual está pendo por las Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección ambiental. La urgencia de un plan de manejo sustentable del acuífero en el corredor Cancún –Tulum no sólo se fundamenta en los motivos arriba mencionados sino ante los riesgos de salud pública por contaminación y eventuales colapsos del subsuelo en zonas urbanizadas. Quizás el riesgo más alarmante sería el colapso de un basurero municipal. Puntos clave son redimensionar los desarrollos urbanos de la Riviera Maya, mantener de ser posible incrementar la cobertura vegetal primaria, manejo adecuado de residuos sólidos y drenajes, crear U.M.A's para proteger Sac Aktun, Nohoch Nah Chich, Dos Ojos. Así como fundar el fideicomiso "Acuífero de la Riviera Maya".

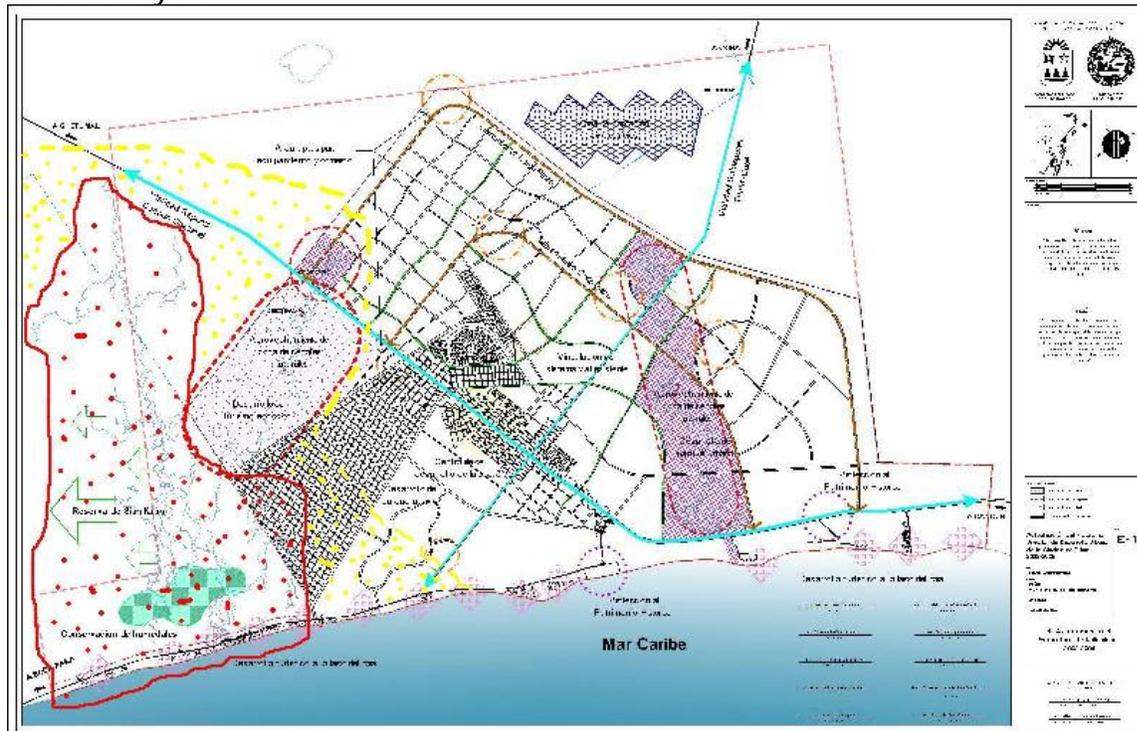


Fig. A4 Desarrollo Tulum 2026 con reserva del acuífero.