



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en CIENCIAS DEL AGUA

“CUANTIFICACIÓN DE CONTAMINANTES Y ANÁLISIS DE DIVERSIDAD DE
ZOOPLANKTON EN AGUA SUBTERRÁNEA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN”

Tesis que presenta

DILSA MORALES PÉREZ

En opción al título de

MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

2021

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación 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:



Dilsa Morales Pérez

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 **Dilsa Moralez Pérez** titulado **“CUANTIFICACIÓN DE CONTAMINANTES Y ANÁLISIS DE DIVERSIDAD DE ZOOPLANKTON EN AGUA SUBTERRÁNEA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN”** fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea ecosistemas acuáticos y calidad de agua, en los laboratorios de Ecotoxicología y Cromatografía del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Jesús Alvarado Flores y de la Dra. Rosa María Leal Bautista, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias de Agua de este Centro.

Atentamente



Dra. Cécilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México, a 04 de octubre de 2021.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que me proporcionaron para realizar y concluir con mi maestría con número de becario 19CAAGO1814.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY A.C.), específicamente a la Unidad de Ciencias del Agua (UCIA) por abrirme las puertas desde un principio para hacer estancias de investigación, por realizar un proyecto de investigación para titularme de la universidad, por estudiar una maestría, por abrir las puertas del laboratorio y brindarme todas las herramientas.

A mis directores de tesis: Dr. Jesús Alvarado Flores, por su paciencia de explicar las cosas, por motivarme en el trascurso de la maestría, por estar pendiente de todas las cosas que se requería realizar de las actividades de tesis, por compartir su experiencia y aprendizaje.

A la Dra. Rosa María Leal Bautista, por aceptarme y confiar en mí en participar en la tesis de maestría, por su paciencia a enseñarme todo lo que conlleva la parte de laboratorio, por animarme y motivarme para concluir con la maestría, por tomar de tiempo extra y realizar actividades para mejorar en temas de maestría.

A los miembros del comité el Dr. Gilberto Acosta González y la Dra. Melissa Lenczewski por brindarme su tiempo y apoyo en aprender a usar herramientas para análisis de mis datos, por enseñarme parte de sus conocimientos que han adquirido.

Al Dr. Alejandro Legaspi por estar al pendiente y revisar la tesis, por aceptar ser parte del jurado.

A los técnicos de laboratorio José Bautista, Benjamín Delgado, Jorge Peniche, Daniela Ortega y Gabriela Rosiles por apoyarme con análisis de mis muestras y por brindarme su apoyo el momento de necesitar cualquier herramienta o recurso.

A todos los investigadores de la UCIA, al Dr. Almazán, Dr. Diego, Dr. Adán, Dr. Eduardo, Dr. Jorge, Dr. Jesús, Dra. Rosa y Dra. Cecilia por ser mis maestros en el trascurso de la carrera, por enseñarme y brindarme su apoyo por resolver dudas respecto a la tesis.

A todo el personal que me abrieron espacio resolviendo dudas, por su paciencia y amistad.

DEDICATORIA

Dedicare siempre todo a Dios porque me mantuvo con bien y salud, porque me brindo todas las cosas para concluir mi maestría.

Dedico también este trabajo con gran amor infinito a mi esposo Reyes Arsenio por su apoyo moral y económico, por impulsarme, motivarme, por apapacharme cuando sentía que no podía, por estar siempre conmigo, por soportar mi humor, por escucharme, por brindarme su tiempo, por ser mi ayuda idónea, porque siempre se preocupa en darme lo mejor, tengo tantas cosas que decir, pero cierro con un GRAN TE AMO MUCHISIMO.

Dedico también a mis padres: Mario Morales mi padre y Aminta Pérez mi madre, que desde el cielo estuvo cuidándome, gracias a ellos que me enseñaron el respeto, los valores y el aprecio, también estos es una muestra de todo lo que hicieron por mí.

A mis hermanos: Antonia, Anselma, Mari, Galindo, Sergio, Bernabé, a todos mis cuñados y sobrinos, que todos me han apoyado moral, me han enseñado el verdadero amor de una verdadera familia y hogar.

A mis tíos (Estela y Filo) que me abrieron las puertas de su casa y así poder llevar acabo mis estudios. Del mismo modo a mi hermana y cuñado (Carlos y Mari) que me recibieron en su familia, gracias por su apoyo moral y económicamente por apoyarme a terminar una carrera.

A mis suegros y cuñadas (os), que me han aceptado en su familia, los quiero muchísimo, gracias abirme las puertas y por consentirme.

A mis compañeros y amigos del CICY, Yesenia, José Carlos, Jaime, Irving, Arturo, Vania, Evelyn, Daniela, Ramón, Miguel, Jovana, Leonela, Dino, Xiomara gracias por brindarme su amistad y apoyo, por esos momentos de risa, de platica que al final se convertía en terapia. Donde quiere que estén siempre deseare lo mejor para cada uno.

Dedico este este trabajo agradeciendo infinitamente a todos los que me apoyaron dándome un consejo, una plática, un chiste, una sonrisa, una amistad clara y transparente, ya que eso me enseñó a madurar como persona y ser persistente en lo que me propuse.

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
ANTECEDENTES	3
1.1 Península de Yucatán.....	3
1.1.1 Características Geológicas de la Península de Yucatán.....	3
1.1.2 Características hidrológicas de la península de Yucatán.....	3
1.2 Vulnerabilidad del acuífero	6
1.3 Contaminantes orgánicos.	6
1.3.1 Compuestos orgánicos persistentes (COP's)	6
1.3.2 Contaminantes emergentes.....	7
1.3.3 Contaminación orgánica por nutrientes	9
1.4 Compuestos orgánicos en el agua subterránea, una problemática mundial	11
1.5 Presencia de Compuestos Orgánicos Persistentes en México	12
1.6 Estudios de contaminantes orgánicos en la península de Yucatán.....	12
1.7 Regulaciones Internacionales que se aplican a estos compuestos.....	14
1.8 La biodiversidad en los sistemas acuáticos de la península de Yucatán.....	14
JUSTIFICACIÓN	18
HIPÓTESIS	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19

CAPÍTULO 2	20
MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 Zona de estudio	20
2.1.1 Importancia de la zona agrícola de Yucatán, Tizimín y Panabá	20
2.2 Tizimín Yucatán	21
2.3 Panabá Yucatán	21
2.4 Actividades predominantes en Tizimín y Panabá	21
2.5 Importancia hidrogeológica de la zona agrícola (terreno Pockmarked)	22
2.6 Importancia de la Zona recreativa en Quintana Roo	22
2.6.1 Puerto Morelos, Quintana Roo	23
2.6.1.1 Hidrogeología	23
2.6.1.2 Turismo (Ruta de los cenotes)	23
2.6.1.3 Cenote Verde Lucero	23
2.6.2 Solidaridad Quintana Roo	23
2.6.2.1 Cenote Chac Mool	24
2.7 Ubicación de la zona de estudio	24
2.8 Diseño experimental Sistema Recolector Nautilus (SiReNa) CICY	25
2.8.1 Prototipo 1	25
2.8.2 Construcción del Sistema Recolector final	25
2.9. Trabajo en campo	26
2.9.1 Colecta de las muestras de agua subterránea	27
2.9.2 Colecta de las muestras de Zooplancton	27
2.9.2.1 Estrategia 1 (botella muestreadora)	27
2.9.2.2 Estrategia 2 (con cubeta)	28
2.9.2.3 Estrategia 3 (Sistema Recolector)	28
2.9.3 Medición de parámetros fisicoquímicos	28
2.10 Análisis de las muestras de agua subterránea	29

2.10.1 Preparación de la muestra para elementos mayores.....	29
2.10.2 Análisis de alcalinidad.....	29
2.10.3 Análisis de nutrientes (NO ₂ -NO ₃).....	30
2.10.4 Análisis de fosfato (PO ₄).....	30
2.10.5 Detección de Presencia/ausencia de contaminantes.....	30
2.10.6 Análisis de Bacteriología: Coliformes fecales y <i>Escherichia coli</i>	31
2.11 Análisis estadísticos	31
2.11.1 Estadística descriptiva de parámetros fisicoquímicos	31
2.11.2 Análisis de escalonamientos multidimensional (MDS)	32
2.12 Análisis de la diversidad de Zooplancton (Trabajo de laboratorio)	32
2.12.1 Proceso de preservación y análisis de muestras de Zooplancton.....	32
2.12.2 Diversidad de Zooplancton	32
2.12.2.1 Diversidad de los sitios de estudio.....	32
2.12.3 Identificación de especies de zooplancton	34
2.12.4 Toma de fotografías de las muestras de los sitios de estudio	34
2.12.4.1 Contabilizar huevos, espermátóforos, color y lípidos en organismos	34
2.13 Análisis de la diversidad específica.....	35
2.13.1 Índice Shannon-Weiner	35
2.13.2 Índice de Simpson	35
2.13.3 Índice de Sørensen.....	36
CAPÍTULO 3	37
RESULTADOS	37
3.1 Caracterización fisicoquímica de los estratos de agua dulce	37
3.1.2 Perfiles de parámetros físicos y químicos en la columna de agua	37
3.2 Análisis hidrogeoquímico del agua	40
3.2.1 Análisis de elementos mayores del estrato dulce	40
3.2.2 Análisis de alcalinidad como sistema carbonatos (HCO ₃ ⁻ y CO ₃ ⁼)	42

3.2.3 Análisis de nitritos, nitratos y fosfato (NO_2 , NO_3 , PO_4)	45
3.2.4 Análisis de antibióticos	45
3.2.5 Análisis de bacteriología.....	46
3.3 Análisis de comparación de los parámetros fisicoquímicos de cada sitio	47
3.4 Análisis de MDS de los elementos mayores	49
3.5 Resultado de diversidad y de cada sitio de estudio.....	52
3.8 Efectos adversos en el Zooplancton de los cenotes Kikil (CK), Verde Lucero (CVL), y Chac Mool(CCH)	54
3.9 Índices de diversidad	56
3.9.1 Índice de Shannon-Weiner	56
3.9.2 Índice de Simpson	57
3.9.3 Índice de Sørensen	58
DISCUSIÓN	60
3.10 Condiciones fisicoquímicas, sistema carbonato, elementos mayores, bacteriología y contaminantes orgánicos en el estrato dulce de cada sitio	60
3.11 La diversidad de Zooplancton asociada a los sitios de estudio	65
CONCLUSIONES	70
PERSPECTIVA Y RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	87
1.0 Anexo 1	87
2. 0 Anexo 2	87
2.1 Preparación de la solución testigo para análisis antibióticos.....	87
2. 2 Análisis de las muestras	88
2. 3 Lectura para observar presencia-ausencia de antibióticos.....	88
3. 0 Anexo 3	89

ABREVIATURAS

(COP's): Compuestos orgánicos persistentes

(PY): Península de Yucatán

CKB: Cenote Kikil - Botella Van Dorn

CVLB: Cenote Verde Lucero botella

CCHB: Cenote Chac Mool - Botella Van Dorn

PROF: Profundidad

RS: Riqueza Sistema Recolector

RB: Riqueza - Botella Van Dorn

RC: Riqueza Cubeta

AS: Abundancia sistema

AB: Abundancia - Botella Van Dorn

AC: Abundancia Cubeta

RZ: Red de Zooplancton

SR: Sistema Recolector

BM: Botella Muestreadora de Van Dorn

CC: Colecta con cubeta

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de muestras y volumen de cada análisis	27
Tabla 2. Promedio de los datos fisicoquímicos de cada sitio	37
Tabla 3. Análisis de elementos mayores: condición hidrogeoquímica del cenote Kikil.....	40
Tabla 4. Análisis de elementos mayores: condición hidrogeoquímica del cenote Verde Lucero..	41
Tabla 5. Análisis de elementos mayores: condición hidrogeoquímica del cenote Chac Mool.....	42
Tabla 6. Resultado del sistema carbonato del CK.....	43
Tabla 7. Resultado del sistema carbonato del CVL.....	44
Tabla 8. Resultado del sistema carbonato del CCH.....	44
Tabla 9. Resultado de los análisis de nutrientes de cada sitio.....	45
Tabla 10. Resultado de análisis de antibióticos de cada sitio.....	46
Tabla 11. Resultado de análisis de bacteriología de cada sitio.....	47
Tabla 12. Riqueza y abundancia por distintos métodos de colecta del CK.....	52
Tabla 13. Riqueza y abundancia por distintos métodos de colecta del CVL	53
Tabla 14. Riqueza y abundancia por distintos métodos de colecta del CCH	53
Tabla 15. Riqueza y abundancia de manera global.....	54
Tabla 16. Grupos de Zooplancton presente de manera global	54
Tabla 17. Efectos adversos en organismos de cada sitio	55
Tabla 18. Efectos adversos de manera global en organismos de cada sitio.....	56
Tabla 19. Resultado del índice de Sørensen de cada sitio.....	59
Tabla 20. Lista de la riqueza de especies de cada sitio colectado con SR.....	89
Tabla 21. Lista de la riqueza de especies de cada sitio colectado con BM.....	90
Tabla 22. Lista de la riqueza de especies de cada sitio colectado con CC.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de agua dulce y salobre.....	4
Figura 2. Modelo conceptual de flujo del agua subterráneo de la PY.....	5
Figura 3. Ejemplo de estructuras de compuestos orgánicos persistentes.....	7
Figura 4. Fuentes generadoras de contaminantes	10
Figura 5. Mapa de los sitios de estudios	24
Figura 6. Diseño del prototipo 1 (SR).....	25
Figura 7. Modelo de utilidad para arrastre en profundidad (SR).....	26
Figura 8. Pasos para trabajar las muestras de Zooplancton de cada sitio.....	33
Figura 9. Parámetros fisicoquímicos en la columna de agua del CK.....	38
Figura 10. Parámetros fisicoquímicos en la columna de agua del CVL.....	38
Figura 11. Parámetros fisicoquímicos en la columna de agua del CCH.....	39
Figura 12. Diagrama del sistema carbonato	43
Figura 13. Comparación de los parámetros fisicoquímicos del CVL y CK.....	48
Figura 14. Resultado de MDS de los elementos mayores de cada sitio.....	49
Figura 15. Comparación de los elementos mayores cationes y aniones de cada sitio.....	50
Figura 16. Comparación de los elementos mayores cationes de cada sitio.....	51
Figura 17. Gráfico del índice de Shannon-Weiner de cada sitio de estudio.....	57
Figura 18. Resultados del índice de Simpson de cada sitio de estudio.....	58
Figura 19. Parámetros fisicoquímicos y sistema carbonato	60
Figura 20. Elementos mayores y bacteriología de los tres sitios de estudio.....	62
Figura 21. Nutrientes y antibióticos de los tres sitios de estudio	63
Figura 22. Datos de manera global de zooplancton.....	66
Figura 23. Ejemplo de cómo realizar las lecturas de análisis antibióticos	88

RESUMEN

La península de Yucatán está constituida por roca de carbonato de calcio altamente porosa y permeable, se presentan geomórfas características de un medio kárstico las cuales resultan de la disolución de la roca que genera colapsos como las dolinas (cenotes), que son expresiones kársticas del acuífero la fuente de agua más importante para la población de la península de Yucatán, la cual aprovechan para satisfacer sus necesidades, como la agricultura, ganadería y actividades recreacionales, pero en el transcurso de los años, se han modificado las condiciones del agua por contaminantes orgánicos e inorgánicos que son utilizados en la agricultura como son los pesticidas y antibióticos. Es por eso que este trabajo tiene como objetivo determinar si existe presencia/ausencia de contaminantes orgánicos en el estrato de agua dulce de tres sitios, y saber si hay efectos adversos en los microorganismos que pertenecen al zooplancton: Copépodos, Cladóceros, Ostrácodos y Rotíferos. En cada uno de los sitios de estudio se tomaron muestras de agua subterránea a 1,4 y 8 m de profundidad usando diferentes métodos de colecta, y se realizaron análisis de elementos mayores, alcalinidad, bacteriología, nutrientes (NO_2 , NO_3 , PO_4), antibióticos, y análisis de riqueza y abundancia en zooplancton, también se hicieron mediciones de parámetros fisicoquímicos en campo como temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Los resultados de elementos mayores sugieren intrusión salina en el cenote Chac Mool. En el caso del análisis de alcalinidad en función del ion HCO_3^- se pudo observar que el cenote Kikil tiene una mayor capacidad de amortiguamiento a una profundidad de 4m, respecto a los otros dos sitios. Los resultados de bacteriología en el agua indican que en los tres sitios los valores son muy altos y están por encima de los límites permitidos por la Secretaría de Salud y Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. En cuanto a la cuantificación de nutrientes se encontró que el cenote Kikil presenta las mayores concentraciones de nutrientes respecto a los otros dos sitios. Los análisis de antibióticos mostraron que los sitios con mayor contaminación en el estrato de agua dulce fue el cenote Kikil a 1 y 8m de profundidad, al igual que el cenote Chac Mool a 1m de profundidad. Los análisis de riqueza de especies en los sitios indican que el cenote Verde Lucero es quien tiene la mayor riqueza y abundancia de microorganismos de zooplancton. Se observaron efectos adversos como presencia de lípidos y cambios en la hemolinfa de copépodos en el cenote Kikil. En conclusión, y con base en los indicadores físicos, químicos y biológicos el cenote Kikil, es el sitio más contaminado, respecto a los otros dos sitios de estudio.

ABSTRACT

The Yucatan Peninsula is made up of highly porous and permeable calcium carbonate rock, there are geomorphic characteristics of a karst environment that result from the dissolution of the rock that generates collapses such as sinkholes (cenotes), cenotes are karst expressions of the aquifer the most important source of water for the population of the Yucatan Peninsula, which they take advantage of to meet their needs, such as agriculture, livestock and recreational activities, but over the years, the water conditions have been modified by organic and inorganic pollutants that are used in agriculture such as pesticides and antibiotics. That is why this work aims to determine the presence/absence of organic pollutants in the freshwater stratum of three sites and to determine there are adverse effects on the microorganisms that belong to zooplankton: Copepods, Cládóceros, Ostrácodos, and Rotíferos. In each of the study places, groundwater samples were taken at 1.4 and 8 m depth using different collection methods, and analyses of major elements, alkalinity, bacteriology, nutrients (NO_2 , NO_3 , PO_4), antibiotics, and diversity analysis in zooplankton were also performed, measurements of physicochemical parameters in the field such as temperature, pH, electrical conductivity and dissolved oxygen were also made. Results from larger elements suggest saline intrusion into the Chac Mool cenote. In the case of the analysis of alkalinity as a function of the ion HCO_3^- and CO_3^{2-} it could be observed that the cenote Kikil has a greater capacity of cushioning at a depth of 4m, compared to the other two sites. Bacteriology results in water indicate that at all three sites the values are very high and above the limits allowed by Secretary of Health and Secretary of Urban Development and Ecology. As for the quantification of nutrients, it was found that the Kikil cenote has the highest concentrations of nutrients compared to the other two sites. Antibiotic analyses showed that the sites with the most contamination in the freshwater stratum were the Kikil cenote at 1 and 8m depth, as well as the Chac Mool cenote at 1m depth. Analyses of species richness at the sites indicate that the Lucero Green cenote has the greatest richness and abundance of zooplankton microorganisms. Adverse effects such as lipid presence and changes in copepod hemolymph were observed in the Kikil cenote. In conclusion, and based on the physical, chemical, and biological indicators, the Kikil cenote is the most contaminated site, compared to the other two study sites.

INTRODUCCIÓN

La península de Yucatán está constituida por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, con un área de 141,523 km², es una plataforma calcárea con una topografía baja, pero con expresiones del cuaternario, posee dos recursos esenciales, el acuífero Kárstico y la biodiversidad. La sociedad, el sector turístico, agropecuario, y otras industrias dependen de ambos recursos. Principalmente del agua subterránea que se encuentra dentro de un sistema kárstico que es altamente poroso y permeable, además el agua subterránea se describe como una lente de agua dulce flotando sobre la lente de agua salina (Aguilar-Duarte *et al.*, 2016, Bauer-Gottwein *et al.*, 2011, Conagua 2019, Graniel *et al.*, 2004, 2015).

En los sistemas de la península de Yucatán se ha documentado una gran riqueza de especies acuáticas, por ejemplo, microorganismos zooplanktónicos como rotíferos, ostrácodos, cladóceros y copépodos importantes para la transferencia de energía y la salud de los sistemas acuáticos (Arroyo-Castro 2019, Cervantes-Martínez *et al.* 2002, Cervantes-Martínez *et al.* 2017, Hernández-Pedraza 2019 y Pérez- Yáñez 2020).

En la actualidad el acuífero de la península de Yucatán se ha modificado en el transcurso de los años por ciertas actividades en las que se utilizan algunos compuestos químicos como en el caso de la agricultura que necesita de pesticidas y fertilizantes para la producción de cultivos, así como actividades ganaderas dado que todo generan desechos (las heces fecales y la orina), también el uso de contaminantes emergentes por ejemplo antibióticos o productos de uso cotidiano, estos se filtran al subsuelo llegando al acuífero. Los cuales contaminan el agua subterránea y por lo tanto dañan la salud de los ecosistemas (González-Herrera 2018, Pacheco 1996, Polanco-Rodríguez *et al.* 2015, Leal-Bautista *et al.* 2011 y Metcalfe *et al.* 2011).

En este contexto, en la península de Yucatán se han detectado diversos contaminantes orgánicos en el agua subterránea por autores como Cobos-Gasca *et al.* (2014), Giácoman-Vallejos *et al.* (2017), Metcalfe *et al.* (2011), Pacheco *et al.* (2013), Polanco-Rodríguez *et al.* (2017), Poot (2016) y Vargas (2015) la mayoría de los estudios coinciden que el problema se magnifica debido a la vulnerabilidad del sistema kárstico, porque se ha reportado que existe una alta porosidad que permite el transporte de contaminantes que se infiltran al acuífero Kárstico (López-Tamayo 2015). Estos problemas ambientales en el agua y sus efectos en la vida acuática se han estudiado en la península de Yucatán desde hace más de diez años. Sin embargo, existe poca información sobre la presencia de contaminantes orgánicos persistentes y emergentes, desde un enfoque en las

variaciones en el estrato de agua dulce, y como estos contaminantes de estar presentes podrían afectar la diversidad de especies. Por lo que presente trabajo responde ¿Si existe variación de contaminantes orgánicos en la columna de agua dulce y si esta variación afecta la riqueza y abundancia de especies de zooplancton de cada estrato? Nuestras áreas de estudio se localizaron acorde a lo siguiente: la primera área de estudio fue en un sitio con zona agrícola y ganadera al norte de la península de Yucatán, específicamente entre los municipios de Tizimín y Panabá. Y la segunda área está fuera de la zona agrícola, solo se reporta actividad de ecoturismo, entre los municipios de Puerto Morelos y solidaridad del estado de Quintana Roo.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Península de Yucatán

La península de Yucatán se sitúa en el sureste mexicano, con las coordenadas geográficas 17° 49' 00" y 21° 36' 00" de Latitud Norte y 86° 45' 00" y 91° 20' 00" de Longitud Oeste; con una superficie de 141,523 km² y se conforma por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán; se encuentra al oeste con el Golfo de México, y colinda con Guatemala y Belice, al suroeste con el estado de Tabasco y al este con el Mar Caribe. La península tiene 125 municipios, 11 pertenecientes al estado de Campeche, 8 a Quintana Roo y 106 a Yucatán (CONAGUA, 2015).

1.1.1 Características Geológicas de la Península de Yucatán

La característica geológica está conformada por rocas sedimentarias del Terciario y Cuaternario. Donde las rocas antiguas son calizas cretácicas y dolomitizadas, silicificadas y recrystalizadas del Paleoceno, delgadas de color claro con intercalaciones de margas y yeso, estas características se encuentran en el sur de Yucatán. Además, existen rocas más jóvenes en áreas disgregadas como son: coquinas, calizas y depósitos de litoral areno-arcilloso en la franja costera, material residual arcilloso y calichoso, producto de alteración. (CONAGUA, 2015, Bautista y Palacio 2012, Butterlin y Bonet, 1960).

1.1.2 Características hidrológicas de la península de Yucatán

La península de Yucatán se caracteriza por ser un medio kárstico, donde existen acuíferos carbonatados integrados por dolomitas y calizas (Vallejos, *et al.*, 2004). La naturaleza kárstica influye en sus características de los procesos geoquímicos debido a que se producen mezclas formadas por propiedades miscibles entre el agua dulce procedente del acuífero y el agua de mar (Fagundo, 2002 y CONAGUA, 2015).

Un acuífero costero en ambientes naturales origina un movimiento tridimensional del agua dulce hacia el mar, donde el agua dulce y salada son miscible, es decir, milita una zona de transición y por difusión se mezclan progresivamente. La zona de mezcla se produce por efecto de la disminución del flujo de agua dulce al mar, así como el aumento de la permeabilidad y heterogeneidad de las diferencias de densidades y las oscilaciones de las mareas (Graniel y Hita, 2004). Por lo anterior, el acuífero regional mantiene una pequeña lente de agua dulce que flota sobre el agua salobre (Perry *et al.*, 1995).

Los acuíferos costeros no confinados se encuentran estratificados por densidad con una lente de agua dulce que cubre a la zona de agua salobre, pero que a la vez los dos cuerpos de agua se encuentran separados por una zona de mezcla denominada haloclina, como se muestra en la figura 1 (Beddows, *et al.*, 2007, Stoessell, 1995, Stoessell, y Coke, 2006 y Stoessell *et al.*, 2002). La lente de agua dulce es relativamente delgada <10-100 m de espesor (Vieyra, y Merediz-Alonso, 2011).

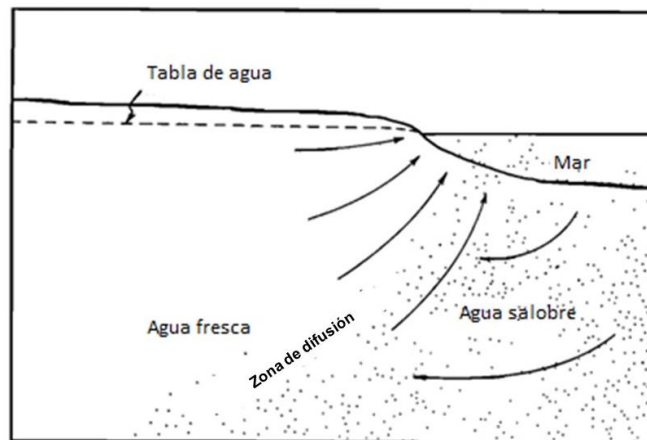


Figura 1. Interacción de agua dulce y salobre. Obtenido de Cooper (1959).

La haloclina es típicamente estrecha y afilada, es considerada como frontera o límite de difusión entre las capas de agua de mar y agua dulce (Stoessell, *et al.* 2002). Autores como Schmitter-Soto *et al.*, (2002) indica que la haloclina estratifica la columna de agua y funciona como una barrera física que bloquea el estrato de agua dulce ya que se encuentra entre ambas capas (la dulce superficial, menos densa, y la marina profunda, más densa), conocida como zona de transición.

Entonces el acuífero de la península de Yucatán, es la única fuente disponible en la península y es agua subterránea. El almacenamiento y el flujo de agua ocurren en el acuífero kárstico con

grandes sistemas de cavidades, donde el flujo de agua subterránea es dominado por conductos de flujos turbulentos. Estas cavidades mayores y conductos están incrustados en el acuífero. Por ejemplo, las "dolinas" son manifestaciones kársticas, las cuales difieren en diámetro desde unos cuantos metros hasta más de 100 m, generalmente son formados por la acción vertical de la disolución y paso del agua hacia niveles profundos del nivel estático durante los períodos glaciales y revelan que las calizas han estado sujetas a significativa disolución vertical, siendo las "cavernas" o "grutas", la manifestación más espectaculares y de diferentes tamaños, así como la extensión está en función de la edad de la roca e incidencia de los aspectos geológicos estructurales (CONAGUA, 2015), a estas expresiones kársticas se les da el nombre de "cenote". Bauer-Gottwein *et al.*, (2011) llevaron a cabo un estudio del acuífero kárstico de la península y elaboraron un mapa de rutas de flujo del agua subterránea mediante un modelo, con el fin de proporcionar las rutas del flujo de agua subterránea y descarga, y se muestran en la figura 2.

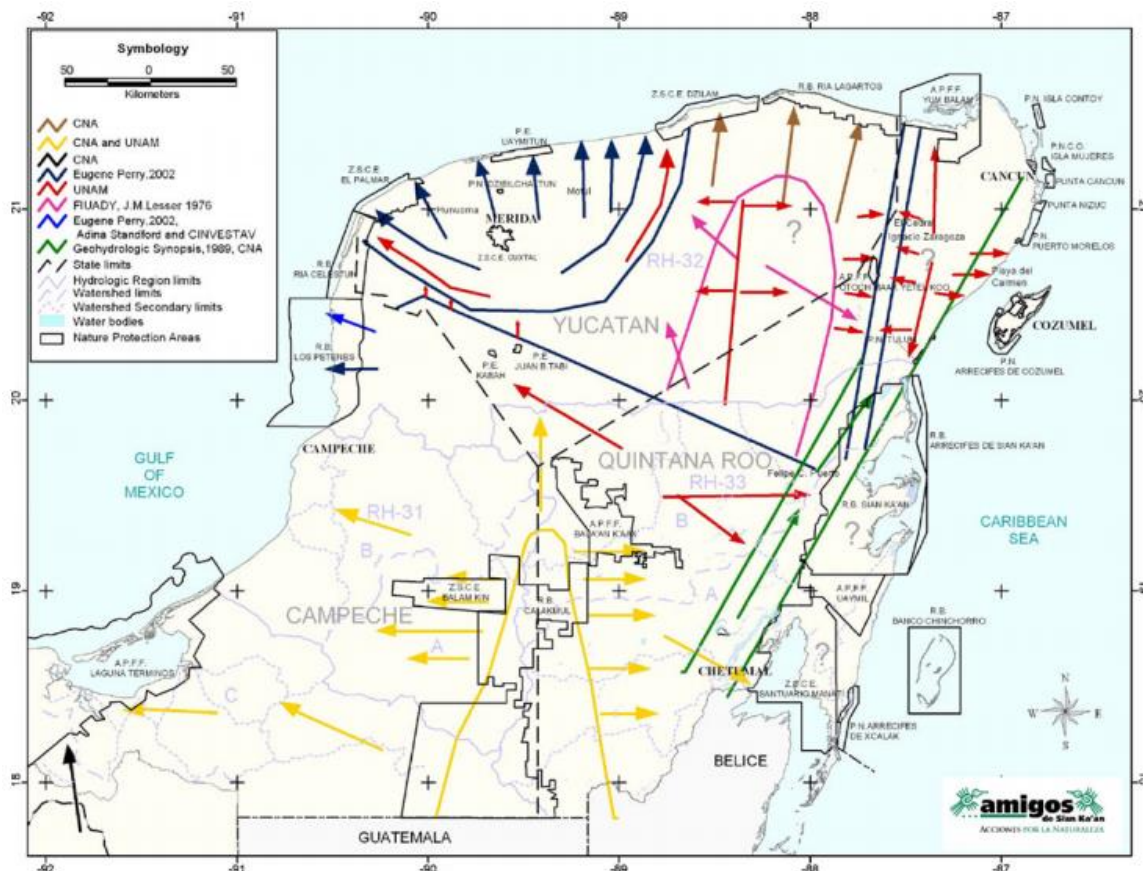


Figura 2. Modelo conceptual del flujo subterráneo de la PY (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

1.2 Vulnerabilidad del acuífero

Las aguas subterráneas de acuífero kárstico abastecen alrededor de 25% de la población mundial, por sus características kársticas existe una mayor exposición a contaminantes por urbanización, industria, y por las actividades agropecuarias que se realizan en la superficie las cuales son amenazados por los residuos que son vertidos al acuífero (Ruepert, 2005).

La vulnerabilidad del sistema kárstico es debido a su composición geomorfológica que permite con facilidad que un contaminante se infiltre hacia el acuífero, bajo las características del contaminante. Entendemos entonces a la vulnerabilidad como una condición natural que los estratos terrestres presentan por sus condiciones de permeabilidad permitiendo la infiltración de sustancias al agua subterránea (Aguilar-Duarte, 2013). Por lo tanto, la vulnerabilidad del sistema kárstico es una característica intrínseca, y el incremento de la contaminación orgánica afectará la calidad del agua y la vida acuática.

1.3 Contaminantes orgánicos.

1.3.1 Compuestos orgánicos persistentes (COP's)

En los últimos años el hombre ha elaborado diversos productos con compuestos químicos orgánicos con el fin de satisfacer las necesidades del desarrollo tecnológico y mejorar su calidad de vida, desde el inicio de la revolución industrial se estiman más 120, 000 sustancias químicas y conforme pasan los años se introducen 2000 compuestos orgánicos (Olea y Fernández, 2001).

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP's) son compuestos químicos resistentes a la degradación fotolítica, biológica y química. Estas sustancias dados a las propiedades que poseen son muy tóxicas y pueden durar (56-182 días) en el ambiente y pueden transitar grandes trayectos antes de acumularse en los tejidos grasos de organismos como son los peces y organismos marinos, también se concentran conforme se transmiten en la cadena trófica (Yarto *et al.*, 2003).

Los COP's se emplean en la industria, la agricultura y para el control de enfermedades. Actualmente algunos de los COP's se siguen utilizando en áreas del mundo donde se consideran esenciales para garantizar la salud pública (Ritter *et al.*, 1995).

En los COP's se encuentran los plaguicidas, usados en distintos sectores agropecuarios. Y el uso intensivo de plaguicidas está asociado a la actividad agrícola, la cual influye en la disminución

de la calidad del agua, los residuos de agroquímicos empleados para la protección de los cultivos, se desplazan por la superficie terrestre o se infiltran en el suelo hasta que consiguen llegar a las aguas subterráneas (Arrazcaeta, 2002).

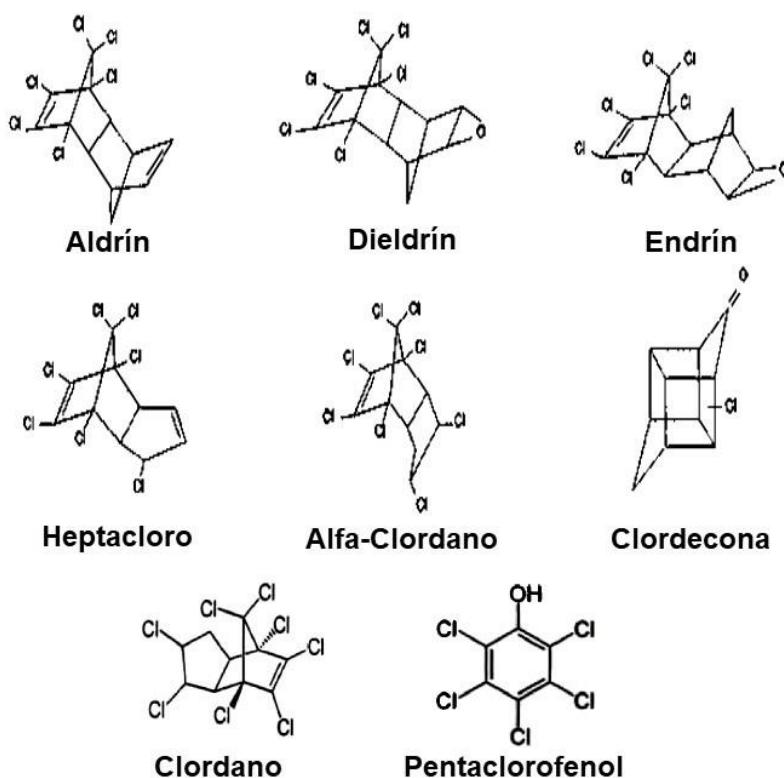


Figura 3. Estructuras de compuestos orgánicos persistentes (Castillo y Soledad, 2009).

1.3.2 Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son compuestos activos que se encuentran en productos de uso continuo, como son los medicamentos, de cuidado personal y nano materiales, los efectos tóxicos que puedan causar estos contaminantes son aun pocos conocidos. Los contaminantes emergentes tienen una escasa o nula regulación a nivel mundial al convertirse en residuos que eventualmente llegaran al agua, por aguas residuales y descargas directas, pero con agresividad y con potencial tóxico a los sistemas acuáticos, junto con los disruptores endócrinos, los productos de aseo personal y medicamentos, que tienen la capacidad de provocar efectos

adversos por ejemplo: mortalidad, malformaciones, disminución de la mortalidad y alteración reproductiva a diferentes organismos (Sabrina-Pérez, 2019).

México cuenta con leyes y normativas para el uso adecuado de los residuos como el artículo 28 de la ley general para la gestión integral de los residuos, sin embargo, los medicamentos se infiltran a los ecosistemas mediante rutas como la excreción en orina y heces, también por medicamentos caducos y sobrantes sin ningún uso, los cuales son desechados como residuo domiciliario o vertiéndose al drenaje, las concentraciones de fármacos no son compuestos persistentes pero el constante uso y vertidos al agua proporcionan su presencia constantemente (Miceli-Montesinos *et al.*, 2018). Además, es importante mencionar que los fármacos una vez administrados al individuo llegan al ambiente (agua subterránea) a través de su excreción y metabolización.

Por todo lo anterior, hoy en día existe la necesidad de estudiar los contaminantes emergentes, debido a las posibles repercusiones o efectos adversos a la calidad del agua, y la vida acuática, incluso la salud del ser humano, por el momento es difícil comprender la magnitud del problema, ya que la concentración, persistencia y frecuencia a veces son desconocidas. Los contaminantes emergentes más comunes en el ambiente son los fármacos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas de abuso, sustancias procedentes de productos de cuidado y de higiene personal (Hernández-Quiroz *et al.*, 2019). Del grupo de los fármacos podemos destacar a los antibióticos, los cuales se han encontrado con mayor frecuencia a través de los años, estos se consideran peligrosos y demandan investigación por la posibilidad de que suceda una selección genética de bacterias cada vez más dañinas, lo que es motivo de gran preocupación (Petrovic *et al.*, 2005).

Finalmente, la contaminación de los ecosistemas acuáticos, a causa de los medicamentos y analgésicos. Está asociado al ser humano, y un factor determinante en el incremento de las descargas de estos contaminantes y que aún falta por establecer una asociación directa.

En la península de Yucatán, un factor determinante para el incremento de todas las actividades económicas, y sociales es el turismo, un sector de gran importancia y dinamismo conformado por hotelerías, restaurantes, transporte, agencias de viajes, recreación, y relacionado entre otros sectores como el artesanal, industria textil, manufacturera, comercio y salud, generando grandes ganancias. El problema se incrementa cuando por temporadas específicas se agrupa una gran cantidad de personas y por lo tanto se incrementan la demanda en el consumo alimenticio, y las actividades turísticas, y por lo tanto se incrementan las descargas de productos de cuidado personal, y medicamentos que tienen todo el potencial de llegar a los ecosistemas acuáticos de forma directa o indirectamente después de pasar por los tratamientos de las plantas de aguas

residuales las cuales generalmente no pueden eliminar y por consecuencias llegan al agua (Casas-Beltrán *et al.*, 2020).

Por ejemplo, los grandes asentamientos hoteleros en el borde costero o junto a cauces hídricos, y además la población que residen a una distancias de 100 km de la costa, ocasionan la degradación y contaminación de la zona costera, y además la presión de la población, el desarrollo de la infraestructura destinada al turismo costero, han afectado en forma significativa los ecosistemas costeros y marinos, que lamentablemente afectaron los arrecifes de coral; en el Caribe, el 61% de los arrecifes están amenazados por la presión del turismo y la contaminación (Miguel y Tavares, 2015).

1.3.3 Contaminación orgánica por nutrientes

El desarrollo y las actividades antropogénicas conllevan al uso de grandes cantidades de contaminantes en el agua y que se han detectado, en parte, a los insumos de agroquímicos en la producción agrícola y ganadera. La producción agrícola conlleva la utilización de agroquímicos, principalmente los fertilizantes y estos tienen influencias negativas en exceso para la calidad de agua ya que causa modificaciones al agua subterránea debido al entorno Kárstico que facilita el arrastre de contaminantes hacia el agua (Pacheco y Cabrera, 1996).

Los usos intensivos de fertilizantes en los cultivos llegaron a los ecosistemas acuáticos alterando la química del agua y por consecuencia los ciclos biológicos y biogeoquímicos. Por ejemplo el empleo de fertilizantes para subsanar las deficiencias de nutrimentos primarios, secundarios y con menor frecuencia para micro nutrimentos, los principales son en su forma absorbida: carbono (CO_2), hidrogeno (H_2O), oxígeno (O_2), nitrógeno (NH_4 , NO_3^-), fósforo (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), azufre (SO_4^{2-} , SO_2), hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}), manganeso (Mn^{2+}), boro (H_3BO_3), zinc (Zn^{2+}), cobre (Cu^{2+}), molibdeno (MOO_4^{2-}), y cloro (Cl^-) (Fageria *et al.*, 2002).

En general la contaminación por la agricultura y la industria es devastadora si continúa manejándose como ahora se hace. Es necesario implementar mecanismos eficientes y monitoreo continuos para tener el riesgo ecológico real de todos estos contaminantes de los ecosistemas acuáticos.

La contaminación de los ecosistemas acuáticos por las actividades turística y la agricultura en la península de Yucatán es compleja y difícil de eliminar, todos los desechos orgánicos alteran la química del agua y el equilibrio ecológico, por ejemplo, altas concentraciones de nitrógeno,

diversos plaguicidas, agroquímicos y desechos agroindustriales, contaminan los ecosistemas acuáticos.

El uso de fertilizantes en la actividad agrícola junto con pesticidas y plaguicidas son responsables de las implicaciones de la contaminación por nitrógeno en los ecosistemas acuáticos son catastróficas, llevando al deterioro (Camargo y Alonso, 2007). En México se estima que se utilizan 20 000 t/año de plaguicidas (González-Arias *et al.*, 2010).

Debido a las actividades y rápida filtración que presentan los acuíferos están siendo afectados por las actividades antropogénicas por el uso de fertilizantes en los cultivos por lo tanto modifica la calidad del agua subterránea (Ávila y Sansores, 2018).



Figura 4. Fuentes generadores de contaminantes al acuífero. Las referencias de las imágenes se encuentran en el anexo 1.

1.4 Compuestos orgánicos en el agua subterránea, una problemática mundial

Los compuestos orgánicos más peligrosos para la calidad del agua y la vida acuática es el uso de los plaguicidas en los campos de cultivo, acorde a lo reportado por (Garrido, *et al.*, 1998) mediante sus estudios de detección de contaminantes orgánicos principalmente insecticidas organoclorados y herbicidas, menciona que los plaguicidas son sustancias complejas que al aplicarse al medio sufren cambios a nivel físico, químico y biológico. Además, el transporte de los plaguicidas en el agua subterránea depende de las características geológicas e hidrogeológicas, así como el espesor de la zona no saturada y las características químicas del propio compuesto, las propiedades que forman parte de la incorporación de los plaguicidas al acuífero es su persistencia, movilidad y solubilidad.

En varios países se han detectado contaminantes orgánicos en el agua subterránea, y, además, existe evidencia que llegaron al acuífero por lixiviados. Por ejemplo, en Cataluña, España reportaron la presencia organofosforados como el Etión, Fenitrotión, Metidatión, Clorpyrifos y Clorfenvinfos, y plaguicidas organoclorados como el: Lindano, Aldrín, Dieldrín, Endosulfato I, Endosulfato II y Endosulfan sulfato.

También se reportan desastres ambientales como el que señala Bejarano-González *et al.*, (2009) donde se derramaron 15, 000 litros de Endosulfan en Brasil el 18 de noviembre del 2008 sobre el río Pirapetinga, esto género que murieran de miles de peces, aves, y mamíferos silvestres, dado que el Endosulfan tiene particularidades genotóxicas, neurotóxicas, provoca toxicidad endocrina, afecta el desarrollo embrionario y fetal (Bejarano-González *et al.*, 2009).

Los cultivos, el uso de plaguicidas en ellos, y además la aplicación de fertilizantes son actividades que contaminan a largo plazo el acuífero, Vargas-Zuñiga (2004) menciona que el sector que más contamina el agua subterránea es la agricultura precisamente por la aplicación de fertilizantes y plaguicidas contaminando los acuíferos subterráneos en Costa Rica.

La contaminación del agua subterránea por fertilizantes, plaguicidas es alta, y recientemente los contaminantes emergentes se suman a la carga de contaminantes que reciben las aguas residuales y, por lo tanto, el agua y los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, Damiano-Vásquez, (2018) realizó un estudio y su objetivo fue mejorar un modelo hidrológico del acuífero de Valencia sur, además, hizo una recopilación acerca de los estudios de contaminantes emergentes presentes en agua subterránea y menciona que se reportaron 169 compuestos, los cuales 144

eran farmacéutico, 37 eran antibióticos, 37 eran analgésico-antiinflamatorio, 24 anticonvulsivos y 17 eran fármacos cardiovasculares.

1.5 Presencia de Compuestos Orgánicos Persistentes en México

Se destaca los reportes de Madrigal (2015), quien evaluó el efecto de la contaminación del agua subterránea en 10 pozos en Guadalajara, y los resultados mostraron que existe presencia de 10 compuestos persistentes (COP's), los cuales fueron: 0.00003 mg/L de Aldrin, 0.00003 mg/L de Dieldrín, 0.00001 mg/L de Endosulfán, 0.001 mg/L de DDT, 0.002 mg/L de Lindano, 0.001 mg/L Hexaclorobenceno, 0.00003 mg/L de Heptacloro, 0.00003 mg/L de Epóxido de Heptacloro, 0.02 mg/L Metoxicloro y 0.03 mg/L 2,4-D. Además, Velázquez *et al.*, (2017) realizaron un estudio de vulnerabilidad en el agua subterránea (pozos) de 18 comunidades de Villa Guerrero, México, debido a la contaminación de compuestos orgánicos persistentes. Para la evaluación usaron el método paramétrico SINTACS (espesor de zona no saturada, infiltración, acuífero, tipo de suelo, superficie del suelo, zona no saturada y conductividad del acuífero). Los resultados del método de evaluación SINTACS señalan que el agua subterránea presenta riesgo de ser contaminada.

1.6 Estudios de contaminantes orgánicos en la península de Yucatán

Giácoman-Vallejos *et al.*, (2017) realizaron un estudio en 29 pozos en el transecto Mérida-Progreso. Realizaron 3 muestreos, mayo 2012, septiembre 2012 y enero 2013, las muestras fueron tomadas a una profundidad de 10-20 m, para evaluar la presencia de plaguicidas usando cromatografía de gases y sus resultados indicaron la presencia de DDT, DDE, DDD, Lindano, Endosulfán y Sulfato de Endosulfán.

Polanco-Rodríguez *et al.*, (2017) realizó una recopilación de la contaminación por COP's en Yucatán, México, menciona que el "Dr. Hideyo Noguchi" en la época de lluvias y secas, colectó muestras de agua y en su resultado indicaron la presencia de 324 detecciones en 14 tipos de plaguicidas organoclorados y sus metabolitos (α -Endosulfán, β -Endosulfán, Dieldrín, 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD, Endrin aldehído, Endosulfán sulfato, Heptacloro, α -Lindano, β -Lindano, γ -Lindano, δ -Lindano). En período de secas fue donde encontraron altas concentraciones, 13.617 ppm de Heptacloro, 10.86 ppm de δ -lindano, 6.53 ppm de α -Lindano, 5.23 ppm de γ -Lindano Heptacloro, δ -Lindano, α -Lindano.

Cobos-Gasca *et al.*, (2014) realizaron un estudio en ocho pozos ubicados en el anillo de cenotes, los municipios que abarcaron son: Celestún, Abalá y Buctzotz, así como en el cenote de Xlaká en Dzibilchaltún, las muestras de agua fueron recolectadas de manera superficial. La cuantificación de contaminantes fue por cromatografía de gases. Los resultados indicaron presencia de ocho tipos de plaguicidas: Aldrin, Clordano, HCH, Endosulfan, Endrin, Heptacloro, Metoxicloro, DDT y sus metabolitos.

Metcalf *et al.*, (2001) realizaron un estudio en la Riviera Maya, las muestras recolectadas fueron de cinco cenotes, los cuales dos cenotes ubicados en Puerto Aventuras y tres en Tulum, colectaron las muestras con ayuda de muestreadores pasivos (SPMDs: dispositivos de membrana semipermeables, POCIS: Muestreador integrador químico orgánico polar) de acero inoxidable y a distintas profundidades (1.5-10.5 m). Para la detección utilizaron cromatografía de gases y sus resultados indicaron la presencia de un herbicida (Clorofenoxi), así como otros contaminantes orgánicos emergentes tales como (cafeína, nicotina, acetaminofén, ibuprofeno y naproxeno), los autores sugieren que la presencia del Clorofenoxi se debe al uso de herbicidas en campo de golf cercano al sitio de muestreo.

Vargas, (2015), en su estudio realizado en la zona cañera al sur de Quintana Roo realizó con el propósito de determinar presencia de COP's en agua subterránea en 14 pozos, donde seis eran de uso agrícola, y ocho pozos de distribución de agua potables, el muestreo lo realizó en la época de lluvias y secas, la detección fue mediante cromatografía de gases. Sus resultados indicaron presencia de organoclorados, organofosforados y piretroides, el que tuvo mayor incidencia fue organofosforado siendo los Fenclorfos y Tionazine los analitos de mayor importancia, posteriormente el grupo de organoclorados donde el analito alfa BHC presentó mayor presencia.

Poot, (2016) llevó a cabo un estudio en Akumal y Chemuyil del estado de Quintana Roo con el fin de identificar contaminantes orgánicos en agua subterránea (Pozos y Cenotes), para identificar el impacto de su uso en campo de golf. El autor señala que colectó muestras de agua a 1 m de profundidad con el objetivo de identificar los plaguicidas presentes, mediante cromatografía de gases. Sus resultados indicaron que los organoclorados no están presentes, pero los organofosforados detectados fueron: Thionazin, Sulfotep, Disulfotón, Metil Paratión, Paratión, Famphur, y Forato.

Por todo lo anterior, la contaminación orgánica en la península de Yucatán es alta, por actividades agrícolas y turísticas. Todo ello indica contaminación orgánica y alteraciones en la calidad del agua y por ende efectos adversos en los ecosistemas acuáticos.

1.7 Regulaciones Internacionales que se aplican a estos compuestos

El agua es el recurso principal ya que proveen al 90% de la población, pero en los últimos años se ha generado una gran preocupación mundial es por eso que numerosos científicos que participaron en la conferencia internacional sobre el agua y medio ambiente en Dublín y las conferencias de las naciones unidas sobre medio ambiente y desarrollo en rio de janeiro, Brasil. Debatieron temas con la finalidad de proteger la calidad de agua (Arrazcaeta, 2002).

Ante los potenciales efectos adversos para la salud de la población generados por los COP's se elaboró el 23 de mayo del 2001, el marco del programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA, 2005), conocido como convenio de Estocolmo, a este convenio se adhirieron en un principio 90 países, entre ellas España. El convenio entro en vigor el 17 de mayo del 2004, el propósito fue “proteger la salud humana y el medio ambiente de COP's, disminuyendo o no producir más emisiones en el medio ambiente” (Domínguez-Boada *et al.* 2011). Comenzaron con reducir 12 contaminantes más nocivos, conocido como “docena sucia”: Hexaclorobenceno, Endrin, Mirex, Toxáfeno, Clordano, Heptacloro, DDT, Aldrin y Dieldrín, Policlorobifenilos, Dioxinas y Furano (PNUMA, 2005).

1.8 La biodiversidad en los sistemas acuáticos de la península de Yucatán

La biodiversidad en la península de Yucatán, por ejemplo, en la laguna y zona costera del Caribe mexicano entre Puerto Morelos y Cancún, se han identificado 41 grupos de Zooplancton (Álvarez-Cadena *et al.*, 2008), en la Bahía de Chetumal reporto 21 grupos de Zooplancton (Castellanos-Osorios, 2009), en la Bahía de Campeche se han reportado 72 especies pertenecientes a 39 géneros de ostrácodos (Gío-Argaez *et al.*, 2002), en Ría Celestún se han registrado 150 especies de fitoplancton, entre cianobacterias y diatomeas (Herrera Silveira y Morales-Ojeda, 2010). En Yucatán se han reportado 102 especies de rotíferos (García-Morales y Elías-Gutiérrez, 2004). En la isla de Cozumel se han identificado 45 especies o rotíferos de la clase Monogononta (Arroyo-Castro *et al.*, 2017).

Los microorganismos forman una fracción muy importante en la biomasa total, ya que son la fuente de la biodiversidad en nuestro planeta, además juega un papel sumamente significativo en el mantenimiento de los procesos biogeoquímicos, así como para la regulación del funcionamiento de la biosfera (Hernández-De Lira *et al.*, 2014). Los microorganismos representan un grupo grande y diverso de especies. Por ejemplo, el fitoplancton es responsables de los mayores procesos biogeoquímicos, realizando la mayoría de la producción primaria en el océano y casi la mitad de la producción primaria neta en la tierra (Zinger *et al.*, 2012).

Los microorganismos están presentes en todas partes de la tierra que sostendrán la vida. Además, en un cuerpo de agua generalmente indican los altos niveles de nutrientes en el agua (Arrascaeta *et al.*, 2015 y Carrillo-Jovel, 2019). También existen microorganismos patógenos que permiten transmisión de enfermedades con gran rapidez y pueden contagiarse por vía fecal-oral la propagación depende de la concentración del organismo patógeno materia fecal que son introducidos al agua. Se mencionan algunos microorganismos que son considerados patógenos, bacterias coliformes, virus, protozoos y en ocasiones helmintos y hongos (Ávila-Torres, 2017). Estos han incrementado debido a la contaminación del agua por diversas actividades antropogénicas (Bauer-Gottwin *et al.*, 2011).

La Península de Yucatán se caracteriza por su paisaje que carece de montañas, la mayor parte del agua de lluvia es infiltrada al subsuelo dado a su permeabilidad de la roca caliza, el florecimiento de estos paisajes se sostiene por el manto acuífero: por ejemplo, los cenotes. Desde el punto de vista de hábitat, los cenotes son relevantes ya que presentan conexiones a corrientes subterráneas, a la flora y fauna, y su aislamiento ha originado el desarrollo de nuevas especies endémicas (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

En el caso de la microflora, las bacterias son las que con mayor frecuencia son reportadas en cenotes, ya que ayudan como indicadores de contaminación, algunas bacterias representan la fuente de abasteciendo de energía para otros organismos que viven permanentemente en la oscuridad, Además, se conoce por estudios realizado que la mayoría de los invertebrados son los macrocrustáceos y el zooplancton, en la península se reporta que del 30 al 50% de las especies que se conocen en México de rotíferos, cladóceros y copépodos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

El zooplancton es un componente vital en los ecosistemas de agua dulce y es una de las primeras comunidades biológicas que reflejan los cambios o perturbaciones ambientales en su entorno, esta comunidad se utiliza como indicador de la condición de un ecosistema de agua dulce, sin embargo, la evaluación ambiental dependerá de un conocimiento detallado de todas las especies

presentes. En el sur de la península de Yucatán se realizó el primer inventario faunístico de comunidad de zooplancton en un acuífero kárstico abierto y oligotrófico, donde se describe la riqueza del zooplancton con la combinación de plancton.

Se secuenciaron 268 especímenes, la lista de especies conocidas aumento de 13 a 77 taxones, con proyección de 87 en total incluidos 77 taxones, con una proyección de 87 en total, incluidos cladóceros, copépodos, ostrácodos, larvas de peces, renacuajos, rotíferos, quironómidos, ácaros del agua (Montes-Ortiz y Elías-Gutiérrez, 2018). Algunas medidas de la diversidad de zooplancton de agua dulce más comunes en estos estudios son: riqueza, abundancia, índices de diversidad y distribución vertical, ha sido explicado por factores abióticos y bióticos como son las limitaciones de nutrientes, temperatura, radiación ultravioleta y depredación. La variación en abundancia, biomasa, comunidades y distribución vertical del zooplancton en zonas tropicales se han descrito sistemas durante los ciclos anuales, sin embargo, las causas de estas variaciones siguen siendo inexplicables, del mismo modo las comunidades del zooplancton en pequeños acuíferos de la península de Yucatán y los factores relacionados con su dinámica han recibido atención limitada (Cervantes-Martínez y Gutiérrez-Aguirre, 2001).

Los ostrácodos (microcrustáceos bivalvos) de agua dulce son uno de los paleobioindicadores más importantes e informativas de las regiones de la península de Yucatán, Campeche, Quintana Roo, Guatemala y Belice, ya que son abundantes en ambientes modernos. La combinación de la alta diversidad existente y fósil proporciona una base de información precisa de comunidades recientes. Los ostrácodos se pueden usar como indicadores paleo ambientales. En la península de Yucatán existen variaciones morfológicas dentro y entre las especies, y ya se han registrado, por ejemplo, Darwinulidae, *Cypretta* y *Cypridopsis* (Macario-González *et al.*, 2018). En las lagunas Kársticas de la PY se han realizados estudios de *Cypridopsis vidua*, *Cytheridella ilosvayi*, *Pseudocandona antilliana*, y *Darwinula stevensoni* con una distribución continua (Echeverría-Galindo *et al.*, 2019).

En Tizimín Yucatán se ha reportado la presencia de organismos acuáticos específicos. Los isópodos del grupo de crustáceos viven en ambientes continentales acuáticos presentan adaptaciones fisiológicas y anatómicas, los isópodos del género *Thermosphaeroma* habitan en manantiales de aguas termales por encima de los 30°C y los del género *Caecidotea* habitan en ambientes con salinidad específica. El género reportado *Creaseriella anops* (Ruiz-Cancino, 2013). Estos organismos acuáticos habitan en cuevas sumergidas, ambientes anquihalino, y estigobio. Los sitios donde fueron reportado son: Cenote del Pochote, Tizimín y Cueva de Spukil, Calcehtok, Yucatán. Además, se distribuyen en hábitat como cavernas y numerosos cenotes de

Yucatán y Quintana Roo. Estos organismos acuáticos habitan en cuevas y cenotes (dolinas) semi cerrados, principalmente en el estrato de agua dulce donde no llega la luz. Los organismos se encontraron desde la superficie hasta la profundidad de más de 50 m; y se han colectado en aguas marinas por debajo de la haloclina (Rocha-Ramírez *et al.*, 2009).

La extraordinaria diversidad en península de Yucatán, ofrece la posibilidad de aprovechar ventajas para usar varias especies como bioindicadores (Daam y Van den Brink, 2010). Sin embargo, hay pocas especies de zooplancton para estudiar los efectos adversos de la contaminación orgánica en agua subterránea, por ejemplo, existe el reporte donde las comunidades de helmintos se han utilizado como bioindicadores para evaluar plaguicidas organoclorados en la península de Yucatán (Pech *et al.*, 2009), y como la composición y abundancia de la fauna bentónica: incluyendo Polychaeta, Mollusca y Crustáceo se modifica con la presencia de contaminantes orgánicos (Gabriel *et al.*, 2012). Rendon-von Osten *et al.*, (2005) utilizaron el pez mosquito *Gambusia yucatana* como bioindicador para estimar la toxicidad del Clorpyrifos, Carbofurano y Glifosato. Rosario-Cruz *et al.*, (2005) utilizaron ácaros como organismo de prueba para estudiar la resistencia a flumetrina, deltametrina y cipermetrina.

Los grupos potenciales a utilizar como bioindicadores en la península de Yucatán son por ejemplo algunas especies de rotíferos, porque se ha sugerido que tienen un gran potencial (Moreira *et al.* 2016). Otro grupo a considerar son los ostrácodos, debido a que se han identificado 118 especies en la región Neotropical-Caribe con excelente distribución, hábitats, función ambiental, historia evolutiva y potencial para evaluar toxicidad (Cohuo *et al.*, 2017, Martens *et al.* 2008, Puckett *et al.*, 2016, Shuhaimi-Othman *et al.*, 2011). Otro ejemplo, es la especie *Ceriodaphnia cornuta* (Cladóceras), este crustáceo tenía el potencial de ser utilizado como bioindicador, debido a su patrón de distribución, hábitats y facilidad de cultivo, lo que hace de esta especie un buen modelo para evaluar la toxicidad de a sustancias químicas en las regiones neotropicales (Do Hong *et al.*, 2004; Ismail *et al.*, 2014, Pérez-Legaspi *et al.*, 2017).

JUSTIFICACIÓN

La contaminación antropogénica se ha ido incrementando en el transcurso de los años, a causa del desarrollo económico y crecimiento poblacional en la península de Yucatán, lo que conlleva el incremento de actividades como la agricultura, la ganadería, y las actividades turísticas, por lo tanto, aumentan el uso de plaguicidas, fertilizantes y antibióticos que son liberados al medio ambiente. Y se convierten en contaminantes del agua subterránea, dado la vulnerabilidad del sistema kárstico.

Las actividades económicas, sociales y culturales juegan un papel muy importante a nivel internacional, nacional, y estatal, como también para la península de Yucatán, son imprescindibles, sin embargo, hay un riesgo, al realizar intensamente todas estas actividades. El riesgo se incrementa cuando no se comprende o estudia la contaminación del agua, y los efectos a la vida acuática y la salud humana desde varias perspectivas o hipótesis de investigación. Desde hace más de diez años, en la península se han caracterizado, identificado y analizado contaminantes orgánicos, pero son pocos los estudios que analizan las diferencias en los estratos de agua dulce. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como principal objetivo generar información sobre el tema de la contaminación orgánica en los estratos de agua dulce, y sus posibles efectos en la diversidad biológica. Con la finalidad de que la información generada del comportamiento y la concentración de contaminantes orgánicos en la columna estratificada del sistema kárstico, proveerá un modelo conceptual, que, en suma, con lo reportado por otros autores, contribuirá al entendimiento y su peligro de la contaminación del agua y sus efectos sobre la vida acuática.

HIPÓTESIS

La contaminación orgánica está presente en todos los estratos de agua dulce y en consecuencia se observan efectos adversos en el zooplancton.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la presencia/ausencia de contaminación orgánica en los estratos de agua dulce de una zona con actividad agrícola y una zona con actividad turística en la península de Yucatán y analizar si existen efectos adversos en la diversidad de zooplancton.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Detectar presencia/ausencia de contaminantes orgánicos en el estrato de agua dulce en una zona con actividad agrícola y una zona con actividad turística.
2. Obtener la riqueza y la abundancia del zooplancton en los estratos de agua dulce de los sitios de estudio de las dos zonas seleccionadas.
3. Identificar si existen efectos adversos en la diversidad de zooplancton debido a la presencia de contaminantes orgánicos en los sitios de estudio.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

Para este estudio se ubicaron sitios en zonas agrícolas al norte de Yucatán y en zona recreativa del estado de Quintana Roo.

2.1.1 Importancia de la zona agrícola de Yucatán, Tizimín y Panabá

La agricultura de Yucatán es un conjunto de procesos productivos agrícolas, pecuarios y forestales. La agricultura se ha venido diversificado en las últimas décadas y desplazándose lentamente al henequén, maíz, de igual manera avicultura, la ganadería bovina y los cítricos (Ritter, L. *et al.*, 1995).

La agricultura abarca desde sistemas de subsistencia hasta agricultura intensiva comercial, en el primero el agricultor cultiva para su insumo limitado y el de su familia, el segundo involucra grandes extensiones de tierra, así como el uso de pesticidas y fertilizantes. La agricultura impacta a la naturaleza alterando la estructura del suelo y contamina el agua por el uso de fertilizantes (Pacheco y Cabrera, 1996).

En el sector agropecuario en años recientes se ha incrementado la producción de alimentos de calidad para cumplir con los requisitos que solicitan los mercados extranjeros y zona turística de Quintana Roo, para producir con calidad necesitan de uso de químicos, así como el uso de grandes invernaderos y unidades especializados cerca de los centros urbanos de Mérida, Tekax, Valladolid y Tizimín (Ramírez-Cancino y Rivera-Lorca, 2010).

Yucatán es muy conocidos por ser productor de ganado y en el transcurso de los años han aumentado la producción dado a sus condiciones fitosanitarias favorables, infraestructura y cercanía a los mercados. La cría de ganado bovino se ha expandido en superficie y en número de cabezas de manera significativa en los últimos 50 años (Eastmon y de Fuentes, 2006).

2.2 Tizimín Yucatán

Tizimín se encuentra en las coordenadas 21°11'49.59 N y 88°09'30.56 O; limita al norte con el municipio de Río Lagartos; al este con el Golfo de México y Quintana Roo; y al sur colinda con los municipios de Espita, Chemax, Temozón y Calotmul y al oeste con los municipios de Espita, Sucilá, Panabá y Río Lagartos. De espacio territorial abarca el 10.36% del estado. tiene 113 localidades y una población total de 69 553 habitantes (Atlas de riesgos naturales, 2014, INEGI, 2009).

2.3 Panabá Yucatán

Se encuentra en la región noreste con cabecera en Tizimín. Localizado entre las coordenadas 21°17'49.47 N y 88°16'12.44 O, Colinda al norte con San Felipe - Río Lagartos; al sur con Tizimín - Sucilá; al este con Tizimín y al oeste con Sucilá. Posee una altitud promedio de 17m sobre el nivel del mar. Panabá abarca un área de 788.15 Km² (PDM, 2015). Las zonas cercanas a esta localidad se considera como el sector primario yucateco ya que forma parte de producción ganadera (PDM, 2015).

2.4 Actividades predominantes en Tizimín y Panabá

Las actividades que predominan es la agricultura y ganadería que se llevaba a cabo en la temporada de primavera-verano (Ávila, j. y Sansores, 2018). En el estado de Yucatán posee la mayor cantidad de producción bovina, con un total de 98%, cuyo inventario es de 4,720 cabezas según censo de 1996. Los municipios ubicados en la zona oriente son: Sucilá, Espita, San Felipe, Panabá, Tizimín, Buctzotz y Valladolid (Martínez *et al.*, 2002).

La producción bovina se caracteriza por el uso de sistemas de pastoreo y ha ocasionado el mayor impacto sobre el cambio de uso de suelo, ya que involucra realizar la tumba de monte, así habilitar establecimiento de praderas. La superficie total dedicada a la ganadería es de 758 027 ha en 2001 y 845 986 ha en 2004; incremento de 19% a 21%, el cual como se mencionó anteriormente está relacionado con el cambio de uso de suelo para la ganadería.

Los municipios de Tizimín y Panabá presentan mayor superficie ganadera. Tizimín en el 2001 contaba con una superficie ganadera de 215 128 Ha y en 2004 con 242 451 ha, Panabá contaba con 51 770 ha en 2001 y en 2004 49 600, estos cambios varían en el transcurso del tiempo (Duran y Méndez, 2010).

En el ámbito de la agricultura que ahí se practica tiene sustanciales plantaciones de maíz, trigo y jatropha, así como invernaderos dedicados a la producción de papaya (Echeverría-Galindo *et al.*, 2019).

2.5 Importancia hidrogeológica de la zona agrícola (terreno Pockmarked)

La zona de “Pockmarked” es una extensa zona en el norte de Yucatán central en la que los cenotes abundan en un karst relativamente maduro. Según Pope *et al.*, (1996), sus características superficiales son las más antiguas y más elevada de la península. Perry *et al.* (1995) han presentado evidencia de que este desarrollo kárstico es, en parte, un proceso que resulta de la disolución de CaSO_4 de evaporitas del Terciario y/o anhidrita/yeso de la brecha de impacto del (Cretácico-Terciario9 K/T. El límite occidental del Terreno Pockmarked coincide con el Anillo de Cenotes y marca el límite entre la zona exterior sustentada en camas evaporíticas y la brecha de impacto de evaporitas del Cretácico terminal (Ward *et al.*, 1985) y la zona interior en el cual los horizontes evaporíticas están ausentes o demasiado profundos para interactuar con las aguas subterráneas.

La zona con afloramientos estratificados, fragmentos de roca caliza y depresiones de diferentes tamaños. Las características que sobresalen de los diferentes tipos de hundimientos son: dolinas, cenotes, sumideros y pozos de agua). Debido a la composición geológica ocurre fácilmente infiltración en el subsuelo (Ávila y Sansores, 2018).

2.6 Importancia de la Zona recreativa en Quintana Roo

La selección de los sitios que no tienen actividades agrícolas, pero si un enfoque turístico servirá para hacer un comparativo en la diversidad de zooplancton, y en la detección del contaminante. El estado de Quintana Roo cuenta con una superficie de 44,705 km² se ubica al sureste del país. Tiene un clima cálido subhúmedo, con una temperatura anual de 26°C. Las actividades principales del estado de Quintana Roo, según INEGI, (2009) es el comercio, zonas turísticas y pesqueros (Secretaría de economía, 2019).

2.6.1 Puerto Morelos, Quintana Roo

El municipio de Puerto Morelos es un puerto principal del estado mexicano de Quintana Roo, tiene como ubicación: Latitud 20°51'N, Longitud 86°54'W, se sitúa al norte del Estado de Quintana Roo. Además, es uno de los pueblos pescadores y que presenta un arrecife de coral que forma parte de la segunda barrera más a nivel mundial, también es atracción para los turistas.

2.6.1.1 Hidrogeología

Por la naturaleza del sistema Kárstico y el escaso suelo que posee Quintana Roo, el agua de lluvia se infiltra rápidamente sobre las rocas calcáreas hacia el acuífero. La acumulación del agua en el sistema subterráneo produce una diferencia de niveles hidrostáticos que establece un flujo subterráneo de tierra al mar.

2.6.1.2 Turismo (Ruta de los cenotes)

En Puerto Morelos se ha incrementados las actividades turísticas, también existen transectos que presentan servicios sobresalientes en el área turístico como por ejemplo la ruta de los cenotes que se encuentra en trayecto de Leona Vicario - Puerto Morelos, en ello se pueden acceder a diversos cenotes (Instituto nacional de ecología y Semar, 2000).

2.6.1.3 Cenote Verde Lucero

El cenote Verde Lucero se encuentra en el km 18 de la carretera puesto Morelos-Leona vicario con las coordenadas 493121.003E, 2306699.925N. Se pueden realizar varias actividades como: bucear y nadar.

2.6.2 Solidaridad Quintana Roo

El municipio de Solidaridad cuya cabecera es Playa del Carmen, y comprende el territorio de la parte continental. Tiene un área de 4 245 km², que representa el 8.4% de la extensión del estado. El crecimiento de Solidaridad va a la par del desarrollo turístico, principal la actividad económica y se ha dado a conocer a nivel mundial como uno de los destinos de playa más atractivos, también como principal eje urbano del Corredor Cancún-Tulum (Camacho Lomelí, 2015 y CCPY, 2006).

2.6.2.1 Cenote Chac Mool

El cenote Chac Mool se ubica cercano a playa del Carmen, con las siguientes coordenadas 474239.361E, 2268198.66N es un lugar turístico, además se encuentran cercano a los cenotes: "Kukulcan" y "Little brother" (Salvado, 2015).

2.7 Ubicación de la zona de estudio

En el siguiente mapa de la figura 5 se puede observar la ubicación de cada sitio de estudio.



Figura 5. Mapa de los sitios de estudio en los estados de Yucatán y Quintana Roo.

Sitio 1. Cenote Kikil (en color verde), este sitio se seleccionó dada su cercanía a las actividades agrícolas de la zona (cultivo de alimento para ganado).

Sitio 2. Cenote Verde Lucero (en color morado) este sitio es uso exclusivo para el turismo/recreacional.

Sitio 3. Cenote Chac Mool (en color rosa) este sitio al igual que cenote Verde Lucero no presenta fuente de contaminación agrícola, pero sí de uso turístico.

2.8 Diseño experimental Sistema Recolector Nautilus (SiReNa) CICY

2.8.1 Prototipo 1

Se elaboró un prototipo o un modelo de utilidad para recolectar zooplancton a diferentes profundidades. Usando materiales prácticos y de bajo costo. En la figura 6, se muestran fotografías del modelo y algunos de sus componentes.

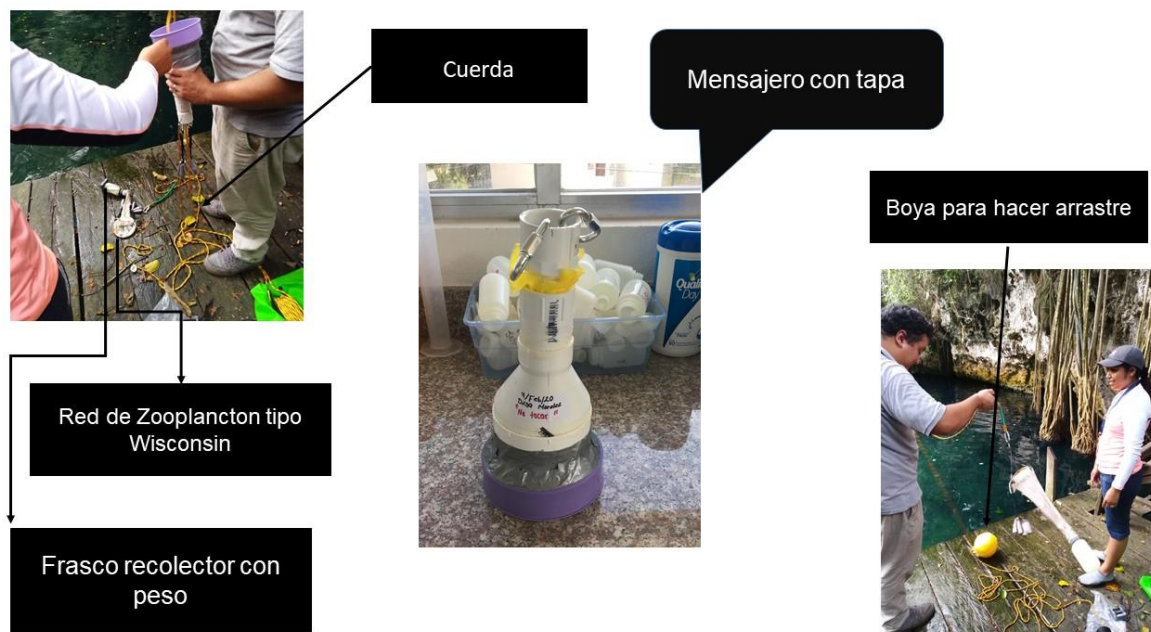


Figura 6. Imagen de diseño del prototipo 1 Sistema Recolector, elaborado en PowerPoint.

Se realizaron mejoras en el diseño del primer prototipo dado que no cerraba muy bien el mensajero y colectaba agua en todo el estrato dulce.

2.8.2 Construcción del Sistema Recolector final

Se construyó un segundo prototipo para recolectar organismos zooplanctónicos por arrastre en lances horizontales, oblicuos y verticales, ver figura 7.

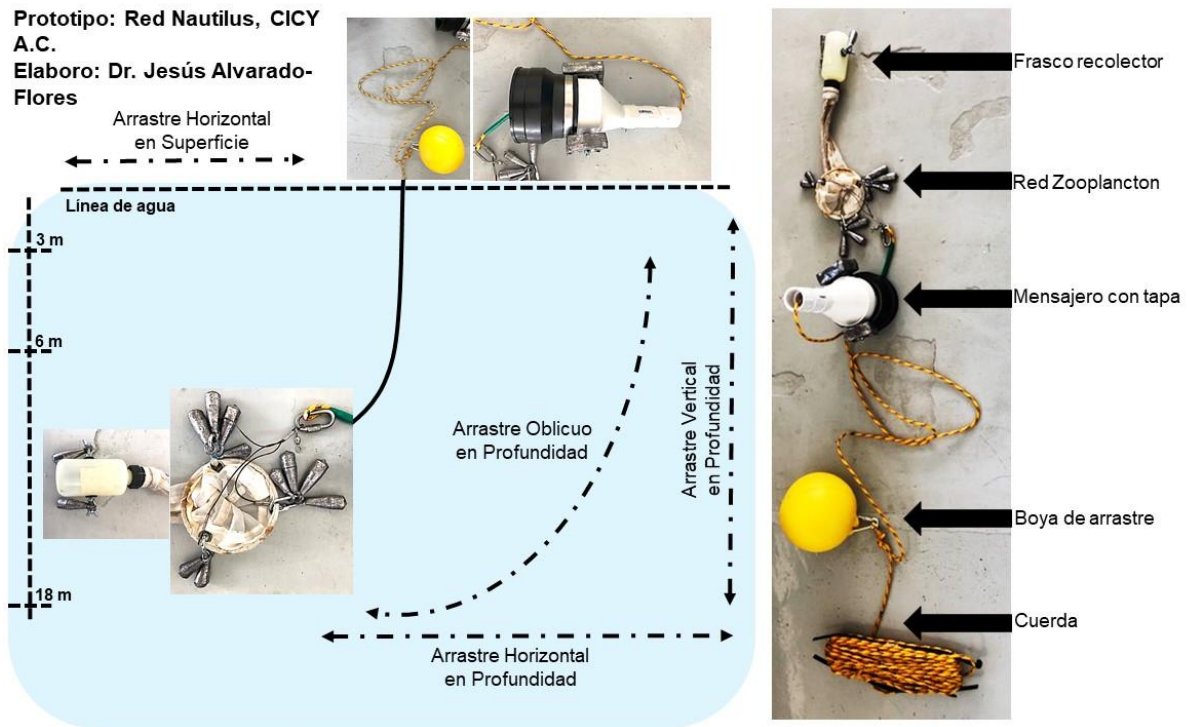


Figura 7. Modelo de utilidad Sistema Recolector para arrastre en profundidad.

El presente modelo de utilidad denominado Sistema Recolector Nautilus, elaborado en el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., este fue el que tuvo mejores resultados en cuestión de hacer arrastres y la nueva tapa fue la más óptima para que no causará contaminación en el estrato de agua dulce de los sitios de estudios, ya que se le agregaron más peso tanto a la tapa, así como a el frasco recolector. Por lo tanto, el prototipo dos fue el que se eligió para utilizarlos en campo. El prototipo se encuentra en revisión para registrarlo como modelo de utilidad ante el departamento de gestión tecnológica del CICY.

2.9. Trabajo en campo

El trabajo en campo se llevó a cabo en la época de secas (marzo del 2019)

2.9.1 Colecta de las muestras de agua subterránea

Se colectaron muestras del estrato de agua fresca (dulce) utilizando la Botella Van Dorn (marca Wildco) a tres profundidades (1, 4 y 8 m) en el cenote Kikil y cenote Verde Lucero y a dos profundidades en el cenote Chac Mool (1 y 4 m). Para realizar la colecta de agua, primero se enjuago la botella con agua del sitio, después se sumergió a la profundidad deseada, y se tomó agua cerrando la botella con el mensajero, esto se hizo dos veces, finalmente el volumen deseado se colocó en una cubeta y se almaceno el agua en los frascos correspondientes.

Tabla 1. Número de muestras y volumen de cada análisis.

Tipo de análisis	Número de Muestras	Volumen total
Nutrientes (NO ₂ , NO ₃ y PO ₄)	24	96 mL
Antibióticos	8	32 mL
Bacteriología	16	1,500 mL
Zooplancton Cubeta	6	600 mL
Zooplancton Botella	16	1,600 mL
Zooplancton Nautilus	16	1,600 mL

2.9.2 Colecta de las muestras de Zooplancton

2.9.2.1 Estrategia 1 (botella muestreadora)

Con la botella Van Dorn, se colectaron 6 litros de agua, por cada profundidad. El agua se colocó en una cubeta y posteriormente se filtró con la red de zooplancton para concentrar la muestra en dos frascos de 100 ml. El orden con lo cual se tomaron las muestras en cada sitio de estudios fue primero fue de 8 m, continuando 4 m y concluyó con 1 m. Para no afectar la diversidad de especies e inducir la migración vertical del zooplancton. La metodología se llevó acabo a los realizado por Cervantes-Martínez *et al.* 2017.

2.9.2.2 Estrategia 2 (con cubeta)

Con una cubeta de plástico con volumen de 10 L, lavada y enjuada con agua destilada, se sujetó a una cuerda, posteriormente se lanzó al sistema acuático para realizar la colecta de agua por medio de un arrastre y tener en total 100 L. El agua se colocó en una cubeta y posteriormente se filtró con la red de zooplancton tipo Wisconsin de 54 μm para concentrar la muestra en dos frascos de 100 ml. Esta metodología fue empleada en todos los sitios en el estrato de agua dulce al primer metro de profundidad. La metodología realizada fue para tener información comparativa con estudios previos realizados en la ruta de cenotes de Puerto Morelos donde se empleó este método para calcular la abundancia y riqueza de especies de zooplancton en la columna de agua.

2.9.2.3 Estrategia 3 (Sistema Recolector)

Se utilizó el diseño Sistema Recolector que se elaboró en las instalaciones del CICY. En primer lugar, se enjuaga el frasco recolector de 250 ml, así como la red de zooplancton tipo Wisconsin de 54 μm , después se hizo el primer arrastre a la profundidad de 8 m y se dejó caer la tapa (mensajero) para evitar recolectar y contaminar la muestra con otra profundidad. Se repitió en dos ocasiones la inmersión y arrastre del sistema en cada profundidad para finalmente tomar dos frascos de 100 ml y tener nuestras colectas de cada profundidad. Esto se hizo en cada sitio de estudio.

2.9.3 Medición de parámetros fisicoquímicos

Los parámetros que se midieron en campo durante el muestreo son: pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$) y oxígeno disuelto (mg/L). Los parámetros mencionados anteriormente nos ayudarán a conocer las condiciones físicas, tanto química del estrato de agua dulce de cada sitio de estudio, además se van a relacionar con el análisis de diversidad en Zooplancton. Para la medición de los parámetros se llevó a cabo con una sonda multiparamétrica, marca Hydrolab, modelo DS5.

2.10 Análisis de las muestras de agua subterránea

Las muestras colectadas en los sitios se transportaron al laboratorio de la UCIA, en la unidad de ciencias del agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Una vez en laboratorio se conservaron en refrigeración para su posterior análisis.

2.10.1 Preparación de la muestra para elementos mayores

Los frascos donde se guardaron las muestras de cada sitio se lavaron para el caso de cationes los frascos se reposaron por 24 horas en una solución al 5% de HClO_4 y para aniones en una solución al 5% de HNO_3 , posteriormente se lavaron con jabón libre de fosfato y finalmente se enjuagaron con agua destilada. Las muestras se filtraron con filtro de $0.45\ \mu\text{m}$ para eliminar la actividad microbiana que alterar la muestra (preservación por filtrado) a un volumen de 60 ml y se colocaron en los frascos previamente lavado para cationes y aniones, posteriormente el análisis de los elementos: cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) y aniones (Cl^- , SO_4^{2-}) (A.P.H.A. 1989). La técnica que se utilizó para el análisis de las muestras fue la cromatografía iónica 882 compact IC Plus con detector IC Conductivity Detector de Metrohm (CE) y con una columna Metrosep A 4 250/4.

2.10.2 Análisis de alcalinidad

Las muestras se colectaron en frascos HDPE de 200 ml por cada sitio de estudio, sin embargo, para en análisis de alcalinidad se requirió un volumen de 60 ml. El volumen de las muestras de cada sitio de estudio se filtró con un filtro de $0.45\ \mu\text{m}$. Para llevar a cabo el análisis de alcalinidad se empleó el kit de prueba HACH universal digital titrator, utilizando la solución de ácido sulfúrico al 0.16 N. También un pH metro para ir midiendo el cambio de pH. La alcalinidad es una medida su capacidad para neutralizar un ácido, es por eso que se trabajó con el método de titulación de GRAN ya que permite ver los cambios que va sufriendo el pH al ir añadiendo un ácido (ácido sulfúrico 0.16 N) hasta llegar a un pH de 4.33.

2.10.3 Análisis de nutrientes ($\text{NO}_2\text{-NO}_3$)

El volumen que se utilizó para realizar en análisis de nitritos y nitratos fue de 4 ml, con el kit eXact micro 7+ que consiste en utilizar pequeñas celdas que contienen el reactivo eXact strip Micro NO_2 part No. 486623 para nitritos y eXact strip Micro NO_3 part No.486655 para nitratos. Primero se verifico que el espectrofotómetro que incluye el kit debe estar en calibrado como indica en manual de análisis, posteriormente se agregó el volumen de la muestra y una vez colocada se introdujo la celda con pequeños movimientos por 20 segundos, luego se presionó READ por 6 minutos para nitritos y 10 minutos para nitratos para la medición de la muestra, los resultados de la muestra se obtuvieron presionando nuevamente READ por 20 segundos. Fue necesario leer los resultados de las muestras con la tabla que proporciona el manual para $\text{NO}_2\text{-NO}_3$ en partes por millón (ppm). Los pasos se hicieron por cada muestra de los sitios de estudio

2.10.4 Análisis de fosfato (PO_4)

El volumen que se utilizó para realizar en análisis de fosfato fue de 4 ml, el kit que efectuó eXact micro 7+ al igual que se utilizó para nitritos-nitratos se utilizó el reactivo eXact strip Micro PO_4 part No. 486814. Primero se verifico que el espectrofotómetro que incluye el kit debe estar en calibrado como indica en manual de análisis, posteriormente se agregó el volumen de la muestra y una vez colocada se introdujo la celda con pequeños movimientos por 20 segundos, luego se presionó READ por 2 minutos para la medición de la muestra, los resultados de la muestra se obtuvieron presionando nuevamente READ por 20 segundos. Fue necesario leer los resultados de las muestras con la tabla que proporciona el manual para PO_4 en partes por millón (ppm).

2.10.5 Detección de Presencia/ausencia de contaminantes

Las muestras de antibióticos de cada sitio se colectaron en frascos de polietileno con volumen de 250 mL, para que posteriormente sean analizadas por la técnica cromatografía de gases, con fin de determinar los tipos de contaminantes orgánicos presentes. La metodología que se empleará para la cuantificación de contaminantes orgánicos será como lo menciona método 505 de la EPA (1986). En específico se eligieron los antibióticos porque tiene un comportamiento recalcitrante. Para la lectura de presencia y ausencia de antibióticos se usó los kits SNAP IDEXX. Las pruebas

SNAP (SNAP Beta-Lactam Kit, SNAP Tetracycline Kit y SNAP Gentamicin Kit) de los laboratorios IDEXX, ya que pueden detectar presencia de residuos o trazas de diversos antibióticos en muestras de leche, por ejemplo: betalactámicos, (incluyendo penicilina G), Tetraciclina y Gentamicina, pero se han adaptado en laboratorio para realizar estudios de detección en muestras de agua subterránea, las pruebas SNAP han sido de gran utilidad en los laboratorios debido a su practicidad.

El desarrollo del testigo se puede observar en el ANEXO 2

2.10.6 Análisis de Bacteriología: Coliformes fecales y *Escherichia coli*

Las muestras se colectaron en frascos HDPE con volumen de 100 ml y el kit que se utilizó para llevar a cabo el análisis fue de Colilert de IDEXX, con el método cromogénico. El análisis se llevó a cabo dentro de las 24 horas de haber colectado la muestra ya que los microorganismos tienen un tiempo de vida muy corto. Las muestras se trabajaron dentro de una campana de flujo laminar, marca Esco, para evitar que se contaminen y una selladora para cerrar las placas que contenía las muestras, modelo Quanti-Tary 2x, posteriormente se introdujo a la incubadora con una temperatura de 35.5 °C, una vez transcurrido el tiempo de incubación se leyeron los resultados de Coliformes fecales y para *E. coli* se utilizó una lámpara UV. Los datos de la lectura se trabajaron en Excel y así conocer los números más probables (NPM) de cada muestra.

2.11 Análisis estadísticos

2.11.1 Estadística descriptiva de parámetros fisicoquímicos

Se ordenaron los datos y resumieron usando estadísticos descriptivos como medidas de tendencia central, dispersión de los datos, y se hicieron histogramas y gráficos con los valores obtenidos (Wayne, D. 1998; Seoane, T. 2007), usando el software Statistica 7.0 (Aguilar-Flores, 2020).

2.11.2 Análisis de escalonamientos multidimensional (MDS)

Adicionalmente se realizaron análisis MDS para que nos permita expresar y representar las proximidades de los valores por sitio de los parámetros e indicadores utilizados (Lozares-Colina y López-Roldán 1991, López-Roldán y Fachelli 2015 y Aguilar-Flores, 2020). Se realizó análisis MDS a los resultados de los elementos mayores, que están integrado por los cationes Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} y los aniones Cl^- , SO_4^{2-} de cada uno de los sitios de estudios, conforme a cada profundidad del estrato dulce, con la finalidad de observar si existe similitud en los elementos mayores.

2.12 Análisis de la diversidad de Zooplancton (Trabajo de laboratorio)

2.12.1 Proceso de preservación y análisis de muestras de Zooplancton

Las muestras de zooplancton que se colectaron en campo por profundidad de cada sitio de estudio se transportaron al laboratorio, inmediatamente se separaron 10 ml de muestra sin preservar en una caja Petri, con la finalidad de observar las especies presentes y cultivar a los organismos para poder realizar una mejor identificación. De las muestras recolectadas, se tomaron 100 ml y se volvió a concentrar a un volumen de 10 ml y se preservaron con formol al 5%, esto con la finalidad de conocer la diversidad del zooplancton y facilitar su conteo e identificación.

2.12.2 Diversidad de Zooplancton

2.12.2.1 Diversidad de los sitios de estudio

Para conocer la diversidad del zooplancton que está en relación con la riqueza (número total de especie) y abundancia (número de individuo de una especie/litro) se trabajaron con las muestras de los sitios de estudio. Para contabilizar la abundancia de especies se utilizaron placas de 24 pozas, de las muestras concentradas a 10 ml, preservadas en formol 5% y etiquetadas de cada sitio de estudio, se tomó 1 ml de muestra con una pipeta Pasteur y se introdujo a una poza, también se añadió 100 μl de GLYCEROL Biotechnology CAS#56-81-5 para su manipulación y

conservación, de esta manera se facilita el montaje en laminillas de vidrio para obtener fotografías en el microscopio óptico (Iannacone y Alvareño, 2006).

Se hicieron 3 repeticiones de 1 ml de cada muestra, por profundidad, por método de colecta de cada sitio de estudio, tal como se ejemplifica en la siguiente figura 8.

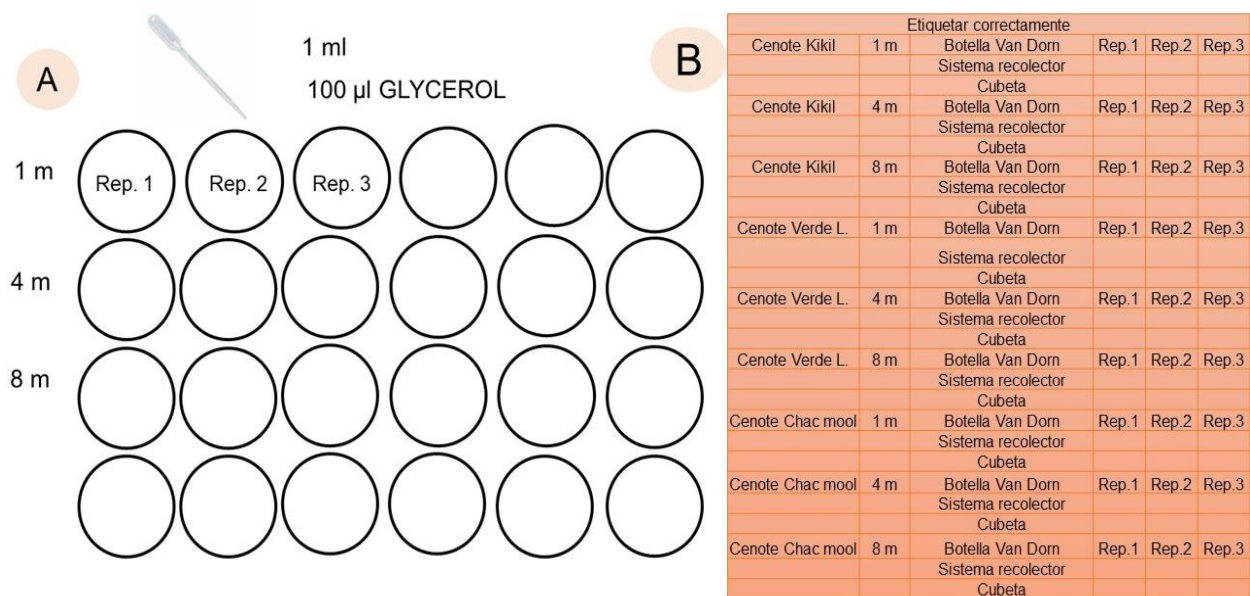


Figura 8. Pasos para trabajar las muestras de Zooplancton de cada sitio.

En el inciso A de la figura 8, se puede observar la forma que se colocaron las muestras, en la primera fila de la placa donde se colocó 1 ml de muestra (Rep. 1) y 100 µl de GLYCEROL, hasta concluir con la tercera replica (Rep.3) de cada profundidad y el orden con que se etiquetaron y contabilizaron todas las muestras se puede observar en la imagen del inciso B, donde se comenzó con Cenote Kikil, a una profundidad de 1m, de la botella Van Dorn, después con la profundidad de 4 m, y por último de 8 m, luego se contabilizó el mismo sitio Cenote Kikil, con las mismas profundidades pero ahora incluyendo todas las réplicas. En cuanto al método de recolecta con el sistema Nautilus (Sistema Recolector), se incluyeron las mismas profundidades y número de réplicas. Finalmente se cuantificó también la abundancia con el método de colecta usando la cubeta, sin embargo, en este método solo se analizó la profundidad de 1 m, ya que el arrastre fue solo superficial, pero se incluyó el análisis para su comparación y discusión con resultados previos por otros autores. Para los siguientes sitios de estudio Cenote verde L. y Cenote Chac Mool se trabajaron tal y como se describió la información del Cenote Kikil.

2.12.3 Identificación de especies de zooplancton

Para la identificación de las especies de zooplancton se hicieron visualizando las muestras preservadas al 5% con un microscopio invertido marca NIKON modelo TS100 y también se utilizaron claves pictóricas para reconocer a los especímenes según las realizadas por Walter Koste (1978) y las bitácoras de investigación de Pérez-Yáñez, (2020) que se encuentran en laboratorio de la UCIA, CICY. También se utilizaron claves para identificación de Bdelloideos por Claudia Ricci y Giulio Melone (1999), adicionalmente se empleó la búsqueda de fotografías de especies en la plataforma de catálogo mundial de rotíferos, link disponible en:

<http://www.rotifera.hausdennatur.at/Species/Index/459?AddScansGrid-page=6>

2.12.4 Toma de fotografías de las muestras de los sitios de estudio

Se realizaron preparaciones permanentes con las muestras de glicerol y formol que se usaron para cuantificar la abundancia, de la siguiente manera. Primero, se retiró 1 ml de la poza con los 100 µl de glicerol de las pozas y se colocaron en una porta objeto de vidrio, después se le colocó un cubre objeto con plastilina en cada esquina para que las muestras no se aplasten, y finalmente se sellaron con barniz transparente, se agregó su etiqueta y dejó secar para después tomar fotografías y fortalecer el análisis taxonómico.

La preparación de las laminillas con las muestras contenidas, se hicieron con el orden con el que se realizaron la diversidad de los sitios de estudio del inciso, a y b de la figura 8. Una vez terminadas de realizar las laminillas, se llevaron a cabo la toma de las fotografías con el microscopio compuesto marcas Zeiss Imager A2 Axio y una aplicación AxioVision SE64 Rel.4.8.

2.12.4.1 Contabilizar huevos, espermátóforos, color y lípidos en organismos

Las fotografías que se obtuvieron de los sitios de estudio e históricos, por profundidad y método colectado, se revisaron cada una de ellas con la finalidad de observar efectos adversos en los organismos, se buscaron cambios morfológicos, histológicos y fisiológicos acorde a las recomendaciones de Alvarado-Flores, (2019), Brande *et al.* (2013), Herold y Meadow, (1970), Tovar-Aguilar *et al.* (2019) y las variables a revisar fueron si presentaban rugosidad, colores diferentes en todo el cuerpo, también si el organismo tiene lípidos y en el caso de las hembras si portan huevos, espermátóforos y estructuras reproductiva.

2.13 Análisis de la diversidad específica

Para el análisis de la diversidad de zooplancton primeramente se trabajó con obtener la riqueza específica por profundidad y sitio.

Para obtener la abundancia específica se aplicará la siguiente ecuación:

$$\frac{N^{\circ} \text{ organismos}}{L} = \frac{(C)(V1)}{(V2)(V3)}$$

Donde C es el número de organismos cuantificados, V1 es el volumen que se concentró, V2 es el volumen contado y V3 es el volumen de la muestra. Los datos obtenidos de riqueza se graficarán utilizando software STATISTICA. La metodología será empleada acorde a Cervantes-Martínez y Gutiérrez-Aguirre (2015), Dodson y Silva-Briano (1996).

2.13.1 Índice Shannon-Weiner

Se calculó el índice de diversidad de Shannon-Weiner para observar las diferencias que existen en los diversos sitios de estudios en función riqueza y abundancia en las especies del zooplancton, siguiendo el método que empleo Gómez-Márquez *et al.*, (2013) y Pérez-Yáñez, (2020).

2.13.2 Índice de Simpson

El índice de Simpson (D) mide la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar pertenezcan a la misma especie

$$D = \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

Donde $\sum$ es la suma de todas las especies, n_i es el número de individuos de la especie i , N es el número total de individuos de todas las especies.

El valor de D oscila entre 0 y 1. En ausencia de diversidad, donde hay solo una especie presente, el valor de D es 1. Cuando la riqueza de la especie se incrementan el valor se aproxima al 0. dado que cuanto mayor sea el valor de D menor es la diversidad, se resta 1 a D para obtener:

$$\text{Índice de Simpson} = 1 - D$$

El valor de este índice también oscila entre 0 y 1, pero ahora el valor se incrementa con la diversidad. En este caso, el índice representa la posibilidad de que dos individuos seleccionados al azar de una muestra pertenezcan a diferentes especies. Otro proceso es utilizar la inversa D :

$$\text{Índice inverso de Simpson} = 1/D$$

Magurran (2013)

2.13.3 Índice de Sørensen

El índice este basado en la presencia o ausencia de las especies, se utiliza una lista de especies de los dos sitios que serán comparadas y se calcula:

$$CC = 2C / (S1 + S2)$$

Donde $2C$ es el número de especies en común para las dos comunidades, $S1$ número de especie de la comunidad 1 y $S2$ número de especies de la comunidad 2.

El valor del índice oscila entre 0, cuando las dos comunidades no poseen especies en común, 1, cuando las composiciones de las especies de las dos comunidades son idénticas Magurran, (2013).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Caracterización fisicoquímica de los estratos de agua dulce

Se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos en los tres sitios de estudio y se muestran los promedios en la tabla 2 que corresponden a la temporada de secas correspondiente al mes de marzo del año 2020.

Tabla 2. Valores de los datos fisicoquímicos de cada sitio.

Parámetro	Cenote Kikil	Cenote Verde Lucero	Cenote Chac mool
Temperatura	25 °C	24 °C	25 °C
pH	7.49	7.56	6.61
Conductividad	1260 $\mu\text{s/cm}$	1111 $\mu\text{s/cm}$	2954 $\mu\text{s/cm}$
Oxígeno disuelto	2.286 mg/L	1.35 mg/L	1.68 mg/L

3.1.2 Perfiles de parámetros físicos y químicos en la columna de agua

Se realizaron perfiles de los parámetros fisicoquímicos en tres sitios: 1) cenote Kikil (a una profundidad de 8 metros) y 2) cenote Verde Lucero (a una profundidad de 8 metros), y 3) cenote Chac Mool (solo a una profundidad de 2 metros). Se observa en las figuras 9, 10, y 11 los perfiles de parámetros fisicoquímicos del cenote Kikil y Verde Lucero, se observan diferencias en los parámetros fisicoquímicos entre sitios, así como ligeras variaciones o cambios en función de la profundidad. El oxígeno disuelto, el pH y la temperatura, cambia a partir de 1m de profundidad en la columna de agua dulce en ambos sitios.

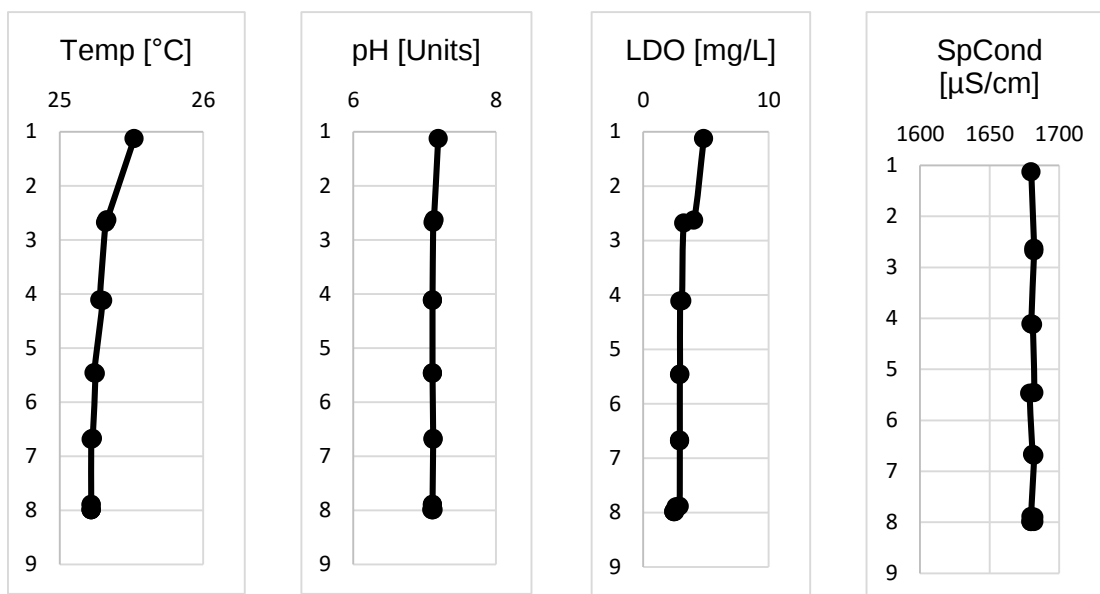


Figura 9. Perfil de los parámetros fisicoquímicos en la columna de agua del CK. Temp=temperatura, pH= potencial de hidrogeno, LDO= oxígeno disuelto, spCond= conductividad eléctrica.

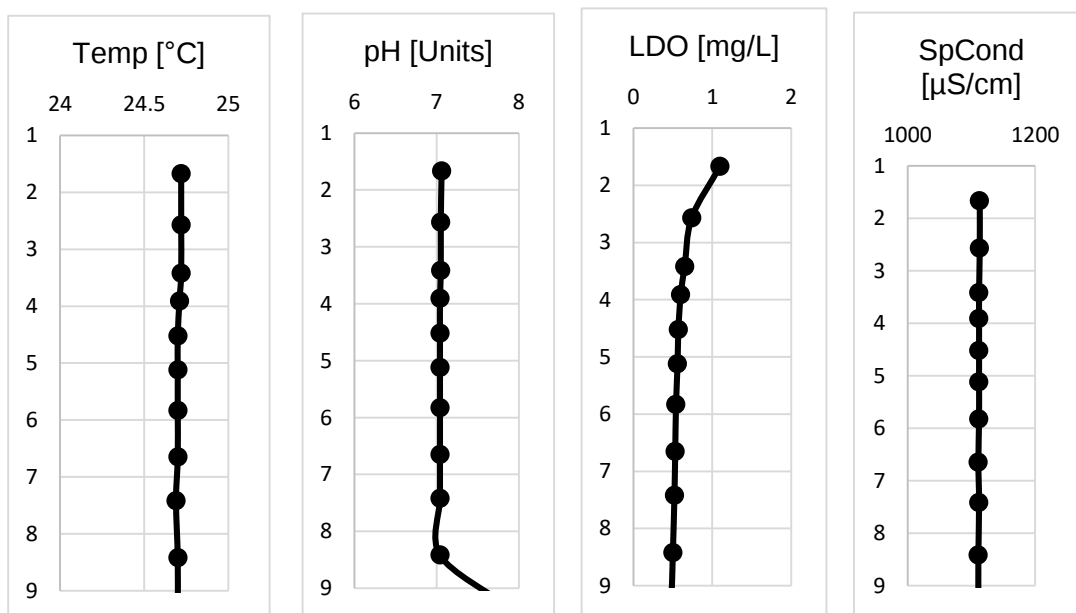


Figura 10. Perfil de los parámetros fisicoquímicos en la columna de agua del CVL. Temp= temperatura, pH=potencial de hidrogeno, LDO=oxígeno disuelto, spCond= conductividad eléctrica.

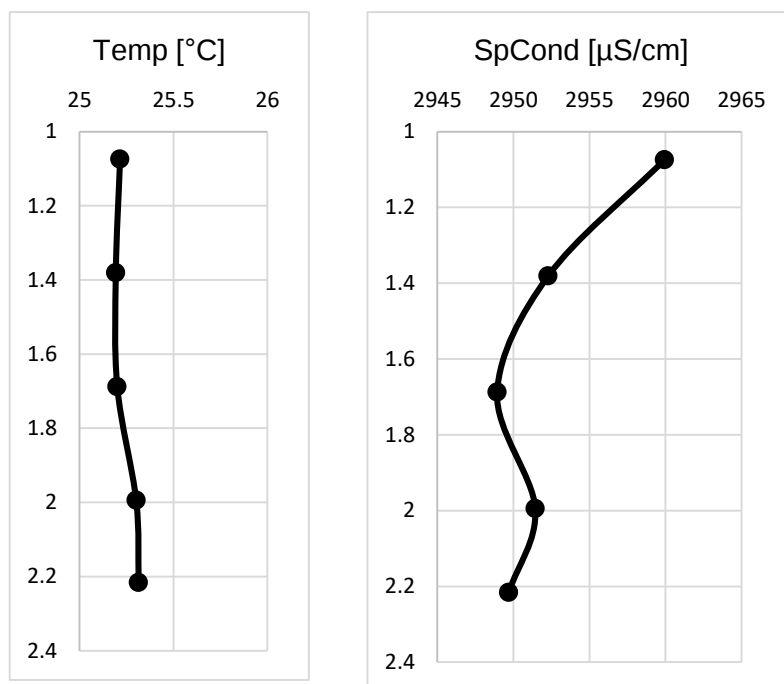


Figura 11. Perfil de los parámetros fisicoquímicos en la columna de agua del CCH. Temp= Temperatura, SpCond= conductividad eléctrica.

Los resultados de pH de las muestras de agua subterránea del estrato dulce del cenote Kikil, Verde Lucero y Chac Mool tienen valores que van desde 7.11 hasta 7.91, lo que indica que el agua es ligeramente básica.

La temperatura presento valores desde 24 a 25°C, los cual no se puede observar diferencia en los resultados.

Los valores de oxígeno disuelto oscilan de 1.35 a 2.286 mg/l, este parámetro si presento variación en los sitios de Verde Lucero y Kikil.

Los valores de conductividad eléctrica mostraron una variación desde los 1111 μs/cm en el Cenote Verde Lucero hasta 2954 μs/cm en el cenote Chac Mool.

Es sumamente importante mencionar que para el cenote Chac Mool no se pudo obtener toda la información fisicoquímica, dada las limitaciones sanitarias del COVID-19, en el mes de marzo del año 2021, eso fue la principal limitación para recabar toda la información de ese sitio. Sin embargo, se pudo medir la temperatura y la conductividad eléctrica.

3.2 Análisis hidrogeoquímico del agua

3.2.1 Análisis de elementos mayores del estrato dulce

En los tres sitios de estudio se midieron los cationes (sodio, calcio, magnesio y potasio) en tres profundidades. Y los aniones que se midieron fueron cloro, bicarbonato, carbonato y sulfato, los resultados se muestran en las tablas 3, 4 y 5, con los cuales se obtuvo la composición química del agua subterránea en el estrato dulce de cada uno de los sitios de estudio.

Tabla 3. Análisis de elementos mayores: condición hidrogeoquímica del cenote Kikil (CK).

Prof.=profundidad

CK						
Elementos mayores						
Cationes				Aniones		
Prof.	Ion	(mg/L)	(meq/L)	Ion	(mg/L)	(meq/L)
1m	Ca_2^+	113	5.6	Cl^-	413	11.6
	Na^+	201	8.7	SO_4^{2-}	55.9	1.1
	K^+	5.2	0.1	HCO_3^-	341.1	2.7
	Mg_2^+	61	5.0	$\text{CO}_3^{=}$	229.2	2.2
4m	Ca_2^+	120	5.9	Cl^-	420	11.8
	Na^+	197	8.5	SO_4^{2-}	58.6	1.2
	K^+	4.3	0.1	HCO_3^-	440.5	3.6
	Mg_2^+	57	4.6	$\text{CO}_3^{=}$	296.0	2.9
8m	Ca_2^+	120	5.9	Cl^-	422	11.9
	Na^+	194	8.4	SO_4^{2-}	58.1	1.2
	K^+	4.3	0.1	HCO_3^-	402.4	3.2
	Mg_2^+	59	4.8	$\text{CO}_3^{=}$	270.4	2.7

El análisis hidrogeoquímico en el cenote Kikil muestran que el catión sodio es el elemento que está más concentrado en el estrato dulce, y el menos concentrado es el potasio. Mientras que los aniones cloro y bicarbonato son los más concentrados en el agua, y el anión menos concentrado

es el sulfato. No se observan variaciones o cambios significativos de los elementos respecto a la profundidad del cenote.

Tabla 4. Análisis de elementos mayores: condición hidrogeoquímica del cenote Verde Lucero.
Prof.=profundidad

CVL						
Elementos mayores						
Cationes				Aniones		
Prof.	Ion	(mg/L)	(meq/L)	Ion	(mg/L)	(meq/L)
1m	Ca_2^+	133	6.6	Cl^-	198	5.58
	Na^+	111	4.8	SO_4^{2-}	39.5	0.82
	K^+	3.8	0.09	HCO_3^-	353.6	2.8
	Mg_2^+	31	2.5	$\text{CO}_3^{=}$	237.5	2.3
4m	Ca_2^+	140	6.9	Cl^-	205	5.7
	Na^+	117	5.0	SO_4^{2-}	40.6	0.8
	K^+	4.1	0.1	HCO_3^-	356.1	2.9
	Mg_2^+	34	2.7	$\text{CO}_3^{=}$	239.2	2.3
8m	Ca_2^+	126	6.2	Cl^-	214	6.0
	Na^+	104	4.5	SO_4^{2-}	41.1	0.8
	K^+	3.8	0.09	HCO_3^-	318.6	2.6
	Mg_2^+	29	2.3	$\text{CO}_3^{=}$	214.0	2.1

El análisis hidrogeoquímico en el cenote Verde Lucero muestran que el catión calcio es el elemento que está más concentrado en el estrato dulce, y el menos concentrado es el potasio. Mientras que el anión bicarbonato es el más concentrados en el agua, y el anión menos concentrado es el sulfato. Al igual que en el cenote Kikil, en el cenote Verde Lucero no se observan variaciones o cambios significativos de los elementos respecto a la profundidad del cenote.

Tabla 5. Análisis de elementos mayores: condición hidrogeoquímica del cenote Chac Mool.

Prof.=profundidad

CCH						
Elementos mayores						
Cationes				Aniones		
Prof.	Ion	(mg/L)	(meq/L)	Ion	(mg/L)	(meq/L)
1m	Ca₂⁺	64	3.1	Cl⁻	795	22.4
	Na⁺	186	8.09	SO₄²⁻	167	3.4
	K⁺	6.57	0.17	HCO₃⁻	271.3	2.2
	Mg₂⁺	31	2.5	CO₃⁼	210.3	2.1
4m	Ca₂⁺	61	3.0	Cl⁻	789	22.2
	Na⁺	188	8.1	SO₄²⁻	166	3.4
	K⁺	7.08	0.1	HCO₃⁻	300.5	2.4
	Mg₂⁺	32	2.6	CO₃⁼	239.5	2.3

Finalmente, el análisis hidrogeoquímico en el cenote Chac Mool muestran que el catión sodio es el elemento que está más concentrado en el estrato dulce, y el menos concentrado es el potasio. Mientras que el anión cloro es el más concentrados en el agua, y el anión menos concentrado es el sulfato. No se observan variaciones o cambios significativos de los elementos respecto a la profundidad del cenote.

3.2.2 Análisis de alcalinidad como sistema carbonatos (HCO₃⁻ y CO₃⁼)

A continuación, se muestra el resultado del análisis de alcalinidad por cada sitio de estudio y por profundidad, que está determinada por el ion bicarbonato HCO₃⁻ y el ion carbonato CO₃⁼, esto nos permite interpretar las condiciones de amortiguación en el estrato de agua dulce. En el diagrama se muestra la relación del método de Gran, en función del sistema carbonatos en base a H₂CO₃, HCO₃⁻ y CO₃⁼ y el pH. La amortiguación se da en un pH de 4.33 y 8.33, esto significa que si los valores del pH se direccionan a la izquierda del diagrama tienden a ser más ácidos, por el contrario, si se mueven a la derecha son más básicos como se muestra en la figura 12.

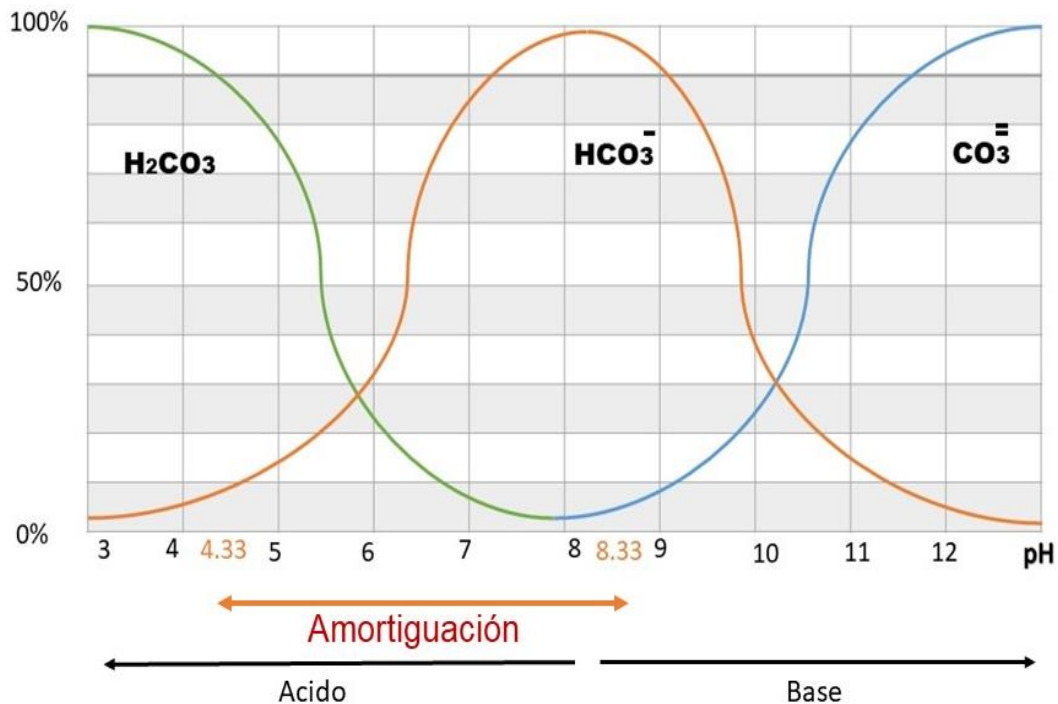


Figura 12. Diagrama de sistema carbonato.

En la tabla 6 se muestran los resultados de alcalinidad del estrato dulce del cenote Kikil, que está en función del sistema carbonato, se puede ver que a 1m el ion HCO_3^- es de 341.1 mg/L y en 8m es de 402.4 mg/L los cuales los valores son menores y a 4m el valor es mayor 440.5 mg/L, por lo tanto, con mayor capacidad de amortiguación, en el caso del ion $\text{CO}_3^{=}$ todos los valores se mantienen constantes con un rango de 229.2-296 mg/L.

Los valores de conductividad en cada profundidad del estrato no aumentan, es decir son semejantes.

Tabla 6. Resultados del sistema carbonato del cenote Kikil (CK). Prof.=profundidad

Prof.	HCO_3^- (mg/L)	HCO_3^- (meq/L)	$\text{CO}_3^{=}$ (mg/L)	$\text{CO}_3^{=}$ (meq/L)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1m	341.1	2.7	229.2	2.2	1680
4m	440.5	3.6	296	2.9	1681
8m	402.4	3.2	270.4	2.7	1680

Los resultados que corresponden al estrato dulce del cenote Verde Lucero (CVL) se muestran en la tabla 7. Los valores se describen en rangos del ion HCO_3^- 318.6-356.1 mg/L y del ion CO_3^{2-} 214-237.5 mg/L en cada una de las profundidades, con respecto al sistema carbonato los valores no cambian, ya que se mantienen constantes en todo el estrato, por lo tanto, la capacidad de amortiguación es semejante. Los resultados de conductividad en cada profundidad del estrato dulce se mantienen constantes al igual que en cenote Kikil. Sin embargo, la conductividad es más alta en Kikil que en Verde Lucero.

Tabla 7. Resultados del sistema carbonato del cenote Verde Lucero (CVL). Prof.=profundidad

Prof.	HCO_3^- (mg/L)	HCO_3^- (meq/L)	CO_3^{2-} (mg/L)	CO_3^{2-} (meq/L)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)
1m	353.6	2.8	237.5	2.3	1113
4m	356.1	2.9	239.2	2.3	1112
8m	318.6	2.6	214	2.1	1111

Finalmente, en la tabla 8 se observan los resultados con respecto al estrato dulce del cenote Chac Mool (CCH), se observan diferencias en 1m y 4m de profundidad. Los valores de los iones HCO_3^- 271.3-300.5 mg/L y CO_3^{2-} 210.3 mg/L a 1m de profundidad son menores a la profundidad de 4m los valores de los iones HCO_3^- 300.5 mg/L y CO_3^{2-} 239.5 mg/L. La profundidad de 4 metros tiene mayor capacidad de amortiguamiento en el sistema subterráneo. La conductividad se mantiene constante en las profundidades, pero los valores son mayores que los otros dos sitios.

Tabla 8. Resultados del sistema carbonato del cenote Chac Mool(CCH). Prof.=profundidad

Prof.	HCO_3^- (mg/L)	HCO_3^- (meq/L)	CO_3^{2-} (mg/L)	CO_3^{2-} (meq/L)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)
1m	271.3	2.2	210.3	2.1	2959
4m	300.5	2.4	239.5	2.3	2949

3.2.3 Análisis de nitritos, nitratos y fosfato (NO₂, NO₃, PO₄)

En la tabla 9 se muestran los resultados del análisis de nutrientes, y se puede observar que los datos para nitratos NO₃ existe variación variaciones en las profundidades del estrato dulce, en el caso de nitritos NO₂ los datos son semejantes y para fosfatos los datos también los cambios son mínimos en la profundidad de estrato. De manera general los nutrientes son más elevados en el cenote Kikil (CK) comparado con los valores obtenidos en la columna de agua del cenote Verde Lucero (CVL) y cenote Chac Mool (CCH).

Tabla 9. Resultados de análisis de nutrientes. Prof.=profundidad

Análisis de nutrientes				
Prof.	Sitios	NO ₃ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)
1m	CK	5.8	0.07	0.60
	CVL	2.2	0.03	0.30
	CCH	2.1	0.02	0.21
4m	CK	3.9	0.02	0.43
	CVL	2	0.02	0.37
	CCH	1.8	0.02	0.70
8m	CK	4.5	0.03	0.54
	CVL	1.8	0.02	0.18

3.2.4 Análisis de antibióticos

Se analizó la presencia y ausencia de dos antibióticos en la columna de agua dulce, en los tres sitios de estudio, los datos se muestran en la tabla 10. En el cenote Kikil (CK) a una profundidad de 1m y 8 m se detectó la presencia de tetraciclina, no se detectó en agua de belcilpenicilina. En el cenote Verde Lucero (CVL) no se detectó ningún antibiótico. Mientras que en el cenote Chac Mool (CCH) a una profundidad de 1m se detectó la presencia de tetraciclina y no se detectó en agua de belcilpenicilina.

Tabla 10. Resultado del análisis de antibiótico de cada sitio. Prof.=profundidad

Análisis de Antibióticos			
Límite de detección 2.5-2 (mg/L)			
Prof.	Sitios	Tetraciclina	Belcilpenicilina
1m	CK	PRESENCIA	Ausencia
	CVL	Ausencia	Ausencia
	CCH	PRESENCIA	Ausencia
4m	CK	Ausencia	Ausencia
	CVL	Ausencia	Ausencia
	CCH	Ausencia	Ausencia
8m	CK	PRESENCIA	Ausencia
	CVL	Ausencia	Ausencia

3.2.5 Análisis de bacteriología

En los tres cenotes de estudio se realizaron análisis bacteriológicos que se muestran en la tabla 11. El análisis de bacteriología es un indicador de calidad de agua, para eventos recientes de contaminación. Los resultados de Coliformes fecales y *E. coli* en estrato del cenote Kikil (CK) se detectó en todas las profundidades. Los Coliformes fecales y *E. coli* incrementan la concentración en NMP/100 mL, en profundidad del estrado de agua dulce. Y los valores más altos de Coliformes fecales y *E. coli* en NMP/100 mL son en el cenote Kikil, en comparación a los otros dos cenotes Verde Lucero (CVL) y cenote Chac Mool (CCH).

Tabla 11. Resultados del análisis de bacteriología de cada sitio de estudio. Prof.=profundidad

		Coliformes fecales	<i>E.Coli</i>
Prof.	Sitios	NMP/100 mL	NMP/100 mL
1m	CK	700.35	506.6
	CVL	321.85	76.6
	CCH	247.7	23.35
4m	CK	829	193.2
	CVL	512.95	80.2
	CCH	268.15	37.7
8m	CK	829	829
	CVL	829	111.8

Los resultados de Coliformes fecales y *E. coli* en estrato del CK se puede observar que a las distintas profundidades las presencias de estos organismos son muy altos, el rango de presencia en todo el estrato del CK es de para Coliformes fecales 700.35-829 NMP/100 mL y para *E. coli* un rango de 193.2-829 NMP/100 mL.

En el CVL se observar que los valores de Coliformes fecales y *E. coli* en el estrato de agua son más bajos en comparación a CK, el rango para Coliformes fecales es de 321.85-829 NMP/100 mL y Para *E. coli* con un rango de 76.6-111.8 NMP/100 mL.

En el CCH se pueden observar que los resultados para Coliformes fecales y *E. coli* son mucho más muy bajos en comparación de los sitios CK Y CVL, los resultados para Coliformes fecales va desde 247.7- 268 NMP/100 mL Y para *E. coli* 23.35-37.7 NMP/100 mL y en 4m los valores aumentan Coliformes fecales 268.15 NMP/100 mL, para *E. coli* 37.7 NMP/100 mL.

Con todos los valores mencionados anteriormente el sitio con que más presencia de este tipo de organismos es el CK.

3.3 Análisis de comparación de los parámetros fisicoquímicos de cada sitio

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de los parámetros fisicoquímicos del cenote Kikil y el cenote Verde Lucero, con el cual nos permitió observar la distribución de los parámetros fisicoquímicos y realizar una comparación prospectiva entre ambos. Para ello se presentan los

datos en gráficos de histograma de los parámetros fisicoquímicos: temperatura (TEMP.), pH, Conductividad (COND.) y oxígeno disuelto (LDO). En el gráfico 4 se presentan los histogramas del cenote Kikil (CK) contra el cenote Verde Lucero (CVL), en donde se puede ver que son muy diferentes. En este análisis se incluyeron todos los valores obtenidos de cada sitio, es decir, los datos que corresponden a cada profundidad. Además, se pueden observar los valores mínimos y máximos para cada variable en cada sitio en la figura 13.

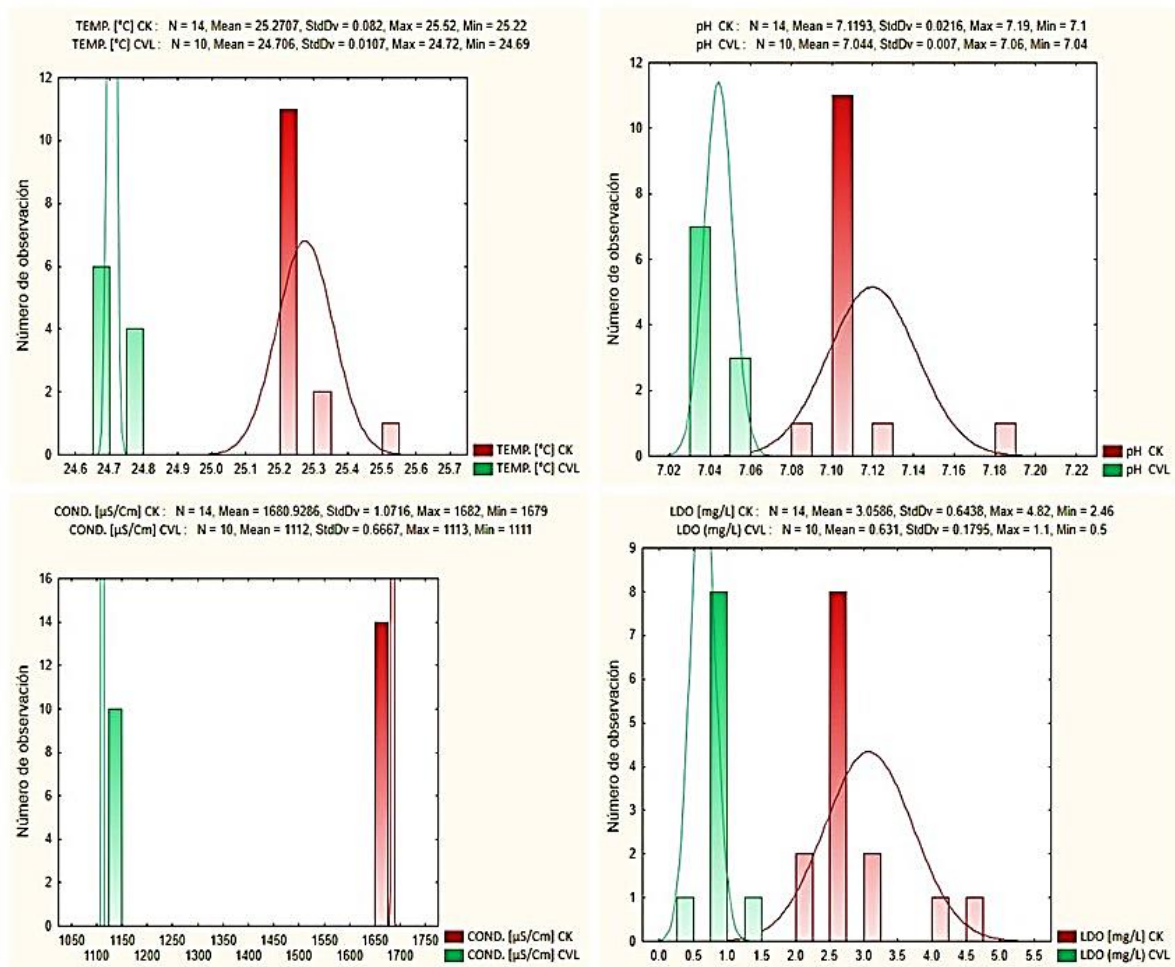


Figura 13. Comparación de los parámetros fisicoquímicos de los cenotes CVL y CK.
Temp=temperatura, pH= potencial de hidrogeno, LDO= oxígeno disuelto, spCond= conductividad eléctrica.

3.4 Análisis de MDS de los elementos mayores

A continuación, se puede observar los resultados del análisis MDS de los elementos mayores con una similaridad de 90% y un estress de 0.01. El análisis está conformado por tres grupos, CVL, CK Y CCH los cuales son los sitios de estudio.

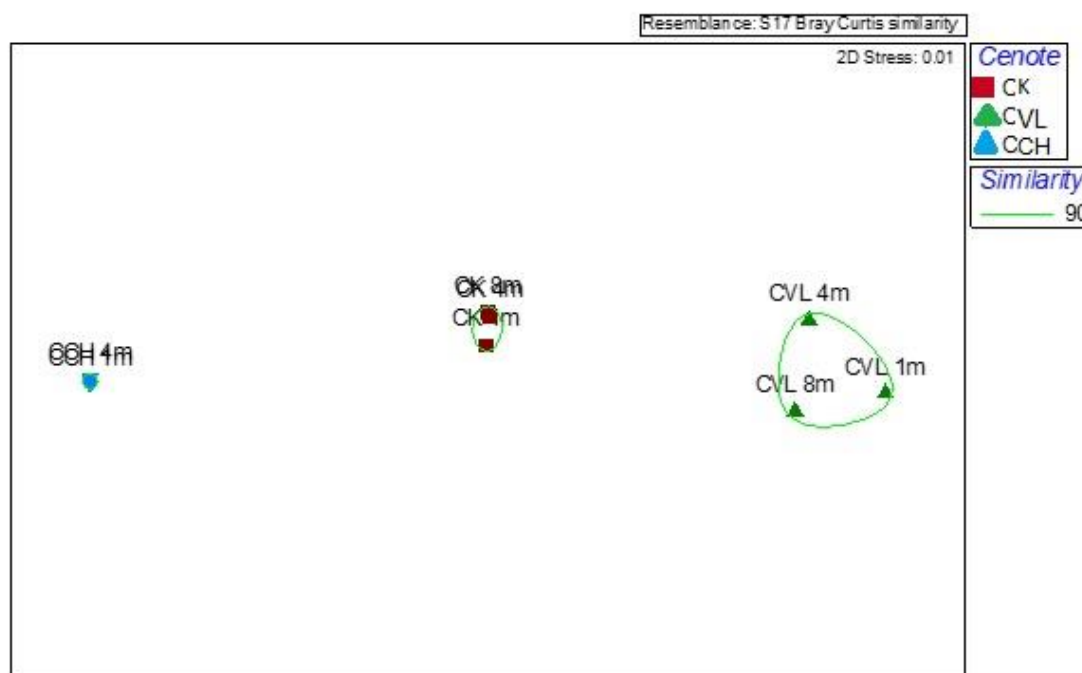


Figura 14. Resultado de MDS de los elementos mayores de cada sitio.

En la figura 14 se observa la distribución de los elementos mayores por sitio, donde cenote Kikil (CK), cenote Verde Lucero (CVL) y así como cenote Chac Mool (CCH) indican que mantiene un comportamiento homogéneo, en términos de composición de cationes y aniones, respecto a la columna de agua sin importar la profundidad. Mientras que en la siguiente figura 15. A, B y C que corresponden A) ion Cl^- , B) ion Na^+ y C) ion SO_4^{2-} es posible distinguir que las condiciones de ion Cl^- y ion SO_4^{2-} CCH son predominantes y que el ion Na^+ presenta un rango más elevado en el cenote Kikil (CK) a diferencia del cenote Verde Lucero (CVL) y cenote Chac Mool (CCH, es importante mencionar que los iones Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-} son indicadores de la influencia de condiciones salinas en este sitio, los sulfatos en cenote Chac Mool (CCH) se encuentran en un rango 166-167 mg/L mayores al de cenote Kikil (CK) 55.9-58.6 mg/L y cenote Verde Lucero (CVL) 39.5-41.1 mg/L, lo cual indica intrusión salina.

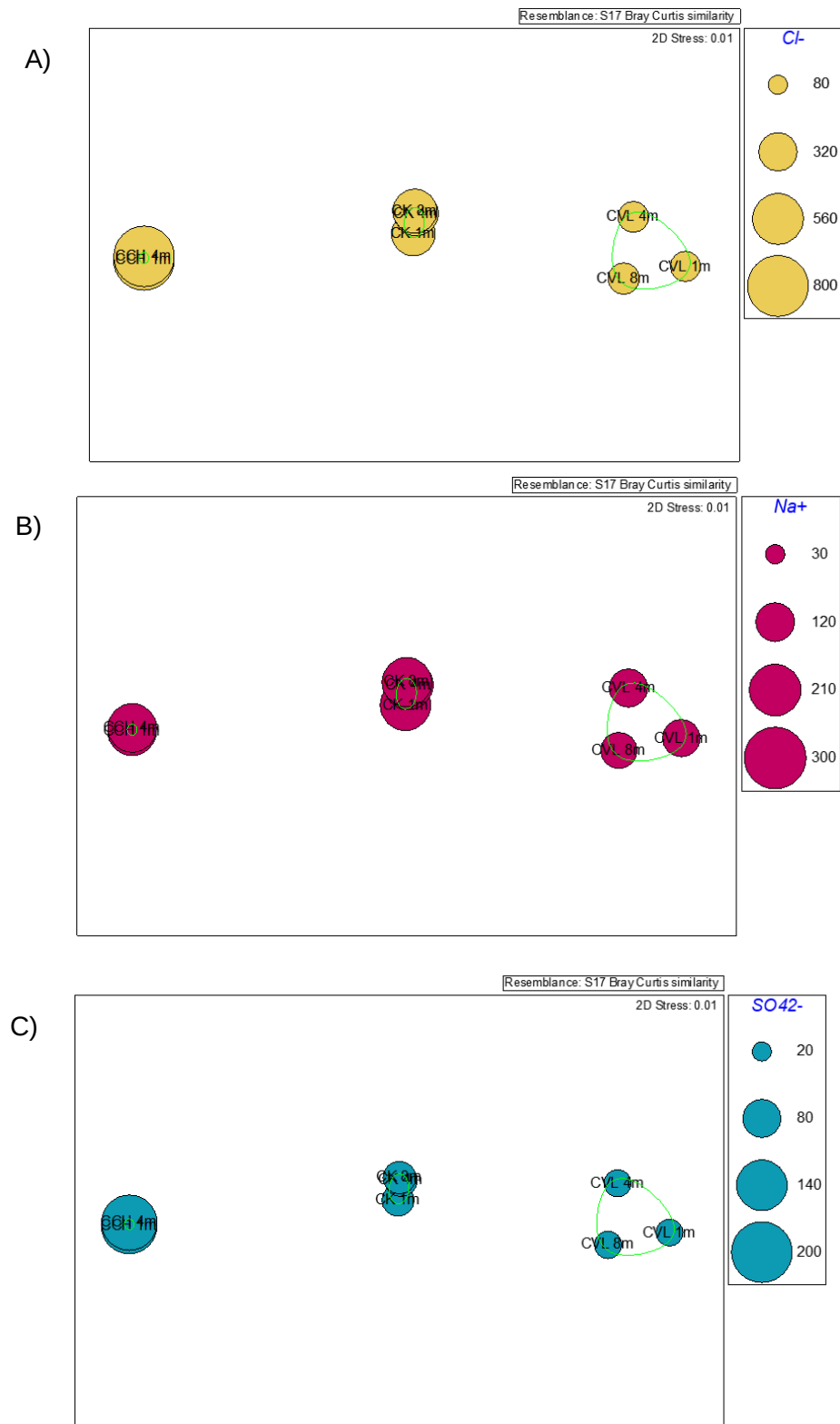


Figura15. Comparación de los elementos mayores cationes y aniones de cada sitio.

En la figura 16. A y B, corresponden a lo siguiente: A) ion Mg^{2+} y el B) ion Ca^{2+} se puede observar que el sitio con mayor predominancia en Mg^{2+} es el cenote Kikil (CK) mientras que el cenote Verde Lucero (CVL) y cenote Chac Mool (CCH) tienen la misma similaridad en cuestión de cantidad del ion Mg^{2+} , a pesar de que el cenote Chac Mool (CCH) es menos profundo. En el caso de del ion Ca^{2+} los sitios que tienen mayor cantidad, son cenote Kikil (CK) y cenote Verde Lucero (CVL), esto quiere decir que en ambos sitios tiene interacción con materiales geológicos del mismo tipo, como los minerales cálcica y dolomita.

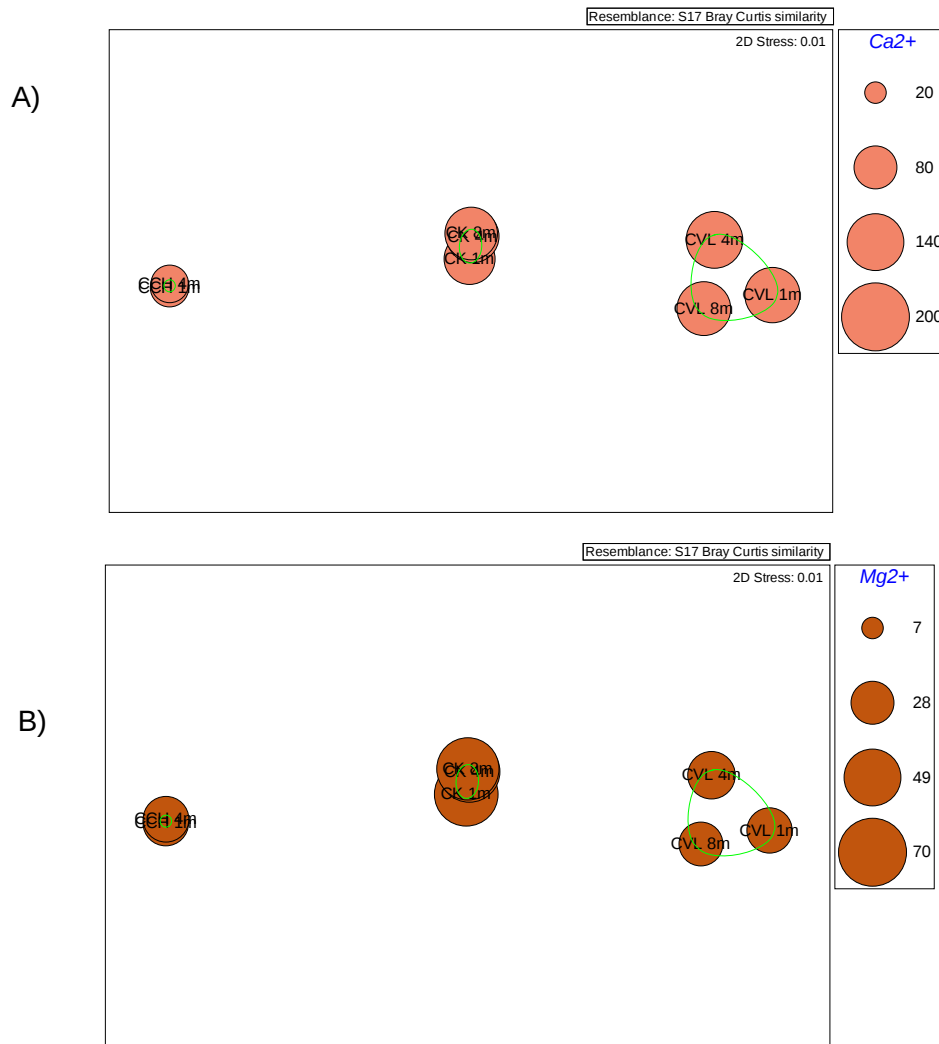


Figura 16. Comparación de los elementos mayores cationes de cada sitio de estudio.

3.5 Resultado de diversidad y de cada sitio de estudio

A continuación, se muestran en las siguientes tablas los resultados de riqueza y abundancia de los sitios de estudio. Los datos son presentados con las tres diferentes metodologías utilizadas: 1) Sistema SIRENA (S), 2) Botella de Van Dorn (B), y 3) Arrastre con Cubeta (C).

En la tabla 12 se muestran los datos del cenote Kikil (CK). Se encontró una riqueza máxima de 5 especies y a una profundidad de 1m, sin embargo, la abundancia fue alta a 8m. El mejor método para estimar la riqueza y la abundancia es la botella de Van Dorn, porque se conoce el volumen exacto y la profundidad de recolecta. El filtrado a profundidad con el método Sirena es aceptable comparado con el de Van Dorn. Mientras que el método con Cubeta solo nos permite analizar a una profundidad no mayor a 1 m. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre métodos.

En cuanto a la profundidad, con el método confiable para analizar en el presente estudio, es decir con la botella de Van Dorn. Si se observa una mayor riqueza y abundancia a 1m, con respecto a las otras profundidades en el cenote Kikil (CK). Como se observa en la tabla 12.

Tabla 12. Riqueza (R) y abundancia (A) por distintos métodos de colecta del cenote Kikil (CK). Sistema SIRENA (S), Botella de Van Dorn (B), y Arrastre con Cubeta (C). Prof.=profundidad, Org/L= organismos por litro

Prof.	R-S	R-B	R-C	A-S (Org/L)	A-B (Org/L)	A-C (Org/L)
1m	3	3	3	3.5	2.8	4.3
4m	2	2		4	0.5	
8m	1	2		5.6	0.4	

Respecto al cenote Verde Lucero, el mayor número de especies fue encontrado a 4 m, y la menor cantidad de especies a 8 m, con los datos obtenidos con el método de botella de Van Dorn. La mayor abundancia se encontró a 1m. Estos resultados se pueden observar en la tabla 13.

Tabla 13. Riqueza (R) y abundancia (A) por distintos métodos de colecta del cenote Verde Lucero (CVL). Sistema SIRENA (S), Botella de Van Dorn (B), y Arrastre con Cubeta (C).
Prof.=profundidad, Org/L= organismos por litro

Prof.	R-S	R-B	R-C	A-S (Org/L)	A-B (Org/L)	A-C (Org/L)
1m	7	6	4	12.5	1.9	12.9
4m	2	6		4.0	0.7	
8m	7	3		1.8	0.7	

Por último, los datos de riqueza y abundancia en el cenote Chac Mool con el método de botella Van Dorn, el que como anteriormente se menciona es el mejor y estándar. No se observan diferencias en la riqueza en profundidad en la columna de agua. Sin embargo, la abundancia si es mayor a 1m de profundidad. Como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Riqueza (R) y abundancia (A) por distintos métodos de colecta del cenote Chac Mool(CCH). Sistema SIRENA (S), Botella de Van Dorn (B), y Arrastre con Cubeta (C).
Prof.=profundidad, Org/L= organismos por litro

Prof.	R-S	R-B	R-C	A-S (Org/L)	A-B (Org/L)	A-C (Org/L)
1m	2	5	4	0.1	0.7	1.1
4m	5	4		0.5	0.4	

En la tabla 15 se presentan los resultados de la riqueza y abundancia de los sitios de manera global. Tomando en cuenta el método botella Van Dorn. El cenote Chac Mool(CCH), tiene más especies que el cenote Verde Lucero (CVL) y el cenote Kikil (CK). Sin embargo, el cenote Kikil es quien tiene una mayor abundancia.

Tabla 15. Riqueza (R) y abundancia (A) de manera global en los tres sitios. Sistema SIRENA (S), Botella de Van Dorn (B), y Arrastre con Cubeta (C). Org/L= organismos por litro

Sitio	R-S	R-B	R-C	A-S (Org/L)	A-B (Org/L)	A-C (Org/L)
CK	6	7	3	4.3	1.2	4.3
CVL	16	15	3	6.1	1.1	12.9
CCH	7	9	4	0.8	0.3	1.1

En general, las especies que están en el sistema pertenecen a los grupos rotífera, cladóceros, ostrácodos y copépodos. Los datos se presentan en la tabla 16. Los mismos grupos de zooplancton que se pudieron observar en los sitios de cenote Kikil y cenote Verde Lucero (CVL) son copépodos, cladóceros y rotíferos, a diferencia del cenote Chac Mool(CCH), en donde no se encontraron cladóceros.

Tabla 16. Grupos de Zooplancton presentes de manera global en los tres sitios.

Sitio	Número de grupos	Nombre de los grupos
CK	3	Copépodos, Cladóceros y rotíferos
CVL	3	Copépodos, Cladóceros y rotíferos
CCH	3	Copépodos, ostrácodos y rotíferos

3.8 Efectos adversos en el Zooplancton de los cenotes Kikil (CK), Verde Lucero (CVL), y Chac Mool(CCH)

Se tomaron fotografías de copépodos como organismos indicadores, al ser los organismos con mayor presencia y abundancia en los tres sitios, de las tres profundidades de la columna de agua dulce. Las fotografías se revisaron y contabilizaron si los organismos presentaban algún cambio morfológico en el cuerpo como: lípidos, coloración en el cuerpo y en el caso de las hembras si presentaban huevos, además se cuantifico la cantidad de espermatozoides. En la tabla 17 se pueden observar los efectos que presento cada organismo a cada profundidad de cada sitio de estudio.

Tabla 17. Efectos adversos en organismos de cada sitio de estudio. Prof.=profundidad

Prof.	Sitio	Lípidos	Espermatóforos	Huevos	Coloración Azul	n
1m	CK	112	1	8	24% Ausente y 76% Maxila y Prosoma	2
1m	CVL	6	0	5	28% Maxila y Prosoma, 72% Todo el cuerpo	1
1m	CCH	0	0	4	100% Ausente	6
4m	CK	0	0	0	20% Ausente, 80% Prosoma	0
4m	CVL	0	3	23	7% Apendice, 93% Todo el cuerpo	1
4m	CCH	0	0	0	100% Ausente	0
8m	CK	27	2	0	55% Ausente y 45% Prosoma	1
8m	CVL	0	7	0	100% Todo el cuerpo	2
						5

Se observan diferencias entre sitios y en profundidad para cada sitio. Por ejemplo, la cantidad de lípidos es alta en el cenote Kikil (CK), en comparación con los otros dos cenotes, que los especímenes analizados no presentan lípidos. La cantidad de huevos y espermatóforos es similar en los cenotes Kikil (CK) y Verde Lucero (CVL). Se nota un mayor número de espermatóforos en el cenote Verde Lucero (CVL). La cantidad de huevos y espermatóforos, en copépodos indica que están reproduciéndose y, por lo tanto, en ambos sitios CK y CVL, existe reproducción sexual. Mientras que en el cenote Chac Mool no hay evidencia de reproducción sexual. Se analizó de manera cualitativa la coloración en copépodos, y notamos que los copépodos del cenote Verde Lucero (CVL), tienen una coloración más intensa y marcada en comparación a lo observado en cenote Kikil (CK). Esta coloración está relacionada con una acumulación de hemolinfa en respuesta a un estrés fisicoquímico como la ausencia de oxígeno.

En la tabla 18 se muestran los efectos que observamos en el análisis de fotografías, de manera general. En el cenote Kikil se puede observar como efecto adverso la gran cantidad de lípidos, seguido que se pudieron observar también que portaban huevos algunos especímenes y una coloración escasa, comparada con lo observado en organismos del Cenote Verde Lucero el mayor efecto que se logró observar es mayor cantidad de huevos y una gran coloración azul.

Tabla 18. Efectos adversos de manera global en organismos de cada sitio de estudio.

Sitio	Lípidos	Espematóforos	Huevos	Coloración azul	n
CK	203	1	31	Ausente y Presente en Maxila y Prosoma	4 5
CVL	0	12	27	Presente en todo el cuerpo	5 1
CCH	0	0	0	Ausente	

3.9 índices de diversidad

3.9.1 Índice de Shannon-Weiner

En el siguiente gráfico se muestran los resultados del índice de Shannon-Weiner de cada uno de los sitios de estudios en función de la riqueza y abundancia. El índice de Shannon-Weiner más alto es en el cenote Verde Lucero (CVL) y el valor más bajo es en el cenote Kikil (CK). El índice de Shannon-Weiner nos ayudó a cuantificar la diversidad específica, y la heterogeneidad de la comunidad en los tres sitios.

En la figura 17 se pueden observar las diferencias en los índices de Shannon-Weiner en el estrato de cada sitio de estudio, y se puede observar que el cenote Verde Lucero (CVL) los valores de Shannon-Weiner son altos a una profundidad de 4m, mientras que en los cenotes Kikil (CK) y cenote Chac Mool(CCH) los valores altos de Shannon-Weiner están en 1m.

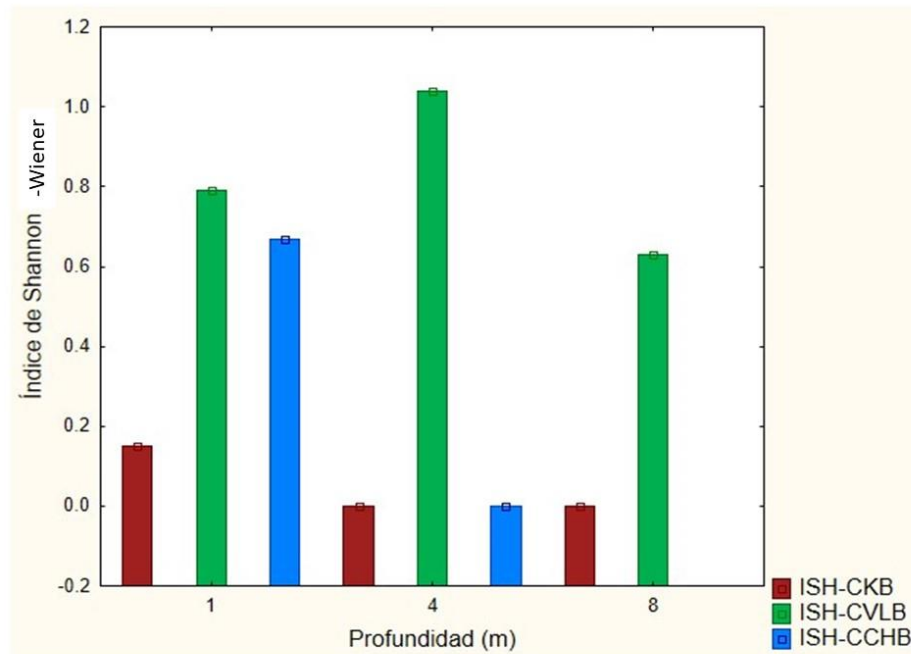


Figura 17. Gráfico del índice de Shannon-Weiner de cada sitio de estudio, ISH-CKB= Índice de Shannon-Weiner, cenote Kikil, botella, ISH-CVLB= Índice de Shannon-Weiner, cenote Verde Lucero, botella, ISH-CCHB= Índice de Shannon-Weiner, cenote Chac Mool, botella.

3.9.2 Índice de Simpson

En el siguiente gráfico se pueden observar los resultados de índice de Simpson en el estrato de cada sitio de estudio. El índice de Simpson se basa en la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar de una muestra pertenezcan a la misma especie. En general se puede observar que conforme aumenta la profundidad incrementa el índice de Simpson.

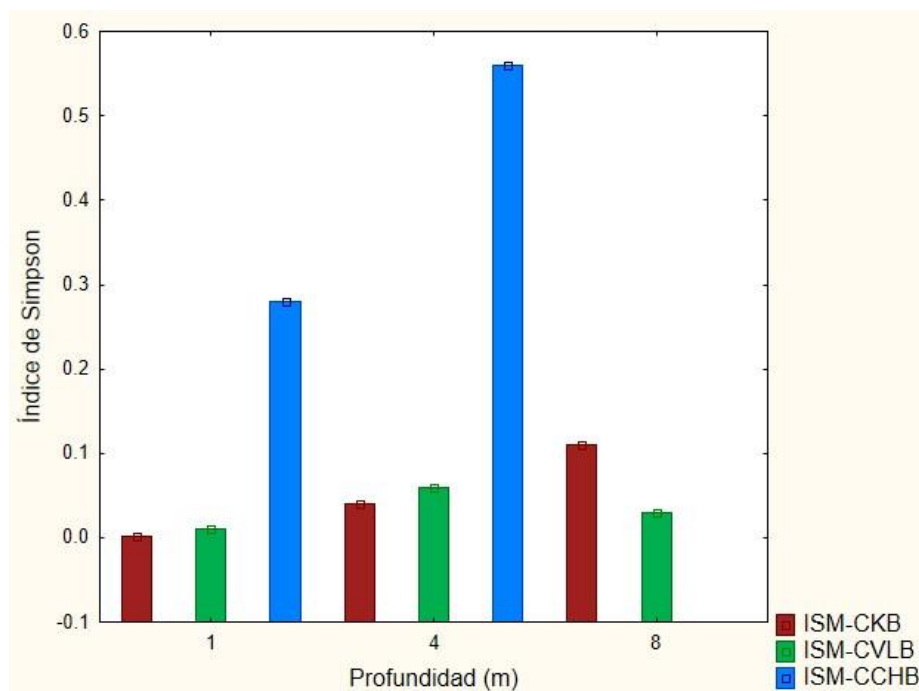


Figura 18. Gráfico del índice de Simpson de cada sitio de estudio, ISM-CKB= Índice de Simpson, cenote Kikil, botella, ISM-CVLB= Índice de Simpson, cenote Verde Lucero, botella, ISM-CCHB= Índice de Simpson, cenote Chac Mool, botella.

3.9.3 Índice de Sørensen

En la siguiente tabla se muestran los resultados del índice de Sørensen del estrato de cada sitio de estudio que fueron colectado la botella de Van Dorn. El índice de Sørensen nos ayuda a entender la similitud en las especies en el estrato de agua dulce entre los sitios de estudio.

Tabla 19. Resultado del índice de Sørensen de cada sitio de estudio. Prof.=profundidad

Prof.	Sitios	IS
1m	CKB-CVLB	0.2
1m	CKB-CCHB	0
1m	CVLB-CCHB	0.4
4M	CKB-CVLB	0.33
4M	CKB-CCHB	0.4
4M	CVLB-CCHB	0.36
8M	CKB-CVLB	0.5

En la tabla 19 se realizó una comparación del sitio CKB y CVLB con el fin de observar si hay similitud en las especies. En la profundidad de 1m del CKB y CVLB el índice de similitud fue de 0.2, mientras que en la profundidad de 4m de los mismos sitios el índice fue de 0.33, finalmente comparando los mismos sitios, pero a la profundidad de 8m el índice fue de 0.5. El índice nos menciona que si es 0 no existe similitud en las especies, a diferencia de que el índice es cercano a 1 existe presencia o similitud en las especies, entonces el estrato con mayor similitud fue en la profundidad de 8m.

En la segunda comparación de los sitios CKB y CCHB a dos profundidades en el estrato dulce, el resultado del índice a 1m fue de 0, mientras que en 4m el índice fue de 0.4. Los resultados de esta comparación indican que en la profundidad de 4m hay mayor similitud de las especies.

En la tercera comparación de los sitios CVLB y CCHB, el resultado del índice a la profundidad de 1m fue 0.4, mientras que en la profundidad de 4 m el índice fue de 0.36, basándonos con los resultados obtenidos y con lo que nos indica el índice en la profundidad de 1m hay mayor presencia de similitud que en 4m.

DISCUSIÓN

En el presente estudio se generó información del estrato dulce de tres sitios dentro del estado de Yucatán y Quintana Roo, mediante un enfoque de hidrogeoquímica y biológico. Se analizaron parámetros físicos y químicos, elementos mayores, nutrientes, presencia de antibióticos y contaminación por coliformes fecales y *E. coli*. Además, se analizó la riqueza y abundancia del zooplancton como un indicador ecológico y de calidad de agua del estrato dulce.

A continuación, se discuten los resultados obtenidos primero con un enfoque de hidrogeoquímica, y se finaliza con el análisis comparativo de los resultados de zooplancton.

3.10 Condiciones fisicoquímicas, sistema carbonato, elementos mayores, bacteriología y contaminantes orgánicos en el estrato dulce de cada sitio

La siguiente figura nos permite relacionar los indicadores de condiciones de campo y su variación con la profundidad.

	Cenote Kikil		Cenote Verde Lucero		Cenote Chac Mool	
	Parámetros fisicoquímicos	Sistema carbonato	Parámetros fisicoquímicos	Sistema carbonato	Parámetros fisicoquímicos	Sistema carbonato
1m	T 25.52 °C pH 7.19 Cond 1680 µs/cm OD 4.82 mg/L	HCO ₃ ⁻ 341.1 mg/L Media capacidad de amortiguación	T 24.72 °C pH 7.06 Cond. 1113 µs/cm OD 1.1 mg/L	HCO ₃ ⁻ 353.6 mg/L Media capacidad de amortiguación	T 25.38 °C pH 6.61 Cond. 2959 µs/cm OD 1.68 mg/L	HCO ₃ ⁻ 271.3 mg/L Baja capacidad de amortiguación
4m	T 25.3 °C pH 7.11 Cond 1681 µs/cm OD 2.94 mg/L	HCO ₃ ⁻ 440.5 mg/L Mayor capacidad de amortiguación	T 24.7 °C pH 7.04 Cond 1112 µs/cm OD 0.57 mg/L	HCO ₃ ⁻ 356.1 mg/L Media capacidad de amortiguación	T 25.31 °C Cond 2949 µs/cm	HCO ₃ ⁻ 300.5 mg/L Media capacidad de amortiguación
8m	T 25.22 °C pH 7.11 Cond 1860 µs/cm OD 2.46 mg/L	HCO ₃ ⁻ 402.4 mg/L Media capacidad de amortiguación	T 24.7 °C pH 7.9 Cond 1111 µs/cm OD 0.46 mg/L	HCO ₃ ⁻ 318.6 mg/L Media capacidad de amortiguación		

Figura 19. Parámetros fisicoquímicos y sistema carbonatos del estrato dulce de tres cenotes el acuífero de la península de Yucatán. Temp=temperatura, pH= potencial de hidrogeno, LDO= oxígeno disuelto, spCond= conductividad eléctrica, HCO₃⁻= ion bicarbonato.

Como se muestra en la figura 19, la mayor capacidad de amortiguamiento, se encontró en Kikil una profundidad de 4 y 8 metros. Perry *et al.*, (2009) señala que estos cambios se dan por diferencia de interacción agua roca y la carga de materia orgánica en el sistema. Los resultados de los bicarbonatos en los tres sitios se asemejan al estudio realizado por Sánchez- Sánchez *et al.*, (2015) en donde reporta un rango de 166.2 - 558 mg/L, y menciona que este rango de valores indica heterogeneidad del medio acuífero debido al cambio dinámico entre los diferentes procesos hidrogeoquímicos. Comparando con el resultado de Cabrera *et al.*, (2002), los valores que reportamos en el presente trabajo, son más bajos, ya que el rango que ellos determinaron es de 318.86 - 463.80 mg/L, y eso se debe a que mientras más profundos sea el sistema, el agua tendrá mayor periodo de contacto con la roca debido a los ambientes kársticos.

Es importante señalar que el valor de 398.94 mg/L reportado por Perry *et al.*, (2002) para la zona de Tizimín, se encuentra por debajo de los valores que se cuantificaron en el cenote Kikil (440.5 mg/L; a 4 metros). Monroy-Ríos, (2014) menciona que el ion bicarbonato y carbonato constituyen el sistema carbonato, que es el más importante regulador de pH para el agua subterránea de la península de Yucatán.

Acorde a Schmitter-Soto *et al.*, (2002) el pH tiene tendencias a la neutralidad debido a las características del sistema carbonato de la península de Yucatán, lo que permite hábitats acuáticos con el potencial de una diversidad biológica importante y con una fuerte actividad bacteriana y procesos de descomposición (Sánchez, *et al.*, 2015). En los tres sitios de estudio los valores de pH estuvieron dentro de la neutralidad.

La variación detectada en los valores de conductividad eléctrica, se explican por dos aspectos, las diferencias en la concentración de iones carbonatos y por la cercanía de un sitio a la costa. El sitio con mayor conductividad eléctrica, pero diferencia en la capacidad de amortiguamiento respecto a los otros dos sitios, es el cenote Chac Mool, este incremento en la conductividad eléctrica se explica porque se encuentra muy cercano a la costa y por lo tanto existe intrusión salina y concuerda con lo mencionado por Aguilar-Flores, (2020) , Rodríguez y Crespo, (2010) donde mencionan que la conductividad es un indicador de intrusión de agua de mar y ocurre en a un rango de 1-1.7 km cercano a la costa de la península de Yucatán. Las variaciones en la conductividad y la capacidad de amortiguamiento en los cenotes, estarán relacionadas a la interacción con la roca y la presencia de materia orgánica.

Con respecto a los elementos mayores, que indican la interacción del agua con roca, en los tres sitios, acorde a lo mostrado en la figura 14 y figura 20, se observa que existen ligeras variaciones

de los elementos mayores, por ejemplo, la presencia de altas concentraciones de los elementos cenote Chac Mol apoyan nuestra observación de intrusión salina. Mientras que en los otros dos sitios Kikil y Verde Lucero, se sugiere que existen diferencias en el tipo de agua. Como menciona Pacheco et al., (2016) y Carmona-Esquivel, (2019) en la zona norte de Quintana Roo existen variaciones, es decir, no hay un comportamiento homogéneo en la columna y se puede observar en la figura 15. A), B) y C), así como en la figura 16 A), B) y C), lo cual también fue reportado por Aguilar-Flores (2020) en la costa norte de Quintana Roo.

Cupul-Caamal *et al.*, (2021) coincide con los resultados sobre hidrogeoquímica de este estudio dado que la composición química no es homogénea y los iones que predominan son el Cl⁻ y Na⁺ en el estado de Yucatán (Tizimín y Panabá).

Perry *et al.*, (2002) menciona que la característica geoquímica del agua subterránea del norte de la península de Yucatán puede estar controlados por los procesos naturales de la mezcla con el agua de mar, por la disolución o precipitación del CaCO₃, Ca Mg(CO₃)₂, CaSO₄/ CaSO₄.2H₂O, SrSO₄. Y NaCl, así como la pérdida o ganancia de agua del estrato de agua dulce, también pueden modificarse por las actividades humanas, ya que tiene que extraer agua para el uso en la agricultura, por adición de contaminantes orgánicos e inorgánicos y por alteración del uso de suelo.

	Cenote Kikil		Cenote Verde Lucero		Cenote Chac Mool	
	Elementos mayores (mg/L)		Elementos mayores (mg/L)		Elementos mayores (mg/L)	
1m	Ca ²⁺ 113	Coliformes fecales NMP/100 mL	Ca ²⁺ 133	Coliformes fecales NMP/100 mL	Ca ²⁺ 64	Coliformes fecales NMP/100 mL
	Na ⁺ 201		Na ⁺ 111		Na ⁺ 186	
	K ⁺ 5.2	700.35	K ⁺ 3.8	321.85	K ⁺ 6.57	247.7
	Mg ²⁺ 61		Mg ²⁺ 31		Mg ²⁺ 31	
	Cl ⁻ 413	<i>E. Coli</i> 506.6	Cl ⁻ 198	<i>E. Coli</i> 76.6	Cl ⁻ 795	<i>E. Coli</i>
	SO ₄ ²⁻ 55.9	Presencia alta	SO ₄ ²⁻ 39.5	Presencia media	SO ₄ ²⁻ 167	23.35
	CO ₃ ²⁻ 229.2		CO ₃ ²⁻ 237.5		CO ₃ ²⁻ 210.3	
	Interacción con minerales		Interacción con minerales		Intrusión salina	
4m	Ca ²⁺ 120	Coliformes fecales	Ca ²⁺ 140	Coliformes fecales	Ca ²⁺ 61	Coliformes fecales
	Na ⁺ 197		Na ⁺ 117		Na ⁺ 188	
	K ⁺ 4.3	829	K ⁺ 4.1	512.95	K ⁺ 7.08	268.15
	Mg ²⁺ 57		Mg ²⁺ 34		Mg ²⁺ 32	
	Cl ⁻ 420	<i>E. Coli</i>	Cl ⁻ 205	<i>E. Coli</i>	Cl ⁻ 789	<i>E. Coli</i>
	SO ₄ ²⁻ 58.6	193.2	SO ₄ ²⁻ 40.6	80.2	SO ₄ ²⁻ 166	37.7
	CO ₃ ²⁻ 296.0	Presencia alta	CO ₃ ²⁻ 239.2	Presencia media	CO ₃ ²⁻ 239.5	
	Interacción con minerales		Interacción con minerales		Intrusión salina	
8m	Ca ²⁺ 120	Coliformes fecales	Ca ²⁺ 126	Coliformes fecales		
	Na ⁺ 194		Na ⁺ 104			
	K ⁺ 4.3	829	K ⁺ 3.8	829		
	Mg ²⁺ 59		Mg ²⁺ 29			
	Cl ⁻ 422	<i>E. Coli</i>	Cl ⁻ 214	<i>E. Coli</i>		
	SO ₄ ²⁻ 58.1	829	SO ₄ ²⁻ 41.1	111.8		
	CO ₃ ²⁻ 270.4	Presencia alta	CO ₃ ²⁻ 214.0	Presencia media		
	Interacción con minerales		Interacción con minerales			

Figura 20. Elementos mayores y Bacteriología del estrato dulce de tres cenotes el acuífero de la península de Yucatán. NMP=Número más probable.

Como se muestran en la figura 20 los resultados de coliformes fecales y *E. coli* en los tres sitios de manera global, se puede observar que todos los valores comparados con los indicados en las normas, se rebasan. Es decir, como valor mínimo para coliformes es de 257.7 NMP/100 mL y un máximo de 829 NMP/100 mL, mientras que el rango va de 23.35 - 829 NMP/100 mL para *E. coli*. Estos datos se encuentran por arriba de la norma que recomienda la Secretaria de Desarrollo urbano y Ecología CE-CCA-001789 y la Secretaria de Salud NOM-245-SSA1-2010, requisitos para cualquiera que presente un servicio público y actividades recreativas con contacto primario y debe estar por debajo de 40-200 NMP/100 mL es claro que los sitios tienen contaminación alta como lo menciona el estudio de Leal-Bautista *et al.*, (2011) y Hoogestein, *et al.*, (2015) en el cual hacen énfasis que la contaminación directa al acuífero por los desechos humanos como la materia urinaria y fecal, pueden llegar dado al uso de baños que se encuentren cercanos, y exposición recreacional. Además, Kane, (2016) menciona que los turistas también pueden transmitir bacterias de ellos mismos al agua y afectar a aquellas que se encuentran adaptadas al sistema. La presencia de microorganismos como indicadores de contaminación han sido relacionada con la presencia de otros microorganismos, tales como mencionan (Ávila-Torres, 2017, Rosiles-González *et al.*, 2017). La presencia de materia orgánica sugiere la existencia de otros microorganismos asociados en el estrato de agua dulce, es importante mencionar y acorde a lo que dice Carrillo-Jovel, (2019) los microorganismos constituyen una parte importante en el mantenimiento de los procesos biogeoquímicos, la regulación del funcionamiento de la biosfera y son fundamentales para el equilibrio de los ecosistemas.

Cenote Kikil				Cenote Verde Lucero				Cenote Chac Mool			
Nutrientes (mg/L)			Antibióticos	Nutrientes (mg/L)			Antibióticos	Nutrientes (mg/L)			Antibióticos
NO ₃	NO ₂	PO ₄	Presencia	NO ₃	NO ₂	PO ₄	Ausencia	NO ₃	NO ₂	PO ₄	Presencia
5.8	0.07	0.60		2.2	0.03	0.30		2.1	0.02	0.21	
Mayor concentración				Mediana concentración				Mayor concentración			
NO ₃	NO ₂	PO ₄	Ausencia	NO ₃	NO ₂	PO ₄	Ausencia	NO ₃	NO ₂	PO ₄	Ausencia
3.9	0.02	0.43		2	0.02	0.37		1.8	0.02	0.70	
Mayor concentración				Mayor concentración				Baja concentración			
NO ₃	NO ₂	PO ₄	Presencia	NO ₃	NO ₂	PO ₄	Ausencia				
4.5	0.03	0.54		1.8	0.02	0.70					
Mayor concentración				Baja concentración							

Figura 21. Se muestra las condiciones de presencia entre Nutrientes (relacionados a las actividades agrícolas) y antibióticos del estrato dulce de tres cenotes el acuífero de la península de Yucatán. NO₃= Nitratos, NO₂= Nitritos Y PO₄ =Fosfato.

Se puede observar en el cenote Kikil valores altos de nutrientes respecto a los sitios Cenote Verde Lucero y Chac Mool, esto se explica porque el cenote Kikil se encuentra en una zona con una gran actividad agrícola y ganadera como lo mencionan los autores Martínez *et al.*, (2002), Duran y Méndez (2010) y Ávila y Sansores (2018). De acuerdo a lo señalado por los autores Pérez-Yáñez y Pacheco, (2004), Flores-Días *et al.*, (2019), Polanco-Rodríguez *et al.*, (2017), Giácoman-Vallejos *et al.*, (2017), Pacheco y Cabrera, (1996) los compuestos de nitrógenos están relacionados al uso de fertilizantes y estiércol en la actividad agrícola – ganadera, también a la presencia de materia orgánica. Los valores de NO₃ y NO₂ son altos en Kikil comparados con los otros dos sitios y concuerda con Isahia-Smith, (2019). Además, Cupul-Caamal *et al.*, 2021 alude que el 67 % de las propiedades ganaderas utilizan fertilizante y 33% utilizan estiércol. Los nutrientes que se derivan por el uso de fertilizante y estiércol son nitrógeno y fosfato Isahia-Smith, (2019). Pero también señala que el agua subterránea es de gran importancia para el uso de la agricultura, pero se ve afectado por la misma actividad y también que el uso del suelo por la agricultura afecta la estructura y reduce su capacidad de retención de contaminantes y estos pueden llegar al acuífero.

Respecto a la presencia de antibióticos en los tres sitios, en la columna de agua está relacionada principalmente a las actividades recreativas que se realizan en los tres sitios, y además por la actividad agrícola - ganadera. En los tres sitios se realizan actividades recreativas, y en dos de ellos se detectó la presencia de antibióticos, mientras que en el sitio Kikil se realiza actividad recreativa y está cercano a una zona agrícola-ganadera. No obstante, estudios anteriores, realizados por Kane, (2016), no reporta la presencia de antibióticos en el cenote Verde Lucero (con actividad recreativa), lo que concuerda con lo reportado en este trabajo, ya que no se encontró presencia de antibióticos en la columna de agua de Verde Lucero, además la autora menciona que la visita de los turistas amenazan las condiciones del igual al nadar en los cenotes, pero también son alterados por el usos de productos de cuidado personal como el bloqueador y repelente. Sin embargo, Metcalfe *et al.*, (2001), si reporta la presencia de antibióticos en el estado de Quintana Roo, y los asocia a la actividad turística de la región. Por todo lo anterior, la presencia de antibióticos en la columna de agua, es debido a la descarga directa o indirecta de antibióticos por las actividades turísticas. Aunque es necesario profundizar en el estudio de la presencia de antibióticos en la columna de agua de la península de Yucatán y comprender que actividad es la que influye en la presencia de antibióticos en el agua.

Leal-Bautista *et al.*, (2013, 2016) menciona que el agua subterránea de la Península presenta una gran modificación debido al incremento del turismo y su vulnerabilidad intrínseca al ser un

sistema kárstico, esta combinación permite el transporte de contaminantes orgánicos y microbianos, adicional las actividades humanas que como la agricultura y turismo modifican la calidad de agua, además Isahia-Smith, (2019) indica que el uso de agroquímicos contribuye a un mayor aporte en presencia de contaminantes orgánicos en el agua subterránea en zona agrícola de la parte noreste de Yucatán (Tizimín y Panabá) , además de descomposición de materia orgánica, escorrentía y disolución del material geológico pero también menciona que agua subterránea está siendo afectada por la actividades turísticas zona no agrícola y que también presentan contaminantes orgánicos. En cambio, Medina-Moreno *et al.*, (2014) alude que la presencia de contaminantes está relacionada con la temporada turística ya que específicamente el cenote Chac Mool presento contaminación por hidrocarburos.

3.11 La diversidad de Zooplancton asociada a los sitios de estudio

Para fines comparativos y estandarizados se discute a profundidad el método de la Botella de Van Dorn. En los cuales, se conoce el volumen y la profundidad exacta en donde se realizaron las recolectas y, además, coinciden con la toma de muestra para los análisis físicos y químicos del agua.

Como se muestra en la figura 22, en resumen, la riqueza y abundancia en los sitios, así como la similitud entre sitios es diferente, por sitio y en profundidad.

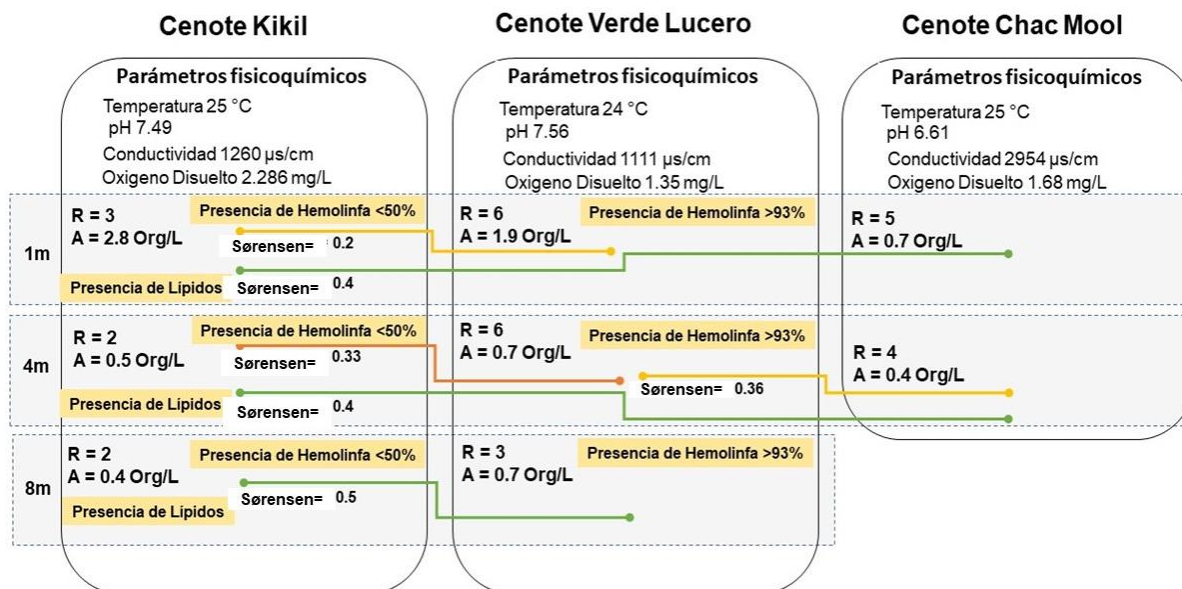


Figura 22. Comparación de riqueza, abundancia y similitud de Sørensen en tres cenotes de la península de Yucatán. R=riqueza, A=abundancia.

Los valores de riqueza y abundancia que se obtuvieron se pueden observar en las tablas 12, 13 y 14 con la abreviación R-B, A-B, ya que corresponden a la metodología de botella. El cenote Verde Lucero es el sitio con mayor riqueza de especies, y mayor abundancia comparado con los otros dos cenotes. Cabe resaltar que el grupo con mayor abundancia fue el grupo copépodo en el cenote Verde Lucero y el Cenote Kikil, en el Cenote Chac Mool el grupo más abundante fue el grupo rotífera.

La mayor abundancia del grupo copepoda Huys y Boxshall, (1991) mencionan se debe a antecedentes de que los Copépodos ha sido capaces de adaptarse a cualquier condición del sistema, por lo tanto, se encuentran en sistemas de agua dulce y salobre, por lo tanto, los copépodos son el grupo con mayor dominancia. En el caso de los rotíferos Martínez-Silva *et al.*, (2018) mencionan que algunos rotíferos como *Brachionus*, *Keratella*, *Polyarthra*, pueden adaptarse a las condiciones eutróficos y oligotróficos, así como crear resistencia a los altos valores de pH, altas concentraciones de carbonatos, sulfatos, cloruros y calcio.

Es evidente, que la profundidad de 1m es el área con mayor abundancia en los tres sitios. Se observa como disminuye la riqueza de especies en profundidad. Acorde a los resultados obtenidos, el sitio con mayor abundancia y más especies es de mejor calidad respecto a los otros dos sitios donde se observa menor abundancia y poca riqueza, por lo tanto, el cenote Verde Lucero es el sitio con mejores condiciones físicas y biológicas.

Por último, también se realizó el análisis de Sørensen que expresa el grado de semejanza entre las especies y se hizo el análisis por sitio y profundidad, se puede observar en la tabla 19 que los sitios no presentan similitud o semejanza entre las especies y por lo tanto los sitios son diferentes. Todos los análisis se evaluaron como mencionan Moreno, (2000) y Magurran, (2013). Sin embargo, el sitio Verde Lucero es el de mayor riqueza abundancia. Para los sitios Kikil y Chac Mool no existen datos de riqueza y abundancia en la literatura. Nuestros datos represan los primeros reportes para ambos sitios.

Comparando los resultados de nuestros datos del cenote Verde Lucero, respecto a la abundancia y riqueza reportado por el estudio de Pérez-Yáñez, (2020), indica la presencia de 14 especies, donde el 79% corresponde al grupo de rotíferos, y el 21% para el resto de los grupos de zooplancton reportados: cladóceros, copépodos y ostrácodos. En cuanto a la abundancia se menciona que hubo una mayor presencia de individuos de rotíferos con un valor de 39.68 Org/L, para copépodos 32.13 Org/L, en caso de los cladóceros un valor de 28.10 Org/L, y siendo los ostrácodos los menos abundantes con un valor de 0.09 Org/L. Los valores de abundancia y de riqueza que se obtuvieron en este trabajo están por debajo de los reportados por Pérez-Yáñez, (2020) esta diferencia es bastante notorio dado que Pérez-Yáñez como método de colecta utilizó una cubeta con un volumen de 100 L y para este estudio se está comparando con la botella de Van Dorn con volumen de 6L, además el grupo con mayor abundancia fue el grupo Copépoda, y también es diferente porque se colectaron a distintas profundidades.

En la tabla 13 se puede observar resultados riqueza y abundancia específicamente con el método de colecta con cubeta (A-C) a 1m de profundidad comprando con Pérez-Yáñez, (2020) también se encuentran por debajo en valor de abundancia para en este estudio es de 12.9 Org/L.

Es importante mencionar que los estudios de zooplancton con un enfoque de análisis en profundidad en el estrato de agua dulce de la península de Yucatán, son escasos y solo existen los datos reportados por Cervantes-Martínez *et al.*, (2002., 2009., 2017).

El estudio realizado por Cervantes-Martínez *et al.*, (2017) en dos cenotes de Quintana Roo, reportaron en un ciclo anual la presencia de más de 20 especies de zooplancton. Ellos mencionan que es alta la variabilidad de riqueza y abundancia en ambos sitios. Además, mencionan que la abundancia cambia en profundidad y por época del año (secas y lluvias). También reportan que la abundancia total por grupo en este estudio en copépodos (*Tropocyclops inversus*) fue como valor máximo 21.3 Org/L, mientras que para el rotífero *Keratella americana* fue de 1936 Org/L.

También Cervantes-Martínez *et al.*, (2009) en su estudio de limnología básica del Cenote Azul en Quintana Roo, mencionó que el Cenote Azul es un sistema monomítico Cálido, el oxígeno disuelto, pH y la temperatura corresponden con el patrón de estratificación térmica, además, se encuentran dentro los límites señalados como aceptables en los criterios ecológicos y de calidad de agua para la vida acuática. En el periodo de mayor precipitación se encontró mayor biomasa fitoplanctónica, las variables iónicas del sistema mostraron que el agua corresponde al agua dulce sin haloclina.

Otro estudio realizado por Cervantes-Martínez *et al.*, (2002) en ocho cenotes de Quintana Roo, reportaron una baja biomasa de zooplancton, debido a una baja concentración de nutrientes, además reportan cambios de oxígeno en profundidad, desde 0.8 hasta 13.1 mg/L.

La profundidad de sus recolectas fueron realizadas hasta 20 metros. Comparada con nuestros datos, nuestros sitios de estudio solo fue posible estudiar la riqueza y abundancia hasta 8 metros en dos sitios y 4 metros en un sitio. Sin embargo, es importante mencionar que estudios de riqueza, abundancia de zooplancton en las profundidades de los cenotes son escasos.

El grupo que se encontró con mayor frecuencia en los tres sitios fueron los copépodos. Y acorde a lo reportado por Suárez-Morales *et al.*, (2004) se han reportado más de 23 especies en la península de Yucatán, de siete géneros diferentes: algunos de ellos endémicos para la región, sobre todo para ecosistemas dulceacuícolas. Se distribuyen por toda la península de Yucatán, lo que los hace accesibles en estudios de diversidad y calidad de agua, y además pueden utilizarse para ver los cambios en los sistemas acuáticos, porque están presentes en todas las estaciones del año.

En los tres sitios de estudio encontramos copépodos, por tal razón se usaron como indicadores de efectos adversos. Los análisis de efectos adversos en copépodos que se realizaron en los sitios, con revisión y análisis mediante fotografías con un número determinado de especímenes para cada sitio. Indican que en el cenote Kikil, existe estrés en los organismos porque se notó un incremento alto de la presencia de inclusiones de lípidos, los cuales están relacionados con el estrés ambiental, comparado con los otros sitios donde no se observó presencia de lípidos en los organismos (Brande *et al.*, 2013).

Las variables a considerar fueron coloración en el cuerpo, si presentaban huevos, gránulos de lípidos y espermatozoides, esto se tomaron en cuenta con base en el estudio de Tovar-Aguilar, (2019) y Brande *et al.*, (2013). Los resultados de los efectos adversos se pueden observar en el cuadro 11 y 12, el sitio con más efectos en los organismos es el cenote Kikil, los efectos se

presentan en los gránulos de lípidos, presentan menos cantidad de huevos y muy pocos espermátóforos al comparar con el cenote Verde Lucero. Estas diferencias fisiológicas y morfológicas, en los organismos sugiere que están en contacto con diversos contaminantes y responden a ese estrés en el cual están sometidos presentando gránulos en cierta parte de su cuerpo acorde a lo sugerido por el estudio de Moreira *et al.*, (2016). En otros grupos de zooplankton (rotíferos), recientemente, y como muchos eucariotas, en respuesta a cambios fisiológicos y estrés ambiental, existe reorganización celular y producción de proteínas, gasto de energía, y se producen gránulos de estrés en respuesta al efecto adverso, los cuales pueden ser utilizados como un indicador de daño celular o estrés celular (Jones *et al.*, 2013).

En el cenote Kikil, los organismos presentaron mayores efectos adversos dado que se encuentra en un área de agricultura y ganadería, recapitulando, las concentraciones de nutrientes fueron más altas en este sitio y también se presentó contaminación por el antibiótico tetraciclina en la profundidad de 1 y 8m, por esta razón, los efectos observados en los organismos fueron en respuesta a estos cambios en el sistema (Gíacomán-Vallejos *et al.*, 2017, Polanco-Rodríguez, 2019). Los factores que afectan las condiciones hidrológicas y biológicas en los cenotes, pueden ser asociadas a residuos de fertilizantes o agroquímicos, u otras sustancias químicas tóxicas que llegan al acuífero. Se incrementa la carga de nutrientes y los sitios se eutrofizan y se aumenta la carga orgánica del sitio y las bacterias consumen el oxígeno disuelto bajando la concentración y se observan los efectos adversos en las especies.

También se cuantificó la hemolinfa de copépodos, y se pudo observar que hay un gran incremento de la presencia de hemolinfa en el cuerpo de organismo del cenote Verde Lucero, en comparación con los otros dos sitios. Esto es debido a que hay poco oxígeno en el cenote Verde Lucero, comparado con el oxígeno del cenote Kikil. La deficiencia del oxígeno disuelto determina la supervivencia, incluso la riqueza de especies y su abundancia en los sitios (Jyothinanu *et al.*, 2018). Al observar diferencias en los patrones de la hemolinfa de copépodos y ver las diferencias en los valores de oxígeno disuelto en los sitios, es evidente que existen diferencias y se observa en la presencia de la hemolinfa de los copépodos.

Es evidente que el sitio con mayor carga de contaminantes es el cenote Kikil, comparado con los otros dos cenotes que se estudiaron y acorde a los datos físicos, químicos y biológicos que se analizaron. En profundidad se observan cambios, en la riqueza y abundancia, y algunos parámetros físicos y químicos comienzan a modificarse, sin embargo, es importante realizar monitoreo en otras temporadas del año, y cuantificar otros indicadores de calidad de agua para conocer la magnitud de la contaminación y los efectos adversos a la biota acuática.

CONCLUSIONES

Este trabajo es una línea base de información sobre la condición de los sitios de estudio que se encuentran en un área de actividad agrícola y ganadera en la zona norte de Yucatán, así como de actividad recreacional en Quintana Roo.

Los valores fisicoquímicos del estrato dulce no presentan cambios bruscos o muy altos, pero es importante mencionar que cada sitio es diferente al otro debido a los datos obtenidos, ya que en algunos presentaron valores semejantes y en otro hubo ligeras variaciones.

Conocer las características químicas de la estratificación del estrato dulce de cada uno de los sitios nos permite evaluar las condiciones del agua en el acuífero de la península de Yucatán. Las variaciones de los elementos mayores a varias profundidades permitieron identificar que existen variaciones en los estratos de la columna de agua dulce en los tres sitios, así como la interacción de agua-roca, y existencia de intrusión salina.

Existe presencia de contaminantes orgánicos, nutrientes, en el cenote Kikil ya que se encuentra en la zona de actividad agrícola, pero además también hay contaminación por antibióticos debido a uso recreacional en el cenote Chac Mool y el cenote Kikil.

El Cenote Kikil presenta mayor contaminación por nutrientes, presencia de antibióticos y además rebasan los límites permisibles de las normas de la Secretaría de Desarrollo urbano y Ecología CE-CCA-001789 y la Secretaría de Salud NOM-245-SSA1-2010 para coliformes fecales.

La diversidad (riqueza y abundancia) de zooplancton es buen indicador de calidad de agua ya que, a mayor riqueza, también existe mayor abundancia lo cual indica un buen estado de salud para el sistema. De forma general la riqueza y abundancia de zooplancton de cada sitio de estudio hubo variación, así como a las distintas profundidades. Además, se observaron variaciones en la profundidad del estrato lo que a futuro puede ser un parámetro indicador para conocer en detalle la distribución y los efectos adversos de los contaminantes su influencia en la biota.

PERSPECTIVA Y RECOMENDACIONES

- A. Se propone realizar más estudios con el enfoque estratificado y análisis en diferentes profundidades para poder conocer las condiciones de los sistemas subterráneos, dado que conforme pasan los años van cambiando con respecto a las actividades antropogénicas, así como el uso de contaminantes.
- B. Cuantificar contaminantes orgánicos persistentes ya que por la pandemia del Covid-19 no se logró incluir este tipo de contaminantes asociados a las actividades agrícolas y ganaderas.
- C. También realizar estudios de toxicidad aguda y crónica para evaluar la repuesta de los organismos de zooplancton a los contaminantes emergentes y contaminantes orgánicos persistentes.
- D. Se debe incluir estudios de detección de contaminantes en los sedimentos.
- E. Continuar con los estudios de diversidad biológica en organismos como el zooplancton y ver los cambios que presentan al estar en un sistema contaminado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, Z., Delgado, C. (2013) Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Trop. and subtrop. agroecosystems* 16(2)
- Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Delgado, C. (2016) IVAKY: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Rev. Méx. de Ing. Quím.* 15(3), 913-933
- Aguilar-Flores V. (2020) Evaluación de la distribución de las condiciones salinas en el sistema hidrogeológico del noreste de Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.
- Álvarez-Cadena, J., Almaral-Mendivil, A., Ordóñez-López, U., Uicab-Sabido, A. (2008) Composición, abundancia y distribución de las especies de quetognatos del litoral norte del Caribe de México. *Hidrobiológica* 18, 37-48
- Alvarado-Flores, J., Andrade-Canto, S., Caballero-Vázquez, J. A., Almazán-Becerril, A. (2019) X-ray microanalysis of northeastern Quintana Roo aquatic biota, México: evidence of hazard metals presence. *J. of aquac. Res.* 47(4), 654-664
- A.P.H.A. (1990) Standard methods for the examination of Water and Wastewater. *J. Am. Public Health Assoc.* Washington, D. C.
- A.P.H.A. (1989) Standard methods for examination of Water and Wastewater. *J. Am. Public Health Assoc.* Washington, D.C.
- Aryal, S., Karki, G., Pandey, S. (2015) Microbial diversity in freshwater and marine environment. *NPL J. Biotechnol.* 3(1), 68-70
- Arrazcaeta, L. (2002) Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos. *Fitosanidad* 6(3), 55-62
- Tizimín Yucatán (2014) Atlas de Riesgos Naturales de Tizimín Yucatán.
http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/31096_Tizimin.pdf. Consultado: 20 de mayo de 2020.
- Ávila-Torres, G. (2017) Detección y cuantificación de coliformes, colifagos y adenovirus en el sistema acuífero del norte del estado de Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

Arroyo-Castro, J. (2019) Descripción del complejo de especies *Lecane bulla* (Rotífera: monogononta) en ecosistemas acuáticos de Quintana Roo usando un enfoque integrativo. Tesis de maestría, CICY, México.

Ávila, J., Sansores, S. (2018) Hydrogeological Characteristics, Water Availability and Quality in Yucatán, México, *The Quest for Jatropha FAME and Sustainability in Yuc, México*, pp 131-149

Bautista, F., Palacio, G. (2012) *Geografía de los suelos de México*, península de Yucatán, Universidad Nacional Autónoma de México, pp 355-406.

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G. (2011) The Yucatán península karst aquifer, México. *J. of Hydrol* 19(3), 507-524

Beddows, P., Smart, P., Whitaker, F., Smith, L. (2007) Decoupled fresh–saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity. *J. of Hydrol.* 346(1-2), 18-32

Berenjano-González, F. Casadinho, C., Weber, J., Zugasti, C., Prado, E., Ruiz, B., Muñoz, F. (2009) El Endosulfán y sus alternativas en América Latina, *Intel. POPs Elimination Network*, México.

Casas-Beltrán, D. A., Gallaher, C. M., Hernandez-Yac, E., Febles-Moreno, K., Voglesonger, K., Leal-Bautista, R. M., Lenczewski, M. (2020) Seaweed Invasion, Temporal Changes in Beach Conditions Lead to Increasing Cenote Usage and Contamination in the Riviera Maya. *Sustainability* 12(6), 2474

Camacho-Lomelí, R. (2015) Urbanización turístico-costera desigual en Playa del Carmen, Quintana Roo (México). *GeoGraphos*
<https://doi.org/10.14198/GEOGRA2015.6.77>

Castillo, T., Soledad, M. (2009) Estudios de monitores pasivos y activos de compuestos orgánicos persistentes en el aire. Informe técnico, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Carmona-Esquivel, J. (2019) Caracterización geoquímica del agua subterránea en el este de Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

Carrillo-Jovel, V. H. (2019) caracterización de la estructura de la comunidad de microorganismos en cuerpos de agua de dulce del norte de la península de Yucatán. Tesis de maestría, CICY, México.

Castellanos-Osorio, I., Espinoza-Avalos, J., Islebe, G., Hernández-Arana, H. (2009) Estudios de zooplancton: Logros y retos. E. (Eds) El sistema ecológico de la Bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe. El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, Quintana Roo, México, pp 61-68.

Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, A. (2015) Physicochemistry and zooplankton of two karstic sinkholes in the Yucatán Peninsula, México. *J. of limnol.* 74(2)

Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, M., Suárez-Morales, E. (2002) Limnological and morphometrical data of eight karstic systems 'cenotes' of the Yucatán peninsula, México, during the dry season (February–May, 2001). *Hidrobiol.*
<https://doi.org/10.1023/A:1021260131757>

Cervantes-Martínez, A., Mezeta-Barrera, M., Gutiérrez-Aguirre, M. A. (2009) Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México Basic limnology of the karstic tourist lake Cenote Azul in Quintana Roo, México. *Hidrobiol.* 19(2), 177-180

Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, M. A., Elías-Gutiérrez, M., Arce-Ibarra, A. M., García-Morales, A. (2017) Aquatic biodiversity in cenotes from the Yucatán península (Quintana Roo, México). *T. y Praxis* 14, 49-68

Cooper, H. (1959) A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. *J. of Geophysical Res.* 64(4), 461-467

Cenote Chac Mool (s.f.) Guía de la Riviera Maya, ubicación del cenote Chac Mool
<http://www.guiaderivieramaya.com/es/chac-mool-cavern-diving-riviera-maya.html> Consultado: 24 de marzo de 2019.

Cohuo S, Macario-González L, Pérez L., Schwalb A. (2017) Overview of neotropical-caribbean freshwater ostracode fauna (Crustacea, Ostracoda): identifying areas of endemism and assessing biogeographical affinities. *Hidrobiol.* 786: 5-21

Cobos, V., Barrientos, R., Navarro, J., Rendón von Osten, J. (2014) Plaguicidas organoclorados: contaminantes persistentes en cenotes de Yucatán. *Bioagrociencias* 7(1), 24-27

CONAGUA. (2015) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Serranía del Burro (3105), estado de Yucatán.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103392/DR_3105.pdf consultado: 17 de febrero de 2019

CONAGUA. (2015) Programa hídrico regional 2014-2018 de la región hidrológico-administrativa xii, península de Yucatán.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/241045/PHR_09.06.16.compressed.pdf

Consultado: 22 de febrero de 2019

Cupul-Caamal, F. A., Isaiah Smith, D. N., Ortega Camacho, D., Cervantes Cocom, G. A., Cejudo, E. (2021) Tendencias en la biogeoquímica del agua subterránea en la región agroindustrial del noreste de Yucatán. *Trop. and Subtrop. Agroecosystems* 24(1), 11

CCPY. (2006) Programa Director de Desarrollo Urbano del Centro de Población. http://www.ccpy.gob.mx/archivos/documentos-agendas/tmp_201509111847.pdf Consultado: 05 de mayo del 2019

Damiano-Vásquez, B. (2018) Modelación del transporte de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en el acuífero de la plana de valencia sur. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Daam, M., Van den Brink, P. (2010) Implications of differences between temperate and tropical freshwater ecosystems for the ecological risk assessment of pesticides. *Ecotoxicol.*, 19(1), 24-37

Dodson, S., Silva-Briano, D. (1996) Crustacean zooplankton species richness and associations in reservoirs and ponds of Aguascalientes State, Mexico. *Hydrobiol.* 325(2), 163-172

Domínguez-Boadaa, L., Peñaa, M., Almeida-González, M., Henríquez-Hernández, L., Serra-Majemb, L., Álvarez-León, E., Luzardoa, O. (2011) Convenio de Estocolmo: monitorización de los niveles de contaminantes orgánicos persistente en la población de las Islas Canarias. *Rev. Biocancer* (5)

Do Hong L. C., Becker-Van S. K., Tarradellas, J. (2004) Tropical ecotoxicity testing with *Ceriodaphnia cornuta*. *Environ. Toxicol.* 19: 497-504

Duran, R., Méndez, M. (2010) Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, México.

Eastmond, A., Fuentes, A. (2006) Impacto de los sistemas agropecuarios sobre la biodiversidad. E. (ed). Contexto Social y Económico, México, pp 98-104

Echeverría-Galindo, P. Pérez, L., Correa-Metrio, A., Avendaño, C. E., Moguel, B., Brenner, M., Schwalb, A. (2019) Ostrácodos neotropicales como indicadores ambientales en un gradiente altitudinal de Guatemala y México. *Rev. de Biol. Trop.* 67(4), 1037-1059

Elías-Gutiérrez, M., Montes-Ortiz, L. (2018) Estado actual del conocimiento de la diversidad del zooplankton (invertebrados) de agua dulce de la península de Yucatán, utilizando la taxonomía integrativa. *T. y Prax* 25, 31-48

EPA (1979) Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes.

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30000Q10.PDF?Dockkey=30000Q10.PDF> Consultado: 15 de marzo de 2020.

EPA (1991) A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination.

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20001UHS.PDF?Dockkey=20001UHS.PDF> Consultado 09 de abril de 2020.

EPA, (1986) Method 505: Analysis of organohalide Pesticide and Aroclors in Drinking Water by Microextration and Gas Chromatography.

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100NLPY.PDF?Dockkey=9100NLPY.PDF> Consultado: 10 de febrero de 2019.

Fagundo, J. R. (2002) Procesos geoquímicos naturales e inducidos por el hombre en acuíferos kársticos costeros. *Hidrogeol.* 2, 71-79

Fageria, N. K., Scriber J. M. (2002) The role of essential nutrients and minerals in insect resistance in crop plants. Sci. Publ. Oxford and IHB, New Delhi, India pp 23-54

García-Morales, A. E., Guttierrez, M. E. (2004) Rotifera from southeastern Mexico, new records and comments on zoogeography. *Ser. Zool.* 75(1), 99-120

Garrido, T., Costa, C., Fraile, J., Orejudo, E., Niñerola, J., Ginebreda, A., Figueras, M. (1998) Análisis de la presencia de plaguicidas en diversos acuíferos de Cataluña. En: La contaminación de las aguas subterráneas, un problema pendiente, E. (ed). Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, España, pp 127-130

Galindo, P., Pérez, L., Correa-Metrio, A., Avendaño, C., Moguel, B., Brenner, M., Schwalb, A. (2019) Tropical freshwater ostracodes as environmental indicators across an altitude gradient in Guatemala and México. *Rev. de Biol. Trop.*
<http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i4.33278>

Giácoman-Vallejos, G., Lizárraga-Castro, I., Hernández-Núñez, E., Ponce-Caballero, M. (2017) Presencia de plaguicidas en el acuífero cárstico entre los municipios de Mérida a Progreso, Yucatán, México. *C. Azúcar* 44(3), 1-13

Gío-Argaez, F. R., Machain-Castillo, M. L., Gaytán-Caballero, A. (2002) Los ostrácodos de la zona económica exclusiva de México Parte I. *La Bahía de Campeche. Jaina* 13, 1-11

Graniel, E., Vera, I., González Hita, L. (2004) Dinámica de la interfase salina y calidad del agua en la Costa Nororiental de Yucatán. *Ing.* 8(3), 15-25

González-Herrera, R., Euán, A., Iztaccíhuatl, B., Osorio-Rodríguez, J., Sánchez, Pinto, I. (2018) El acuífero yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. *Rev. Int. de contam. amb.*
<https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.09>

González-Arias C. A., Robledo-Marengo M., Medina-Díaz I. M., Velázquez-Fernández J. B., Girón-Pérez M. I., Quintanilla-Vega B., Ostrosky-Wegman P., Pérez-Herrera N. E., Rojas García A. E. (2010) Patrón de uso y venta de plaguicidas en Nayarit, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 26, 221-228

Gómez-Márquez, J. L., Peña-Mendoza, B., Guzmán-Santiago, J. L., Gallardo-Pineda, V. (2013) Composición, abundancia del zooplancton y calidad de agua en un microreservorio en el estado de Morelos. *Hidrobiol.* 23(2), 227-240

Gutiérrez-Aguirre, M. A., Suárez-Morales, E. (2001) Diversity and distribution of freshwater copepods (Crustacea) in southeastern México. *Biodivers. y Conserv.* 10(5), 659-672

Hernández-Quiroz M., Ruiz-Meza D., Rojo-Callejas F., Ponce de León-Hill C. A. (2019) Determinación de la distribución de contaminantes emergentes en agua intersticial en sedimentos de humedal mediante la optimización y validación de un método analítico. *Rev. Int. de contam. Amb.*
<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.12>

Herrera-Silveira, J., Morales-Ojeda, S. (2010) Lagunas costeras de Biodiversidad y Desarrollo humano en Yucatán. En: Biodiversidad y Desarrollo humano en Yucatán, E. (ed). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, México, pp

24-26

Herold, R. C., Meadow, N. D. (1970) Age-related changes in ultrastructure and histochemistry of rotiferan organs. *J. of ultrastruct. Res.* 33(3-4), 203-218

Hernández-De Lira, I., David-Huber, M. (2014) Metagenómica: Concepto y Aplicaciones en el Mundo Microbiano. En: Fronteras en microbiología aplicada, E. (ed). Universidad Autónoma de Coahuila, México, pp

185-207

Huys, R., Boxshall, G. A. (1991) Copepod evolution, The Ray Society, London.

Isaiah-Smith, D. (2019) The impacts of land use on groundwater quality in the northeast Yucatán península Región. Tesis de maestría, CICY, México.

Ismail H. N., Ahmad U. W., Tay C. C. (2014) Biological responses of tropical cladoceran, *Ceriodaphnia cornuta* to different algae diets. *J. of Life Sci. and Tech.* 2: 48-54

INEGI, (2019) Clima de la Península de Yucatán.

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/clima.aspx?tema=meye=31>

Consultado: 18 de febrero de 2019.

INEGI, (2009) Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos.

Tizimín, Yucatán.

http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/31/31096.pdf

Consultado: 24 de febrero de 2019

Instituto nacional de ecología (2000) Programa de manejo del parque nacional de arrecifes de

Puerto Morelos.

https://data.nodc.noaa.gov/coris/library/NOAA/NonCRCP/Other/national_park_mgmt_prog_puerto_morelos_reefs.pdf Consultado: 16 de agosto de 2020

Iannacone, J., Alvariño, L. (2006) Diversidad del zooplancton en la Reserva Nacional de Junín, Perú. *Ecol. Apl.* 5(1-2), 175-181

- Jones, B. L., VanLoosen, J., Kim, M. H., Miles, S. J., Dunham, C. M., Williams, L. D., Snell, T. W. (2013) Stress granules form in *Brachionus manjavacas* (Rotifera) in response to a variety of stressors. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular y Integrative Physiology* 166(2), 375-384
- Jyothibabu, R., Jagadeesan, L., Karnan, C., Arunpandi, N., Pandiyarajan, R. S., Balachandran, K. K. (2018) Ecological indications of copepods to oxygen-deficient near-shore waters. *Ecol. Indic.* 93, 76-90
- Koster, W. (1978) Rotatoria. Uberordnung monogononta. Gebruder borntraeger. Berlín.
- Leal-Bautista, R. M., Lenczewski, M., Morgan, C., Gahala, A., McLain, J. E. (2013) Assessing Fecal Contamination in Groundwater from the Tulum Region, Quintana Roo, México. *J. of Environ. Prot.* 4: 1272-1279
- Leal-Bautista, R. (2016) Organic Contaminants in a tourist area: unexpected presence in the groundwater of the Yucatán península. En: NGWA's Groundwater 26th, 24-27 April, Denver Colorado.
- Leal-Bautista R. M., Hernández-Zarate, G., German Cuevas, N. A., Oliman, Mg. V. (2011) Pathogens and pharmaceuticals pollutants as indicators of contamination at the northeastern aquifer of Quintana Roo. *Trop. and subtrop. agrecosystems* 13: 211-219
- Lin, J., Ganesh, A. (2013) Water quality indicators: bacteria, coliphages, enteric viruses. *Intl. J. of environ. health res.* 23(6), 484-506
- López-Roldán, P., Fachelli, S. (2015) Clasificación de las técnicas de análisis de datos, E. (1^a) Metodología de la investigación social cuantitativa, Barcelona. pp 86-97
- Lozares-Colina, C., López-Roldán, P. (1991) El análisis multivariado: definición, criterios y clasificación. *Papers: rev. de soc.*
<http://dx.doi.org/10.5565/rev/papers/v37n0.1594>
- López-Tamayo, A. (2015) "Exploración geofísica para la prospección. Cancún, Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

- Macario-González, L., Cohuo, S., Elías-Gutiérrez, M., Vences, M., Pérez, L., Schwalb, A. (2018) Integrative taxonomy of freshwater ostracodes (Crustacea: Ostrácoda) of the Yucatán península, implications for paleoenvironmental reconstructions in the northern Neotropical región. *Zool.* <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2018.04.002>
- Madrigal, M. (2015) Contaminación por plaguicidas en acuíferos del Valle de Autlán, *Jalisco, Rev. Iberoam. para la invest. Y el desarrollo educ.* 5(10), 17-30
- Magurran, A. E. (2013) Measuring biological diversity, John Wiley & Sons, USA.
- Martens, K., Schön, I., Meisch, C., Horne, D.J. (2008) Global diversity of ostracods (Ostrácoda, Crustacea) in freshwater. *Hydrobiol.* 595(1): 185-193
- Martínez-Silva, P., Muñoz-Yustres, J. L., Charry, N. R. (2018) Structure of the Zooplanktonic Community in a Tropical Dam (Betania, Colombia) with High Environmental Tension, *ResearchGate* 11(59):2931-2948
- Martínez, V., Flores, J., Pérez, R. (2002) Función de producción de la ganadería de doble propósito de la zona oriente del estado de Yucatán, México. *Téc. Pecuaria en Méx.* 40(2), 187-192.
- Medina-Moreno S. A., Jiménez-González, A., Gutiérrez-Rojas, M., Lizardi-Jimenez M. A. (2014) Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as a function of tourism development, *Rev. Mex. Ing. Quím.* 13(2), 509-516
- Metcalfe, C., Beddows, G., Bouchot, T., Metcalfe, H., Van-Lavieren, H. (2011) Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatán península, México. *Environ. Pollut.* 159(4), 991-997
- Miceli-Montesinos A., Rojas-Valencia M., Neftalí, Nájera-Aguilar H. A., Escobar-Castillejos D., Guillén-Trujillo H. A., Orantes-García C. (2018) Eliminación de contaminantes fármacos en agua residuales por medio de sistemas de humedales. *Researchgate* 1-27
- Miguel, C., Tavares, M. (2015) El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe, Textos seleccionados, Cepal.
- Moreira, R. A., Mansano, A., Rocha, O., Daam, M. (2016) The use of rotifers as test species in the aquatic effect assessment of pesticides in the tropics. *Hydrobiol.* <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2675-0>

Montes-Ortiz, L., Elías-Gutiérrez, M. (2018) Faunistic survey of the zooplankton community in an oligotrophic sinkhole, Cenote Azul (Quintana Roo, México), using different sampling methods, and documented with DNA barcodes. *J. of Limnol.* 77(3)

Monroy-Ríos, E. (2014) Sistema de carbonatos. <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/entradasenespanol/sistemacarbonatos/?fbclid=IwARQAVxpVizd1DALXF-Y6v6bl3xzKs3rTy8x7q1XAjlTNK0BlhKtoODCW0wE> Consultado:13 de julio del 2021.

Moreno, C. E. (2000) Métodos para medir la biodiversidad, Manuales y tesis SEA, España.

Olea, N., Fernández, M. (2001) Plaguicidas persistentes. En: Implementación del Convenio de Contaminantes Orgánicos Persistentes, 26-27 de noviembre de 2001, Madrid, España.

Pacheco, W., Mejía, J., Navarrete, R., Ríos, J., Gamboa, K., Herrera, N. (2013) Síntomas depresivos en agricultores expuestos a plaguicidas en Tixmehuac, Yucatán. *Rev. De la Universidad Autónoma de Yucatán*

Pech, D., Vidal-Martínez, V. M., Aguirre-Macedo L., Gold-Bouchot G., Herrera-Silveira J., Zapata-Pérez O., Marcogliese DJ. (2009) The checkered puffer (*Spheroides testudineus*) and its helminths as bioindicators of chemical pollution in Yucatán coastal lagoons. *Sci. of Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.054>

Petrovic M., Dolores-Hernando M., Díaz-Cruz M., Barceló D. (2005) Liquid chromatography–tandem mass spectrometry for the analysis of pharmaceutical residues in environmental samples: a review. *J. of Chromatography A* <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.10.110>

Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marin, L. (2002) The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatán península, México. *Int. Geol. Rev.* 44(3), 191-221

Perry E., Paytan, A., Pedersen, B. y Velazquez-Oliman, G. (2009) Groundwater geochemistry of Yucatán península, México: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *J. of hydrol.* 367: 27-40

Perry, E., Luis-Marin, Jana-MCClain., Guadalupe-Velázquez. (1995) Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatán, México: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geol.*

[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0017:ROCSNY>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0017:ROCSNY>2.3.CO;2)

Pérez-Yáñez, D. (2020) Bioacumulación del cadmio y plomo en cuatro grupos de Zooplancton del noreste de Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

Pérez-Legaspi, I. A., Garatachia-Vargas, M., García-Villar, A. M., Rubio-Franchini, I. (2017) Evaluación de la sensibilidad del cladócero tropical *Ceriodaphnia cornuta* y metales pesados. *Rev. Intel. de contam. Amb.* 33(1), 49-56

PDM, (2015) Panabá Yucatán.

<http://www.panabayucatan.gob.mx/wp-content/uploads/2017/03/PLANPANABA.compressed.pdf>

Consultado:04 de marzo del 2019.

Pope K., Ocampo A., Kinsland G., Smith R. (1996) Surface expression of the Chicxulub crater. *Geol.*

[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0527:SEOTCC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0527:SEOTCC>2.3.CO;2)

Poot, L. (2016) Evaluación de la sorción de plaguicida usados para el mantenimiento de un campo de golf en suelo de la Riviera Maya, Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

Polanco-Rodríguez, A., Alberto, J., Sánchez, J., Rejón, G., Gómez, J., Del Valls Casillas, T. (2015) Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water Environ J.* 29(1), 140-150

Polanco-Rodríguez, A. G. (2017) Contaminación del agua y Bioacumulación en el ser humano de plaguicidas organoclorados en el estado de Yucatán, México, *Researchgate* 1(1), 2017

Polanco-Rodríguez, A. G., Magaña Castro, T. V., Cetz Luit, J., Quintal López, R. (2019) Uso de agroquímicos cancerígenos en la región agrícola de Yucatán, México. *C. Agr.* 46(2), 72-83

PNUMA (2005) Eliminando los COP del mundo: guía del convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, Internacional, Ginebra.

Puckett, T. M., Andreu B., Colin J. P. (2016) The evolution of the Brachycytheride Ostrácoda in the context of the breakup of Pangea. *Rev. de micropaléontol.* 59 (2), 97-167

Ramírez-Cancino, L., Rivera-Lorca, J. (2010) La ganadería en el contexto de la biodiversidad, En: Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán, E. (ed). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, México, pp 106-108

Ricci, C., Melone, G. (2000) Key to the identification of the genera of bdelloid rotifers. *Hydrobiol.*, 418(1), 73-80

Ritter, L., Solomon, K., Forget, J. (1995) Contaminantes orgánicos persistentes, Informe de evaluación sobre: DDT, aldrina, dieldrina, endrina, clordano, Heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno, bifenilos policlorados, dioxinas y furanos Preparado por *Canadian Network of Toxicology Centres*, Asamblea mundial de la Salud, Canada.

Rodríguez, M. G., Crespo, I. O. (2010) Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *Rev. Electr. de Medioambiente* (9), 15-35

Rocha, H., Cardona, A., Graniel, E., Alfaro, C., Castro, J., Rűde, T., Heise, L. (2015) Interfases de agua dulce y agua salobre en la región Mérida-Progreso, Yucatán. *Tecnol. y cienc. del Agua* 6(6), 89-112

Rocha-Ramírez, A., Álvarez, F., Alcocer, J., Chávez-López, R., Escobar-Briones, E. (2009) Lista anotada de los isópodos acuáticos epicontinentales de México (Crustacea: Isopoda). *Rev. Mex. Biodivers.* 80(3), 615-631

Rosario-Cruz, R., Guerrero, F. D., Mille, R. J., Rodriguez-Vivas, R. I., Domínguez-García, D. I., Cornel, A. J., Hernandez-Ortiz, R., George J.E. (2005) Roles Played by Esterase Activity and by a Sodium Channel Mutation Involved in Pyrethroid Resistance in Populations of *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) Collected from Yucatán, México, *J. of Medical Entomology*, 42(6), 1020-1025

Rosiles-González, G., Ávila-Torres, G., Moreno-Valenzuela, O. A., Acosta-González, G., Leal-Bautista, R. M., Grimaldo-Hernández, C. D., Hernández-Zepeda, C. (2017) Occurrence of pepper mild mottle virus (PMMoV) in groundwater from a karst aquifer system in the Yucatán península, México. *Food Environ. Virol.* 9(4), 487-497

Ruepert, C., Castillo, L., Bravo, V., Fallas, J. (2005) Vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por plaguicidas en Costa Rica. Universidad Nacional, Costa Rica.

Ruíz-Cancino, G., Mejía-Ortíz, L. M., Lozano-Álvarez, E. (2013) Dinámica poblacional de *Creaseriella anops* (Crustacea: Isopoda) en cenotes dulceacuícolas de Quintana Roo. En: La Carcinología en México, E. (ed). El legado de Dr. Alejandro Villalobos, México, pp 87-110

Sanabria-Pérez, F., Alanís Méndez, J. L., Pech-Canché, J. M., Solís Maldonado, C. (2019) Principales residuos de medicamentos generados en los hogares y su potencial ecotóxico en Tuxpan, Veracruz, *Acta universitaria*
<https://doi.org/10.15174/au.2019.2398>

Salvado, S. (2015) Guía completa de la ruta de los cenotes en Puerto Morelos.
<https://www.elcaminomascorto.es/la-ruta-de-los-cenotes-de-puerto-morelos-leona-vicario/>
Consultado: 22 de abril de 2020.

Sánchez-Sánchez, J., Álvarez-Legorreta, T., Pacheco-Ávila, G., González-Herrera, R., Carrillo-Briebiezca, L. (2015) Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *RMCG*, 32(1), 62-76

Sánchez, J., Álvarez, T., Pacheco, J., Carrillo, L., González, R. (2016) Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnol. y Cienc. del Agua* 7(4), 75-96

Sánchez, I. A., Cervantes-Martínez, A., Herrera, R. A. G., Campos, M. E. V., Gutiérrez-Aguirre, M. A. (2015) Evidencia de flujo preferencial al mar, del Cenote Caletita, en Cozumel, México. *Ing.* 19(1), 1-12

Secretaría de economía, (2019) Información económica y estatal. Quintana Roo.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/438153/quintana_roo_2019.pdf Consultado: 12 de noviembre de 2019

SEMAR. (s.f.) Información general de Puerto Morelos.
<https://digaohm.semar.gob.mx/derrotero/cuestionarios/cnarioPtomorelos.pdf> Consultado: 02 de abril de 2020.

Seoane, T., Martín, J. R., Martín-Sánchez, E., Lurueña-Segovia, S., Moreno, F. A. (2007) Estadística: estadística descriptiva y estadística inferencial. *Semergen* 33(9), 466-471

Simpson, E. H. (1949) Measurement of diversity. *Nature*
<https://doi.org/10.1038/163688a0>

Shuhaimi-Othman, M., Yakub, N., Ramle, N. A., Abas, A. (2011) Toxicity of metals to a freshwater ostracod: *Stenocypris major*. *J. of toxicol.*
<https://doi.org/10.1155/2011/136104>

Schmitter-Soto, J., Escobar-Briones, E., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Marín, L. E. (2002) Los cenotes de la península de Yucatán. *Lag. y Pres. de Méx.* AGT. México, 337-381

Stoessell, R. (1995) Dampening of transverse dispersion in the halocline in karst limestone in the northeastern Yucatán península. *Groundwater* 33(3), 366-371

Stoessell, R., Coke, J. (2006) An explanation for the lack of a dilute freshwater lens in unconfined tropical coastal aquifers: Yucatán example, 56 (2006), 785-792

Stoessell, R. Coke, J., Easley, H. (2002) Localized thermal anomalies in haloclines of coastal Yucatán sinkholes. *Groundwater* 40(4), 416-424

Suárez-Morales, E., Reid, J. W., Fiers, F., Iliffe, T. M. (2004) Historical biogeography and distribution of the freshwater cyclopine copepods (Copepoda, Cyclopoida, Cyclopinae) of the Yucatán península, México. *J. of Biogeogr.* 31(7), 1051-1063

Tovar-Aguilar, G. I., Arzate-Cardenas, M. A., Rico-Martínez, R. (2019) Efectos del diclofenaco en el rotífero dulciacuícola *Lecane papuana* (Monogononta: Lecanidae). *Hidrobiol.* 29(2), 63-72

Vargas-Zúñiga, J. (2004) Evaluación de residuos de plaguicidas en agua y determinación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, en la Subcuenca del Río Poás, Costa Rica. Tesis de maestría, CONICIT, Turrialba, Costa Rica.

Vargas-Hernández, A. (2015) Impacto de compuestos orgánicos persistentes (COP's) en la zona sur del acuífero de Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Sánchez-Martos, F., Molina, L. (2004) Evolución del contacto agua dulce-agua salada en un acuífero kárstico costero: acuífero de Aguadulce (Almaría), *Geogaceta*
<http://hdl.handle.net/10272/8989>

Velázquez, A., Sánchez, J., Martínez, A., Paredes, J., Mancino, M. (2017) Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de plaguicidas en suelos florícolas en Villa Guerrero, Estado de México. *RUG* 26(2), 111-129

Vieyra, M., Merediz-Alonso, G. (2011) Review: The Yucatán península karst aquifer, México. *Hydrogeol. J.* 19(3), 507-524

Ward, C., Weidie, E., Back, W. (1985) Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatán península. *Soc. Geol. de Nueva Orleans*. New Orleans, Louisiana, USA (119)

Yarto, M., Gavilán, A., Barrera, J. (2003) El Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes y sus implicaciones para México. *Gac. Ecol.* (69), 7-28

Zinger, L., Gobet, A., Pommier, T. (2012) Two decades of describing the unseen majority of aquatic microbial diversity. *Mol. Ecol.* 21(8), 1878-1896

ANEXOS

1.0 Anexo 1

Cenote Verde Lucero, imagen propia

Antibióticos, farmacéuticos de Barcelona: <https://www.farmaceuticonline.com/es/antibioticos-uso-adecuado/>

Agricultura: <https://alcanzandoelconocimiento.com/revisan-agricultura-y-gobiernos-de-yucatan-y-quintana-roo-acciones-para-reactivar-actividad-agropecuaria/>

Ganadería: <https://larevo.mx/ganaderos-del-orient-de-yucatan-sin-respaldo-de-las-autoridades/>

Acuífero de la península de Yucatán, tomado de 2-Tamayo, (2016).

2. 0 Anexo 2

2.1 Preparación de la solución testigo para análisis antibióticos

Primero se comenzó a hacer la preparación de la solución control con el kit SNAP ya que nos ayudara a conocer la presencia y ausencia de antibióticos en las muestras de agua de cada sitio de estudio.

Los reactivos para la solución control que se utilizaron fueron los siguientes:

SNAP Tetracycline test

SNAP Beta-lactam st test

La solución control, se prepararon a 5 ppm para la solución positiva de tetraciclina y belcilpenicilina, se utilizaron todo el contenido de las ampollitas, luego se diluyeron en agua miliQ, posteriormente se tomó 450 µl de la solución, vertiéndose en el tubo que incluye el kit y finalmente se encubaron a 40 °c por 5 minutos, se retiraron pasado el tiempo, posterior se vertió la solución dentro de las placas, se volvieron a introducir a la incubadora por 4 minutos para obtener las lectura final. Se realizaron 2 controles para cada reactivo. También se hicieron diluciones de la solución madre que se preparó a 2.5-5 ppm siguiendo los pasos como se mencionaron anteriormente con la finalidad de poder observar si existe presencia o ausencia de antibióticos a esas concentraciones. Además, fue necesario realizar un blanco para ambas concentraciones y así poder comprobar que la solución control estaba correctas.

2. 2 Análisis de las muestras

Las muestras del cenote Kikil, cenote Verde Lucero y cenote Chac Mool se trabajaron al con las indicaciones del manual SNAP, primero se tomaron 450 µl de muestra y se vertieron en los tubos que incluye el kit y finalmente se encubaron a 40 °C por 5 minutos, se retiraron pasado el tiempo para poner las muestras y reactivo dentro de las placas, se volvieron a introducir a la incubadora por 4 minutos para obtener la lectura final.

2. 3 Lectura para observar presencia-ausencia de antibióticos

Para saber si hay presencia o ausencia de antibióticos en las muestras se tomaron en cuenta las indicaciones de manual que proporciona el kit.

1. Si los resultados de la muestra en comparación del control son iguales es no detectable, 2. también si las muestras con comparación al control el color es más fuerte es no detectables, 3. pero si el control es más fuerte en color que la muestras es positivo tal y como se observan en las imágenes.



Figura 23. Ejemplo de cómo hacer la lectura de análisis antibióticos

3. 0 Anexo 3

En las siguientes tablas se muestra la lista de las especies por sitio de estudio y método utilizado en la temporada de seca.

El cenote Verde L. es el primer sitio que presenta mayor cantidad de especies a la profundidad de 1 m colectado con el sistema, segundo el cenote Kikil y por último el cenote Chac mool. En 4 m el sitio con mayor especie es el cenote Chac Mool y en 8 m el sitio con mayor especie es el cenote Verde Lucero.

Tabla 20. Lista de la riqueza de especie cada sitio, colectado con SR. Prof.=profundidad.

Prof.	Grupo	Orden	Familia	Especie	SR		
					CK	CVL	CCH
1 m	Rotifera	Ploima	Brachionidae	<i>Ketatella americana</i>		x	
			Lecaniade	<i>Keratella cochearis</i>		x	
			Testudinellidae	<i>Testudinella patina</i>		x	
	Copepoda	Calanoida	Diaptomidae		x	x	
		Cyclopoida	Cyclopoidae		x	x	x
	Cladocera	Anomopoda	Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>		x	
	Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>			
4 m	Rotifera	Ploima	Brachionidae				
			Lecaniade	<i>Lecane cornuta</i>			x
				<i>Lecane bulla</i>			
				<i>Lecane luna</i>			x
	Copepoda	Calanoida	Testudinellidae	<i>Testudinella patina</i>			x
			Diaptomidae		x	x	
			Cyclopoidae		x	x	
			Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>		x	
	Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>			
	Rotifera	Ploima	Brachionidae				

CONTINUACIÓN

8 m			Lecaniade	<i>Lecane cornuta</i>		x
				<i>Lecane bulla</i>		
				<i>Lecane luna</i>		x
			Testudinellidae	<i>Testudinella patina</i>	x	
				<i>Dissotrocha aculeata</i>		x
				<i>Bdelloideo</i>		x
	Copepoda	Calanoida	Diaptomidae		x	x
		Cyclopoida	Cyclopoidae		x	x
	Cladocera	Anomopoda	Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>		x
	Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>		

Tabla 21. Lista de la riqueza de especie de cada sitio, colectado con MB. Prof.=Profundidad.

Prof.	Grupo	Orden	Familia	Especie	MB		
					CK	CVL	CCH
1 m	Rotifera	Ploima	Brachionidae	<i>Ketatella americana</i>		x	
			Lecaniade	<i>Lecane cornuta</i>			x
				<i>Lecane bulla</i>			x
			Hexarthridae	<i>Hexarthra</i>		x	x
			Testudinellidae	<i>Testudinella patina</i>		x	
				<i>Dissotrocha aculeata</i>			x
	Copepoda	Calanoida	Diaptomidae		x	x	
		Cyclopoida	Cyclopoidae		x	x	x
	Cladocera	Anomopoda	Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>		x	
	Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>	x		x
4 m	Rotifera	Ploima	Brachionidae	<i>Keratella cochearis</i>		x	
			Lecaniade	<i>Lecane cornuta</i>			x
				<i>Lecane bulla</i>			x
			Hexarthridae	<i>Hexarthra</i>		x	x
			Testudinellidae	<i>Testudinella patina</i>		x	x

CONTINUACIÓN

			<i>Colurella</i>		x
Copepoda	Calanoida	Diaptomidae		x	x
	Cyclopoida	Cyclopoidae		x	x
Cladocera	Anomopoda	Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>		x
Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>		
8 m	Rotifera	Ploima	Brachionidae		
	Copepoda	Calanoida	Diaptomidae	x	x
		Cyclopoida	Cyclopoidae	x	x
	Cladocera	Anomopoda	Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>	x
	Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>	

Tabla 22. Lista de la riqueza de especie de cada sitio, colectado con MC. Prof.=Profundidad.

Prof.	Grupo	Orden	Familia	Especie	MC		
					CK	CVL	CCH
1 m	Rotifera	Ploima	Brachionidae	<i>Keratella cochearis</i>	x	x	
				<i>Lecane cornuta</i>			x
				<i>Lecane bulla</i>			x
	Copepoda	Calanoida	Diaptomidae		x	x	x
		Cyclopoida	Cyclopoidae		x	x	x
	Cladocera	Anomopoda	Daphniidae	<i>Ceriodaphnia cornuta</i>	x	x	
	Ostracoda	Podocopida	Cyprididae	<i>Cypridopsis vidua</i>			