

Una aproximación ecohidrológica de un campo experimental de pozos en el karst de Yucatán.

Zetina-Moguel C.E.^{1*}, González-Herrera R.A.¹, Barceló-Quintal I.D.², Sánchez y Pinto I.A.¹ y Méndez-Novelo R.I.¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Avenida de industrias no contaminantes y periférico norte s/n. Mérida, Yucatán, México.

²Universidad Autónoma Metropolitana–Azcapotzalco, área de Química y Físico-química Ambiental, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200. Delegación Azcapotzalco, CDMX.

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2018 — Fecha de aceptación: 30 de enero de 2019

Resumen

El campo experimental de pozos de la FIUADY es un sistema de pozos de 50 m y hasta 75 m de profundidad. Se construyó con la finalidad de confrontar y consolidar el conocimiento hidrológico del agua subterránea en la planicie kárstica del norte de Yucatán. En este contexto el objetivo de este trabajo es documentar el comportamiento histórico de algunas variables del ambiente físico-químico y biológico del acuífero para bosquejar modelos del hábitat de la microbiota del epikarst en la planicie norte de la península de Yucatán. Se documentó la conformación hidrogeológica con análisis de detritos de la perforación y utilizando video subacuático en los pozos; se hicieron mediciones de temperatura, conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto en octubre, noviembre, enero, febrero, marzo y abril de diferentes años. Para los análisis estadísticos se agruparon los datos en dos períodos: recarga (octubre y noviembre) y descarga (enero-abril). Los resultados incluyen un perfil hidrogeológico esquemático y los análisis estadísticos de las variables. Los valores mínimos y máximos observados son: temperatura °C (26.64,29.87), conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$ (465,46800), pH (6.14,8.20) y oxígeno disuelto mg/L (0.01, 7.93); se concluye que: a) en un área de pocos metros cuadrados hay variaciones importantes en las características hidrogeológicas, b) el comportamiento hidrogeológico de los pozos tiene que ver con horizontes kársticos ; sus dimensiones, conectividad, distribución, densidad y la forma como influye ante diversos esfuerzos hidrológicos y finalmente c) la presencia de crustáceos en los pozos y “anomalías” en la concentración de oxígeno puede tener una explicación en procesos biogeoquímicos de ecosistemas oscuros.

Palabras claves: ambiente karstico, hábitat oscuro, planicie kárstica, acuífero de Yucatán.

Hydroecological approach for an experimental field of wells in Yucatan karst.

Abstract

The FIUADY experimental field of wells is a system of 50 m and up to 75 m deep boreholes. It was built with the purpose of confronting and consolidating the hydrological knowledge of

*zmoguel@correo.uady.mx

groundwater in the karst plain of northern Yucatan. In this context, the objective of this work is to document the historical behavior of some variables of the physico-chemical and biological environment of the aquifer to sketch models of the habitat of the microbiota of the epikarst in the northern plain of the Yucatan peninsula. The hydrogeological conformation was documented with drilling debris analysis and using underwater video in the wells; Measurements of temperature, electrical conductivity, pH and dissolved oxygen were made in October, November, January, February, March and April of different years. For the statistical analyzes, the data were grouped into two periods: recharge (October and November) and discharge (January-April). The results include a schematic hydrogeological profile and the statistical analysis of the variables. The minimum and maximum values observed are: temperature ° C (26.64,29.87), electrical conductivity $\mu\text{S}/\text{cm}$ (465,46800), pH (6.14,8.20) and dissolved oxygen mg / L (0.01, 7.93); it is concluded that: a) in an area of few square meters there are important variations in the hydrogeological characteristics, b) the hydrogeological behavior of the wells has to do with karst horizons; its dimensions, connectivity, distribution, density and the way it influences various hydrological efforts and finally c) the presence of crustaceans in the wells and "anomalies" in the concentration of oxygen can be explained in biogeochemical processes of dark ecosystems.

Keywords: karst environment, dark habitat, karstic plateau, Yucatan aquifer.

Introducción

En el Karst de la Península de Yucatán tienen lugar hábitats de comunidades biológicas muy diversas: desde los visibles montes (selvas, praderas, humedales) y ciudades que se asientan sobre las planicies y formaciones kársticas, pasando por las asociaciones de animales todavía observables en las cavernas (secas e inundables), hasta grupos prácticamente imperceptibles a la visión humana, ya que habitan dentro de pasajes inaccesibles al hombre y que forman parte de intrincadas redes cavernosas inundadas de origen calcáreo. La interacción entre estos sistemas biológicos es dinámica, de tal modo que las selvas del karst superficial aportan al subsuelo materia y energía mediante procesos como la infiltración del agua al acuífero (pluvial, riego, etc.) y del subsuelo el monte toma materia y energía: iones y enlaces químicos producto de la actividad biológica. (Pacheco y Cabrera 1997, Pacheco *et al.* 2000, Pacheco *et al.* 2001, Cervantes-Martínez *et al.* 2002, Herrera-Silveira *et al.* 2002, Xuluc-Tolosa *et al.* 2003, Hodell *et al.* 2005, Vargas-Ramos 2007, Hernández-Terrones *et al.* 2011,

Bauer *et al.* 2011, Pérez *et al.* 2011, Pérez-Ceballos *et al.* 2012).

Las formaciones kársticas superficiales (epikarst), visibles (incluyendo cavernas), han sido objeto de estudios desde una perspectiva biológica y ecosistémica (Schmitter-Soto *et al.* 2002; Bauer-Gottwein *et al.* 2011, Herrera-Silveira *et al.* 2002; Pérez *et al.* 2011, Pérez-Ceballos *et al.* 2012); sin embargo, existen otras regiones del karst subterráneo que no son accesibles a la exploración directa por el ser humano y que se ha estudiado menos (Bastviken *et al.* , 2002; Engel 2007, Por 2008, Pronk *et al.* 2009, Plach *et al.* , 2011, Staehr *et al.* 2012, Okafor 2011), porque en su estado natural son inaccesibles a la visión humana, y solo mediante alguna modificación del espacio físico como la perforación de un pozo y/o la observación con instrumentos, puede generarse conocimiento de estos complejos ecosistemas.

Las comunidades humanas, y particularmente las ciudades, cambian los equilibrios y la dinámica misma de los subsistemas biológicos y ambientales. No solo por la concentración, en espacios reducidos, de agua, alimentos, materia diferente a la que ocurre en los montes o

ecosistemas naturales, sino por los desechos y la actividad humana orientada a la máxima productividad económica mediante la industrialización o uso masivo de recursos naturales locales (Hildebrand *et al.* 1995; Perry *et al.* 1995, Pope *et al.* 1996, Graniel-Castro y González-Hita 2002, Hernández-Terrones *et al.* 2011).

El campo experimental de pozos del Campus de Ingeniería y Ciencias Exactas de la Universidad Autónoma de Yucatán se construyó con el objeto de confrontar y consolidar el conocimiento teórico del comportamiento hidrológico del agua subterránea en la planicie kárstica del norte de Yucatán; en la actualidad ha favorecido la formación académica de estudiantes de ingeniería y ha permitido contribuciones del conocimiento científico del karst yucateco (Sánchez y Pinto *et al.* 2005).

El objetivo de este trabajo es documentar el comportamiento histórico de algunas variables del ambiente físico-químico y biológico del acuífero, a través del monitoreo y análisis de éstas variables medidas y registradas en el campo experimental de pozos del Campus de Ciencias exactas e ingeniería (UADY) para bosquejar modelos del hábitat de la microbiota del epikarst en la planicie norte de la Península de Yucatán y estudiar procesos biogeoquímicos del acuífero kárstico.

Método

1.- Área de estudio

El campo experimental hidrogeológico (CEH) de pozos se encuentra al norte de la ciudad de Mérida, la ubicación geográfica se obtuvo con GPS y mediante levantamientos topográficos con una estación total; localización, cota y altura sobre el nivel medio del mar en metros (modelo de Geoide WGS84) de cada pozo (Tabla 1).

Tabla 1.- Posición geográfica de los pozos del campo experimental, la cota y el cálculo de la altura en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm) se basó en un banco de nivel del INEGI y el modelo de geoide WGS84

ID Pozo	Coordenadas UTM cuadrante 16Q		Cota (m)	Nivel freático (msnmm)
	X	Y		
1	225189	2329857	6.538	5.318
2	225193	2329860	6.344	5.120
3	225196	2329861	6.710	5.489
4	225199	2329861	6.644	5.420
5	225186	2329864	6.792	5.568
6	225189	2329864	6.497	5.265
7	225196	2329867	6.554	5.332
8	225185	2329869	6.554	5.284
9	225190	2329870	6.718	5.492
10	225195	2329872	6.416	5.189
11	225188	2329867	6.755	5.532

2.- Perfil hidrológico y arquitectura del hábitat físico del epikarst

Para la descripción física y litológica del área de estudio se usaron dos fuentes de

información: a) Durante la perforación de los pozos de este campo experimental se tomaron muestras de detritos de los cuales se hicieron inferencias sobre la composición litológica de los diferentes estratos. b) Se tomaron videos con una cámara submarina modelo R-Cam 1000 con registro de la profundidad de las tomas.

3.- Condiciones hidrológicas

Las mediciones de las condiciones atmosféricas se hicieron mediante una estación meteorológica automatizada situada a 50 m del campo experimental de pozos. Las mediciones del ambiente físico químico del agua subterránea en el área del Campo experimental de pozos se realizaron en 2003 (febrero-abril), 2004 (enero), 2008 (noviembre) y 2014 (octubre). Los equipos utilizados fueron sondas multiparamétricas Hidrolab Quantum.

En el mes de noviembre de 2008, se realizaron mediciones de temperatura (°C), conductividad eléctrica (μS/cm), pH, Oxígeno Disuelto (mg/L) y Potencial Rédox (mV). Las mediciones se hicieron en 9 pozos a intervalos de profundidad de 1 m (la primera medición a 20 cm por debajo del nivel freático); las mediciones iniciaron a las 9:40 am y finalizaron a las 15:30 (un período de 5:50 h). El estadístico de tendencia central evaluado en las variables observadas en el campo experimental de pozos fue la mediana, y la variación se registró mediante el registro de mínimos y máximos en el período de medición.

En Octubre de 2014 se realizaron mediciones de temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial rédox y clorofilas; estas mediciones se hicieron hasta una profundidad de 20 m, entre las 7:30 AM y 12:30 PM.

Los datos fueron agrupados en dos épocas:

- a) Recarga que incluye los meses de octubre y noviembre y
- b) Descarga que incluye los meses de enero, febrero, marzo y abril.

Para el análisis estadístico (descriptivo y gráfico) se utilizaron herramientas de EXCEL así como del entorno para análisis estadístico R-Project y StatGraphics CENTURION 18.

Resultados

En la Figura 1 se presentan la distribución de los pozos en un plano horizontal y un corte vertical del campo experimental de pozos (perfil hidrogeológico) en el que se esquematizan las regiones karsificadas del acuífero. En total, 11 son los pozos construidos para experimentación, uno de ellos con una profundidad de 70 m.

Los valores estadísticos de las variables físico-químicas se presentan en la Tabla 2; los parámetros estadísticos estimados fueron: la Media, Mediana, Rango, Máximo, Mínimo y Número de observaciones realizadas en el Campo experimental de pozos..

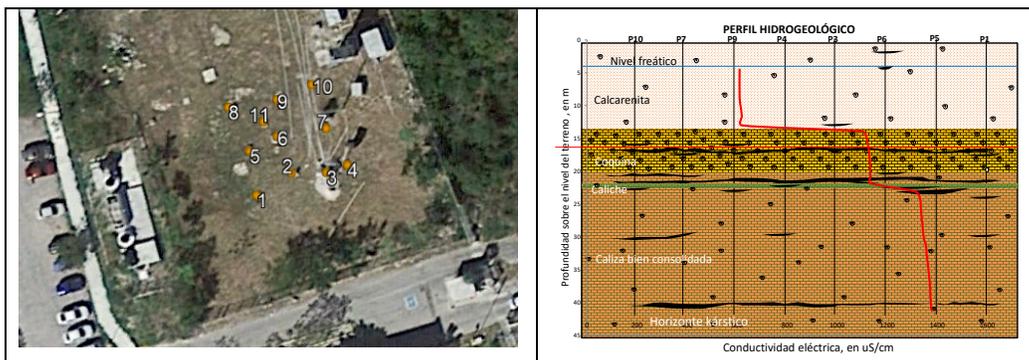


Figura 1.- Ubicación de pozos y perfil hidrogeológico del CEH

Tabla 2.- Resumen estadístico de las variables temperatura, conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto medidas en el campo experimental de pozos

Estadísticos	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	pH	O ₂ Disuelto (mg/L)
Media	27.71	2954.58	6.78	2.48
Mediana	27.62	1344.00	6.76	2.12
Rango	2.23	46335.00	2.06	7.92
Mínimo	26.64	465.00	6.14	0.01
Máximo	28.87	46800.00	8.20	7.93
No de Observaciones	1258	1201	1248	854

En la Figura 2, se muestra la estratificación de la Temperatura en mediciones realizadas tanto en épocas de máxima y mínima recarga; es notable la amplia variación de la temperatura

en las aguas superficiales y conforme se incrementa la profundidad disminuye la variabilidad; las temperaturas están entre 26.5° C y 29°C.

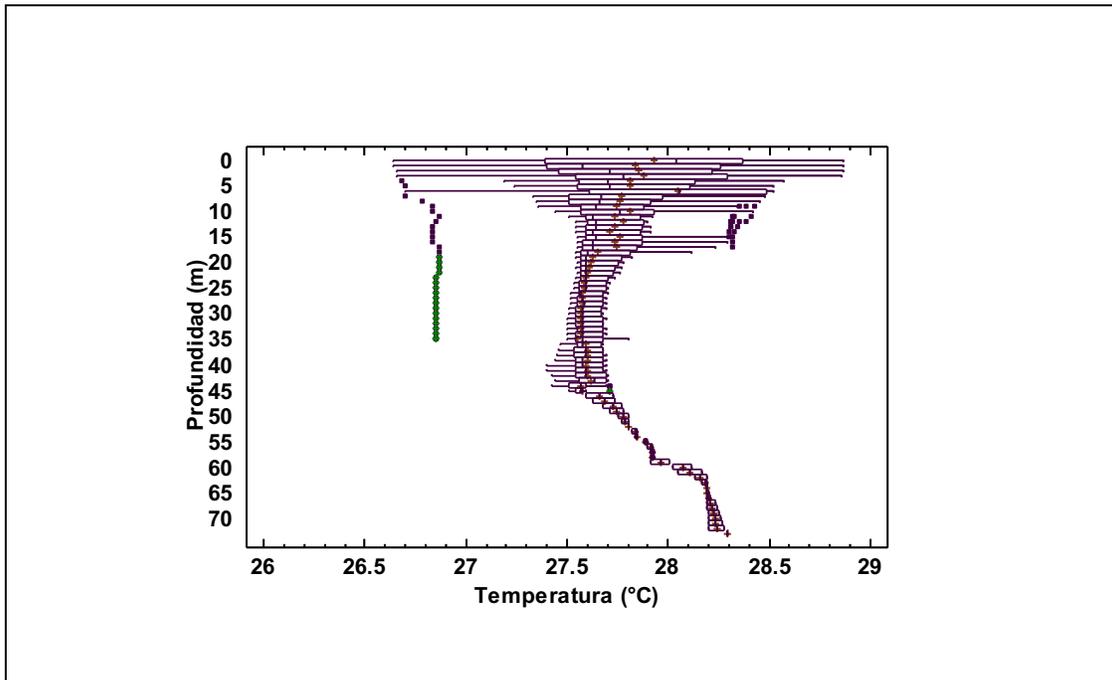


Figura 2.- Distribución vertical de la Temperatura medida en °C en el Campo experimental de pozos

En la Figura 3 se presenta, mediante un gráfico de cajas y bigotes, la distribución de los valores de temperatura en la época de máxima (recarga) y mínima recarga (descarga) del

acuífero; en los meses de recarga (octubre-noviembre) la temperatura es más elevada y con menor dispersión.

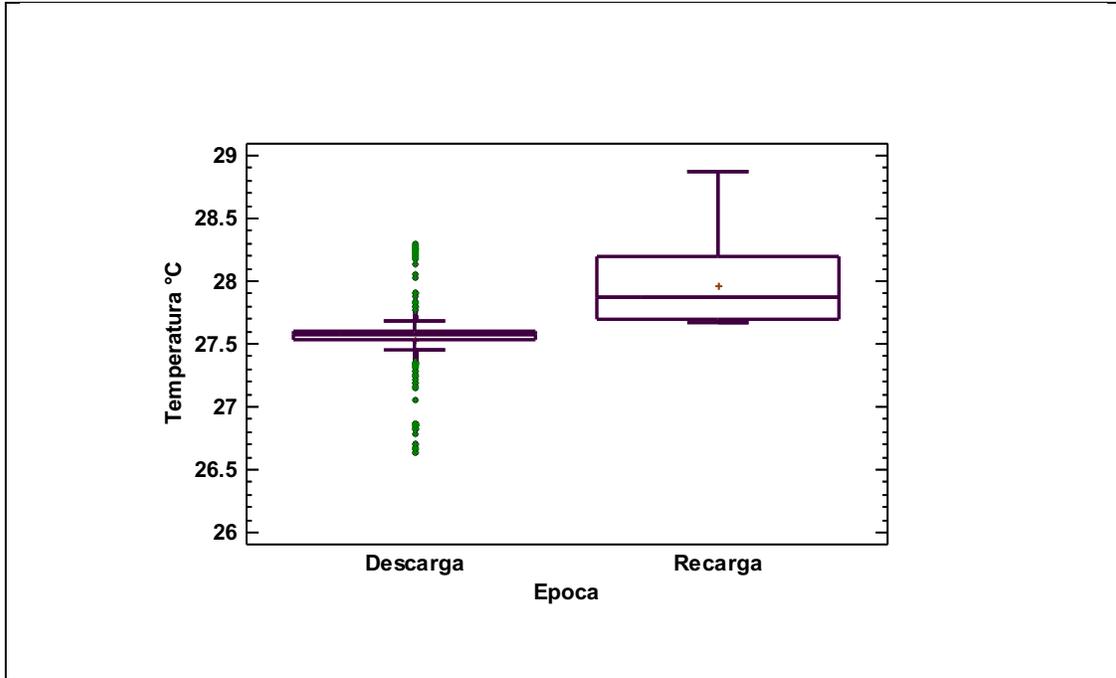


Figura 3.- Gráfico de la dispersión de las mediciones de temperatura (°C) en el campo experimental de pozos. La descarga corresponde a los meses de enero a abril y la recarga a octubre y noviembre

La Conductividad eléctrica muestra un arreglo vertical (Figura 4) en el que, en los primeros 10 m de profundidad hay poca variación y los valores se mantienen bajos (465 $\mu\text{S}/\text{cm}$) hasta los 46 m en donde se presenta una transición hasta alcanzar conductividades eléctricas muy elevadas (>40000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

En términos generales la conductividad eléctrica es baja (<1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), a excepción de los valores altos que se tienen en aguas por debajo de los 45 m, la Figura 5 muestra la distribución de los valores de conductividad eléctrica de las épocas de descarga y recarga mediante un gráfico de cajas y bigotes.

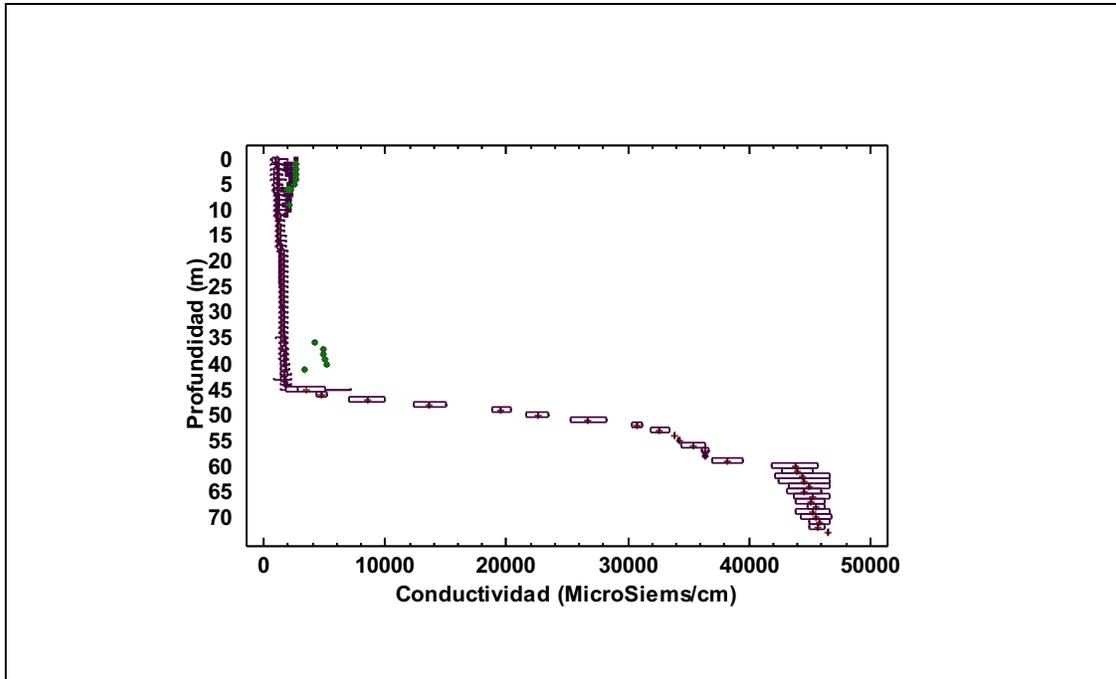


Figura 4.- Perfil de conductividad eléctrica en el Campo Experimental de pozos

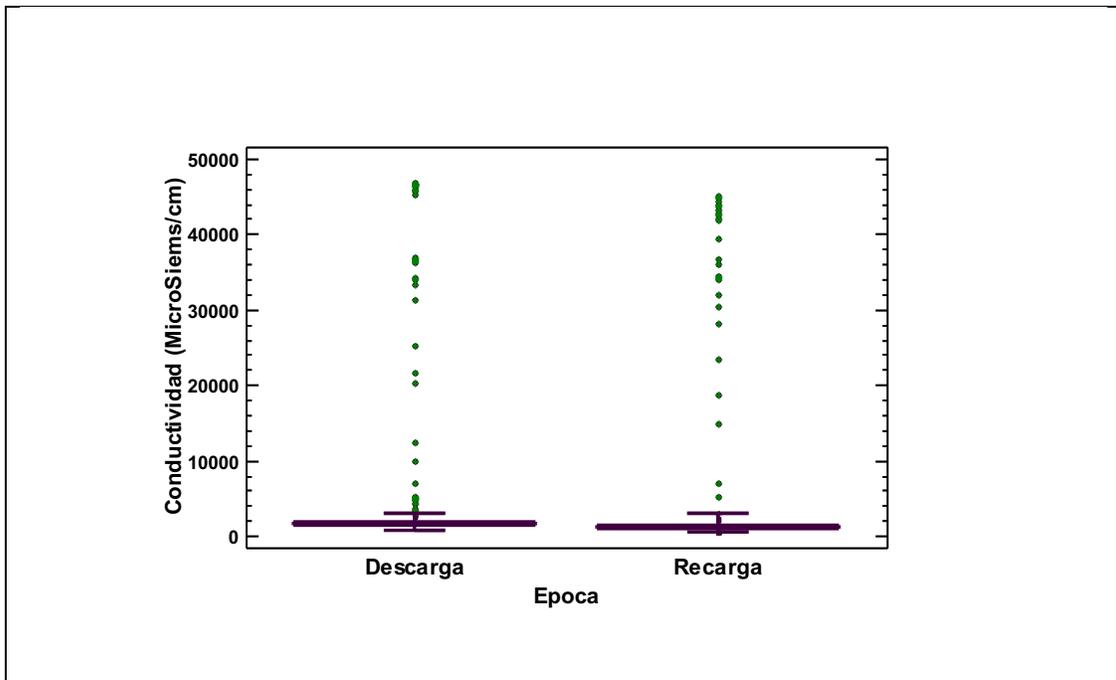


Figura 5.- Gráfico de Cajas y Bigotes de las mediciones de Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$ medidas en las épocas de máxima recarga (Recarga) y mínimo nivel del acuífero (Descarga).

El pH del agua del acuífero en el Campo Experimental de pozos muestra una estratificación que se presenta en la Figura 6.

En la Figura 7 se presenta el comparativo de los valores de pH medidos durante la época de descarga y recarga; el pH durante la época de recarga es más ácido y más variable que durante la época de descarga o mínimo nivel del acuífero.

Una Variable importante en el metabolismo de los ecosistemas acuáticos es la concentración de oxígeno disuelto; en la Figura 8 se presenta un perfil vertical en el que son notables los valores altos en la superficie y condiciones de muy bajas concentraciones de oxígeno disuelto a profundidades mayores a los 6 m.

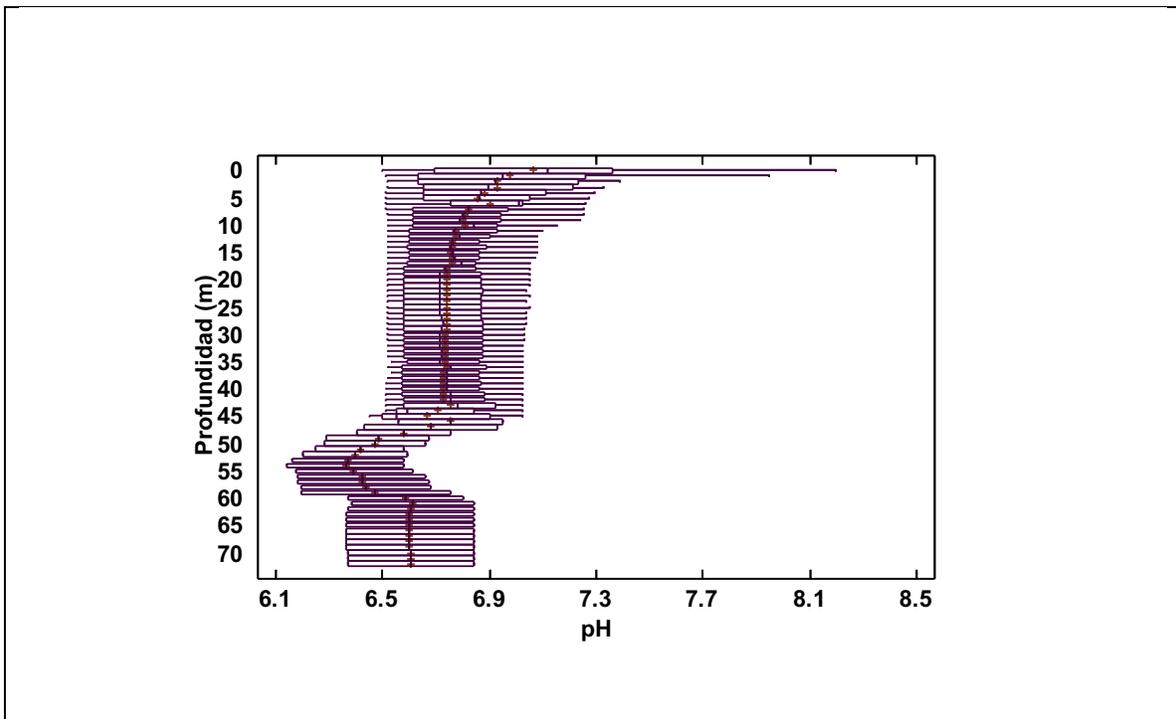


Figura 6.- Perfil de mediciones de pH en el que se observa una estratificación con cambios en los 15 y 45 m de profundidad

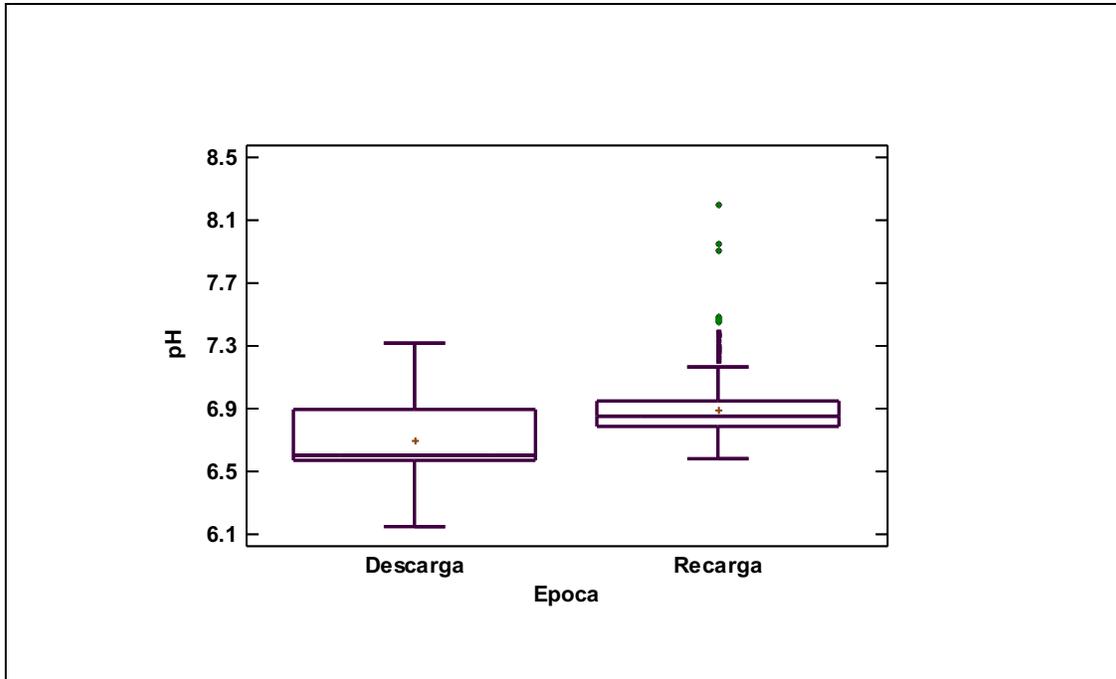


Figura 7.- Gráfico comparativo de las mediciones de pH en el Campo Experimental de pozos durante las épocas de Descarga y Recarga (máximo nivel del acuífero)

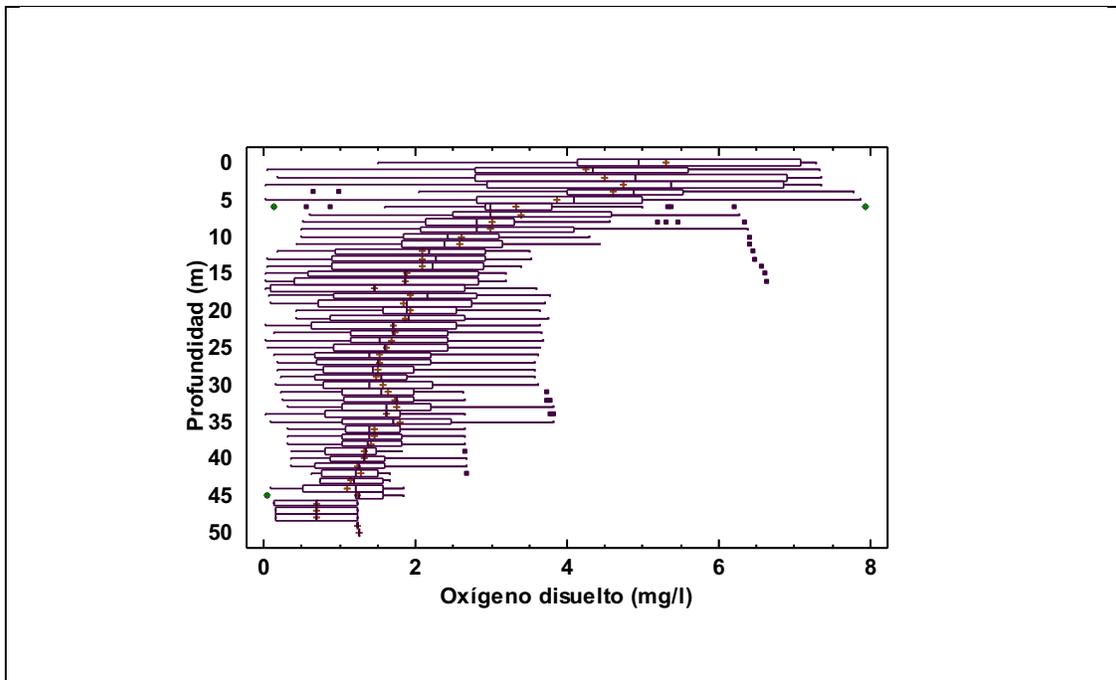


Figura 8.- Perfil vertical de las mediciones de oxígeno disuelto en mg/L realizadas en el campo experimental de pozos

Por otra parte las concentraciones de oxígeno disuelto son menores durante la época de

recarga que durante la época de descarga y esto puede apreciarse en la Figura 9.

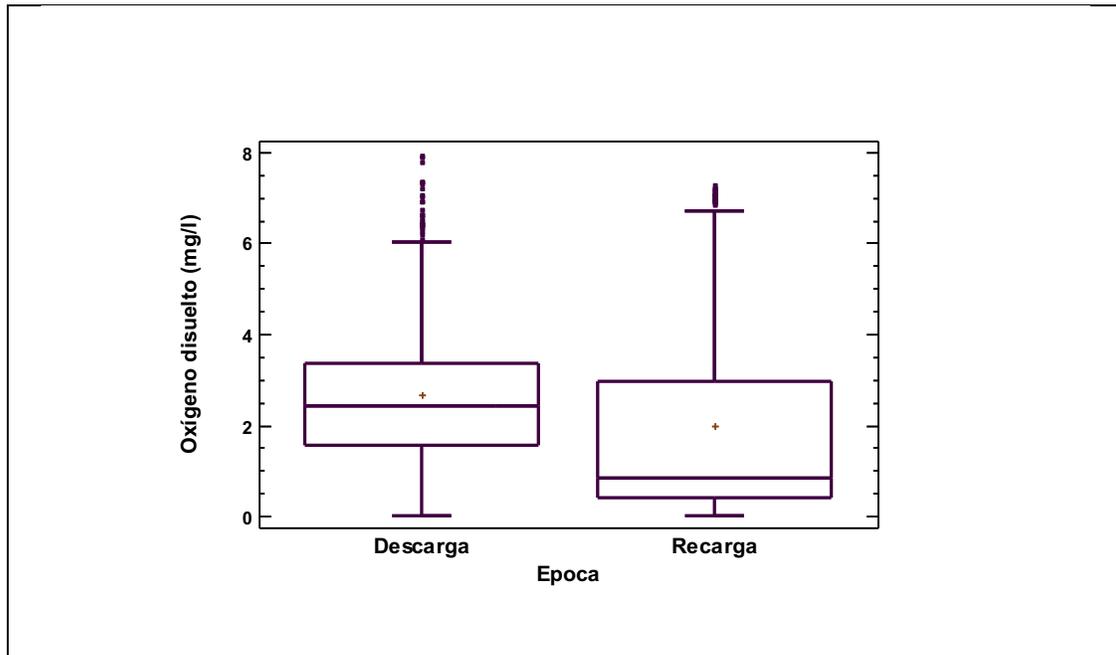


Figura 9.- Comparativo de las concentraciones de oxígeno disuelto en el Campo Experimental de Pozos durante las épocas de descarga y recarga del acuífero

En los videos subacuáticos se observaron crustáceos a los 42 m a los 43 m y a los 51.6 m de profundidad. La identificación de los organismos solo permite el nivel de grupo. Sin embargo, los reportes de macrocrustáceos en los sistemas acuáticos epicontinentales de la península de Yucatán incluyen *Agostocaris bozanci*, *Yagerocaris cozumel*, *Janicea*

antiguensis, *Calliasmata nohochi* (Escobar-Briones *et al.* 1997) *Procaris* no descrito (Kornicker e Iliffe 1992) y el ripedia *Speleonectes tulumensis* (Smitter-Soto *et al.* 2002). En la Figura 10 se presenta una fotografía extraída de uno de los videos a 42.2 m de profundidad.



Figura 10.- Fotografía subacuática de macro crustáceos que habitan el epikarst en las inmediaciones del campo experimental de pozos de la FIUADY

Discusión

El campo experimental de pozos es una ventana desde la que se puede observar al ecosistema del acuífero que tiene lugar en el epikarst subterráneo; su estructura litológica y la arquitectura de sus expresiones cársticas (cavidades) muestran una gran complejidad y se manifiesta en las observaciones: tanto en los componentes que aparecieron en los detritos (durante la perforación de los pozos) como en las imágenes de video en las que pudieron apreciarse tres horizontes kársticos (estratos horizontales con presencia de cavidades) cuya conectividad horizontal, de alguna manera ha sido evaluada mediante pruebas con trazadores y pruebas de bombeo (Sánchez y Pinto *et al.* 2005, Zetina-Moguel *et al.* 2007, Gutiérrez-Díaz 2011).

La construcción de los pozos en el campo experimental conectó verticalmente los diferentes horizontes cársticos y esto de alguna manera encubre los comportamientos

hidrogeológicos (combinó las diferentes presiones hidrostáticas correspondientes a los horizontes kársticos), biogeoquímicos (permite el intercambio de componentes químicos y de origen biológico) y biológicos (permite o facilita el paso de organismos entre horizontes cársticos, en migraciones verticales); no obstante brinda la posibilidad de inferir con base en las observaciones sobre los diferentes procesos del ecosistema que se desarrolla en esta zona oscura del karst.

Aunque en el campo experimental de pozos no se han realizado campañas de medición de iones, ni evaluaciones microbiológicas, existen mediciones realizadas en un pozo de monitoreo de la CONAGUA situado en la misma zona de estudio; en este pozo se realizaron determinaciones de iones a dos profundidades (20 y 50 m) y en los meses de Febrero y Octubre (Heise 2013). Algunas de estas determinaciones se presentan en la Tabla 3.

Heise (2013) publica también datos de la composición iónica de pozos situados alrededor de la ciudad de Mérida (25 pozos), incluyendo el pozo de CONAGUA que se encuentra a un lado del Campo Experimental. En la Tabla 4 se presenta un resumen

estadístico de estas determinaciones. Y en la Tabla 5 se presenta un resumen estadístico de las determinaciones de coliformes fecales y totales realizadas por Heise (2013) en pozos de la ciudad de Mérida entre 10 y 50 m de profundidad.

Tabla 3.- Concentración de Iones en un pozo aledaño al parque experimental (Miliequivalentes/L)

Meses	Profundidad (m)	TDS	Na ⁺	Cl ⁻	N-NO ₃	SO ₄ ⁼	As	Hg	Pb	Dureza
Octubre	20	784	71	119.12	10.21	35	0.94	0.33	4.52	365.17
Febrero	20	606	103.74	162.3	7	51.25	1.39	0.71	0.03	337.14
Octubre	50	20418	5325	9572.31	2.3	1266.16	20.68	4.46	40.23	2814.89
Febrero	50	18600	5253.1	10665.7	1.1	1598.4	25.88	29.3	10.31	2651.72

Tabla 4.- Resumen estadístico de determinaciones de iones realizada por Heise (2013), en la ciudad de Mérida entre los 2 y 50 m de profundidad. Los resultados están en miliequivalentes por litro (meq/L)

Estadísticos	Na	K	Ca	Mg	Si	Fe	Mn	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄ ⁼	N-NO ₃	F
Media	31.31	0.57	7.17	6.38	1.08	0.001	0.001	0.011	6.46	36.81	4.08	0.385	0.013
Mediana	5.00	0.18	5.20	2.29	1.12	0.001	0.000	0.000	6.61	5.04	0.90	0.357	0.006
Desviación estándar	57.98	0.92	5.31	9.77	0.46	0.002	0.002	0.055	0.84	73.94	7.68	0.219	0.014
Varianza muestral	3362.03	0.85	28.18	95.45	0.21	0.000	0.000	0.003	0.71	5466.73	58.93	0.048	0.000
Rango	226.04	4.09	20.93	31.80	1.50	0.008	0.010	0.275	3.34	299.31	33.11	0.729	0.054
Mínimo	2.35	0.05	3.87	0.72	0.45	0.000	0.000	0.000	4.64	1.56	0.19	0.071	0.001
Máximo	228.40	4.14	24.80	32.52	1.95	0.008	0.010	0.275	7.99	300.87	33.30	0.800	0.055
No. de pozos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Tabla 5.- Determinaciones de coliformes totales y fecales en 24 pozos de la ciudad de Mérida entre 10 y 50 m de profundidad (de datos publicados por Heise 2013)

Estadísticos	<i>Coliformes Totales</i> (UFC/100ml)	<i>Coliformes Fecales</i> (UFC/100ml)
Media	2048.8	1471.7
Mediana	1935	1130
Desviación estándar	1628.6	1432.4
Varianza muestral	2652324.5	2051875.4
Rango	5780	5290
Mínimo	20	10
Máximo	5800	5300
Número de pozos	24	24

Esta composición química reportada, de alguna manera muestra el ambiente físico-químico (temperatura, conductividad eléctrica, pH, O₂) químico (composición iónica: aniones y cationes) y microbiológico (Coliformes: grupos microbiológicos asociados a los organismo homeotermos) que se puede esperar en el campo experimental de pozos. De los datos experimentales previamente publicados relacionados a los sistemas acuáticos del epikarst (Heise 2013 y Moore 2014), se desprende que el análisis de la estratificación vertical en el campo de pozos puede ser de gran importancia (conocimiento y tecnología de gestión del acuífero).

Basta abordar un tema de mediciones en aguas subterráneas (en pozos), y en sistemas abiertos (cenotes): tanto en pozos como en sistemas abiertos se han observado incrementos en la concentración de oxígeno en aguas profundas (40 m y 50 m de profundidad) de 1 mg/L a aproximadamente 3 mg/L (Heise 2013), y aunque la explicación se ha buscado en procesos físicos, hoy se sabe que existe producción de oxígeno por quimiosíntesis en sistemas oscuros (Ettwing *et al.* 2012) y esta es otra posibilidad de una fuente de oxigenación del acuífero kárstico.

En el campo experimental de pozos de la Facultad de Ingeniería se hicieron

observaciones de crustáceos a profundidades de 42.2 m, 43 m y 51.6 m. Los artrópodos son especialmente sensibles a contaminantes antropogénicos, y su existencia a esas profundidades en el campo experimental de pozos (que es un sistema alejado de un cenote u otro ecosistema acuático abierto o expuesto a la luz y los procesos fotosintéticos) solo puede explicarse por la presencia de materia orgánica alóctona (detritos y deshechos de la fotosíntesis) y/o autóctona procedente de quimiosíntesis en los sistemas oscuros del epikarst así como otros procesos que forman parte de los ciclos biogeoquímicos del karst y qué han permanecido ocultos a la observación.

Conclusiones

En un área de pocos metros cuadrados (distancia mínima de 3 m y máxima de 16.2 m entre pozos) y una profundidad de 50 y 75 m, pueden encontrarse variaciones importantes en los comportamientos físico-químicos del agua subterránea como resultado de la conexión de los pozos con los horizontes kársticos atravesados, estableciendo así una conexión vertical entre ellos.

El comportamiento hidrogeológico de los pozos tiene que ver con horizontes kársticos de diferente conectividad y en muchos casos

permite la presencia y posibilidad de observar macro-organismos.

La presencia de crustáceos en los pozos y las “anomalías” en la concentración de oxígeno

disuelto con respecto a la profundidad puede tener una explicación en procesos biogeoquímicos de ecosistemas oscuros.

Agradecimientos

Se agradece al Programa de Apoyo y Consolidación de Cuerpos Académicos (PADECCA) de la Coordinación General de Posgrado, Investigación y Vinculación de la Universidad Autónoma de Yucatán por el apoyo brindado para llevar a cabo actividades de investigación por los integrantes del Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología de la Facultad de Ingeniería.

Referencias

Bastviken D., Ejlertsson J. And L. Tranvik . 2002. Measurement of Methane Oxidation in Lakes: A Comparison of Methods. **Environ. Sci. Technol.** **36**, 3354-3361

Bauer-Gottwein P., B. R. N. Gondwe, G. Charvet, L. E. Marín, M. Rebolledo-Vieyra, G. Merediz-Alonso. 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. **Hydrogeology Journal** **19**: 507–524

Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, M. y Suárez.Morales, E. 2002. Limnological and morphometrical data of eight karstic systems “cenotes” of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February–May, 2001). **Hydrobiologia** 482: 167-177.

Engel A.S. 2007. Observations on the Biodiversity of Sulfidic Karst Habitats. **Journal of Cave and Karst Studies** V. 69, no. 1, p. 187–206.

Escobar-Briones, E., M. E. Camacho, and J. Alcocer. 1997. Calliasmata nohochi, new species (Decapoda: Caridea: Hippolytidae), from anchialine cave systems in continental Quintana Roo, Mexico. **J. Crust. Bio.****17(4):**733-744.

Ettwing K.F. , Speth D. R., Reimann J., Wu M.L. , Jetten M.S.M and J. T. Keltjens. 2012. Bacterial oxygen production in the dark. Hypothesis and theory article. Hypothesis and Theory ARTICLE

Grael-Castro E. y González-Hita 2002. Deterioro de la calidad del agua subterránea por el desarrollo poblacional Cancún Q.Roo. **Ingeniería** **6** (3): 41-53.

Gutiérrez-Díaz S. 2011. Estudio del coeficiente de dispersión en el acuífero cárstico de porosidad dual de Yucatán. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México.

Heise L. 2013. Dynamics of the coastal karst aquifer in northern Yucatán peninsula. Thesis To Obtain The Degree Of Maestría en Ciencias Ambientales Degree Awarded By Universidad Autónoma de San Luis Potosí And Master Of Science Technology And Resources Management In The Tropics And Subtropics In The Specialization: Resources Management Degree Awarded By Cologne University Of Applied Sciences.

Hernández-Terrones L., Rebolledo-Vieyra M., Merino-Ibarra M., Soto M, Le-Cossec A. y E. Monroy-Ríos. 2011. Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. **Water Air Soil Pollution** 218:517–528.

Herrera-Silveira J., Medina-Gomez I. & R. Colli. 2002. Trophic status based on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. **Hydrobiologia** 475/476: 91–98.

Hildebrand, A.R., Pilkington, M., Connors, M., Ortiz-Aleman, C., Chavez, R.E., 1995. Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. **Nature** 376, 415– 417.

Hodell D.A., Brenner M., Curtis J.H., Medina-González R., Chan-Can E.I., Albornaz-Pat A. and T.P. Guilderson. 2005. Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. **Quaternary Research** 63: 109– 121

Kornicker, L. S.; Iliffe, T. M. (1992). Ostracoda (Halocypridina, Cladocopina) from anchialine caves in Jamaica, West Indies. **Smithsonian Contributions to Zoology**. 530, 1-22., available online at <https://doi.org/10.5479/si.00810282.530>

Moore A. 2014. Characterization of the Native Microbial Communities in the Karst Aquifer of Yucatan Peninsula, Mexico. A DISSERTATION SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE DOCTOR OF PHILOSOPHY. NORTHERN ILLINOIS UNIVERSITY DEKALB, ILLINOIS.

Okafor N. 2011. **Environmental Microbiology of Aquatic and Waste Systems**. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

Pacheco, J., & Cabrera, A. 1997. Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula, Mexico. **Hydrogeology Journal** 5, 47–53.

Pacheco, A., Cabrera, J. A., & Marin, L. E. 2000. Bacteriological contamination assessment in the karstic aquifer of Yucatan, Mexico. **Geofísica Internacional** 39, 285–291.

Pacheco, A., Cabrera, J. A., & Marin, L. E. 2001. Nitrate temporal and spatial patterns in twelve water supply wells, Yucatan, Mexico. **Environmental Geology** 40, 708–715.

Pérez L., Bugja R., Lorenschat J., Brenner M., Curtis J., Hoelzmann P., Islebe G., Scharf B. and A. Schwalb. 2011. Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. **Hydrobiologia** 661:407–433.

Pérez-Ceballos, R. Pacheco-Ávila, J. Euán-Ávila, J. I, Hernández-Arana, H. 2012. Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. **Journal of Cave and Karst Studies**, 74(1), 90-102. doi:10.4311/2011es0222.

Perry, E.C., Marin, L.E., McClain, J., Velazquez, G., 1995. The ring of cenotes (sinkholes) northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and association with the Chicxulub impact crater. **Geology** 23, 17– 20.

Plach, J.M., Elliott, A.V.C., Droppo, I.G., Warren, L.A., 2011. Physical and ecological controls on freshwater floc trace metal dynamics. **Environ. Sci. Technol.** 45 (6), 2157–2164.

Por F.D. 2008. Deuterobiosphere the Chemosynthetic Second Biosphere of the Globe. A First Review. Integrative. **Zoology** **3**: 101–114.

Pope, K.O., Ocampo, A.C., Kinsland, G.L., Smith, R., 1996. Surface expression of the Chicxulub crater. **Geology** **24**, 527–530.

Pronk M., Goldscheider N., and J. Zopfi. 2009. Microbial communities in karst groundwater and their potential use for biomonitoring. **Hydrogeology Journal** **17**: 37–48.

Sánchez y Pinto I., González-Herrera R. y E. Perry. 2005. Hidrodinamic behavior of the yucatan aquifer. A perspective on the hydraulic conductivity estimation. **Espeleo@digital** **2** Ciudad de la Habana, Cuba. Pág. 8-20.

Schmitter-Soto J.J., Comín F.A., Escobar-Briones E., Herrera-Silveira J., Alcocer J., Suárez-Morales E., Elías-Gutiérrez M., Díaz-Arce V., Maín L.E. and B. Steinch. 2002. Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). **Hydrobiologia** **2002**;467:215–28.

Staehr, P.A., Testa, J.M., Kemp, W.M., Cole, J.J., Sand-Jensen, K., Smith, S.V., 2012. The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges. **Aquatic Sciences** **74**, 15–29.

Xuluc-Tolosa F.J., Vester H.F.M., Ramirez-Marcial N., Castellanos-Albores N., and D. Lawrence. 2003. Leaf litter decomposition of tree species in three successional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico. **Forest Ecology and Management** **174** (2003) 401–412.

Vargas-Ramos R. 2007. Carbon Dynamics in a Seasonally Dry Tropical Forest. A Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Environmental Sciences. UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE USA.

Zetina-Moguel C., R. Medina-González, I. Sánchez-Molina, L. Chumba-Segura y J. Alonzo-Salomón. 2007. Hacia una Perspectiva Para Definir Criterios de Salud de los Cenotes de Yucatán. Memorias del Primer Encuentro de Investigación Científica y Tecnológica del Sistema Hidrológico de Yucatán 1:23. Mérida.