



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

Posgrado en Ciencias del Agua

**HIDROQUÍMICA Y CARACTERIZACIÓN DEL
SEDIMENTO CARBONATADO DEL SUR DE LA
LAGUNA DE BACALAR**

Tesis que presenta

Nidia Ivonne Tobón Velázquez

En opción al título de

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

Marzo, 2018

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: Nidia

Nombre: Nidia Ivonne Tobón Velázquez

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.

POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Nidia Ivonne Tobón Velázquez titulado "HIDROQUÍMICA Y CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO CARBONATADO DEL SUR DE LA LAGUNA DE BACALAR" fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Calidad y Uso Sostenible del Agua, en el laboratorio de Hidrogeoquímica y Calidad de Agua, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección de la Dra. Laura Margarita Hernández Terrones, y la co-dirección del Dr. Mario Rebolledo Vieyra perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente.



Dr. Manuel Martínez Estévez

Director de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 01 de marzo de 2018

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán por todas las lecciones que recibí, académicas y de vida.

A los encargados y colaboradores en el Laboratorio de Hidrogeoquímica y Calidad del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán, el Laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica, UNAM, y el Laboratorio de Ciencias Marinas de la Universidad de California Santa Cruz, por brindar sus instalaciones y el material para esta investigación.

A todos y cada uno en mi comité tutorial:

Dra. Laura Hernández Terrones por su amistad, por aceptar ser mi asesora y por su continuo apoyo en la búsqueda de información; por toda su confianza, experiencias compartidas y por siempre estar al pendiente de los avances de esta investigación.

Dr. Mario Rebolledo Vieyra por sus valiosos consejos desde el día que inicie en la Maestría, por todo lo aprendido en campo, por su amistad, paciencia y ayuda en el análisis de datos; por enseñarme que la labor científica no tiene límites.

Dr. Antonio Almazán por todo su apoyo desde un inicio de este proyecto, por sus valiosas sugerencias, por el conocimiento que compartió con nosotros dentro y fuera del aula y por su valiosa amistad.

Dra. Adina Paytan por su apoyo en mi estancia en California, por brindarme el apoyo técnico y personal para la elaboración de mi investigación y por sus valiosas sugerencias.

Dra. Ofelia Morton y Dr. José Luis Andrade por aceptar formar parte de este proyecto, compartir conmigo su experiencia y estar siempre dispuestos a ayudarme.

Dr. Gilberto Acosta por apoyarme desde que se incorporó a la Unidad de Ciencias del Agua, por sus enseñanzas y consejos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de esta investigación (No. Becario 599463).

Al Proyecto Seguridad Hídrica en el Sureste Mexicano ante dos escenarios de

Cambio Climático (247565) y al Proyecto de Redes-CONACYT (282240) por el apoyo económico brindado para poder realizar este proyecto.

Al personal técnico de las diferentes instituciones por apoyarme a realizar el trabajo de laboratorio y enseñarme a usar el equipo, especialmente a la Quim. Daniela Ortega Camacho por ayudarme a que mis resultados estuvieran a tiempo. Y al M. en C. Benjamín Delgado Pech por todo su apoyo en el análisis de datos.

A los técnicos Elizabeth Hernández Álvarez, Sara Ordoñez Godinez, Kim Bitterwolf y Kyle Broach por el tiempo dedicado y el apoyo brindado en el laboratorio.

A mis compañeros Fer, Carlos, Alicia, Sayuri, Susi, Tere, Ali, y Paloma por brindarme su amistad y compartir experiencias inolvidables.

DEDICATORIA

A mis padres:

Gracias por sus consejos y palabras de aliento que me han ayudado a crecer como persona y a luchar por lo que quiero. Les agradezco a ambos por que con su ejemplo me han enseñado que nada es imposible y que con esfuerzo y dedicación puedo conseguir todas mis metas.

A mis hermanos:

Gracias por su apoyo y cariño, y por estar en los momentos más importantes de mi vida. Gracias por siempre estar apoyándome desde lejos y me alentarme a continuar.

A mi amado esposo:

Por compartir esta experiencia conmigo y alentarme a seguir adelante. Por que juntos empezamos esta nueva aventura y la hemos concluído con éxito. Este logro es de ambos. Gracias por tu cariño y comprensión en todo momento y por ayudarme a pasar los momentos difíciles de la mejor manera. Nos esperan más aventura y espero sean igual de geniales como esta.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN	4
2 ANTECEDENTES	6
2.1 ÁREA DE ESTUDIO	6
2.2 CLIMA	6
2.3 HIDROLOGÍA	7
2.3.1 <i>AGUA SUPERFICIAL</i>	8
2.3.2 <i>AGUA SUBTERRÁNEA</i>	9
2.4 GEOQUÍMICA SEDIMENTARIA	10
3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	12
4 HIPÓTESIS	12
5 OBJETIVOS	12
5.1 OBJETIVO GENERAL	12
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
6 MÉTODOLOGÍA	13
6.1 SELECCIÓN DE SITIOS Y COLECTA DE MUESTRAS	13
6.2 ANÁLISIS DE MUESTRAS DE AGUA	15
6.2.1 <i>CROMATOGRAFÍA IÓNICA</i>	15
6.2.2 <i>ALCALINIDAD - TITULACIÓN ÁCIDO-BASE</i>	16
6.3 ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SEDIMENTO	17
6.3.1 <i>DIFRACCIÓN DE RAYOS X</i>	17
6.3.3 <i>ELEMENTOS MAYORITARIOS Y TRAZA</i>	18
6.3.4 <i>CONTENIDO FÓSIL</i>	19
6.4 ANÁLISIS DE DATOS	20
6.4.1 <i>DIAGRAMA DE PIPER</i>	20
6.4.2 <i>ÍNDICE DE SATURACIÓN</i>	20
6.4.3 <i>ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES</i>	20

6.4.4	<i>CORRELACIÓN DE SPEARMAN</i>	21
6.4.5	<i>ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN</i>	21
7	RESULTADOS	22
7.1	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA	22
7.2	CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO	30
7.2.1	<i>DESCRIPCIÓN DE LOS NÚCLEOS</i>	30
7.2.2	<i>GEOQUÍMICA</i>	32
7.2.3	<i>ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN</i>	36
7.2.4	<i>DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</i>	38
7.3	CONTENIDO FÓSIL	39
8	DISCUSIÓN	41
9	CONCLUSIONES	47
10	BIBLIOGRAFÍA	48

TABLAS

Tabla 1. Condiciones de operación del Cromatógrafo de Iones.....	16
Tabla 2. Índices de contaminación (Manoj y Padhy, 2014; Javan et al., 2015).....	22
Tabla 3. Variables físico-químicas de las muestras de agua. Composición química en mg/L; Prof.: profundidad en metros (m); CE: conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$; T: temperatura en $^{\circ}\text{C}$	23
Tabla 4. Valores propios de ejes ambientales.....	29
Tabla 5. Matriz de correlación de Spearman de los elementos traza en muestras de sedimento ($n=18$; negritas y rojo $P < 0.05$).....	35
Tabla 6. Índices de contaminación del registro sedimentario. Índice de geoacumulación (Igeo), Aporte antropogénico, Factor de Contaminación (FC), Grado de Contaminación y Carga de Contaminación (PLI).....	36
Tabla 7. Rangos de calidad del sedimento basado en diferentes índices de contaminación (Manoj y Padhy, 2014; Javan et al., 2015).....	37
Tabla 8. Contenido de microorganismos dentro del registro sedimentario.....	40

FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la Laguna de Bacalar (LB), longitud de 40.0 km, y ancho máximo de 2.0 km. La LB está influenciada por dos lagunas que se encuentran a su alrededor, la laguna de Chile Verde y la laguna Guerrero (Fuente: Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, INEGI).....	7
Figura 2. Inferencia de las direcciones de flujo preferencial del agua subterránea en la Península de Yucatán a partir de la medición de la carga hidráulica. Los contornos de colores indican la carga hidráulica medida por Bauer et al., (2011), mientras que las etiquetas (círculos) corresponden a datos de carga hidráulica publicados por diferentes autores (Tomado de Bauer et al., 2011).	9
Figura 3. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo (cruces). COC: Cocalitos; RAP: Los Rápidos; BAC1: Bacalar 1; BAC2: Bacalar 2; y BAC3: Bacalar 3. Los núcleos sedimentarios se tomaron en todos los sitios excepto en el Cenote Azul (Caz) y en el Cenote Cocalitos (Ccoc), donde solo se tomaron muestras de agua y se midieron parámetros físico-químicos.....	14

Figura 4. Ejemplo de los análisis de difracción de rayos-X para determinar el contenido mineralógico de cada núcleo sedimentario. Los colores corresponden a las intensidades medidas para cada mineral.	18
Figura 5. Perfil de temperatura a lo largo de la Laguna de Bacalar y dos cenotes. a) Ubicación de los sitios donde se tomaron los perfiles; b) perfiles de temperatura en la LB, el color de las líneas corresponden a los sitios marcados en la imagen a); c) perfil de temperatura del Cenote Azul; y d) perfil de temperatura del Cenote Cocalitos. Líneas continuas indican datos tomados en noviembre de 2016, y las líneas punteadas indican los datos correspondientes a junio de 2017.	24
Figura 6. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la laguna. Puntos verdes indican la concentración tanto de aniones como de cationes de cada muestra correspondiente a la laguna, puntos azules corresponden a las muestras de los cenotes a 15.0 m de profundidad. Todas las muestras pertenecen al tipo de agua cálcico-sulfatada.	26
Figura 7. Efecto de la mineralización en la composición química de la columna de agua. Puntos azules indican los sitios de muestreo; círculos sombreados indican el rango en el cual la conductividad y los elementos mayores indican un efecto de la mineralización por evaporitas o carbonatos de acuerdo con Khedidja y Boudoukha (2016).	27
Figura 8. Índice de Saturación (SI) calculados para cada sitio. Los valores de $SI=0$ indican equilibrio de los minerales, $SI>0$ se encuentran sobresaturados y $SI<0$ se encuentran en disolución. Asteriscos corresponden a las muestras tomadas a 15.0 m de profundidad.	28
Figura 9. Análisis de componentes principales (PCA) basado en 15 variables físico-químicas de la columna de agua.	29
Figura 10. Longitud de los núcleos sedimentarios, BAC1: Bacalar 1, BAC2: Bacalar 2, BAC3: Bacalar 3, COC: Cocalitos, RAP: Los Rápidos. Ubicación en figura 3.	31
Figura 11. Concentración de elementos mayores y traza (ppm) del registro sedimentario.	33

RESUMEN

Este estudio tiene como propósito documentar el estado ambiental de la parte sur de la Laguna de Bacalar, por medio del análisis de la composición físico-química de la columna de agua y del registro sedimentario. Durante noviembre 2016 se colectaron muestras de agua en cinco sitios de la laguna y en junio de 2017 se colectaron muestras de dos cenotes, para determinar la concentración de alcalinidad, nutrientes, aniones y cationes, así como perfiles de temperatura durante la temporada de nortes y lluvias. A partir de los parámetros físico-químicos medidos en la laguna de Bacalar se pudo establecer una distribución espacial de estos parámetros. Con base en un análisis de componentes principales se determinó que la porción occidental se caracteriza por presentar alto contenido de Ca^{2+} , SO_4^{2-} y HCO_3^- , esta misma condición se presentó en los dos cenotes, indicando aporte de agua subterránea hacia la porción occidental de la laguna de Bacalar. En contraste, la porción oriental se caracteriza por presentar mayor concentración de Na^+ y Cl^- comparados con la parte occidental. A pesar de este alto contenido de sales en la porción oriental se comprobó que no existe intrusión salina, la presencia de estos elementos se puede derivar de una mayor evaporación debido a que la laguna es más somera en esa zona.

En general la laguna de Bacalar es considerada como un sistema somero, oligotrófico debido a las bajas concentraciones de nutrientes (NO_2^- y PO_4^{3-}), esta misma tendencia se registró en el análisis de la composición de organismos en el sedimento donde se identificaron especies de ostrácodos (*Cytheridella ilosvayi*, *Darwinula stevensoni*, *Cypridopsis okceechobei*, *Limmocythere opesta* y *Pseudocandona* sp.) característicos de ambientes con bajo contenido de nutrientes y de aguas tranquilas.

Adicionalmente, se realizó un análisis del registro sedimentario y se determinó que la composición mineralógica está dominada por la calcita. A partir de las concentraciones de los elementos traza (Ba^{2+} , U^{6+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}), se determinó la calidad del sedimento a partir del análisis de cuatro índices: índice de

geoacumulación, factor de contaminación, grado de contaminación y el índice de carga de contaminación. A partir de estos resultados se encontró que la concentración de U^{6+} , Mn^{2+} , K^+ y Ni^{2+} , son considerados de origen natural, ya que su concentración es parecida a la composición litológica carbonatada, mientras que la alta concentración de Ba^{2+} se relaciona con la disolución de la barita y la alta concentración de Zn comparada con la composición litológica indica la presencia de este elemento por fuentes externas, posiblemente derivado de actividades antrópicas.

Palabras clave: Laguna de Bacalar, registro sedimentario, parámetros físico-químicos, agua subterránea

ABSTRACT

The aim of this work is to assess the environmental state of the southern part of Bacalar Lagoon, analyzing the physic-chemical composition of water column and the sedimentary record. Two sampling campaign were carried out. The first campaign was conducted in November 2016, water samples and sediment cores were collected in five sample sites. The second campaign was conducted in June 2017, in which were collected samples in two cenotes, to determine concentrations of alkalinity, nutrients, anions and cations, as well as temperature profiles during wet and “nortes” seasons. From the physic-chemical parameters measured in Bacalar lagoon, a spatial distribution of these parameters could be established. Based on an analysis of principal components, it was determined that the western part of the lagoon water column is characterized by high concentration of Ca^{2+} , HCO_3^- , and Sr^{2+} , derived from groundwater input. In contrast, the eastern part of the lagoon is characterized by high concentration of Mg^{2+} , Na^+ and Cl^- . However, present day seawater intrusion is not influencing the lagoon, the presence of these elements can be derived from a greater evaporation due to the lagoon is shallower in that area.

In general, Bacalar lagoon is considered a shallow, oligotrophic system due to the low concentrations of nutrients (NO_2^- y PO_4^{3-}), this same tendency was recorded in the analysis of organisms composition found in the sediment; some ostracodes species (*Cytheridella ilosvayi*, *Darwinula stevensoni*, *Cypridopsis okceechobei*, *Limmocythere opesta* and *Pseudocandona* sp.) are related to environments with low nutrient concentration and calm waters.

The mineralogical composition of the sediment is dominated by calcite. Through the concentration of trace elements (Ba^{2+} , U^{6+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}), the quality of the sediment was determined from the analysis of four indices: geoaccumulation index, pollution factor, pollution degree and pollution load index. The comparison of studied trace elements concentration in the present study and the crustal composition reveal that Mn^{2+} , Ni^{2+} , K^+ and U^{6+} in the sediment record are not contaminated. However, the concentration of Ba^{2+} is derived from the barite dissolution and the high concentration of Zn^{2+} compared to the lithological composition suggests the presence of this element seem to have predominantly anthropogenic origin.

KEYWORDS: *Bacalar lagoon, sedimentary record, physical-chemical parameters, groundwater*

Research Highlights

- Mineralogical composition of the sediment dominated by calcite
- Spatial distribution of geochemical parameters, western part is characterized by high concentration of SO_4^{2-} , Sr^{2+} and alkalinity associated with groundwater input and eastern side by no intrusion of seawater
- Bacalar lagoon sediment is not contaminated by Mn^{2+} , K^+ and Ni^{2+}
- Moderate contamination of Zn^{2+} in the sediment, possibly derived from anthropogenic activities
- High concentration of Ba is derived by dissolution of barite (BaSO_4)

1 INTRODUCCIÓN

En el Caribe Mexicano los sistemas acuáticos epicontinentales y marinos han sido afectados por contaminantes, principalmente por metales pesados, debido a la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados, así como otras actividades en la región como el turismo, la agricultura y la ganadería (Díaz, 2005; Medina *et al.*, 2014; Ochoa *et al.*, 2016). La economía de Quintana Roo está basada principalmente en el turismo, y se ha registrado un incremento en la población de 17 veces más en los últimos 40 años (Dixon *et al.*, 2001; Bauer *et al.*, 2011; INEGI, 2015), representando una necesidad sustancial de la infraestructura necesaria para el tratamiento de aguas residuales. Dado que Quintana Roo esta sobre una plataforma carbonatada, la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales propicia procesos de contaminación a través de la infiltración, mezcla con agua subterránea o descarga de agua superficial sobre el mar y lagunas costeras (Beddows, 2002; Pérez *et al.*, 2011b).

La laguna de Bacalar se ubica en el sur de Quintana Roo y es de gran interés, entre otras características, debido a que contiene estructuras carbonatadas conocidas como estromatolitos, los cuales son considerados como los microbialitos de agua dulce más grandes del mundo, abarcando una longitud total de 10 km (Gischler *et al.*, 2008; Centeno *et al.*, 2012). Su importancia radica en el hecho de que preservan información de los climas del pasado y las condiciones en las que vivieron los organismos en el momento de su sedimentación. Estas estructuras son sensibles a los cambios en las condiciones en las que habitan, y su crecimiento podría ser alterado.

A pesar de la importancia que tiene la laguna de Bacalar, debido a que es un extenso cuerpo de agua dulce que propicia el crecimiento de los estromatolitos, esta no tiene una regulación como área natural protegida, por lo tanto los planes de desarrollo siguen en proceso. Las principales actividades en esta área son el turismo, la agricultura (caña de azúcar, arroz, piña y maíz), la actividad pecuaria (porcino y ovino), y la apicultura (Díaz, 2005; INEGI, 2002). Esta laguna es un

lugar turístico muy atractivo y la afluencia de turistas ha incrementado con el tiempo (COESPO, 2007), promoviendo un mayor desarrollo urbano y turístico, lo cual genera un impacto sobre la laguna, y las actividades acuáticas asociadas al turismo (algunas de ellas no están propiamente reguladas) han causado un impacto negativo sobre la calidad del agua y los estromatolitos (Díaz, 2005). Los impactos de estas actividades sobre la laguna no han sido estudiados de manera integral, estudios previos han reportado algunas características de la laguna (Díaz, 2005; Gischler *et al.*, 2008, 2011; Pérez *et al.*, 2011a; Gerd, 2012; Siqueiros *et al.*, 2013; Castro *et al.*, 2014; González *et al.*, 2014; Sánchez, *et al.*, 2015; Oliva *et al.*, 2016).

En los sistemas acuáticos, el contenido de elementos traza se distribuye entre la fase disuelta, coloidal, material en suspensión y en la fase sedimentaria (Katip *et al.*, 2012), sin embargo, en la fase sedimentaria la concentración de estos elementos es mayor con respecto a su contenido en el agua, dado el bajo tiempo de residencia (Nriagu y Pacyna, 1988; Pradit *et al.*, 2010). El estudio de la composición química de los sedimentos permite conocer los cambios ambientales y regionales a través del tiempo, y por lo tanto a través del estudio del registro sedimentario se pueden conocer los cambios en la composición química del cuerpo de agua, ya sea por cambios naturales o derivado de actividades humanas (Boyle, 2001; Yang y Rose, 2005).

El análisis del registro sedimentario en la laguna de Bacalar permitirá determinar el impacto antropogénico sobre el sistema, a través del análisis de los cambios en la concentración de elementos mayores y traza, además de evaluar las características físico-químicas del agua. A través de este estudio se podrán ver los cambios en la composición química y la dinámica de la laguna, y los resultados ayudarán a conocer el estado ambiental de la laguna y generar acciones que ayuden a preservar a los estromatolitos.

2 ANTECEDENTES

2.1 Área de estudio

La laguna de Bacalar (LB) se encuentra ubicada en el sureste del estado de Quintana Roo ($18^{\circ} 56' 26.5''$ N, $88^{\circ} 09' 28.6''$ O y $18^{\circ} 32' 38.6''$ N, $88^{\circ} 27' 48.6''$ O) (Fig. 1). Comprende un área total de ~ 40.0 km², con una longitud de 40.0 km y un ancho máximo de 2.0 km, tiene una elevación media de 1.5 metros sobre el nivel del mar (CONAGUA, 2002; Gischler *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2014). Se cree que la LB es de origen tectónico ya que se encuentra sobre la falla del Rio Hondo, la cual pertenece predominantemente al Mioceno, esta falla es resultado de diferentes eventos tectónicos durante el Cenozoico (Beddows, 2004; Díaz, 2005; Bauer *et al.*, 2011).

2.2 Clima

De acuerdo con CONAGUA (2015), el estado de Quintana Roo tiene un clima cálido subhúmedo con una temperatura media de 26.5 °C. Se caracteriza por tener tres periodos meteorológicos: 1) de Noviembre a Febrero se presenta la temporada de frentes fríos, también llamados nortes, con vientos que alcanzan hasta 90.0 km/hr (Hernández *et al.*, 2011); 2) durante Junio a Octubre, existe la presencia de ondas tropicales dando origen a la temporada de lluvias, la precipitación más abundante tiene lugar entre junio y septiembre (176.3 - 214.5 mm); 3) entre los meses de Marzo a Mayo se presenta un periodo relativamente seco, con precipitaciones menores (124.0 mm).

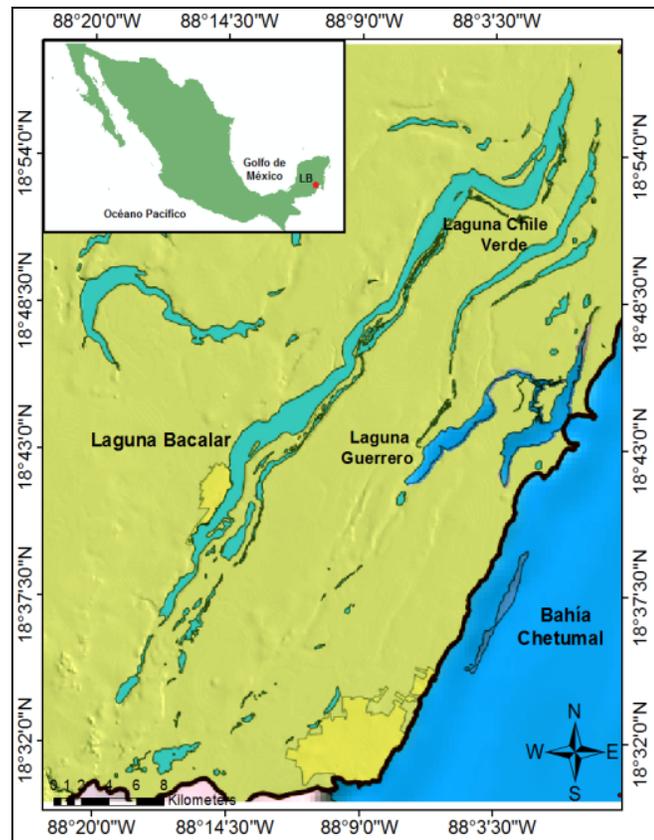


Figura 1. Ubicación geográfica de la Laguna de Bacalar (LB), longitud de 40.0 km, y ancho máximo de 2.0 km. La LB está influenciada por dos lagunas que se encuentran a su alrededor, la laguna de Chile Verde y la laguna Guerrero (Fuente: Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, INEGI).

2.3 Hidrología

La Laguna de Bacalar es un sistema oligotrófico, con una profundidad máxima de 15.0 m y con una estacionalidad poco marcada (Gischler *et al.*, 2008). Durante el invierno la temperatura máxima del agua registrada es de 28.0 °C, mientras que durante el verano es de 29.0 °C. Esta laguna es el cuerpo de agua dulce más extenso de Quintana Roo, con conductividad eléctrica (CE) menor a 2.3 mS/cm, y con pH entre 7.6 y 8.3 (Beltrán, 2010).

2.3.1 Agua Superficial

La LB se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 33 (RH33), donde debido a la naturaleza cárstica de la zona, existen cinco cenotes con una profundidad máxima de ~90.0 m (Gischler *et al.*, 2008), tres de éstos (Cocalitos, Esmeralda y Negro) se encuentran dentro de la laguna y tienen una conexión superficial, mientras que el Cenote Azul el cual se encuentra fuera de la laguna, solo tiene conexión subterránea. Por otro lado, la laguna recibe aporte de agua del Cenote Xul-Ha a través de un canal que se encuentra en el extremo suroeste de la laguna (Perry *et al.*, 2009; Beltrán, 2010; Gischler *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2011a)

La parte oriental de la LB tiene conexión con la Bahía de Chetumal a través del Río Hondo, así como a través de varias lagunas que se encuentran a su alrededor (Laguna Chile Verde y Laguna Guerrero) (Fig. 1). Otro aporte importante de agua está dado por la precipitación, este aporte es alto durante el verano-otoño y bajo durante el invierno y primavera, la precipitación acumulada media anual es de 1100.0-1500.0 mm/año (INEGI, 2015). Se ha estimado que la variación anual de los niveles de agua en la laguna es de aproximadamente 30.0 cm (Gischler *et al.*, 2011).

Beltrán (2010) y Sánchez *et al.*, (2015) indican que los iones principales presentes en el agua de la laguna son el Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- y SO_4^{2-} , mientras que en el sedimento, y en menor concentración, se encuentran algunos elementos traza como Hg^{2+} , Pb^{4+} y Cd^{2+} (González *et al.*, 2014). Se ha reportado que la concentración de estos metales se incrementa durante la temporada de lluvias (González *et al.*, 2014), debido al transporte de estos elementos hacia la laguna, ya sea por escorrentía o por aporte de agua subterránea. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la ingesta de estos elementos provocan serios problemas de salud en los humanos, como anemia, hipertensión, disfunción renal, inmunotoxicidad, toxicidad reproductiva, daños en los huesos, piel, aparato digestivo y pulmones (OMS, 2003; Pérez y Azcona, 2012).

2.3.2 Agua Subterránea

La Península de Yucatán es un sistema cárstico, formado principalmente por rocas carbonatadas de fácil disolución, dando lugar a fracturas y estructuras de disolución, que lo hacen un sistema más complejo. Por ello, no se ha podido estimar la dirección del flujo de agua subterránea en toda la península (Bauer *et al.*, 2011). Sin embargo, se han realizado diversos estudios a escala regional (Bauer *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2015), donde se ha estimado la dirección de flujo a partir de la medición en la carga hidráulica (Fig. 2). De manera general, se estima que la dirección del flujo es del interior del continente hacia la costa.

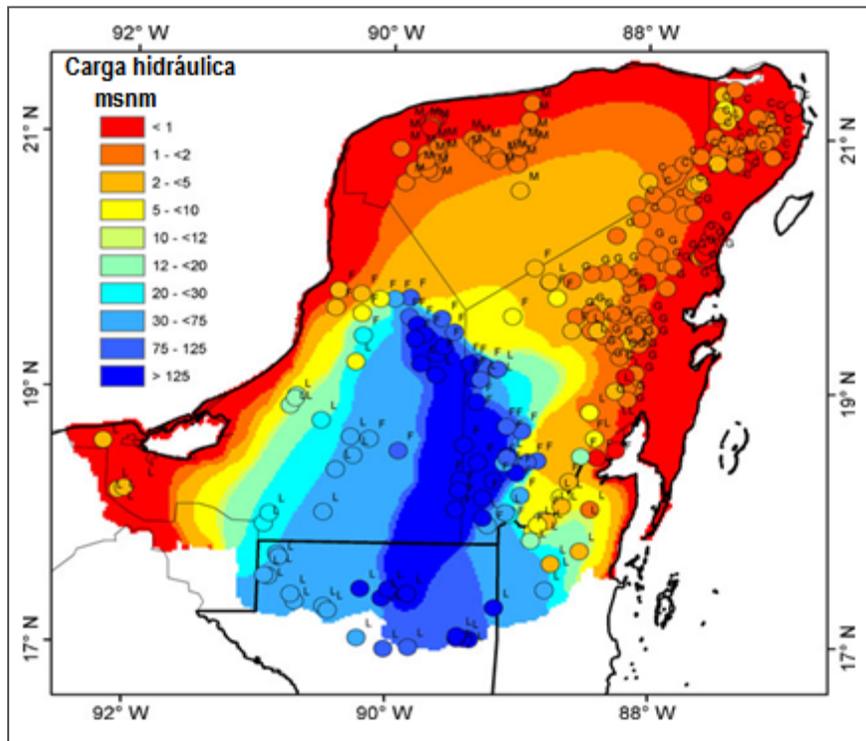


Figura 2. Inferencia de las direcciones de flujo preferencial del agua subterránea en la Península de Yucatán a partir de la medición de la carga hidráulica. Los contornos de colores indican la carga hidráulica medida por Bauer *et al.*, (2011), mientras que las etiquetas (círculos) corresponden a datos de carga hidráulica publicados por diferentes autores (Tomado de Bauer *et al.*, 2011).

En la parte sur de Quintana Roo se ha observado que, en general, el flujo de agua subterránea tiene una orientación de NNO-SSE, básicamente,

perpendicular a la costa (Sánchez *et al.*, 2015), lo cual indica que la LB recibe importantes aportes de agua subterránea en la parte occidental (Díaz, 2005; Gischler *et al.*, 2011). Gischler *et al.*, (2008, 2011) reportaron que en la composición química del agua, el contenido de carbonatos en el agua del lado occidental de la laguna es mayor a la concentración de carbonatos del agua de mar (140 mg/l); mientras que el contenido de carbonatos en el resto de la laguna es menor. Esta misma condición se encontró en el Cenote Azul y en la Laguna de San Antonio, las cuales se ubican en la parte occidental de la LB.

La composición química del agua subterránea depende, en gran medida, de la interacción agua-roca debido a la disolución de esta última, lo que enriquece el agua subterránea con algunos minerales provenientes de la roca (Aliaga, 2009). Estudios realizados por Perry *et al.*, (2002) y Null *et al.*, (2014), en algunas zonas del sureste de Quintana Roo, reportan que el agua subterránea tiene un alto contenido de calcio y sulfato derivados de la disolución del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la celestita (SrSO_4). Perry *et al.*, (2002) reportan que la composición del agua subterránea con alto contenido de calcio y sulfato, impide la mezcla de con el agua de mar desde el sur de Tulum hasta Belice.

2.4 Geoquímica sedimentaria

El estado ambiental de los cuerpos acuáticos superficiales, se puede determinar a través del análisis de la composición geoquímica de los sedimentos y del agua (Cieslewicz *et al.*, 2017). Sin embargo, en el registro sedimentario la concentración de los constituyentes minoritarios, como los elementos traza, es mayor debido a que tienen baja solubilidad en la columna de agua y tienden a depositarse en el sedimento (Mason, 2013).

Los elementos traza son un grupo de elementos que están presentes de manera natural en el medio en concentraciones bajas (<0.1‰), algunos de estos son esenciales para el crecimiento de los organismos (micronutrientes). Dependiendo del tipo de sustrato los elementos traza cambian sus proporciones.

En el caso de los sistemas carbonatados se incluyen principalmente a los elementos traza Sr, Mn, Ba, K, Cu, Cd, Zn, Pb, Fe y Co (Adriano, 1986). Los elementos traza se encuentran presentes en diferentes formas en el ambiente acuático, y su concentración está controlada por la precipitación atmosférica, por procesos de erosión en el suelo y roca, y por procesos biológicos (Salomons y Förstner, 1980).

La composición química de los sedimentos lacustres está controlada principalmente por las características litológicas de la cuenca (Urrutia, *et al.*, 2002). Sin embargo, dentro de los procesos sedimentarios existen dos clasificaciones del origen de los materiales que rigen la composición química dentro del cuerpo de agua: 1) materiales autigénicos, los cuales se generan derivado de procesos como precipitación y disolución de los minerales, procesos biológicos (respiración y fotosíntesis), e interacción agua-atmósfera; y 2) materiales alogénicos, de origen externo, transportados por viento, lluvia, o derivados de actividades antrópicas (Horowitz, 1985; Boyle, 2001). El estudio de la composición geoquímica inorgánica en sedimentos permite entender las interacciones entre los diferentes componentes del ecosistema, como el mecanismo de transporte de los elementos, interacción agua-roca, procesos de mineralización, entre otros (Adriano, 1986; Boyle, 2001).

Dado que los sedimentos lacustres tienen baja tasa de renovación, esta permite que se preserven las condiciones químicas del agua en la que sedimentaron (González *et al.*, 2009), por lo tanto un registro sedimentario actúa como un indicador de las condiciones físico-químicas del pasado, y dichas condiciones han ido variando a través del tiempo.

En la LB solo se ha realizado un estudio de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en sedimento superficial y en gasterópodos (González *et al.*, 2014), y se ha encontrado que la LB está contaminada principalmente con Hg. Sin embargo, es necesario realizar un estudio multidisciplinario para determinar el grado de contaminación y la distribución de estos elementos dentro de la LB.

3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es la variabilidad espacial de la composición físico-química en agua y sedimento en la Laguna de Bacalar?
- ¿Existe contaminación en la laguna de Bacalar derivado de actividades antropogénicas?

4 HIPÓTESIS

El aporte de agua subterránea, la composición mineralógica, el aporte antropogénico de elementos traza y la composición química del agua y sedimento de la laguna de Bacalar tendrán una distribución espacial de acuerdo con la distancia a los cenotes.

Dado el incremento del turismo, las actividades agrícolas y pecuarias en la región de Bacalar, la composición química de la laguna de Bacalar se verá afectada por los desechos derivados de estas actividades.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar los cambios en la composición físico-química de la columna de agua y del registro sedimentario en el sur de la laguna de Bacalar.

5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la composición química del agua de la parte sur de la Laguna de Bacalar.
- Determinar el aporte de agua subterránea a través de la comparación en la

mineralogía y la composición química del agua de la laguna y de dos cenotes.

- Identificar la composición mineralógica del agua y sedimento, para conocer las posibles fuentes de los elementos
- Determinar el aporte antropogénico de elementos traza en la Laguna de Bacalar, mediante el análisis de los cambios en la composición química del sedimento.
- Conocer la calidad del sedimento en la laguna de Bacalar, mediante el análisis de índices de contaminación.

6 MÉTODOLÓGÍA

6.1 Selección de sitios y colecta de muestras

Se seleccionaron siete sitios de muestreo a lo largo de los últimos 10 km de la parte sur de la LB. Cinco se encuentran ubicados en la parte occidental de la laguna y dos se ubican en la parte oriental (Fig. 3). La ubicación de cada sitio se estableció mediante un GNSS (Global Navigational Satellite System) marca TRIMBLE®, modelo NOMAD® 1050, utilizando como datum el WGS84.

Se realizaron dos campañas de muestreo, la primera se llevó a cabo en noviembre de 2016, donde se colectaron cinco núcleos de sedimento de manera manual, contenidos en tubos de acetato de vinilo de 5.0 cm de diámetro, con longitudes que variaron de 11.0 cm a 41.0 cm. Tres de los núcleos se tomaron en la porción occidental de la laguna (COC, BAC3 y RAP) y dos núcleos se tomaron en la porción oriental (BAC1 y BAC2) (Fig. 3). Las muestras se preservaron a una temperatura aproximada de 4.0°C para su posterior análisis en el laboratorio.

En laboratorio, los núcleos se describieron y submuestrearon cada 4.0 cm, obteniéndose un total de 27 muestras de sedimento. Todas las muestras se secaron en cajas petri en un horno a 50.0°C, posteriormente se molieron en un

mortero de ágata, posteriormente para realizar los diferentes análisis, las muestras se pasaron por un tamiz de 10.0 μm de apertura de poro.

Adicionalmente, en cada sitio se colectaron seis muestras de agua superficial, para los diferentes análisis de alcalinidad, concentración de nutrientes, concentración de cationes y aniones. En total se colectaron 36 muestras de agua superficial.

La segunda campaña de muestreo se llevó a cabo durante junio de 2017, donde se muestrearon los sitios Ccoc y Caz (Fig. 3). En cada sitio se colectaron tres muestras de agua superficial y tres muestras de agua a 15 m de profundidad con ayuda de equipo de buceo, en total se obtuvieron seis muestras por cada sitio para los análisis de alcalinidad, concentración de nutrientes, y concentración de cationes y aniones.

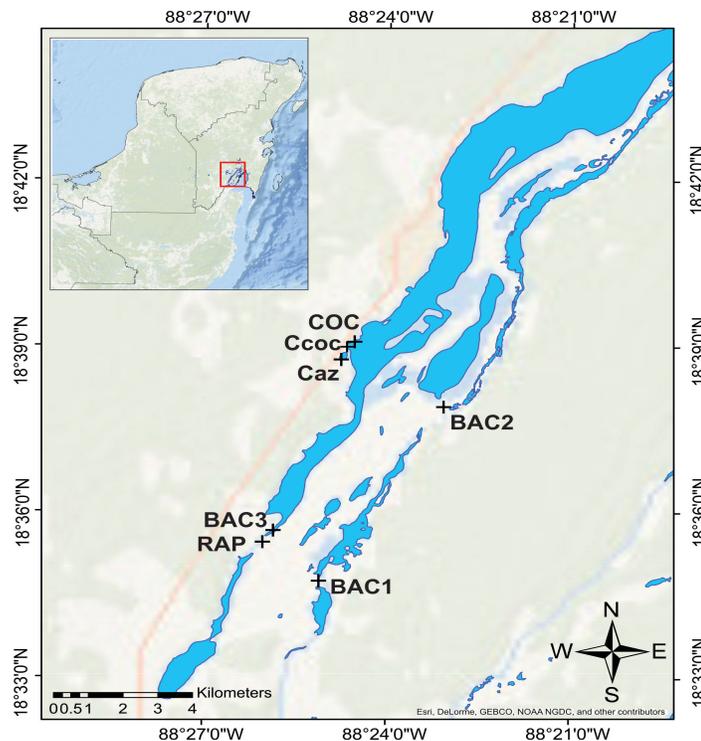


Figura 3. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo (cruces). COC: Cocalitos; RAP: Los Rápidos; BAC1: Bacalar 1; BAC2: Bacalar 2; y BAC3: Bacalar 3. Los núcleos sedimentarios se tomaron en todos los sitios excepto en el Cenote Azul (Caz) y en el Cenote Cocalitos (Ccoc), donde solo se tomaron muestras de agua y se midieron parámetros físico-químicos.

La colecta de muestras de agua para los análisis de nutrientes en forma disuelta de amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}), se realizó en botellas de polietileno de alta densidad (Nalgene®) de 125.0 ml, previamente lavadas con HCl, de acuerdo a los protocolos internacionalmente establecidos (USGS, 2016), estas muestras se filtraron utilizando filtros de 0.45 μm de abertura de poro.

Para las muestras de alcalinidad y aniones, se colectaron volúmenes de 250.0 y 125.0 ml, respectivamente, en botellas de polietileno de alta densidad (Nalgene®) previamente lavadas con HNO_3 al 14%, mientras que las botellas para las muestras de cationes (125.0 ml), se lavaron con HCl.

Las muestras de agua colectadas en ambos muestreos se colocaron en hieleras para su transporte al laboratorio, se preservaron a una temperatura inferior a los 4.0°C hasta su posterior análisis en laboratorio. Para monitorear el control de calidad de las muestras tanto en la adecuada preservación y transporte se tomaron cuatro blancos de viaje (uno por cada parámetro medido), además se colectaron réplicas para el parámetro de alcalinidad con el fin de estimar el error de muestreo.

Finalmente, en ambas campañas de muestreo los parámetros físico-químicos del agua (temperatura, pH, conductividad, sólidos totales disueltos y oxígeno disuelto), fueron medidos *in situ* utilizando una sonda multiparamétrica marca YSI®, modelo 6600, estos parámetros fueron tomados en la parte superficial de la laguna en cada sitio de muestreo.

6.2 Análisis de Muestras de Agua

6.2.1 Cromatografía Iónica

La determinación de nutrientes (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}), cationes (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ y Sr^{2+}) y aniones (Cl^- , SO_4^{2-}) se realizó con un cromatógrafo de iones 882 Compact IC Plus de Metrohm® en la Unidad de Ciencias del Agua, Centro de

Investigación Científica de Yucatán. Para las muestras de NO_3^- y NO_2^- se utilizó el detector UV/VIS y el de conductividad eléctrica para Cl^- , SO_4^{2-} y PO_4^{3-} .

La técnica de cromatografía iónica consiste en utilizar una fase estacionaria y una fase móvil, para el análisis de aniones, como medio móvil se utilizó una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) con bicarbonato de sodio (NaHCO_3) a una concentración de 1.8 mM y 1.7 mM, respectivamente, mientras que para el análisis de cationes se utilizó una solución de ácido nítrico (HNO_3) con una concentración de 2.7 mM. Para este método se utilizaron 10.0 ml de cada muestra.

Las condiciones con las que se opera el cromatógrafo de iones se encuentran en la Tabla 1. Estas condiciones se utilizan tanto para el control analítico como para el análisis de muestras.

Tabla 1. Condiciones de operación del Cromatógrafo de Iones

Operación	Condiciones
Tiempo de análisis	20.0 min
Tipo de integración	Automático
Tipo de columna	Metrosep A Supp 5 250/4.0
Composición de la fase móvil	Carbonato de sodio, 1.8 mM Bicarbonato de sodio 1.7 mM Ácido nítrico 2.7 mM
Flujo	0.700 ml/min
Presión	9.23 MPa

6.2.2 Alcalinidad - Titulación ácido-base

La determinación de alcalinidad se realizó mediante el método de titulación ácido-base, el cual consiste en agregar reactivos ácidos (H_2SO_4) para determinar a qué concentración los carbonatos y bicarbonatos se neutralizan, indicando la concentración de compuestos carbonatados presentes en las muestras.

Este método consiste en dos fases: 1) alcalinidad de fenolftaleína, se agrega 1.0 ml de ácido (fenolftaleína), si la muestra vira a color rosa, se lleva a

cabo la titulación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0.02 N hasta llegar a un pH de 8.3, en este punto la mayor parte del CO_3 se ha convertido a HCO_3 y el color de la fenolftaleína cambia de color rosa a incoloro; y 2) alcalinidad total, en esta fase se añade a cada muestra anaranjado de metilo como indicador, se lleva a cabo la titulación agregando ácido sulfúrico hasta llegar a un pH de 4.5, donde la mayor parte de HCO_3 se convierte en H_2CO_3 y CO_2 , y la muestra cambia de color a rosa salmón. Posteriormente, el volumen utilizado de reactivo se convierte a unidades de mg CaCO_3/l .

6.3 Análisis de Muestras de Sedimento

6.3.1 Difracción de Rayos X

Para conocer el contenido mineralógico del sedimento se utilizó el método de difracción de rayos X. Se utilizaron 2.0 g de cada muestra de sedimento previamente molida, se colocó en un recipiente de acero inoxidable y se analizaron en un difractómetro marca X'Pert³ Powder©. Los datos obtenidos se analizaron en el programa Xpert Data Collector©, donde se identificó el contenido de minerales para cada muestra. Este análisis se realizó en el Instituto de Ciencias del Mar de la Universidad de California, Santa Cruz (UCSC), California, EE.UU

El análisis del contenido de minerales por el método de difracción de rayos-X, mide la intensidad en cuentas por segundo (cps) de cada mineral de acuerdo a la concentración de este mismo en la muestra. Para cada muestra se observó la intensidad de los picos y se identificó que mineral correspondía cada pico. Adicionalmente, se determinó la proporción de cada mineral en cada muestra y por último se compararon las intensidades de todas las muestras en cada núcleo. En la figura 4 se muestra un ejemplo de los análisis que se realizaron.

Para el análisis de los elementos traza se utilizaron dos estándares internos (Sc y Rh) a una concentración de ~200 ppb para corregir la deriva instrumental. El Rh se utilizó a una baja resolución para los elementos Sr^{2+} , Ba^{2+} y U^{6+} , mientras que el Sc se utilizó como estándar interno para el resto de los elementos (Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ti^{4+} , K^+ , Si^{4+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , y Zn^{2+}).

Las cuentas por segundo obtenidas del equipo se convirtieron a concentraciones usando una curva estándar obtenida a partir del material de referencia NIST 1b. Se usó un promedio de tres blancos para obtener la concentración final.

6.3.4 Contenido Fósil

Se realizó un conteo de los microorganismos fósiles en cada sección del sedimento. Para facilitar el conteo, cada muestra se pasó por tamices de diferentes tamaños de abertura de poro 500.0 μm , 355.0 μm y 250.0 μm , posteriormente se observaron en un microscopio estereoscópico, usando un aumento de 10x y 40x, dependiendo del tamaño de los organismos que se observaron. Así mismo, se realizó un registro fotográfico de las especies encontradas, utilizando una cámara digital OLYMPUS DP20©, con base en ellas, se identificaron los diferentes tipos de especies consultando la literatura. Este análisis se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias del Mar de la Universidad de California, Santa Cruz (UCSC), California, EE. UU.

Para la identificación de diatomeas, se realizó un tratamiento previo de las muestras, el cual consistió en eliminar la materia orgánica y carbonatos, agregándole una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10% y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), a 5.0 g de muestra. A continuación, para eliminar la condición ácida de la solución excedente, la muestra se lavó al menos cinco veces consecutivas con agua destilada. Posteriormente se dejó reposar la muestra por 24 hrs y luego se extrajo el agua utilizando la técnica de sifonado. Finalmente, las muestras se aforaron a 30.0 ml y se prepararon haciendo diluciones de 1:5, de las cuales se tomaron alícuotas de 200.0 ml y se montaron en un portaobjetos con el

medio de montaje Naphrax, el cual se calentó unos segundos para evaporar el solvente y cristalizar la resina. La identificación de diatomeas se realizó en el laboratorio de Paleolimnología del Instituto de Geofísica, UNAM, se utilizó un microscopio óptico OLYMPUS BX50© con un objetivo de 100x.

6.4 Análisis de datos

6.4.1 Diagrama de Piper

Con el fin de determinar el tipo de agua de la laguna de Bacalar se utilizó el diagrama de Piper, el cual se obtuvo a través del software Aqua Chem Versión 3.7. Este diagrama utiliza un sistema triangular donde el triángulo de la derecha representa el porcentaje de aniones (Cl , SO_4 , $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$) y en el triángulo de la izquierda se encuentra el porcentaje de cationes (Ca , Mg , $\text{Na} + \text{K}$). Ambas concentraciones son proyectadas en un rombo central que indica la composición química del agua (Güler *et al.*, 2002).

6.4.2 Índice de Saturación

A partir de los resultados de cationes y aniones se calculó el índice de saturación de algunos minerales como calcita, dolomita, aragonita, yeso y celestita (Fig. 8). Este análisis se realizó utilizando el programa PHREEQC, del software AquaChem Versión 3.7. A través de este análisis se puede conocer si los minerales están en equilibrio con el medio ($\text{SI}=0$), sobresaturados ($\text{SI}>0$) lo que genera precipitación del mineral, y por último permite saber si el mineral está en disolución ($\text{SI}<0$) (Appelo y Postman, 2005).

6.4.3 Análisis de Componentes Principales

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA), a partir del análisis de quince variables físico-químicas (temperatura del agua, pH,

conductividad eléctrica, TDS, SiO_2^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ y Sr^{2+}) utilizando el software R, v. 3.4.0. Debido a que los ejes derivados de un análisis de PCA representan desviaciones estándar, cuando las diferencias entre sitios son mayores a 2 unidades representan un cambio en las condiciones físico-químicas (Massaferro *et al.*, 2017), por lo tanto las variaciones pueden interpretarse como diferencias entre sitios.

6.4.4 Correlación de Spearman

Se realizó una prueba de normalidad a las concentraciones de los elementos medidos en el registro sedimentario, con el fin de ver si tenían una distribución normal. Para este análisis se utilizó la prueba Shapiro-Wilk con el programa STATISTICA v. 13.3. Para determinar la correlación entre las variables medidas en el registro sedimentario se utilizó la correlación de Spearman con el programa STATISTICA v. 13.3. Este análisis permite conocer la relación entre las variables de cada sitio con un nivel de significancia de $P < 0.05$. Este análisis no paramétrico se realizó debido a que al realizar una prueba de normalidad (Shapiro-Wilks) a las variables medidas en el registro sedimentario, esta no se cumplió.

6.4.5 Índices de Contaminación

Para determinar la calidad del sedimento en la LB se utilizaron cuatro índices de contaminación (Tabla 2). Donde M_s es la concentración del elemento de interés en la muestra y M_c es la concentración promedio del elemento contenido en las rocas carbonatadas. Dado que en la LB no se tiene un nivel de referencia de los elementos traza en sedimento, se seleccionó el Al como referencia, debido a que es un elemento conservativo y es resistente a la erosión, por lo tanto, no participa activamente en los ciclos biogeoquímicos y no tiene una fuente antropogénica significativa (Böes *et al.*, 2011).

Los valores para la corteza terrestre fueron tomados de Turekian y Wedepohl (1961), los cuales refieren sus concentraciones en rocas carbonatadas de la corteza terrestre superior: Al= 4200.0 ppm; K= 2700.0 ppm; Mn= 1100.0 ppm; Ni= 20.0 ppm; Zn= 20.0 ppm y Ba= 10.0 ppm.

Tabla 2. Índices de contaminación (Manoj y Padhy, 2014; Javan *et al.*, 2015)

Índice	Formula
Índice de geoacumulación	$I_{geo} = \log_2(M_s/1.5 * M_c)$
Factor de Contaminación	$FC = M_s/M_c$
Grado de Contaminación	$GC = \sum_{i=1}^n CF$
Índice de carga de contaminación	$PLI = (CF_1 * CF_2 * ... * CF_n)^{1/n}$

Para diferenciar el origen de los elementos traza, ya sea de origen antropogénico o litológico se utilizaron las siguientes formulas (Hernández *et al.*, 2003):

$$[M]_{litogénico} = [Al]_s * ([M]/[Al])_c$$

$$[M]_{antropogénico} = [M]_T - [M]_{litogénico}$$

donde el aporte litogénico se estima a partir de la concentración de Al en la muestra (Al_s) y la relación entre el elemento traza y el Al en la corteza (Al_c). Para el aporte antropogénico se utiliza la concentración total del elemento medido en la muestra (M_T) menos el aporte litogénico.

7 RESULTADOS

7.1 Parámetros físico-químicos del agua

Los valores físico-químicos del agua superficial de la LB se muestran en la tabla 3. Los valores de conductividad eléctrica (2.6-3.1 mS/cm) indican que la

salinidad de la laguna corresponde al rango de agua dulce, y con un pH casi neutro (6.6-7.3). Adicionalmente, la temperatura del agua entre los sitios de muestreo no presenta gran variación (27.5-29.7°C).

La profundidad máxima medida en la laguna fue de 15.0 m, mientras que en los cenotes Cocalitos y Azul, la profundidad máxima a la cual descendieron los buzos fue de 30.0 m. Sin embargo, Gischler *et al.*, (2008) y Gondwe *et al.*, (2010) han reportado para el Cenote Azul una profundidad de 90.0 m y 74.0 m para el cenote Cocalitos. La figura 5 muestra los perfiles de temperatura a lo largo de la parte sur de la laguna, donde se observa muy poca variabilidad con respecto a la profundidad (28.5-28.8°C), indicando que la distribución de la misma en la columna de agua es homogénea (Fig. 5b).

Tabla 3. Variables físico-químicas de las muestras de agua. Composición química en mg/l; Prof.: profundidad en metros (m); CE: conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$; T: temperatura en °C.

Clave	COC	RAP	BAC1	BAC2	BAC3	Ccoc		Caz	
Sitio	Cenote Cocalitos	Los Rápidos	Bacalar 1	Bacalar 2	Bacalar 3	Cenote Cocalitos		Cenote Azul	
Prof.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	0.00	15.00
pH	6.58	6.97	7.31	7.34	*	6.54	*	6.85	*
T	29.26	28.91	27.47	29.67	20.20	29.27	28.50	30.84	29.60
CE	2.93	2.65	3.15	3.19	*	2.68	*	2.67	*
TDS	1.76	1.60	1.95	1.90	*	1.57	*	1.56	*
Na ⁺	63.00	32.47	133.57	108.12	32.73	47.40	34.10	31.30	33.60
K ⁺	0.75	0.42	1.80	1.75	0.26	3.58	2.97	2.82	3.05
Mg ²⁺	71.24	73.20	89.00	83.65	75.61	73.40	77.50	76.80	78.10
Ca ²⁺	393.00	376.00	386.00	386.00	422.00	208.00	354.00	342.00	365.00
Sr ²⁺	5.47	6.31	7.15	4.40	2.71	4.76	5.92	5.45	5.52
Cl ⁻	100.74	41.66	283.17	226.41	41.65	91.00	47.00	41.00	42.00
SO ₄ ²⁻	962.00	1015.00	1091.00	962.00	1174.00	913.00	1237.00	1107.00	1284.00
SiO ₂ ⁻	16.25	22.00	22.25	23.50	15.75	32.00	30.00	36.00	31.00
HCO ₃ ⁻	156.70	270.90	86.50	61.90	225.30	155.00	244.00	214.00	241.00
NO ₃ ⁻	1.40	1.74	2.68	0.10	2.67	2.00	1.28	2.55	2.83
NO ₂ ⁻	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
NH ₄ ⁺	0.18	0.13	0.28	0.19	0.14	0.20	0.26	0.21	0.23
PO ₄ ³⁻	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM

*Datos no disponibles. Ubicación de sitios de muestreo ver Fig. 5. Desviación estándar de los análisis: Na 0.97%, K 0.13%, Mg 2.98%, Ca 14.29%, Sr 0.34%, Cl 2.11%, SO₄ 9.0%, SiO₂ 2.60%, NO₃ 0.19%, y NH₄ 0.04%. <LDM: menor al límite de detección del método. Balance iónico <10%.

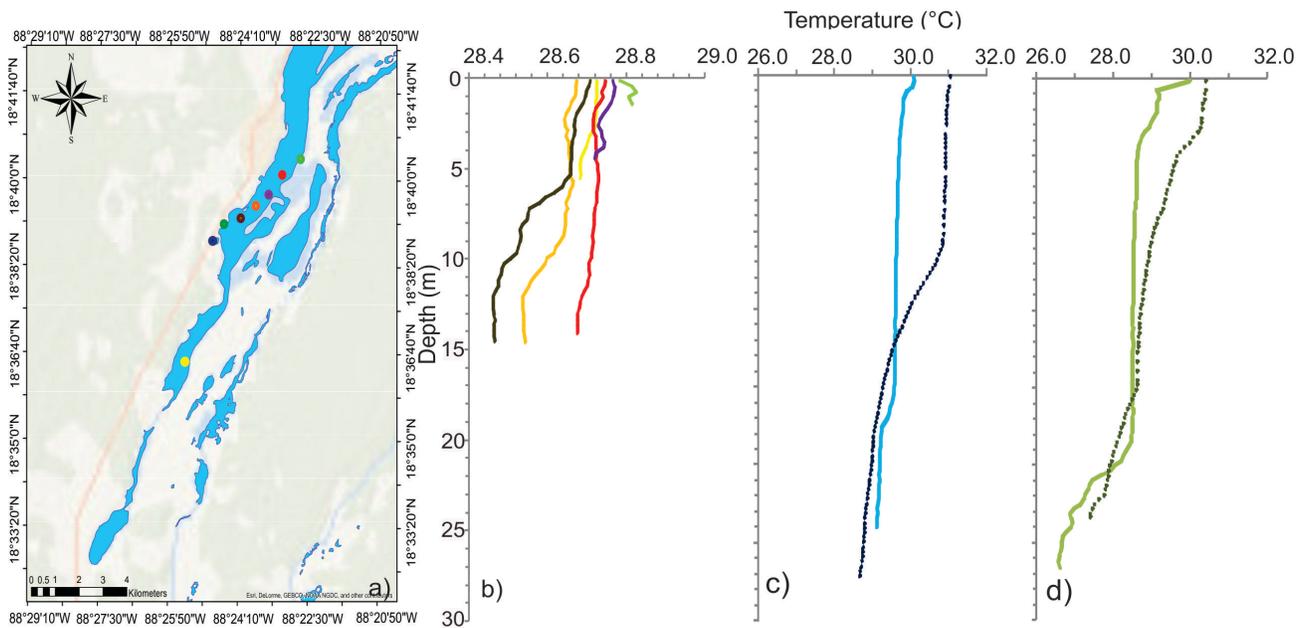


Figura 5. Perfil de temperatura a lo largo de la Laguna de Bacalar y dos cenotes. a) Ubicación de los sitios donde se tomaron los perfiles; b) perfiles de temperatura en la LB, el color de las líneas corresponden a los sitios marcados en la imagen a); c) perfil de temperatura del Cenote Azul; y d) perfil de temperatura del Cenote Cocalitos. Líneas continuas indican datos tomados en noviembre de 2016, y las líneas punteadas indican los datos correspondientes a junio de 2017.

En contraste con los valores de temperatura registrados en la LB, se observó una mayor variación en los perfiles de los cenotes en ambas épocas de muestreo. Durante junio, tanto en el Cenote Azul como en el Cenote Cocalitos la temperatura registrada fue más alta (31.0°C y 30.4°C , respectivamente), con respecto a los valores de noviembre (30.0°C) (Fig. 5c-d).

Adicionalmente, en ambos cenotes se observan dos cambios de temperatura con respecto a la profundidad durante las dos campañas de muestreo. En el Cenote Azul durante junio el primer cambio de temperatura se observa a 0.5 m y la otra a 12.0 m, mientras que en noviembre se encuentran a 2.3 m y 29.0 m (Fig. 5c). Para el Cenote Cocalitos en junio el cambio de temperatura se encuentra a 3.8 m y 29.0 m, mientras que en noviembre están a 2.0 m y 24.0 m (Fig. 5d). Para ambos cenotes se observa que la profundidad donde ocurre el cambio de temperatura disminuye durante el verano (junio).

En los sitios de la parte oriental de la laguna, se midieron los valores de conductividad eléctrica (3.15-3.19 mS/cm) más altos si se comparan con los valores de conductividad eléctrica medidos en la parte occidental (2.65-2.93 mS/cm). La concentración de elementos mayores en esta parte de la laguna está dominada por Cl^- (41.0-283.0 mg/l), y Na^+ (4.7-5.8 mg/l), sin embargo estos valores son menores comparados con el promedio del agua de mar (~19370.0 mg/l y 10760.0 mg/l, respectivamente) (Pérez *et al.*, 2011a), indicando que no hay influencia de agua marina. La profundidad máxima medida en la columna de agua en la parte oriental fue de 0.4-0.6 m, dada esta baja profundidad existe una mayor evaporación en esta zona comparada con la parte occidental, es por ello que en esta zona domina la presencia de Na^+ y Cl^- , favoreciendo un incremento en la conductividad eléctrica y en la concentración de los sólidos totales disueltos (1.9-1.8 mg/l).

La concentración de NO_3^- varía de 0.1 a 2.7 mg/l, mientras que la concentración de NO_2^- y PO_4^{3-} son menores a los límites de detección del método. A partir de los resultados analíticos, se establece que el orden de abundancia de los cationes en el agua es $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{K}^+$ y para los aniones es $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$.

El diagrama de Piper (Fig. 6) muestra las características hidroquímicas basadas en las proporciones de aniones y cationes (meq/l), en el cual se puede observar que todas las muestras se agrupan en un mismo tipo de agua, correspondiendo al tipo cálcico-sulfatada (Ca-SO_4). De igual manera, el tipo de agua para los cenotes es cálcico-sulfatada, aunque la concentración tanto de HCO_3^- como de SO_4^{2-} es mayor con respecto a las concentraciones medidas en la LB.

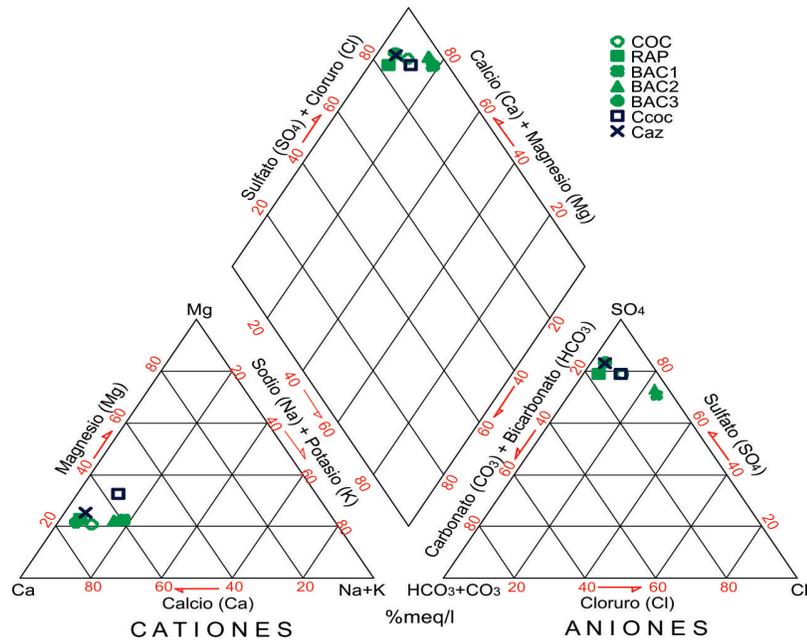


Figura 6. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la laguna. Puntos verdes indican la concentración tanto de aniones como de cationes de cada muestra correspondiente a la laguna, puntos azules corresponden a las muestras de los cenotes a 15.0 m de profundidad. Todas las muestras pertenecen al tipo de agua cálcico-sulfatada.

Los resultados de la composición química del agua muestran una distribución espacial, donde la parte occidental se caracteriza por altas concentraciones de alcalinidad y calcio (157.0-270.0 CaCO_3 mg/l y 376.0-422.0 mg/l, respectivamente) comparadas con la parte oriental (62.0-86.0 CaCO_3 mg/l y 86.0 mg/l). La concentración de alcalinidad en el cenote Azul y el cenote Cocalitos es de 244.0 y 241.0 CaCO_3 mg/l, respectivamente, a una profundidad de 15.0 m. Adicionalmente, en la LB se observa un gradiente de alcalinidad con dirección norte-sur, en la parte sur se obtuvieron las concentraciones más altas.

De acuerdo con el diagrama de Piper (Fig. 6), el tipo de agua de la laguna está dominado por la presencia de SO_4^{2-} (962.0-1174.0 mg/l), a través de la relación SO_4/Cl se puede conocer su origen, la relación en la parte occidental se encuentra entre 6.9 y 20.5, mientras que en la parte oriental la relación es entre 2.8 y 3.1.

La relación entre la conductividad eléctrica y la relación de los elementos mayores ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ y $\text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) permite conocer el origen de los elementos mayoritarios. De acuerdo con Khedidja y Boudoukha (2016) se puede clasificar el origen de los elementos mayores en agua, ya sean derivados de la disolución de carbonatos o debido al efecto de las evaporitas. En la figura 7, se observa que todos los sitios se agrupan dentro de un rango menor a uno en la relación de elementos mayores, mientras que la conductividad eléctrica se agrupan entre 2.0 mS/cm y 3.5 mS/cm, agrupándose dentro de la clasificación derivada del efecto de evaporitas.

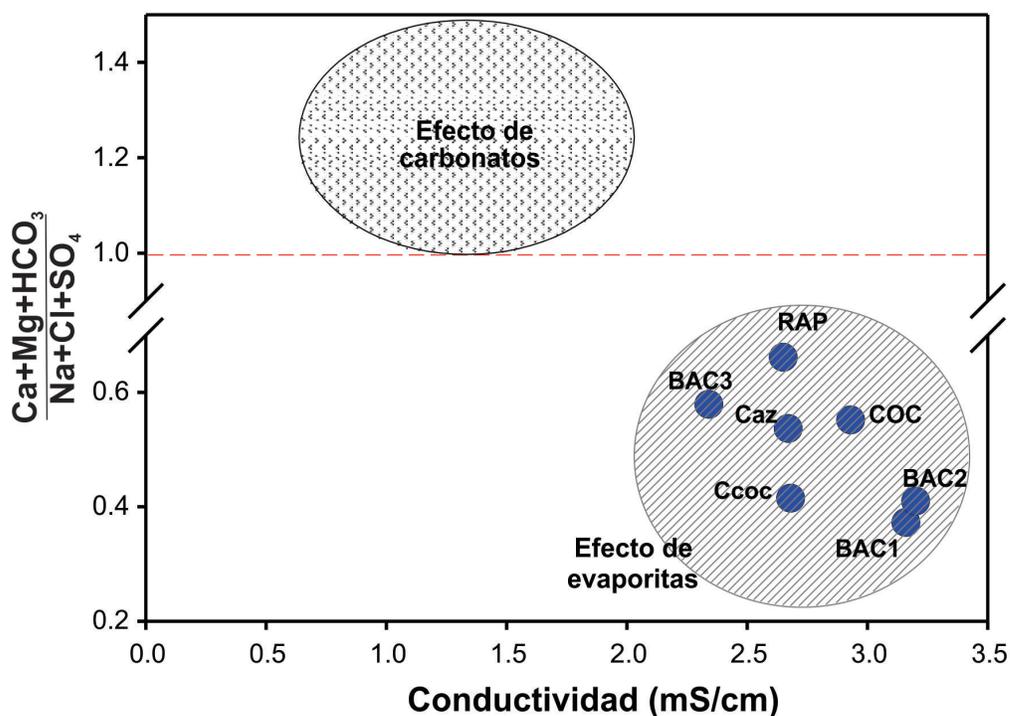


Figura 7. Efecto de la mineralización en la composición química de la columna de agua. Puntos azules indican los sitios de muestreo; círculos sombreados indican el rango en el cual la conductividad y los elementos mayores indican un efecto de la mineralización por evaporitas o carbonatos de acuerdo con Khedidja y Boudoukha (2016).

De acuerdo con los resultados del índice de saturación (Fig. 8), se identificaron tres grupos principales, el primero corresponde a los sitios sobresaturados con respecto a la aragonita, calcita y dolomita, en este grupo

están incluidos los sitios: RAP, BAC3, Caz y el Ccoc (15.0 m). El segundo grupo está conformado por el sitio COC y la muestra del Ccoc superficial, en el cual todos los minerales se encuentran en disolución, por último, el tercer grupo está conformado por BAC1 y BAC2 los cuales están en equilibrio con respecto a la calcita, mientras que el resto de los minerales se encuentran en disolución.

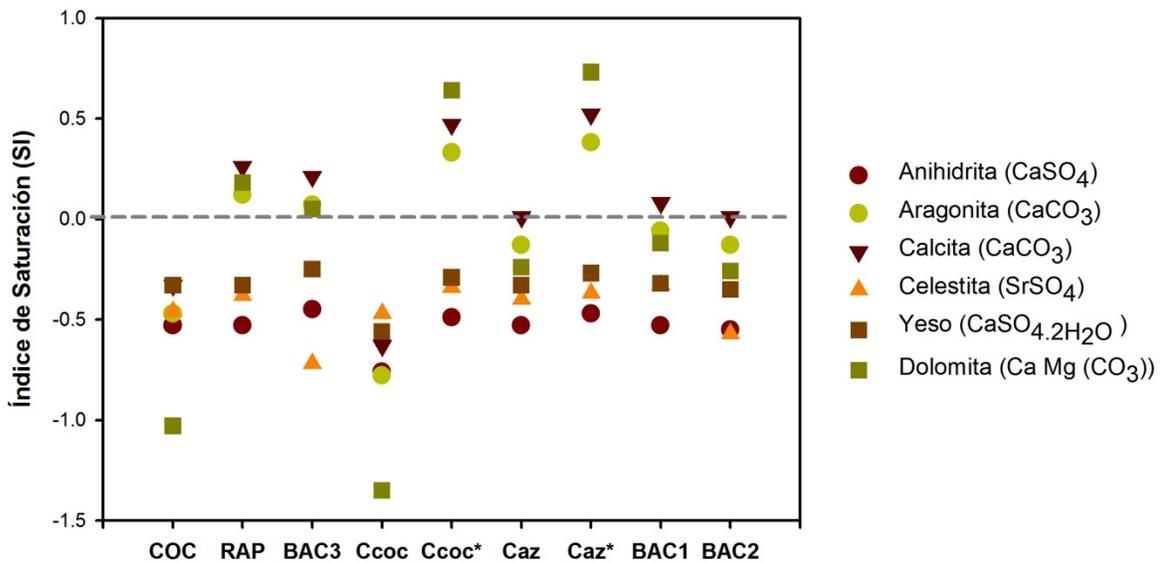


Figura 8. Índice de Saturación (SI) calculados para cada sitio. Los valores de SI=0 indican equilibrio de los minerales, SI>0 se encuentran sobresaturados y SI<0 se encuentran en disolución. Asteriscos corresponden a las muestras tomadas a 15.0 m de profundidad.

En el análisis de componentes principales solo se presentaran los componentes 1 y 2, debido a que son los más importantes con respecto al resto de los componentes ya que representan el 47% y 22% de la varianza total, respectivamente (Tabla 4).

En la figura 9 se pueden observar variaciones que se pueden interpretar como diferencias entre sitios debido a la distribución espacial de las características físico-químicas. Con respecto al componente 1, se puede observar que los sitios se diferencian de acuerdo a la distribución de los parámetros pH, conductividad eléctrica, TDS, Na⁺ y HCO₃⁻. Donde se pueden dividir en dos grupos, el primero corresponde al extremo izquierdo de la figura (Eje 1, de -2 a 0) mostrando mayor contenido de HCO₃⁻ para los sitios COC, RAP, BAC3, Ccoc y Caz, mientras que el segundo grupo corresponden al extremo derecho de la figura (Eje1, de 0 a 4),

donde los sitios BAC1 y BAC2 se caracterizan por tener alto contenido de Na^+ , conductividad eléctrica, pH y TDS con respecto a los sitios del grupo 1.

Tabla 4. Valores propios de ejes ambientales

Eje	Valores propios
1	7.06
2	3.38
3	2.10
4	1.27

Mientras que el componente 1 está asociado al contenido los parámetros físico-químicos, Na^+ y HCO_3^- , el componente 2 se asocia a la concentración de SiO_2^- y K^+ . Este componente se separa en dos grupos, el primero corresponde a todas las muestras de la laguna (COC, RAP, BAC1, BAC2 y BAC3) las cuales tienen menor concentración de SiO_2^- y K^+ (Eje 2, 3 a 0) con respecto al segundo grupo que está conformado por las muestras de cenotes (Ccoc y Caz). El grupo 2 tiene las concentraciones más altas de SiO_2^- y K^+ (Eje 2, 0 a -3). Sin embargo, el componente 1 es el que mayor diferencias muestra entre sitios.

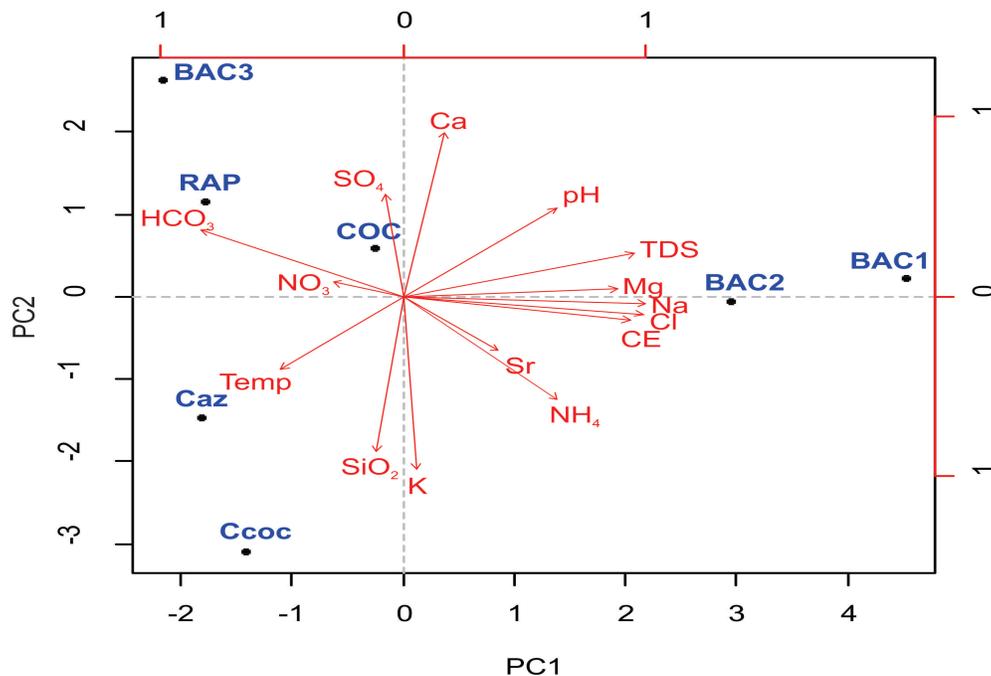


Figura 9. Análisis de componentes principales (PCA) basado en 15 variables físico-químicas de la columna de agua.

7.2 Caracterización del sedimento

7.2.1 Descripción de los núcleos

En la figura 10 se presentan los núcleos de sedimento obtenidos, así como sus longitudes. A continuación se presenta la descripción de cada perfil sedimentario desde la parte superior hasta la base:

Los Rápidos

El núcleo tiene una longitud total de 11.0 cm, de los primeros 6.0 cm de la parte superior el color del sedimento es entre verde y café, el tamaño de grano es variable, hay fragmentos de roca, principalmente color verde. La mayor parte de los granos gruesos se encuentran en los primeros centímetros (superficie). Los últimos 4.0 cm basales son sedimento muy fino de color café, se alcanza a apreciar la presencia de materia orgánica. En el último centímetro hay fragmentos de ramas.

Cocalitos

Longitud del núcleos 27.0 cm, los primeros 3.0 cm superficiales son de color gris, más oscuro que el resto del sedimento. En los primeros 10.0 cm superficiales hay presencia de manglar rojo, el resto del núcleo es de color gris claro a café claro. A los 15.0 cm aproximadamente (desde la superficie) se observa una lámina delgada de sedimento más oscuro con fragmentos de manglar rojo.

Bacalar 1

La longitud total de 40.0 cm, los primeros 4.5 cm presentan un color gris homogéneo, el resto es de color café. En algunas secciones se observa la presencia de manglar rojo, cuyo contenido es mayor en los primeros 13.0-15.0 cm superficiales.

Bacalar 2

Se obtuvo en este sitio un núcleo con longitud de 46.0 cm, iniciando desde la superficie, los primeros 2.0 cm son de color verde, el tamaño de grano es fino, presentó olor a azufre, y consistencia similar al barro a lo largo de todo el núcleo. De 0.0-21.0 cm el sedimento es de color café claro, de 21.0-31.0 cm es de color café más oscuro y de 31.0-46.0 cm es gris claro, el resto del núcleo es color café claro. En este núcleo se observan dos láminas, la primera entre 20.0-23.5 cm y la segunda a 27.5 cm, ambas de color café oscuro con fragmentos de ramas. En los últimos 8 cm, el color del sedimento es de color gris claro y de grano más fino.

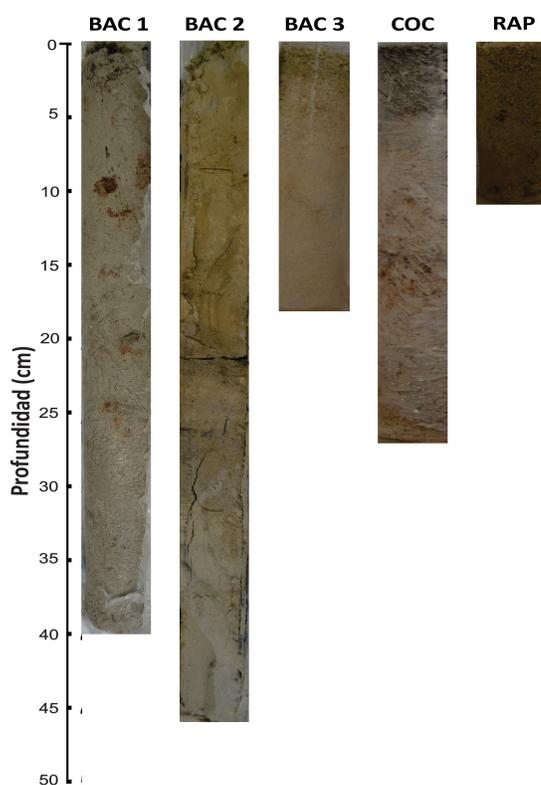


Figura 10. Longitud de los núcleos sedimentarios, BAC1: Bacalar 1, BAC2: Bacalar 2, BAC3: Bacalar 3, COC: Cocalitos, RAP: Los Rápidos. Ubicación en figura 3.

Bacalar 3

Tiene una longitud total de 18.5 cm, sedimento fino, color café claro, los primeros 3.0 cm son color verde, probablemente debido a la presencia de cianobacterias. El tamaño de grano es gradual, donde en la parte superficial es más fino (aprox. los primeros 12.0 cm) con respecto a la base del núcleo.

7.2.2 Geoquímica

La concentración de elementos mayores y traza en los núcleos de sedimento se muestran en la figura 11. En general, la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Sr^{2+} es elevada en todos los núcleos, alcanzando valores de 1-3 órdenes de magnitud mayores con respecto al resto de los elementos.

El orden de abundancia de los elementos mayores y traza en los núcleos que se encuentran en la parte occidental (COC, RAP y BAC3) es similar $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Si}^{4+} > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Zn}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ba}^{2+} > \text{Ti}^{4+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{U}^{6+}$, mientras que para los núcleos de la parte oriental (BAC1 y BAC2) el orden de abundancia es $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Si}^{4+} > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Zn}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ni}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ti}^{4+} > \text{Mn}^{2+} > \text{U}^{6+}$. El núcleo BAC1 tiene las concentraciones más altas de Al^{3+} , Si^{4+} , K^+ , Ti^{4+} , Mn^{2+} y Fe^{3+} , mientras que en el núcleo BAC2 se obtuvieron las concentraciones más altas de Ni^{2+} y Zn^{2+} , el resto de los elementos son similares en los diferentes núcleos. La concentración de Ca^{2+} y Sr^{2+} es mayor en la parte occidental, mientras que la concentración de Mg^{2+} y Si^{4+} es mayor en la parte oriental.

La concentración de algunos elementos como el Al^{3+} , Si^{4+} , K^+ , Ti^{4+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} y Ni^{2+} son mayores en las muestras superficiales comparadas con las muestras en profundidad (basales) (Fig. 11). Por el contrario, en la mayoría de los núcleos la concentración de Ba^{2+} , U^{6+} y Zn^{2+} son mayores en la parte basal del registro sedimentario. El resto de los elementos (Ca^{2+} y Mg^{2+}) no muestran gran variación a lo largo del registro sedimentario ($r^2 < 0.5$).

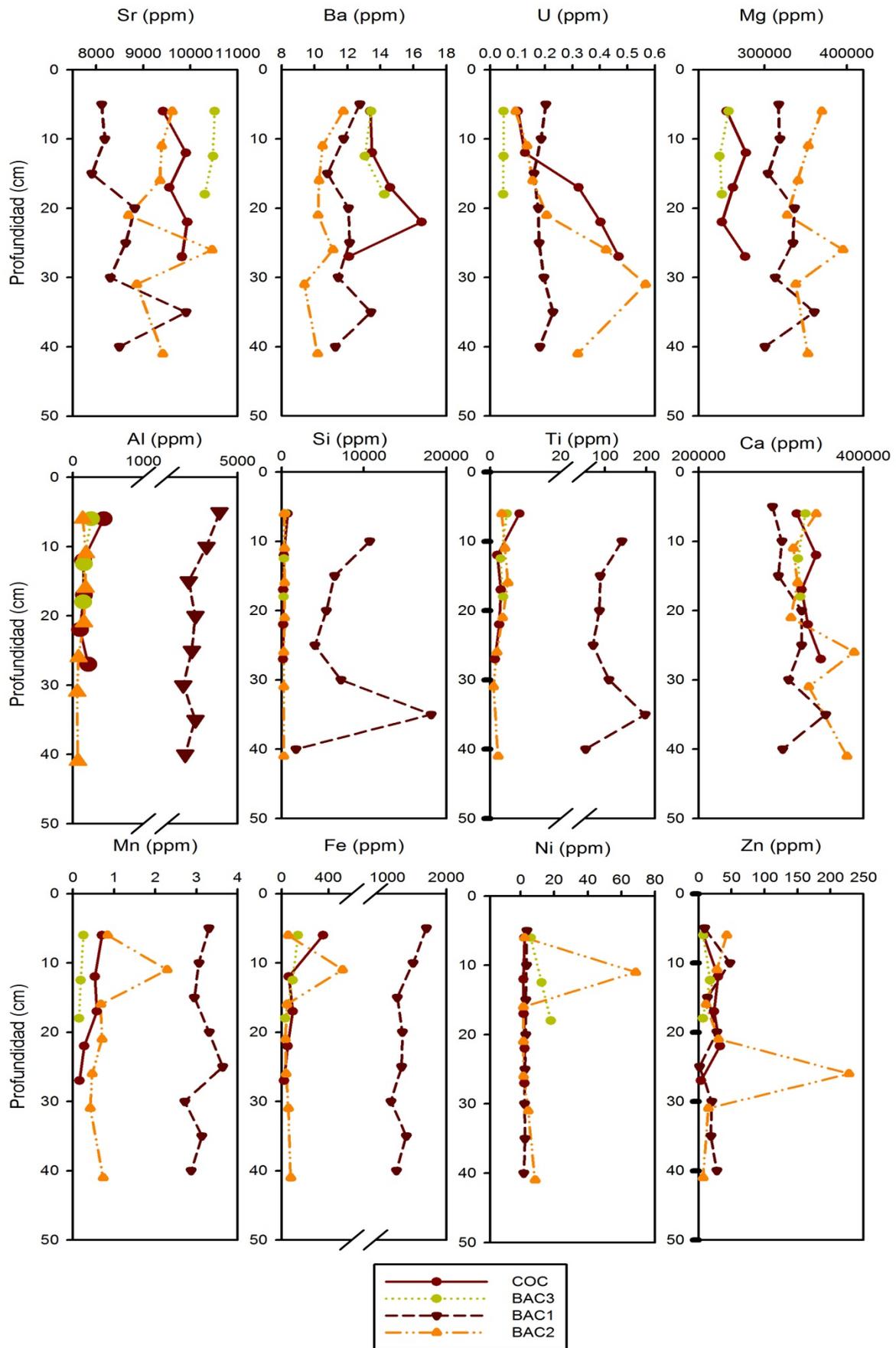


Figura 11. Concentración de elementos mayores y traza (ppm) del registro sedimentario

Debido a que existen diferencias entre el orden de magnitud de los elementos, los datos no presentan una distribución normal, por tal razón se decidió utilizar el análisis de correlación de Spearman para determinar la relación que existe entre los elementos de cada núcleo y su nivel de significancia ($p < 0.05$) (Tabla 5). La relación de elementos es diferente para cada sitio excepto por la relación U-Si en los núcleos COC, BAC1 y BAC2 ($r^2 = -0.99$, 0.71 y -0.76 , respectivamente, $p < 0.05$).

Excepto el núcleo BAC3, la correlación más significativa para todos los núcleos se obtuvo para Al-(Fe-Ti) ($r^2 > 0.90$), debido a que estos elementos son conservativos, con baja movilidad. En el núcleo BAC2 la correlación más significativa se obtuvo entre Sr-Mg, Al-Ti, K-Ni y Si-Ti ($r^2 = 0.90$, 0.90 , -0.88 y 0.86 , respectivamente). Para el núcleo BAC1 existe una correlación entre Sr-Ca, Al-(Fe, Ni), K-(Fe, Ni), y Ba-Mg ($r^2 = 0.95$, 0.98 , 0.98 , y 0.81 , respectivamente). En el núcleo COC los siguientes elementos tienen en mismo grado de correlación, para algunos casos es positiva ($r^2 = 0.90$) como para el Ti-(Mn, Fe), y para el resto la correlación es negativa ($r^2 = -0.90$): Al-(Zn, Sr), Fe-(Ca, U), Mn-(U, Ca), U-Si y Ba-Zn. En el núcleo BAC3 solo hay correlación entre cuatro elementos, U-Sr y Ca-Mg ($r^2 = 0.99$).

Tabla 5. Matriz de correlación de Spearman de los elementos traza en muestras de sedimento ($n=18$; negritas y rojo $P < 0.05$).

	Sr	Ba	U	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn
Sr	1.00												
Ba	0.50	1.00											
U	0.50	0.00	1.00										
Mg	0.00	-0.50	0.00	1.00									
COC Al	-0.90	-0.80	-0.30	0.10	1.00								
Si	-0.20	0.10	-0.90	-0.20	0.10	1.00							
K	0.15	0.05	-0.72	0.15	-0.15	0.87	1.00						
Ca	0.60	-0.30	0.70	0.60	-0.30	-0.60	-0.15	1.00					
Ti	-0.60	0.30	-0.70	-0.60	0.30	0.60	0.15	-1.00	1.00				
Mn	-0.70	0.10	-0.90	-0.20	0.40	0.70	0.36	-0.90	0.90	1.00			

	Fe	-0.70	0.10	-0.90	-0.20	0.40	0.70	0.36	-0.90	0.90	1.00	1.00		
	Ni	0.30	0.10	0.60	-0.70	-0.10	-0.30	-0.41	0.10	-0.10	-0.50	-0.50	1.00	
	Zn	0.70	0.90	-0.10	-0.30	-0.90	0.30	0.41	-0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	1.00
		Sr	Ba	U	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn
BAC1	Sr	1.00												
	Ba	0.52	1.00											
	U	0.19	0.62	1.00										
	Mg	0.69	0.81	0.26	1.00									
	Al	-0.05	0.62	0.24	0.52	1.00								
	Si	-0.24	0.52	0.71	0.31	0.57	1.00							
	K	-0.05	0.62	0.24	0.52	1.00	0.57	1.00						
	Ca	0.95	0.40	0.10	0.69	-0.19	-0.24	-0.19	1.00					
	Ti	-0.24	0.52	0.71	0.31	0.57	1.00	0.57	-0.24	1.00				
	Mn	0.38	0.69	-0.12	0.71	0.64	0.02	0.64	0.29	0.02	1.00			
	Fe	-0.02	0.69	0.38	0.55	0.98	0.67	0.98	-0.17	0.67	0.60	1.00		
	Ni	-0.55	0.21	-0.07	0.17	0.81	0.55	0.81	-0.57	0.55	0.43	0.76	1.00	
	Zn	0.10	-0.38	0.00	-0.14	-0.05	-0.14	-0.05	0.07	-0.14	-0.48	-0.10	0.21	1.00
		Sr	Ba	U	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn
BAC2	Sr	1.00												
	Ba	0.26	1.00											
	U	-0.10	-0.55	1.00										
	Mg	0.90	0.57	-0.24	1.00									
	Al	-0.33	0.50	-0.67	0.00	1.00								
	Si	-0.19	0.29	-0.76	-0.10	0.74	1.00							
	K	-0.48	0.43	-0.29	-0.38	0.33	0.50	1.00						
	Ca	0.50	0.26	0.48	0.55	-0.45	-0.67	-0.29	1.00					
	Ti	-0.33	0.31	-0.71	-0.10	0.90	0.86	0.29	-0.52	1.00				
	Mn	-0.10	0.52	-0.67	0.19	0.71	0.31	0.05	-0.14	0.57	1.00			
	Fe	-0.14	0.07	-0.10	0.10	0.31	-0.29	-0.50	0.10	0.19	0.64	1.00		
	Ni	0.52	-0.31	-0.02	0.40	-0.26	-0.36	-0.88	0.02	-0.26	0.12	0.48	1.00	
	Zn	0.60	0.29	-0.17	0.48	-0.17	0.12	0.14	-0.05	-0.31	-0.24	-0.57	0.12	1.00
		Sr	Ba	U	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn
BAC3	Sr	1.00												
	Ba	-0.89	1.00											
	U	0.99	-0.91	1.00										
	Mg	0.41	0.06	0.37	1.00									
	Al	0.68	-0.26	0.64	0.95	1.00								

Los resultados de estos índices se compararon con los valores reportados por Manoj y Padhy (2014) y Javan *et al.*, (2015) donde indican la calidad del sedimento de acuerdo a los rangos dados para cada índice (Tabla 7).

Tabla 7. Rangos de calidad del sedimento basado en diferentes índices de contaminación (Manoj y Padhy, 2014; Javan *et al.*, 2015)

Índice	Calidad del sedimento
Índice de geoacumulación (Igeo)	<0 No contaminado 0-1 No contaminado a moderadamente contaminado 1-2 Moderadamente contaminado 2-3 Moderadamente contaminado a altamente contaminado 3-4 Altamente contaminado 4-5 Altamente contaminado a muy contaminado >5 Muy contaminado
Factor de Contaminación (FC)	<1 Bajo FC 1 ≤ CF <3 Moderado FC 3 ≤ CF <6 Considerable FC ≥6 Muy alto FC
Grado de Contaminación (GC)	<6 Bajo GC 6 ≤ CD <12 Moderado GC 12 ≤ CD <24 Considerable GC ≥24 Alto GC (contaminación antropogénica)
Índice de carga de contaminación (PLI)	=0 No contaminado =1 Nivel base de elementos presentes >1 Deterioración progresiva del sitio

En todos los núcleos el U^{6+} , Mn^{2+} y K^+ tienen los valores más bajos de Igeo, mientras que los valores para el FC y el GC son menores a 2.0, indicando que el sedimento no está contaminado con estos elementos y se sugiere que su concentración en el sedimento es de origen litogénico. Para el Ni^{2+} los índices Igeo (<0), FC (<1) y GC (<6) indican una baja contaminación con respecto a este elemento, excepto para las muestras superficiales (0-6 cm y 6-11 cm) del núcleo BAC2, donde el FC es mayor a 3.0 y el Igeo es mayor a 1.0, sugiriendo que la calidad del sedimento varía de no contaminado a moderadamente contaminado.

Por otro lado, el Zn^{2+} presenta significantes diferencias entre las muestras superficiales y las basales. En los núcleos COC (17.0-22.0 cm), RAP (6-11 cm), BAC1 (5-10 cm) and BAC2 (16-21 cm and 21-26 cm) los valores de Igeo y el FC son mayores (>0 y >2 , respectivamente) comparado con las muestras superficiales, indicando que el Zn^{2+} pudo haberse movilizado desde las muestras superficiales hacia las muestras basales.

El valor del GC del Zn^{2+} en todos los sitios es mayor de 1.5, sin embargo, las muestras de la parte occidental (BAC1 y BAC2) muestran los valores más altos (8.22 y 18.05, respectivamente), sugiriendo una considerable contaminación del sedimento. A pesar de esta condición, los resultados del PLI (<1) en todas las muestras indica que todos los sitios no están contaminados. Sin embargo, si la concentración del Zn^{2+} continua incrementando la laguna podría verse afectada por la contaminación con este elemento.

La concentración del Ba^{2+} presenta una distribución espacial, los núcleos de la parte occidental de la LB (COC, RAP y BAC3) muestran las más altas concentraciones comparado con los núcleos de la parte oriental. Esta misma condición se observa en los resultados de los índices calculados. A pesar de que todos los índices (excepto GC) muestran valores más altos, estos sugieren que el sedimento no está contaminado con este elemento. Adicionalmente, los valores de GC son mayores en la parte oriental (7.34-9.56) comparado con la porción occidental (2.64-7.01), esta misma distribución espacial se observa para el Zn^{2+} .

7.2.4 Difracción de rayos-X

Dentro de la composición mineralógica de los núcleos sedimentarios se encontró la presencia de calcita ($CaCO_3$), dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), coesita (SiO_2) y aragonita ($CaCO_3$). En general, en todos los núcleos, las mayores intensidades corresponden a la calcita. Con respecto al resto de los minerales, solo tres muestras presentaron dolomita (COC 6.0 cm, RAP 0.0 cm y BAC2 4.0 cm). Adicionalmente en menores proporciones se encontró la presencia de barita

(BaSO₄) y esfalerita (ZnS). La parte occidental de la laguna contiene mayor concentración de barita, y solo algunas muestras contienen esfalerita.

7.3 Contenido Fósil

Dentro del registro sedimentario se encontraron cinco grupos de organismos, los cuales incluyen ostrácodos, gasterópodos, bivalvos, foraminíferos y diatomeas. La identificación de especies se realizó con base en trabajos previamente publicados en la zona de estudio (Pérez *et al.*, 2011; Siqueiros *et al.*, 2013; Oliva *et al.*, 2016).

En general los organismos que predominaron en todas las muestras fueron los ostrácodos, alcanzando desde 17 hasta 263 individuos por muestra, mientras que los gasterópodos y bivalvos fueron menos abundantes, los foraminíferos estuvieron casi ausentes en la mayoría de las muestras (Tabla 8).

Dentro del grupo de ostrácodos se encontraron cinco géneros, de los cuales tres se identificaron a nivel de especie (*Cytheridella ilosvayi*, *Darwinula stevensoni*, *Cypridopsis okceechobei*, *Limmocythere opesta* y *Pseudocandona* sp.). Solo se encontró un género de foraminíferos correspondiente a *Elphidium*.

Los gasterópodos fueron el segundo grupo más abundante en todos los núcleos, sin embargo en COC se contó el mayor número de organismos. Del grupo de los gasterópodos se identificaron dos subclases correspondientes a Probosbranchia y Pulmonata, de esta última identificó la especie *Pomacea flagellata*, el resto de las especies no se lograron identificar.

Dentro del grupo de las diatomeas se identificaron en total 16 géneros, 11 a nivel especie (*Diploneis suboralis*, *Encyonema mesianum*, *Denticula elegans*, *Delicata delicatula*, *Navicula podzorskii*, *Mastogloia dansei*, *M. lacustris*, *Nitzchia amphibia*, *Diploneis oblongella*, *Brachysira procera* y *Navicula cf. Santae-crucis*), 3 a nivel género (*Cyclotella* sp., *Sellaphora* sp. y *Mastogloia* sp.) y 2 no se pudieron identificar. Dada la disponibilidad del laboratorio solo se pudo realizar el conteo de diatomeas para la muestra COC (17.0-22.0 cm), BAC2 (16.0-21.0 cm) y BAC3

(0.0-6.0 cm, 6.0-12.5 cm y 12.5-18.0 cm). Las muestras correspondientes a COC y BAC2 no contienen diatomeas, mientras que a lo largo de todo el registro de BAC3 se encontró una gran abundancia, donde la especie dominante para la muestra superficial fue *Delicata delicatula* y para el resto de las muestras *Mastogloia dansei* fue la especie dominante.

El sitio en el que mayor número de organismos se encontraron fue en COC, donde de igual manera, en esta parte de la laguna, durante la campaña de muestreo se encontró superficialmente una gran cantidad de gasterópodos (principalmente *Pomacea flagellata*) y de bivalvos, lo cual nos indica que, a través del tiempo, han existido variaciones con respecto a la abundancia de organismos, dependiendo de las condiciones físico-químicas del agua en las que se encontraban.

Tabla 8. Contenido de microorganismos dentro del registro sedimentario

Sitio	Prof. (cm)	Número de individuos				
		Ostrácodos	Gasterópodos	Bivalvos	Foraminíferos	Diatomeas
COC	0-6	263	28	9	1	*
	6-12	135	30	2	0	*
	12-17	110	21	0	0	*
	17-22	59	16	6	0	4
	22-27	126	22	1	1	*
RAP	0-6	17	5	1	0	*
	6-11	136	11	9	0	*
BAC 1	0-5	86	6	1	2	*
	5-10	116	6	0	0	*
	10-15	79	3	1	1	*
	15-20	42	1	0	1	*
	20-25	52	2	1	2	*
	25-30	48	5	0	2	*
	30-35	73	13	0	1	*
35-40	47	10	0	2	*	
BAC 2	0-6	19	1	0	0	*
	6-11	15	0	0	0	*
	11-16	50	1	0	0	*
	16-21	73	1	0	0	0
	21-26	162	1	0	0	*
	26-31	163	9	0	0	*

	31-36	147	1	3	0	*
	36-41	88	3	0	0	*
	41-46	93	4	0	0	*
BAC 3	0-6	102	7	0	0	108
	6-12.5	115	3	0	0	42
	12.5-18	74	7	0	0	89

*Datos no disponibles

8 DISCUSIÓN

Los parámetros físico-químicos del agua de la LB reportados en este estudio, como la temperatura, CE, pH, oxígeno disuelto y la concentración de iones mayores y nutrientes se encuentran dentro de los rangos reportados en trabajos anteriores (Gischler *et al.*, 2008; Beltran, 2010; Pérez *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2015). Adicionalmente, estos parámetros se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles para agua potable (NOM-127-SSA1-1994), indicando una buena calidad del agua en cuanto a estos parámetros.

La LB es somera (~15 m), por lo que la distribución de la temperatura no presenta gran variación evitando la estratificación de la columna de agua, lo cual indica que, al menos durante la temporada de nortes, la columna de agua es homogénea. Por el contrario, los cenotes Azul y Cocalitos presentan estratificación en ambas temporadas (nortes y lluvias), donde el primer cambio en la temperatura con respecto a la profundidad se asocia a la radiación solar y la segunda es derivada de la estacionalidad. Durante el otoño (noviembre), finaliza la temporada de lluvias, dando inicio a la temporada de nortes, lo cual promueve la mezcla de la columna de agua debido a la acción del viento, mientras que durante el verano (junio) se observa un desplazamiento de la termoclina debido al incremento en la temperatura, promoviendo la estratificación de la columna de agua.

La concentración de nutrientes en la LB fue baja, lo que indica que es un sistema oligotrófico. Beltran (2010) reporta que los altos niveles de fijación de nitrógeno están relacionados con la baja disponibilidad del nitrógeno (NH_4^+ , NO_2^-

and NO_3^-), y esta baja concentración de nutrientes favorece el crecimiento de los estromatolitos de la LB.

A partir de los resultados obtenidos en el diagrama de Piper se establece que el tipo de agua de la parte sur de la LB es cálcico-sulfatada con un gradiente creciente de alcalinidad de norte a sur. Estudios realizados por Sánchez *et al.*, (2015) reportan que la parte norte de la laguna corresponde al tipo de agua cálcico-carbonatada (Ca-HCO_3). Adicionalmente Oliva *et al.*, (2016) señalan que la parte norte de la laguna tiene un fondo fangoso y se presentan aguas turbias casi todo el año, mientras que la parte sur se caracteriza por aguas transparentes y fondo arenoso. Estas diferencias sugieren que existe una hidrodinámica diferente a lo largo de la laguna, donde la parte sur se encuentra influenciada por el aporte de agua subterránea, mientras que la parte norte se caracteriza por baja salinidad, baja concentración de sulfatos y la falta de estromatolitos. De acuerdo con Schmitter-Soto *et al.*, (2002) indican que en la Península de Yucatán la concentración de alcalinidad se puede ver influenciada por la incorporación de agua meteórica (rica en carbonatos y bicarbonatos), promoviendo la disolución y cambios en la concentración de alcalinidad.

Las diferencias en la conductividad eléctrica encontradas entre los sitios muestreados en ambos lados de la laguna, se pueden deber a que la parte oriental de la laguna es más somera (0.4-0.6 m) con respecto a la parte occidental (1.0-2.2 m), promoviendo mayor evaporación en la porción oriental, lo que genera el incremento en la conductividad eléctrica y de otros elementos (Na^+ y Cl^-), reflejados en una concentración más alta. Por el contrario, en la porción occidental domina la concentración de Ca^{2+} y SO_4^{2-} , sugiriendo que en esta parte de la laguna existe un aporte de estos iones provenientes de otra fuente, permitiendo que se genere la suficiente saturación para precipitar y por lo tanto se promueva el crecimiento de estromatolitos, esta condición fue observada en otros sistemas por Chagas *et al.*, (2016).

La relación SO_4/Cl en la LB se encuentra entre 27 y 197 veces más alta que la reportada por Perry *et al.*, (2002) para el agua de mar (0.103), indicando que no

hay intrusión salina y que el origen de estos elementos es posiblemente de la disolución de evaporitas, como el yeso y la celestita. La LB se encuentra sobre una región evaporítica derivada de la formación del Mioceno, compuesta principalmente por yeso y anhidrita, y la interacción agua-roca permite la presencia de estos minerales en el agua subterránea (Perry *et al.*, 2010). La conductividad eléctrica medida en los sitios (2.0-3.5 mS/cm) y la relación baja de los elementos mayores (<1.0) comparado con sistemas de alta salinidad (Khedidja y Boudoukha, 2016), sugieren que existe un efecto por la disolución de evaporitas más que por los carbonatos. Este análisis junto con el SI sugieren que la concentración de los elementos mayoritarios, como el SO_4^{2-} , está influenciada por la entrada de agua subterránea, debido al enriquecimiento de algunos minerales derivados de la disolución de las rocas evaporíticas (yeso y anhidrita).

Los elementos mayores reportados en agua y el análisis del índice de saturación concuerdan con la mineralogía encontrada en el sedimento (XDR). Se encontró similitud entre los minerales que están precipitando como la calcita para todos los núcleos y la dolomita y anhidrita para el núcleo RAP.

Los minerales predominantes en sedimento es la calcita, asociada principalmente al alto contenido de Ca y HCO_3 en la laguna. En menor concentración se encontró coesita, este mineral se forma en condiciones de altas presiones (3 a 10 GPa) (Hemley *et al.*, 1994), y dado que la Península de Yucatán se encuentra sobre una plataforma de margen pasivo (Bauer *et al.*, 2011), el origen de este mineral se podría asociar con el impacto de un meteorito (Lounejeva *et al.*, 2000). Se sabe que la PY es una zona con influencia de uno de los impactos meteóricos más grandes del mundo conocido como Chicxulub y se ha estimado que la influencia de este impacto abarco un radio de al menos 360 km (Fouke *et al.*, 2002). La presencia de coesita en la LB podría estar asociada a este evento, dado que Kenkmann y Schönián (2006) y Fouke *et al.*, (2002) han reportado ejectas provenientes del impacto de Chicxulub en Belice (Formación Albion) y en regiones del Río Hondo cerca de Bacalar como Sarabia, Ramonal y Agua Dulce. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para determinar el origen de la coesita en la LB.

Las concentraciones de Al^{3+} , Fe^{3+} y Ti^{4+} son propias de constituyentes mayoritarios en rocas (Drever, 2005). Dado que la LB esta sobre un sistema carbonatado los constituyentes mayores en sedimento están dominados por el Ca^{2+} y Mg^{2+} , donde la concentración de Ca^{2+} es mayor en la porción occidental y el Mg^{2+} domina en la porción oriental. Otro constituyente en los sedimentos de la LB es el Sr^{2+} con concentraciones de 7900.0 ppm a 10500.0 ppm, donde los valores más altos corresponden a los núcleos de la parte occidental de la laguna, mientras que las concentraciones más bajas corresponden a la parte oriental. El alto contenido de Sr^{2+} se puede derivar de la disolución de las evaporitas como se discutió anteriormente, el núcleo BAC1 corresponde al sitio más alejado de los cenotes, y coincide con el hecho de presentar las concentraciones más bajas de Sr^{2+} , mientras que los sitios de la porción occidental (cercano a los cenotes) tienen las concentraciones más altas de Sr^{2+} , esto nos indica que una posible fuente de este elemento es el agua subterránea, esta misma idea fue reportada por Perry *et al.*, (2002) al hacer una relación entre Sr^{2+} y SO_4^{2-} en el cenote Azul.

La correlación significativa entre Al-(Ti, Fe) en casi todos los núcleos se puede deber a que estos elementos son los menos móviles en sedimento, siendo parte de los elementos conservativos. La correlación entre los elementos de los diferentes sitios de estudio no presentó una distribución espacial, por lo que podemos inferir que los elementos no están controlados por los mismos parámetros en cada sitio, coincidiendo con las diferencias en hidrodinámica de la LB.

La calidad del sedimento basado en los índices Igeo, FC, GC y PLI se encuentran entre no contaminado a moderadamente contaminado (Manoj y Padhy, 2014; Javan *et al.*, 2015). Basados en esta clasificación y en la comparación con el aporte antropogénico, los índices de contaminación indican que la LB no está contaminada por U^{6+} , K^+ y Mn^{2+} .

La alta concentración de Zn^{2+} y Ba^{2+} en las muestras basales reflejan los niveles previos a los aportes recientes (Urrutia *et al.*, 2002), es decir migran desde la parte superficial hacia la profundidad. Estos elementos presentan mayor índice

de contaminación en los sitios COC, BAC1 y BAC2, indicando su presencia derivado de actividades humanas. Sin embargo, el sitio BAC1 y BAC2 son los sitios más alejados de la población y de difícil acceso, tienen aguas más tranquilas y menos profundas, estos sitios se consideran aun no perturbados. En el núcleo BAC1 se encuentran las concentraciones más altas de algunos elementos traza (Al^{3+} , Si^{4+} , K^+ , Ti^{4+} , Mn^{2+} y Fe^{3+}), pudiendo considerarse como un lugar donde se acumulan estos elementos, posiblemente debido al flujo del agua. Adicionalmente, se observa que la concentración de Zn^{2+} y Ba^{2+} tanto en el sitio COC como en BAC1 y BAC2 son muy similares, sugiriendo que posiblemente estos elementos se transporten desde la parte occidental de la laguna hacia la parte oriental y se acumulen en esta última parte. Sin embargo, es importante establecer la dirección del flujo de agua para asegurar que existe un transporte de estos elementos de COC hacia BAC2.

El origen del Zn^{2+} y Ba^{2+} en la LB se puede derivar de dos procesos: 1) de la disolución de barita y esfalerita. La presencia de barita domina en la parte occidental sugiriendo que la concentración de Ba^{2+} se derive de la disolución de este mineral; 2) del uso de fertilizantes o alimento para ganado en la zona, dado que es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, y cerca de la laguna se realizan actividades de agricultura en las cuales son utilizados fertilizantes y agroquímicos. La mayoría de fertilizantes contienen elementos esenciales (Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mo^{6+} y Ba^{2+}), los cuales pudieran encontrarse en déficit en el suelo (Adriano, 1986). Cerca del poblado de Bacalar, se usan al menos 300.0 toneladas de fertilizantes y 2400.0 l de agroquímicos al año (Ortiz, 2016) los cuales debido a la naturaleza cárstica del área, el exceso de estos productos se puede infiltrar en el acuífero, causando un impacto sobre la laguna. Dado que el contenido de ZnS es bajo, se sugiere que el origen del Zn^{2+} podría derivarse de actividades humanas. Sin embargo, los resultados del PLI (<1) en todas las muestras indican que los sitios no están altamente contaminados.

La baja concentración de los metales pesados es consistente con trabajos previos en la zona (Castro *et al.*, 2014), donde se reporta la concentración de

metales pesados en la parte superficial de la columna de agua de la laguna de Bacalar. Los valores reportados se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 y por los criterios ecológicos CE-CCA-001/89, los cuales establecen los límites máximos en la concentración de metales pesados para agua potable y otros usos como actividades recreacionales.

En general, la ecología de las especies de ostrácodos identificadas en este trabajo (*Cytheridella ilosvayi*, *Darwinula stevensoni*, *Cypridopsis okceechobei*, *Limmocythere opesta* y *Pseudocandona* sp.) tienen preferencias por aguas tranquilas, y únicamente *Cytheridella ilosvayi* y *Limmocythere opesta* son especies tolerantes a altos niveles de sulfatos (≥ 2300 mg/l) (Pérez *et al.*, 2011a). El gasterópodo *Pomacea flagellata* ha sido identificado como una especie con preferencias por cuerpos de agua relativamente profundos con escasa corriente y abundante vegetación acuática (Oliva *et al.*, 2016).

Dado que las especies encontradas en la LB se caracterizan por tener preferencias hacia aguas tranquilas, la abundancia de estas se ve reflejada en los diferentes sitios muestreados en la LB. El sitio COC es el que mayor número de organismos presenta, este sitio está caracterizado por tener aguas tranquilas y la presencia de un grupo de estromatolitos que podrían servir como sustrato para muchos organismos. En este sitio se encontró en superficie una gran cantidad de conchas de *Pomacea flagellata* durante el muestreo de noviembre. Adicionalmente, se ha reportado que la presencia de moluscos está asociado principalmente con la estructura del hábitat, tamaño del cuerpo de agua, velocidad de la corriente, la concentración de calcio, mientras que los parámetros físico-químicos del cuerpo acuático tienen menor influencia (Dillon, 2006; Álvarez *et al.*, en proceso). Bajo este criterio se podría decir que la mayor abundancia de gasterópodos y bivalvos en la parte occidental de la laguna está asociada a aguas tranquilas, alto contenido de calcio y la presencia de estromatolitos que sirven como sustrato.

A pesar de que los sitios RAP y BAC3 se distinguen por tener una mayor velocidad en el flujo de agua (Beltrán, 2010) con respecto al resto de la laguna,

también tienen un alto contenido de organismos (menor que en COC), posiblemente debido a la presencia de estromatolitos. En la parte oriental, los sitios BAC1 y BAC2 tienen menor abundancia de organismos con respecto a la parte occidental. Sin embargo, en algunos estratos del registro sedimentario, la abundancia es alta, esto puede deberse a periodos con mayor productividad primaria, para confirmar esto sería necesario hacer una reconstrucción paleoclimática comparando la abundancia de especies con otros indicadores.

9 CONCLUSIONES

Este trabajo es una primera aproximación para conocer más a detalle la hidrogeoquímica de la parte sur de la LB. Esta laguna a pesar de estar muy cerca de la costa como algunas lagunas costeras de Quintana Roo, no se comporta igual, es decir, no tiene influencia del agua de mar. Para establecer las razones por las cuales este cuerpo de agua se comporta diferente es necesario realizar un análisis hidráulico.

La LB es un sistema oligotrófico, con mineralogía compuesta principalmente de calcita. A diferencia de la LB, el cenote Azul y Cocalitos tienen una marcada estacionalidad, durante verano debido al incremento de temperatura presentan una termoclina más somera y durante nortes esta se desplaza hacia partes más profundas.

Los análisis de agua y geoquímica en el registro sedimentario de la laguna de Bacalar muestran una clara distribución espacial de los diferentes parámetros. La parte oriental se caracteriza por mayor concentración de Na^+ , Cl^- y por lo tanto una mayor conductividad eléctrica relacionada con una menor profundidad con respecto a la parte occidental de la laguna. La alta conductividad eléctrica no representa intrusión salina.

La parte occidental se caracteriza por presentar un gradiente de alcalinidad norte-sur (concentración más alta al sur), asociado principalmente a la entrada de agua subterránea, evidencias de este aporte incluye: 1) altos índices de saturación

en la composición química de los cenotes, sugiriendo mayor precipitación de calcita; 2) concentraciones similares de alta alcalinidad entre la parte occidental de la laguna y los cenotes, al igual que el alto contenido de Sr^{2+} ; 3) alto contenido de Ca^{2+} , HCO_3^- y SO_4^{2-} , mayor con respecto al agua de mar; y 4) alto contenido de SO_4^{2-} derivado del enriquecimiento de yeso y anhidrita en disolución. La parte occidental, en particular el sitio COC es donde se presenta la mayor abundancia de organismos (ostrácodos, gasterópodos, bivalvos y diatomeas) debido a que se presentan dos condiciones esenciales, es un sitio de aguas tranquilas por las que los organismos tienen preferencias y la presencia de estromatolitos pueden servir como sustrato para los organismos.

En este trabajo se presentan las primeras mediciones de elementos traza en el sedimento carbonatado en la laguna de Bacalar. Los análisis estadísticos y los índices utilizados para los elementos traza en los sedimentos indican que el sedimento no está contaminado por U^{6+} , Mn^{2+} , K^+ , y Ni^{2+} . La alta concentración de Ba^{+2} está relacionada con la disolución de la barita. El sedimento solo se encuentra moderadamente contaminado con Zn^{2+} en la parte occidental de la laguna, sin embargo se sugiere realizar otros estudios para determinar el origen de este elemento y otros metales pesados en la zona para ver si existe algún otro tipo de contaminante y determinar cómo está afectando al sistema.

10 BIBLIOGRAFÍA

Adriano, D. C. (1986) Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. USA, 517 pp.

Aliaga, C. M. (2009) Distribución de elementos de tierras raras entre aguas de percolación y calcita secundaria en terrenos kársticos. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 125 p.

Álvarez, S. D. y De Francesco, C. G. (en trámite) Mollusca. *In*: Pérez, L., Massaferró, J.

y Correa, M. A. (en trámite) Paleobioindicadores lacustres neotropicales. UNAM, México, pp. 190-202.

Appelo, C. A., y Postma, D. (2005) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd edition. Rotterdam: A. A. Balkema.

Bauer, G. P., Gondwe, B., Charvet, G., Marin, L., Rebolledo, V. M. and Merediz, A. G. (2011) Review: the Yucatan Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524.

Beddows, P. A. (2002) Where does the sewage go? The karst groundwater system of the Municipalidad de Solidaridad, Quintana Roo, Mexico. Association for Mexican Cave Studies, Houston, TX, 96 pp.

Beddows, P. A. (2004) Groundwater hydrology of a coastal conduit carbonates aquifer: Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. Tesis de Doctorado. Universidad de Bristol. 303 p.

Beltrán, D. Y. (2010) Estimación de los patrones de fijación de nitrógeno y diversidad asociada (*nifH*) en tapices microbianos y estromatolitos. Tesis de Maestría. Biología Ambiental. Instituto de Ecología, UNAM. 62 p.

Boës, X., Rydberg, J., Martinez, C. A., Bindler, R., Renberg, I. (2011) Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *J. Paleol*, 46, 75-87.

Boyle, J. F. (2001) Inorganic geochemical methods in paleolimnology, *in*: Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 2. Physical and Geochemical Methods, Last, M. W. and Smol, P. J. (ed) Kluwer Academic Publishers, 83-143 pp.

Castro, C., Murray, K. G., Pecoits, E., Aubet, N. R., Petrash, D., Castro, C. S., Dick

Gregory, Planavsky, N. and Konhauser, K. O. (2014) Textural and geochemical features of freshwater microbialites from Laguna Bacalar, Quintana Roo, Mexico. *PALAIOS*, 29(5): 192-209.

Centeno, M. C., Legendre, P., Beltrán, Y., Alcántara, H. R., Lidström, E .U., Ashby, N. M. y Falcón, I. L. (2012) Microbialite genetic diversity and composition relate to environmental variables. *FEMS Microbiology Ecology*, 82, 724-735.

Chagas, A. P., Webb, E. G., Burne, V. R. y Southam, G. (2016) Modern lacustrine microbialites: Towards a synthesis of aqueous and carbonate geochemistry and mineralogy. *Earth-Science Reviews*, 162, 338-363.

Cieslewicz, J., Kobierski, M. y Cichosz, M. (2017) Geochemical assessment of lake sediments in protected areas in Poland- a search for reference condition. *Journal of Limnology*, doi: 10.4081/jlimnol.2017.1582.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2002) Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Península de Yucatán, estado de Yucatán: Gerencia de Aguas Subterráneas, 20p.

Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) (2015) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cerros y Valles (2301), Estado de Quintana Roo. Diario Oficial de la Federación, 24p.

Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua. CE-CCA-001/89. Gaceta Ecológica, enero 1990.

Díaz, J. E.H. (2005) Decreto por el cual se establece el programa de ordenamiento ecológico territorial de la región de Laguna Bacalar, Quintana Roo, México. Periodico Oficial, 126p.

- Dillon, R. T. Jr. (2006)** Freshwater Gastropoda. *In*: Sturm, C. F., Pearce, T. A., Valdés, A. (Eds.), *The Mollusk: A Guide to Their Study, Collection, and Preservation*. American Malacological Society, Pittsburgh, pp. 251-259.
- Dixon, J., Hamilton, K., Pagiola, S. and Segnestam, L. (2001)** Tourism and Environment in the Caribbean: An Economic Framework. Environment Department Papers. The World Bank, Washington, DC.
- Drever, J. I. (2005)** Surface and Ground Water Weathering, and Soils. Elsevier, 607 pp.
- Fouke, W. B., Zerkle, L. A., Alvarez, W., Pope, O. K., Ocampos, A .C., Wachtman, J. R., Grajales, J. M., Claeys, P. y Fischer, G. A. (2002)** Cathodoluminescence petrography and isotope geochemistry of KT impact ejecta deposited 360 km from the Chicxulub crater, at Albion Island, Belize. *Sedimentology*, 49, 117-138.
- Gerd, O. B. (2012)** Distribution of some Calanoida (Crustacea: Copepoda) from the Yucatán Peninsula, Belize and Guatemala. *Rev. Biol. Trop.*, 60 (1), 187-202
- Gischler, E., Gibson, M. A. and Oschmann, W. (2008)** Giant Holocene freshwater microbialites, Laguna de Bacalar, Quintana Roo, Mexico. *Sedimentology*, 55, 1293-1309.
- Gischler, E., Golubic, S., Gibson, M., Oschmann, W. and Hudson, J. H. (2011)** Microbial mats and microbialites in the freshwater Laguna Bacalar, Yucatan Peninsula, Mexico, in: *Advances in Stromatolite Geobiology*, Reitner, J., Trauth, M. H., Stüwe, K. and Yuen, D. (ed). Berlin, Springer, 187-205 pp.
- Gondwe, R. N., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo, V. M., Merediz, A. G. y Bauer, G. P. (2010)** Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 389, 1-17.

- González, B. J. L., Carrión, J. J., Cuevas, D. J., Flores, M. F., Yam, G. J. O., Moreno, C. J., Pérez, V. J. and Calva, C. G. (2014)** Acumulación de Hg, Pb, Cd y Zn por *Pomacea flagellata* en tres balnearios ubicados en la región urbana de la Laguna de Bacalar. *TecnoCultura*, 35, 14-23.
- González, S. E., Retamal, C. M., Medina, P. V., Ahumada, B. R. y Neira, H. J. (2009)** Enriquecimiento, disponibilidad y contaminación de metales traza (Cd, Cu, Pb y Zn) en sedimentos de lagunas urbanas de Concepción-Chile. *Quím. Nova*, 32, 4, 902-907.
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., Turner, A. K. (2002)** Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10, 455-474.
- Hemley, R. J., Prewitt, C. T. y Kingma, K. (1994)** High-pressure behavior of silica, in Heaney, P. J., Prewitt, C. T. y Gibbs, G. V., eds., *Silica-physical behavior, geochemistry and materials applications*. Reviews in Mineralogy, 29, 606 p.
- Hernández, L., Probst, A., Probst, L. J., y Ulrich, E. (2003)** Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *Science of the Total Environment*, 312(1-3), 195-219.
- Hernández, T. L., Rebolledo, V. M., Merino, I. M., Soto, M., Le-Cossec, A. y Monroy, R. E. (2011)** Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan) baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water Air Soil Pollut*, 218, 517-528.
- Horowitz, J. A. (1985)** A primer on sediment trace element chemistry. Lewis Publishers, USA, 144 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2015)**. Censo de Población y

Vivienda, 2010, INEGI, México, D. F.

Javan, S., Hessem, H. A., Gholamalizadeh, A., A. y Soltani, J. (2015) Fractionation of heavy metals in bottom sediments in Chahnimeh 1, Zabol, Iran. *Environ Monit Asses*, 187, 340.

Katip, A., Karaer. F., Ileri. S., Sarmasik, S., Aydogan, N. y Zenginay, S. (2011) Analysis and assessment of trace elements pollution in sediments of Lake Ulubat, Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 33, 961-968.

Kenkmann, T. y Schönian, F. (2006) Ries and Chicxulub: Impact craters on Earth provide insights for Martian ejecta blankets. *Meteoritics & Planetary Science*, 41 (10), 1587-1603.

Khedidja, A. y Boudoukha, A. (2016) L'aquifere Superficiel de Tadjnanet-Chelghoum laid (Nord-Est Algerien). *Larhyss Journal*, 28, 181-197.

Lounejeva, E., Ostroumov, M. y Sánchez, R. G. (2002) Polimorfos de alta presión de sílice en las impactitas de Chicxulub, México- Resultados de espectrometría de Raman. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17 (2), 137-141.

Manoj, K. y Padhy, P.K. (2014) Distribution, Enrichment and Ecological Risk Assessment of Six Elements in Bed Sediments of a Tropical River, Chottanagpur Plateau: A Spatial and Temporal Appraisal. *Journal of Environmental Protection*, 5, 1419-1434.

Mason, R. P. (2013) Trace Metals in Aquatic Systems. Willey-Blackwell, USA, 422 pp.

Massaferro, J., Correa, M. A., Montes de Oca, F. and Mauad, M. (2017) Contrasting responses of lake ecosystems to environmental disturbance: a paleoecological perspective from northern Patagonia (Argentina). *Hydrobiologia*.doi: 10.1007/s10750-016-3081-3

- Medina, M. S., Jiménez, G. A., Gutiérrez, R. M. and Lizardi, J. M. (2014)** Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as function of tourism development in the Mexican Caribbean: *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 509-516.
- Norma Oficial Mexicana (1994).** NOM-127-SSAI-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, 30 de noviembre de 1995.
- Nriagu, J. and Pacyna, J. (1988)** Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 333(12), 134-139.
- Null, A. K., Knee, K. L., Crook, D. E., R. de Sieyes, N., Rebolledo, V. M., Hernández, T. L. and Paytan, A. (2014)** Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research*, 77, 38-50.
- Ochoa, J. C., González, B. J., and Jiménez, C. J. (2016)** Metales pesados (Cd, Cr, Pb, Hg) en *Rhizophora mangle* en río y bahía de Chetumal. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 3(2), 263-271.
- Oliva, R. J., Ocaña, F. A., de Jesús, N. A., de Jesús, C. R. and Vargas, E. A. (2016)** Reproducción de *Pomacea flagellata* (Mollusca: Ampullariidae) en la laguna de Bacalar, Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*, 64 (4), 1643-1650.
- OMS, 2003.** Cadmium in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para calidad de agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud.

- Ortiz, J. (2016, 22 de enero)** Fertilizantes y agroquímicos “roban” belleza a laguna de Bacalar. *SIPSE*. Recuperado de: <http://sipse.com/novedades/fertilizantes-laguna-de-los-siete-colores-contaminacion-laguna-de-bacalar-universidad-milwaukee-contaminacion-188296.html>
- Pérez, L., Bugja, R., Lorenschat, J., Brenner, M., Curtis, J., Hoelzmann, P., Islebe, G., Scharf, B. and Schwalb, A. (2011a)** Aquatic ecosystems of the Yucatan Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. *Hydrobiologia*, 661, 407-433.
- Peréz, C. J., Pacheco, A. J., Euán, A. and Hernández, A. (2011b)** Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring cenotes. Yucatan, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(1), 90-102.
- Pérez, G. P. y Azcona, C. (2012)** Los efectos del cadmio en la salud. *Revista Especializada de Medicina Quirúrgica*, 17(3)199-205.
- Perry, E. C., Velazquez, O. G., and Marin, L., (2002)** The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44, 191-221.
- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B. y Velazquez, O. G. (2009)** Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*, 367, 27-40.
- Perry, E. C., Velazquez, O. G., Wagner, N., Paytan, A. and Street, J. (2010)** Sr ions and isotopes in groundwater Campeche, Mexico. Insight into development of Edzna Valley. *Water-Rock Interaction-Birkle & Torres-Alvarado (eds)*, 349-352.
- Salomons, W. y Förstner, U. (1980)** Trace metal analysis on polluted sediments: II: Evaluation of environmental impact, Springer-Verlag, Heidelberg, New-York, Tokyo, *Environmental Technology, letters* 1, 506-517.

- Sánchez, S. J., Álvarez, L. T., Pacheco, A.J., González, H. R y Carrillo, B. L. (2015)** Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32, 1, 62-76.
- Siqueiros, B.D., Hernández, A. U. y Hernández, A. O. (2013)** Diagnósis prospectiva sobre la diversidad de diatomeas epilíticas en la laguna Bacalar, Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 865-875.
- Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A. , Escobar, B. E., Herrera, S. J., Alcocer, J., Suárez, M. E., Elías, G. M., Díaz, A. V., Marín, L. E. and Steinich, B. (2002).** Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467, 215-228.
- Turekian, K. K., Wedepohl, K. H. (1961)** Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Bulletin of the Geological Society of America*, 72, 175-192.
- Urrutia, R., Yevenes, M. y Barra, R. (2002)** Determinación de los niveles basales de metales traza en sedimentos de tres lagos andinos de Chile: Lagos Chungará, Laja y Castor. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 47 (4), 457-467.
- U. S. Geological Survey (2016)** National field manual for the collection of water-quality data: U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, Chaps. A1-A-10, available online at <http://pubs.water.usgs.gov/twri9A>
- Yang, H. y Rose, N. (2005)** Trace element pollution records in some UK lake sediments, their history, influence factors and regional differences. *Environ. Int.*, 31 (1), 63-75.