



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



**Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chetumal**

TEMA:

**Calidad del agua de sistemas lacustres en la Península de
Yucatán, México**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: LICENCIATURA EN
BIOLOGÍA**

PRESENTA:

Noel Omar Cohuo Zaragoza

Asesor interno: Leopoldo Querubín Cutz Pool

Asesor externo: Plutarco Hernández Hernández

Revisores:

Dra. Nallely Adriadna Aguilar Castillo

ING. Samuel Elías Rosado Martín



Instituto Tecnológico de Chetumal
Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica

SECCIÓN: DEPTO. ING. QUÍM. Y BIOQ.
OFICIO No 0277-DT-2025

Chetumal, Q. Roo., **03/Abril/2025**

ASUNTO: Liberación de Proyecto para Titulación Integral

LIC. CECILIA LORÍA TZAB
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

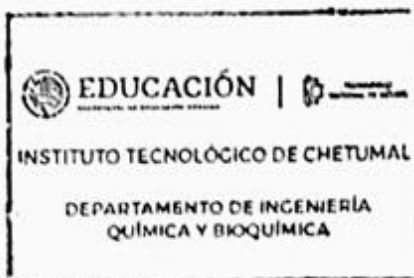
Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación integral:

a) Nombre del Egresado:	NOEL OMAR COHUO ZARAGOZA
b) Carrera:	LICENCIATURA EN BIOLOGÍA
c) N° de control	20390653
d) Nombre del proyecto	CALIDAD DEL AGUA DE SISTEMAS LACUSTRES EN LA PENINSULA DE YUCATÁN, MÉXICO.
d) Producto	TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS)

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica-
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México**

M.C. ALEJANDRO MEDINA QUEJ
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA.



 DR. LEOPOLDO GUTIERREZ CUTZ POOL ASESOR	 DR. SALMA ARIADNA AGUILAR CASTRO REVISOR	 ING. SAMUEL ELÍAS ROSADO MARTÍN REVISOR
--	--	---

C.c.p. Expediente



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Insurgentes #330, esq. Andrés Quintana
Roo, Col. David Gustavo Gutierrez, Apdo. Postal
67 C.P. 77013,
Chetumal, Quintana Roo, Tel. (983) 8322330
ext. 101. / www.chetumal.tecnm.mx



Agradecimientos

Agradezco al Instituto Tecnológico de Chetumal, por brindarme las instalaciones y los equipos necesarios, como las sondas, para realizar los muestreos en las lagunas. Su apoyo fue fundamental para el desarrollo de este proyecto. Al Dr. Sergio Cohuo Durán, por su invaluable orientación en los análisis estadísticos y la elaboración de mapas, y al MMZC. Christian Moisés Huix, por su apoyo en el procesamiento de las muestras y enseñarme a realizar los análisis de laboratorio. Al Dr. Juan Ramón Beltrán Castro, por su asesoramiento y ayuda en los análisis de los datos, que fueron clave para comprender y presentar los resultados de manera sólida. A mis asesores, el Dr. Leopoldo Querubín Cutz Pool y el MMZC. Plutarco Hernández Hernández, por su guía constante y aportes esenciales durante este proceso académico. Finalmente, a mi familia, por su apoyo emocional y económico durante toda mi carrera. Gracias a su amor y confianza pude superar los retos y alcanzar esta meta. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a mi papá Serviliano, a mi madre Lucila, a mi hermana Grisel, a mi hermano Joel, quienes me apoyaron durante esta etapa de mi vida en la universidad. De igual forma agradezco a mis amigos Valeria, Abigail, Montserrat, Ilse, Ángel y Daniela por su amistad. También a mi primo Sergio por integrarme al equipo de trabajo y apoyarme cuando necesitaba su ayuda. A todos ellos agradezco de su tiempo, amor y amistad.

Resumen

La Península de Yucatán se caracteriza por una composición kárstica, por tener cuerpos de agua lenticos y la ausencia de ríos caudalosos. En cuanto a vegetaciones se encuentran comunidades de manglares, peten, selva baja caducifolia, selva media y sabanas. En la Península de Yucatán los problemas de contaminación están concentrados en zonas de desarrollo urbano y zonas con desarrollo turístico. Una de las formas de medir el grado de afectación es mediante la calidad de agua, la cual se mide mediante índices, y uno de ellos es el Índice de Calidad de Agua (ICA) propuesto por Brown y colaboradores. Este índice se basa en la medición de parámetros fisicoquímicos y biológicos, integrados en una ecuación, la cual asigna a cada variable un peso y un subíndice.. Para el presente estudio se muestrearon un total de 33 sistemas acuáticos, en cada sitio se midió la temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y sólidos totales disueltos usando una sonda multiparamétrica Hanna HI98130, también, se midió la turbidez con un Turbidímetro y adicionalmente se colectó una muestra de agua en botellas de polietileno de 1.5 litros para calcular la concentración de coliformes totales, la demanda bioquímica de oxígeno mediante el método de 5 días, nitrógeno total mediante el kit de Hach Persulfate Digestion Method LR (0.5 to 25.0 mg/L N) y fosfatos con un kit de Hach PhosVer® 3 with Acid Persulfate Digestion. Se calculó la concentración de Clorofila-a mediante el método de Determinación de Clorofilas Strickland y Parson (1972). Además, se realizó una interpolación de la calidad del agua y se realizó un análisis para determinar si el agua de los sitios puede ser utilizada para fines recreativos. Las variables ambientales que tuvieron una mayor influencia sobre los sistemas lacustres muestreados fueron la Clorofila-a, Sólidos Disueltos Totales, Conductividad Eléctrica, Coliformes Totales, Turbidez y Nitrógeno Total. Los sitios que presentaron mayores concentraciones de Nitrógeno, Turbidez, Clorofila-a y Coliformes Totales fueron El Ocho, Chacchoben, La Sabana norte, centro y sur. En

cuanto al ICA se obtuvo que Xul-Ha fue el único sitio que alcanzo una calidad buena con un índice de 70. Por otra parte, 5 sitios presentaron una calidad mala, siendo La Sabana norte con un índice de 31, seguido por El Ocho con un índice de 37, Chacchoben tuvo un índice de 43, seguido de la Sabana sur y Sabana centro con un índice de 49. El resto de los sitios presentaron una calidad media y un índice que varía entre los 51 y 67. La interpolación arrojo que la calidad de agua en la Península de Yucatán es media en la zona centro y oeste, con zonas en la costa es con calidad de agua mala. Para determinar si en los sitios se pueden realizar actividades recreativas se compraron los limites permisibles propuestos por la CONAGUA, la NOM-127-SSA1-2021 y los lineamientos bases de calidad de agua de Canadá y la Columbia Británica, encontrándose que los sitios que presentaron altos niveles de Nitrógeno Total y concentraciones de Clorofila-a mayores a 50 mg/m² no son aptos para uso recreativos. En conclusión, la calidad del agua en la Península de Yucatán es media, con sitios de calidad mala, los cuales cuentan con desarrollo urbano, turístico o agrícola .

Palabras clave: ICA, calidad del agua, Península de Yucatán, contaminación

Índice

Introducción	5
Antecedentes	8
Marco teórico	14
Sistemas lacustres	14
Importancia de los humedales y afecciones en la calidad del agua	15
Monitoreo de la calidad del agua mediante el ICA	15
Parámetros usados para el ICA	17
Oxígeno disuelto	17
Temperatura	17
pH	18
Conductividad eléctrica	18
Demanda bioquímica de oxígeno	19
Coliformes totales	19
Turbidez	19
Clorofila-a	20
Sólidos disueltos totales	20
Nitrógeno Total (NT)	21
Fósforo total (PT)	21
Justificación	22
Objetivo general	23
Objetivos específicos	24
Metodología	24
Área de estudio	24

Método	26
Determinación de Clorofila-a	27
Determinación de fosforo total, nitrógeno total y coliformes totales.....	27
Estimación del Índice de Calidad de Agua (ICA)	28
Zonación del ICA de los sistemas acuáticos	29
Normatividad de la calidad del agua	30
Análisis de datos	30
Resultados.....	31
Variables ambientales	31
Análisis de Similitud de las variables ambientales entre los sitios evaluados	38
Análisis de componentes principales.....	39
Índice de Calidad de Agua	44
Zonación de la calidad de agua en la Península de Yucatán	46
Normatividad de la calidad de agua	48
Discusión	52
Parámetros ambientales que describen la calidad del agua	52
Índice de calidad de agua de los sistemas muestreados.....	57
Zonación de la calidad de agua en la Península de Yucatán.....	58
Análisis de resultados en función de la normativa mexicana vigente de calidad de agua	60
Conclusión	61
Referencias.....	63

Índice de tablas

Tabla 1. Calificación de la CA según los valores del ICA (Castro <i>et al.</i> , 2015)	16
Tabla 2. Clasificación de las variables (Samboni-Ruiz <i>et al.</i> , 2007).	16
Tabla 3. Sitios de muestreo	25
Tabla 4. Categorías de la CA (recuperado de Water Research Center, 2024)	29
Tabla 5. Variaciones de las Variables ambientales de los sitios estudiados	36
Tabla 6. Resultados del PERMANOVA de los grupos obtenidos en NMDS, donde se analizaron las variables ambientales para identificar si los grupos formados realmente eran diferentes.....	39
Tabla 7. Contribución de las dimensiones uno y dos. Donde se muestran las contribuciones de cada variable medida.	41
Tabla 8. Distribución de los resultados del Índice ICA y categorización de Calidad de Agua pertenecientes a los sitios de muestreo.	45
Tabla 9. Datos obtenidos de CONAGUA (Recuperado de CONAGUA, s. f.)	46
Tabla 10. Lista de lagunas adicionales usadas para la interpolación.	47
Tabla 11. Límites permisibles de Sólidos Disueltos Totales, Clorofila-a, pH y Turbidez según la NOM-127-SSA1-2021 y los lineamientos bases para aguas de usos recreativos de Canadá y de la Columbia Británica	49
Tabla 12. Calidad de agua según indicadores de CONAGUA.....	51

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de sitios de muestreo.	26
Figura 2. Similitud entre sitios de muestreo. El grupo 1 se caracterizó por tener altos niveles de Sólidos Disueltos Totales, el grupo 2 se caracterizó por presentar bajos niveles de Sólidos Disueltos Totales y registrar las mayores temperaturas, el grupo 3 presentó mayores niveles de Nitrógeno, Fosfatos, Clorofila-a y Coliformes Totales, Nopalitos presentó el mayor número de Sólidos Disueltos Totales y Xul-Ha fue el sitio que presentó menor concentración de Coliformes Totales, Nitrógeno y Fosfatos.....	38
Figura 3. Análisis de componentes principales de Coliformes Totales (CT), Potencial de Hidrógeno (pH), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Conductividad	

Eléctrica (CE), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Clorofila-a (Chl-a), Turbidez, Nitrógeno, Fosfatos, Temperatura (Temp) y Oxígeno Disuelto (OD). Los puntos representan los sitios de muestreo. El color de las líneas que señalan las variables indica la contribución que tienen las variables sobre los sitios.	40
Figura 4. Porcentaje de varianza explicado. Donde 1=Clorofila-a, 2=Sólidos disueltos totales, 3=Turbidez, 4= Conductividad eléctrica, 5=Coliformes totales, 6=Fosfatos, 7=Nitrógeno, 8=Demanda bioquímica de oxígeno, 9=Temperatura, 10=pH.....	41
Figura 5. Suma de las contribuciones de las variables de las dimensiones 1 y 2.	43
Figura 6. Mapa de calor de las variables indicadoras de contaminación, datos usados para la elaboración del mapa corresponden a las variables que tuvieron una mayor influencia sobre los sitios de muestreo según lo obtenido en el PCA.	44
Figura 7. Interpolación del ICA en la Península de Yucatán, la intensidad del color azul refleja la calidad del agua, mientras más oscuro sea el color peor es la calidad de agua y mientras más claro la calidad del agua es mejor.	48

Índice de anexos

Anexo 1. Criterios para la asignación de semáforo en sistemas acuáticos según los criterios de CONAGUA.	77
--	----

Introducción

La Península de Yucatán (PY) en la porción mexicana está compuesta por los estados de Quintana Roo, Campeche y Yucatán (Pérez-Sarabia *et al.*, 2017). En cuanto a la hidrogeografía, está compuesta por un sistema generalizado de corrientes subsuperficiales y con ausencia de ríos (Frausto-Martínez & Ihl, 2015). Los cuerpos de agua presentes son de composición kárstica, debido a que la Península de Yucatán es una plataforma de origen calcáreo (Cohuo *et al.*, 2023; Silveira *et al.*, 2002). Los cuerpos de agua continentales presentes en la Península de Yucatán son conocidos como sistemas lacustres, los cuales se caracterizan por ser cuerpos de agua dulce, cuyo origen se debe a fallas en el terreno de origen tectónico (Carrillo *et al.*, 2024; Cowardin *et al.*, 1979; Frausto-Martínez & Ihl, 2015; SEMARNAT, 2013).

Los sistemas lacustres son cuerpos de aguas superficiales que tienen una gran importancia ecológica, debido a que proveen hábitat y refugio para gran diversidad de especies de aves, reptiles, peces, artrópodos, anfibios (Alvarez-Legorreta *et al.*, 2021; SEMARNAT, 2013). Además, de ser guarderías de larvas de insectos y peces que mantienen las poblaciones y la producción primaria (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013). Por otra parte, estos tienen funciones de control de inundaciones, recarga o reposición de agua subterránea, formación de suelos, depuración de aguas, reservorio, retención y exportación de nutrientes y sedimentos; provisión de productos, mitigación y adaptación de efectos del cambio climático (Alvarez-Legorreta *et al.*, 2021; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013). También son de importancia económica para el ser humano, debido a que son utilizados para la obtención de alimentos pesqueros, materia prima, materiales de construcción, transporte, agua potable, el turismo, entre otros (Cervantes, 2007; SEMARNAT, 2013). Sin embargo, los sistemas lacustres no solo se limitan a brindar servicios ambientales, sino que también brindan beneficios socioculturales, ejemplo de ello son las actividades de recreación, deporte, realización de actividades primarias, prácticas religiosas, elaboración de productos artesanales, entre otras (Alvarez-Legorreta *et al.*, 2021; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; Cervantes, 2007; Lin *et al.*, 2018; SEMARNAT, 2013).

Una problemática creciente en la PY, es que la calidad del agua en estos sistemas lacustres se está viendo afectada por las actividades humanas, tales como el turismo, agricultura, ganadería, acuacultura, urbanización, el mal manejo de aguas residuales y la deforestación (Cohuo *et al.*, 2023; Rubio-Cisneros *et al.*, 2018; SEMARNAT, 2013). Una de las problemáticas que presenta la contaminación de los cuerpos superficiales es que arrastran contaminantes a los mantos acuíferos al ser la fuente primaria de recarga (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2024; Saint-Loup *et al.*, 2018). En la región de la Península de Yucatán es un problema severo debido a la permeabilidad de los suelos kársticos (Cohuo *et al.*, 2023).

Una de las formas de medir el impacto del ser humano en los cuerpos de agua es mediante el uso del índice de calidad del agua (ICA), que considera adición de compuestos químicos y orgánicos provenientes de las actividades antropogénicas (Brown *et al.*, 1972). El ICA es un índice que nos permite evaluar la calidad del agua a partir de variables fisicoquímicas: temperatura, pH, nitrógeno, fósforo, turbidez, conductividad, sólidos totales disueltos, y oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno y biológicas como los coliformes totales (Brown *et al.*, 1972). Cada parámetro tiene una influencia distinta en el cuerpo de agua, por lo cual cada variable recibe un peso diferente dentro de la ecuación. Al aplicar la fórmula se asigna un número único que expresa la calidad del recurso (Brown *et al.*, 1972). Este valor clasifica la calidad del agua en las categorías de: pobre, regular, buena y excelente, el índice indica el grado de la calidad del agua y nos da una perspectiva de si el sistema se encuentra en condiciones para los diferentes usos que se le puede dar o si este ha sufrido afectaciones por actividades antropogénicas (Caho-Rodríguez & López-Barrera, 2017; Duncan *et al.*, 2019; Karmakar & Mahesh, 2020).

El monitoreo de la calidad del agua representa una de las mejores estrategias para establecer planes de manejo y de conservación, en donde se puede poner especial interés en aquellos sistemas que se encuentren fuertemente contaminados (Rodríguez-Nuñez *et al.*, 2022; Roldán-Reascos *et al.*, 2024). Con

base en lo anterior, en el presente trabajo nos planteamos evaluar la calidad del agua de 31 sistemas acuáticos distribuidos en tres estados de la PY mexicana mediante la aplicación del Índice de Calidad de Agua. Para conocer el estado actual de los sistemas lacustres y generar un antecedente para futuras evaluaciones, así como para la implementación de estrategias de manejo y protección.

Antecedentes

A nivel mundial se han desarrollado trabajos en los que destacan la importancia del uso de índices para estimar la calidad del agua, dentro de los que podemos destacar el de Caho y López (2017) quienes determinaron el Índice de Calidad del agua (ICA) del sector occidental del humedal Torca-Guaymaral en Colombia, usando el Universal Water Quality Index (UWQI). El cual es un índice simplificado usado para calidad de agua para consumo humano, con este índice usaron las variables de demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos suspendidos totales, pH y relación nitrógeno total / fósforo total. Para este mismo estudio, implementaron el Canadian Water Quality Index (CWQI) basado en la consecución de objetivos para proteger los usos del cuerpo de agua. El CWQI cambia de forma de expresión dependiendo del tipo de contaminante. Para este índice usaron pH, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales, sólidos suspendidos totales, grasas, aceites y tensoactivos. Para la obtención de datos seleccionaron cuatro puntos de muestreo y monitoreo, de los cuales obtuvieron datos entre agosto de 2015 y abril 2016, lo cual abarca cuatro temporadas distintas. Obtuvieron que la mayor parte de los puntos valorizados con el UWQI tuvieron una valoración regular y para los puntos valorados con el CWQI fueron valorizados como pobres. El estudio concluye que el CWQI es idóneo para evaluaciones espaciotemporales y el UWQI para evaluaciones rápidas de algún uso específico del agua.

Duncan y colaboradores (2019) estudiaron la calidad del agua en la cuenca del río Densu, Ghana durante los años 2010 y 2015 usando el índice de calidad de agua (ICA) y el índice de contaminación de Nemerow. Usaron 25 parámetros fisicoquímicos para medir la calidad del agua para establecer el alcance de deteriorización resultante de las actividades antropogénicas. Los datos fueron obtenidos del Ghana Water Company Regional Laboratory in Weija Accra Ghana. Los resultados indican que doce de los veinticinco parámetros estuvieron encima de los límites establecidos por Organización Mundial de la Salud (OMS). Entre los parámetros analizados se encuentra el amonio, turbiedad, hierro, aluminio y

fosforo los cuales excedieron los limites en todos los años de estudio. La concentración de cobre excedió los límites de la OMS en todos los años a excepción de 2011; por otra parte, el manganeso no excedió los limites durante 2010 y 2013; y el nitrato solamente en año 2015 excedió los limites en 2015. Entre todos los parámetros la turbiedad fue la que presentó el mayor incremento, siendo este de entre un 380% y 6,891.1%. Los principales contaminantes fueron turbiedad, amonio, hierro, fosforo y aluminio entre 2010 y 2015. El índice de agua resultante indica que la calidad del agua es frecuentemente amenazada o dañada entre 2010 y 2014; mientras que en 2015 fue casi dañada. Las actividades de minería ilegal, granjas a lo largo del rio y la descarga de agua residuales sin tratar fueron las principales fuentes de contaminación lo cual es una seria amenaza para la salud de los habitantes de comunidades que usan esta agua para consumo.

Karmakar y Singh (2021) evaluaron la calidad del agua de cuerpos de agua de la India, alrededor de A D Nagar, Dukli, Badharghat y polígonos industriales de Budhjungnagar y el este de Tripura. Durante las temporadas de pre-monzón y post-monzón entre el 2016 y 2018. Midieron oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes fecales, coliformes totales, demanda química de oxígeno, pH, conductividad eléctrica, solidos suspendidos totales, cloruros, bicarbonatos, sulfatos, dureza total, calcio, metales pesados, magnesio, entre otros parámetros. Dichos parámetros se midieron usando el estándar de APHA. Se compararon los parámetros con los estándares de BIS. La demanda bioquímica de oxígeno en todos los cuerpos de agua estuvo debajo de los limites permisibles a excepción del estanque al sureste de Jutemill, Hapania durante la temporada de pre-monzón. Los coliformes totales al oriente y nororiente del polígono industrial de Badharghat estuvieron debajo de los límites. Los valores del ICA demostraron que 75% de las muestras de agua superficial fueron pobres y 25% fueron de buena calidad en las dos temporadas. El análisis estadístico mostró correlaciones positivas y significativas entre los pares de parámetros seleccionados en la superficie del agua. De igual forma el estudio reveló que el agua superficial de esos cuerpos de agua necesita tratamientos antes de ser

consumido y que necesitan ser protegidos de contaminación industrial y doméstica.

Considerando estudios en el caribe, podemos destacar el trabajo de Fernández y Guardado (2020) evaluaron la calidad de agua en el río Cabaña, Cuba usando el Índice de Calidad de Agua superficial (ICAsup) para analizar la composición bacteriológica y fisicoquímica del agua. Muestrearon un total de 20 puntos durante los años 2017 y 2018, en las temporadas de lluvias y secas, calculando el ICA para cada uno de los puntos y fechas de muestreo. Sus resultados muestran que la calidad del agua decrece en el sentido del río, es decir desde la zona alta hasta la baja. De igual forma comprobaron que principal fuente de contaminantes son provenientes de residuales industriales, desechos domésticos y desechos de albañales. A tal grado que ocasionan la disminución de la autodepuración del río. Otro trabajo es el realizado por Roldán y colaboradores (2024), quienes evaluaron la calidad del agua para consumo humano en un área rural de Ecuador, para ello utilizaron el Water Quality Index (WQI) y el Simplified Water Quality Index (SQWI). Sus muestreos fueron realizados durante 2018 y 2019 tomando un total de 18 parámetros fisicoquímicos, los cuales fueron: pH, conductividad, oxígeno disuelto, color, temperatura, fosfatos, nitritos, nitratos, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, turbiedad, sustancias activas de azul de metileno, grasas y aceites, coliformes totales, amonio, nitrógeno y coliformes fecales. Obteniendo que para 2018 los WQI y SQWI valores entre 79.80 y 81.31; y para 2019 valores de 76.99 y 79.89 respectivamente. Obtuvieron como resultados que el agua del sitio de estudio necesita de un tratamiento convencional para lograr una calidad de agua adecuada para consumo humano.

En México Rubio-Arias y colaboradores (2002) desarrollaron un modelo para calcular el Índice de Calidad de Agua en una presa durante el año 2009 en el municipio de Aldama, Chihuahua, México. Colectaron muestras de agua mensualmente en 10 sitios de muestreo, los sitios fueron elegidos aleatoriamente. Midieron 11 parámetros fisicoquímicos: pH, fluoruros, cloruros, nitrógeno

amoniacal, fósforo, color, turbiedad, sulfatos, sólidos totales, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Su modelo califica la calidad de agua con valores <2.3 pobre, 2.3 a 2.8 buena y >2.8 excelente. Dentro de sus resultados obtuvieron que calidad del agua en algunos sitios durante el otoño era pobre y tenía un cambio a valores mayores a 2.8 durante los meses de la temporada de lluvias.

Castañeda-Villanueva y colaboradores (2018) hicieron un diagnóstico de la calidad del agua en la región de Los Altos Norte de Jalisco, México. En el estudio de muestreo un total de 20 puntos de muestreo de agua superficiales, que se encontraban en 8 municipios, los muestreos se realizaron en el 2014 y el 2016. Para cada uno de los sitios de muestreo se midieron las variables de temperatura, conductividad eléctrica, pH, potencial de reducción de oxígeno, concentración de oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal y cloruros. Para diagnosticar de la calidad del agua compararon sus variables con límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994. Encontrando que los sitios que tenían una alta contaminación eran los lagos de Lagos de Moreno, Villa Hidalgo, San Juan de Los Lagos, Unión San Antonio. Concluyeron que todos cuerpos de agua contaban con cierto grado de contaminación.

Hernández-Vargas y colaboradores (2020) evaluaron la calidad del agua y de los ecosistemas acuáticos de dos cuencas del río Tuxcacuesco, en Jalisco, México. Para la evaluación de la calidad del ecosistema utilizaron un índice de integridad biótica que se basa en la ausencia o presencia de macroinvertebrados; y también usaron el índice de calidad de riberas. El estudio se llevó a cabo en la temporada de lluvias del año 2015 y en la temporada de secas de 2016, se hicieron dos muestreos en cuatro sitios para cada una de las temporadas. En los muestreos se colectaron invertebrados y se tomaron parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica, nitrógeno y la velocidad de flujo del agua. Obtuvieron como resultados que el estado ecológico de las dos cuencas era pobre, también registraron que las concentraciones de nitrógeno estaban fuera de los límites permisibles para irrigación agrícola y potable. Concluyendo que hay contaminación de materia orgánica.

Rodríguez y colaboradores (2022) evaluaron la contaminación del agua del río El Pueblito, Querétaro, México. Usando parámetros fisicoquímicos y bioindicadores. Realizaron un monitoreo semanal durante tres meses en siete sitios de muestreo. Calcularon el índice de calidad del agua para facilitar la representación de los resultados. Del análisis fisicoquímico obtuvieron que muestran las tendencias que los análisis hechos con bioensayos usando *Daphnia magna* y el ICA. Los valores demostraron un deterioro de la calidad del agua de aguas arriba a aguas abajo a causa de las descargas que se produjeron a durante su paso por ciudad Corregidora. Los valores del ICM cambiaron de una calidad de 83.00 ± 7.4 (buena) en aguas arriba a 27.00 ± 0.85 (mala) en aguas abajo. El estudio demuestra la utilidad del ICA y como una prueba de toxicidad por *D. magna* puede ser una opción accesible y rápida para indicar altos niveles de contaminación.

En la Península de Yucatán, Silveira y colaboradores (2002) establecieron una línea base del estado trófico de las diferentes zonas a lo largo del litoral de Yucatán. Los muestreos se realizaron entre 2001 y 2002 en 12 localidades. Midieron las variables de salinidad, oxígeno disuelto, transparencia, nitrógeno inorgánico, sílice, fosforo y *Clorofila-a*. Obtuvieron que los puertos y algunas lagunas costeras tenían un estado eutrófico debido a las grandes concentraciones de *Clorofila-a*. En zonas con menor desarrollo urbano obtuvieron valores bajos de *Clorofila-a* y oxígeno disuelto, lo cual sugiere condiciones oligotróficas. Los autores concluyen que los resultados resaltan una necesidad para estrategia regional para atender el potencial problema y recomiendan hacer un estudio de condiciones tróficas junto con información de las fuentes de nutrientes, con el fin de dar información para el manejo, investigación y monitoreo de las prioridades de la región.

Por otra parte, en el 2006 Aranda-Cirerol y colaboradores (2006), se realizaron un monitoreo de calidad del agua de la zona costera noreste de Yucatán, que inicio como un programa de monitoreo, pero este no tuvo continuidad.

González y colaboradores (2008) evaluaron la variación de la calidad de agua y estado eutrófico de lagunas costeras de la Península de Yucatán. Para ello realizaron muestreos bimestrales en 11 estaciones de muestreo durante un año, en las lagunas de Chelem y Celestún. En cada estación de muestreo se tomaron datos de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y *Clorofila-a*. Sus resultados indicaron que Celestún es influenciada por fuertes descargas de agua subterránea con altas concentraciones de nitratos y silicatos; y bioturbación, lo cual le da condiciones oligo-mesotróficas. Mientras que Chelem obtuvo grandes concentraciones de fosfatos y amonio, lo cual indica el impacto de aguas residuales de las zonas urbanas que la rodean, resultando con condiciones meso-eutróficas. Concluyen que las condiciones que explican los patrones observados son: el tiempo de residencia del agua, la contaminación de acuíferos y los patrones climáticos.

Rubio-Cisneros y colaboradores (2018) midieron la calidad del agua de 12 entradas de marea en la Isla de Holbox, Quintana Roo. Utilizaron datos de 43 sitios de muestreos que no están publicados y usaron valores de referencia de calidad de agua que estaban publicados. Analizaron los datos con el Índice Trófico (TRIX por sus siglas en inglés). Los sitios de entradas de marea registraron valores de salinidad de 11 a 36 PSU, valores promedio de nitratos de $0.83 \mu\text{mol}^{-1}$ y nitritos de $0.14 \mu\text{mol}^{-1}$, silicato de $78.6 \mu\text{mol}^{-1}$, fosforo reactivo soluble de $48.8 \mu\text{mol}^{-1}$, y *Clorofila-a* de 29.7 mg/m^3 . El TRIX obtuvo valores entre 2 y 6, que indica que la calidad de agua es baja, lo cual sucede en la mayoría de las entradas de mareas. Los cambios temporales de *Clorofila-a* y fosforo reactivo soluble, sugieren el posible recibimiento de aguas residuales. Los resultados que obtuvieron demuestran que hay problemas con la calidad de agua de Holbox y que hay una necesidad de acciones de manejo para la prevención del deterioro de los servicios ecosistémicos costeros.

Cohuo y colaboradores (2023) evaluaron la alteración antropogénica del lago La Sabana, en el sur del estado de Quintana Roo, México. Evaluaron la calidad del agua utilizando indicadores microbiológicos, químicos, físicos y

metales pesados en los sedimentos superficiales y también evaluaron el riesgo ambiental utilizando tejidos de peces. Encontraron que la calidad del agua era de mala a media y lograron detectar que en la zona central-sur mostraron altos niveles de microorganismos que excedían los límites nacionales. En cuanto a los metales pesados presentes en los tejidos de los peces encontraron que los niveles de zinc y mercurio era bajos. Concluyeron que el lago La Sabana puede ser considerado como un modelo de efectos secuenciales y potenciales de alteraciones antropogénicas en los sistemas acuáticos tropicales kársticos en la Península de Yucatán.

Marco teórico

Sistemas lacustres

Los sistemas lacustres incluyen embalses inundados permanentemente, lagos, lagos intermitentes y lagos de mareas con salinidades menores a 0.5% (Cowardin *et al.*, 1979). Los sistemas lacustres se caracterizan por estar localizados en una depresión topográfica o sobre un canal ribereño; un tamaño menor a 8 hectáreas; y que no tenga una cobertura mayor al 30% de matorrales, árboles, musgos y líquenes (Cowardin *et al.*, 1979). Las litofaces de estos sistemas sufren cambios abruptos por eventos como el cambio climático y la tectónica de placas. La química del agua de estos sistemas es muy variable dentro de la misma cuenca y cambia en periodos cortos de tiempo (Cowardin *et al.*, 1979). Los cambios en estos ambientes son más notorios que en las cuencas oceánicas. Estos sistemas son complejos, su distribución de plantas y animales es controlada por factores abióticos tales como la luz, oxígeno, salinidad, sustrato, nutrientes y factores bióticos como la depredación, simbiosis, competencia y pastoreo (Scott *et al.*, 2012). El origen de este tipo de cuencas o sistemas es procedente de procesos volcánicos, tectónicos, deslizamientos, marinos, glaciares y fluviales (Cintrón-Molero & Schaeffer-Novelli, 2004; Cowardin *et al.*, 1979).

Importancia de los humedales y afecciones en la calidad del agua

Los humedales son de gran importancia puesto que de ellos se obtienen recursos tales como alimento, madera, plantas medicinales y así como los servicios ambientales que estos prestan como el control de inundaciones, filtrado y limpieza del agua, refugio para los animales y plantas (González *et al.*, 2010; Moreno-Casasola *et al.*, 2010; SEMARNAT, 2013). Sin embargo, las actividades antropogénicas como la ganadería, agricultura y la urbanización afectan los humedales. Estas modifican el terreno y la composición del agua, lo cual tiene efectos negativos sobre las especies vegetales y animales existentes (López-Díaz *et al.*, 2021; Menchaca-Dávila & Alvarado-Michi, 2011; Moreno-Casasola *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2007; SEMARNAT, 2012).

Un tema de gran importancia y relevante hoy en día es la calidad del agua, puesto que esta es un reflejo de las afectaciones que tienen los cuerpos de agua (Hernández-Vargas *et al.*, 2020). Las modificaciones en las propiedades fisicoquímicas y biológicas afectan no solo el equilibrio del ecosistema, sino que también puede tener efectos sobre la misma población (Avalos-Ramírez, 2023; Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017; Ibarrarán *et al.*, 2017). La presencia de contaminantes puede incidir sobre la salud (por la presencia de metales pesados y otros contaminantes), ya sea por el consumo de agua contaminada o de alimentos provenientes de estas aguas (Avalos-Ramírez, 2023; Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017; Ibarrarán *et al.*, 2017). Conocer el estado de calidad de agua de los cuerpos acuáticos permite desarrollar estrategias para su manejo y remediación (Ibarrarán *et al.*, 2017; Rodríguez-Nuñez *et al.*, 2022; Roldán-Reascos *et al.*, 2024).

Monitoreo de la calidad del agua mediante el ICA

El ICA es un índice que establece el estado de contaminación del agua a la fecha en la cual fue muestreado el lugar, el índice se calcula midiendo propiedades fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos de agua (Castro *et al.*, 2015). Este índice asigna un valor numérico que puede clasificar la calidad del agua en cinco categorías (ver tabla 1) (Castro *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2018). La medición se realiza con parámetros como temperatura, transparencia, pH,

conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales, sólidos totales disueltos, nitrógeno y fósforo (Castro *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2018; Samboni-Ruiz *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2007). En algunos estudios utilizan más variables, sin embargo, al analizar cinco o seis parámetros de los descritos anteriormente, se puede determinar en gran parte la calidad del agua (Castro *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2018; Samboni-Ruiz *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2007).

Tabla 1. Calificación de la CA según los valores del ICA (Castro *et al.*, 2015)

Categoría de valores	Calificación de la CA	Señal de alerta
0 – 0.25	Muy mala	Rojo
0.26 – 0.50	Mala	Naranja
0.51 – 0.70	Regular	Amarillo
0.71 – 0.90	Aceptable	Verde
0.91 – 1.0	Buena	Azul

Los parámetros fisicoquímicos del agua dan información de la naturaleza química y propiedades físicas, pero no de su incidencia en la vida acuática (Samboni-Ruiz *et al.*, 2007). Mientras que los métodos biológicos dan esta información faltante, sin embargo, no indica cuáles son los contaminantes responsables. Las variables usadas para la medición del ICA se pueden clasificar en cuatro categorías (ver tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de las variables (Samboni-Ruiz *et al.*, 2007).

Categoría	Variables que las representan
Nivel de oxígeno	Oxígeno disuelto, Demanda bioquímica de oxígeno y Demanda química de oxígeno
Eutrofización	Nitratos, Nitritos y Fosfatos
Aspecto de salud	Coliformes fecales y Coliformes totales
Características físicas	Temperatura, Transparencia, Sólidos totales

Parámetros usados para el ICA

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es una de las variables más importantes. Sus niveles brindan información sobre actividad bacteriana, fotosíntesis, estratificación disponibilidad de nutrientes (Beniwal *et al.*, 2021; Karki & Thapa, 2022). Este gas entra al agua por difusión de la atmósfera y como producto de la fotosíntesis de las plantas y algas acuáticas (Beniwal *et al.*, 2021; Karki & Thapa, 2022; Qureshimatva & Maurya, 2015). Las concentraciones de este gas son importantes, y es susceptible a cambios. Por ejemplo, durante los afloramientos algales los niveles de este son altos, pero al acabarse la disponibilidad de nutrientes las algas mueren y las bacterias empiezan a degradar la materia orgánica (Ortegón-Aznar & Ávila-Mosqueda, 2020). La degradación de la materia orgánica por las bacterias requiere de oxígeno, lo cual puede llegar a consumir el oxígeno disuelto en el agua, generando zonas anóxicas (Ortegón-Aznar & Ávila-Mosqueda, 2020). Los niveles altos de oxígeno indican un buen estado ecológico acuático, organismos como los peces requieren de niveles no menores a 5 o 6 mg/l (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). Los valores del OD pueden variar con respecto a la temperatura del agua, en verano las concentraciones de este suelen ser altas, debido al incremento de la presencia de luz solar que se ve reflejado en un aumento (Beniwal *et al.*, 2021). A mayor tiempo de la presencia de luz, se presenta una mayor actividad fotosintética lo cual deriva en una mayor producción de oxígeno (Beniwal *et al.*, 2021).

Temperatura

En los sistemas acuáticos la temperatura controla la velocidad de las reacciones químicas; afecta la reproducción, crecimiento e inmunidad de los peces (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). Los cambios de temperatura pueden llegar a ser fatales para los peces, debido a que puede afectar la actividad biológica y química de los organismos (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). La temperatura, también puede afectar la solubilidad de sales, OD, volatilización, estratificación, pH, equilibrio de ionización, concentraciones de amoníaco y velocidades de reacciones (Beniwal *et al.*, 2021; Karki & Thapa, 2022; Patil *et al.*, 2012). Los

procesos biológicos como la descomposición de la materia orgánica y las tasas metabólicas también se ven afectados por este parámetro (Beniwal *et al.*, 2021; Karki & Thapa, 2022; Patil *et al.*, 2012).

pH

El pH se define como la intensidad de los caracteres básicos o ácidos de una solución a una determinada temperatura, los niveles de pH son importantes para las comunidades bióticas, debido a que la mayoría de las especies animales y vegetales pueden sobrevivir a ciertos rango de pH (Beniwal *et al.*, 2021). Los niveles bajos de este valor (que tienden a la acidez) afectan la actividad fotosintética de las algas, debido a que afecta la asimilación del dióxido de carbono y bicarbonato (Beniwal *et al.*, 2021; Karki & Thapa, 2022; Patil *et al.*, 2012). Los cambios de este parámetro pueden deberse a la presencia de fertilizantes y procesos de eutroficación (Qureshmatva & Maurya, 2015). De igual forma el pH afecta la toxicidad de compuestos químicos como el amoníaco, debido a que controla la ionización de este compuesto. También controla la disponibilidad de ciertos contaminantes como los metales pesados (Karki & Thapa, 2022). Los valores apropiados de este parámetro para muchos sistemas biológicos son de 6.5 a 8.5, que tiende de la neutralidad a la alcalinidad (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es un valor numérico que representa la capacidad de conducir electricidad en soluciones acuosas, esta capacidad depende de la presencia de iones, en aspectos como sus concentraciones relativas, valencias, movilidad, temperatura del líquido y concentración total (Beniwal *et al.*, 2021). Este parámetro guarda una gran relación con el pH, debido a que la mayoría de bases y ácidos inorgánicos y sales son buenos conductores (Beniwal *et al.*, 2021). Los valores de este parámetro pueden indicar la presencia fertilizantes inorgánicos, debido a que los fertilizantes tienen iones de potasio y sulfato (Beniwal *et al.*, 2021; Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

Algunos estudios muestran que los valores de CE mantienen una correlación con diez parámetros fisicoquímicos del agua: pH, temperatura, dureza total, alcalinidad, sólidos totales, calcio, sólidos disueltos totales, cloruro, demanda química de oxígeno y hierro (Beniwal *et al.*, 2021; Patil *et al.*, 2012).

Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una medida de la contaminación del agua por la presencia de materia orgánica, este parámetro representa la cantidad de oxígeno disueltos requerido para la descomposición bioquímica de compuestos orgánicos y para la oxidación de algunos compuestos inorgánicos, y usualmente es medido en periodos de cinco días (Beniwal *et al.*, 2021; Qureshimatva & Maurya, 2015).

Coliformes totales

Las bacterias coliformes son una familia que se encuentran en suelos, plantas, animales y humanos, y su presencia en el agua es un indicio de que puede estar contaminada con desechos en descomposición y aguas negras (Ramos-Ortega *et al.*, 2008). Estos organismos se encuentran con mayor abundancia en el fondo y superficie de los cuerpos de agua. (Ramos-Ortega *et al.*, 2008). La determinación de las Coliformes totales (CT) incluye a todas las bacterias presentes en este grupo, incluyendo los coliformes fecales (Ramos-Ortega *et al.*, 2008). Las coliformes fecales, por otra parte, son bacterias que se encuentran en las heces animales y humanas, por lo que la presencia de estas bacterias indica una contaminación directa de aguas residuales, principalmente drenajes (Fernández-Santisteban, 2017; Ramos-Ortega *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2004).

Turbidez

La turbidez es el parámetro que mide la opacidad del agua que es ocasionada por las partículas suspendidas, tales como limo, arcilla, precipitados químicos, partículas orgánicas y organismos (Beniwal *et al.*, 2021; Patil *et al.*, 2012). A medida que esta variable aumenta, ocurre una disminución en la claridad

del agua. Este parámetro se mide en NTU, y también puede indicar la presencia de contaminantes microbianos (WHO, 2017).

Clorofila-a

La concentración de la Clorofila-a es usada para calcular la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, pero también funciona como indicador del grado de contaminación de los ecosistemas (Rivera *et al.*, 2005). Este parámetro está relacionado con el proceso de eutrofización, proceso donde ocurre un aumento de la producción fitoplanctónica como consecuencia del exceso de nutrientes como el nitrógeno y fósforo (Ledesma *et al.*, 2020).

Las altas concentraciones de Clorofila pueden estar relacionadas con los afloramientos de algas, esto debido al aporte de nutrientes en el agua (Band-Schmidt *et al.*, 2011). Durante los florecimientos algales, existe un consumo excesivo de nutrientes, cuando estos se acaban las algas empiezan a morir y las bacterias comienzan a utilizar las algas muertas como alimento (Ortegón-Aznar & Ávila-Mosqueda, 2020). Durante este proceso las bacterias necesitan oxígeno, el cual es tomado del agua y como resultado liberan CO₂ (Band-Schmidt *et al.*, 2011; Beniwal *et al.*, 2021; Ortegón-Aznar & Ávila-Mosqueda, 2020; Patil *et al.*, 2012). Esto trae como consecuencia la generación de zonas anóxicas, el desplazamiento de especies y la pérdida de biodiversidad por la ausencia de oxígeno en el agua (Band-Schmidt *et al.*, 2011; Ortegón-Aznar & Ávila-Mosqueda, 2020).

Sólidos disueltos totales

Los sólidos disueltos totales (SDT) son una variable usada para evaluar los efectos de la erosión a causa de actividades agrícolas y el escurrimiento de material durante las lluvias (Beniwal *et al.*, 2021). Los sólidos ocasionan la sedimentación que puede generar deltas aguas arriba del reservorio e incluso destruir hábitats de los organismos acuáticos al haber un menor espacio en la columna de agua (Beniwal *et al.*, 2021). La relación entre los sólidos suspendidos y la calidad del agua es debido a la capacidad que tiene el agua de absorber contaminantes como nutrientes y plaguicidas, lo cual incrementa la turbiedad y la

absorción de calor provocando un aumento de la temperatura del agua (Beniwal *et al.*, 2021; Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

Nitrógeno Total (NT)

El nitrógeno en los cuerpos de agua tiene efectos, dependiendo de la forma en la cual este se encuentre, por una parte, puede tener efectos sobre el estado trófico del sistema, y por otra incidir las condiciones de pH. Los nitratos fueron incluidos en el ICA para demostrar el ingreso de fertilizantes y por su efecto en los procesos de eutrofización antropogénica (Beniwal *et al.*, 2021). Esto con el fundamento de que las concentraciones de los nitratos en un ambiente natural no exceden los 0.45 mg/l de NO₃ (Beniwal *et al.*, 2021). Los valores mayores a 0.9 mg/l estimulan el crecimiento algal, lo cual puede ser una posible condición eutrófica y valores mayores a 20 mg/l son signos de aguas contaminadas (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). Este valor está relacionado con un aumento en la alcalinidad del agua y causa una severa interferencia en la dureza del agua (Beniwal *et al.*, 2021; Patil *et al.*, 2012).

Fósforo total (PT)

El fósforo es un componente vital del ciclo biológico de los cuerpos de agua y es un componente limitante del crecimiento de algas y plantas al igual que el nitrógeno. Por lo cual, su concentración es usado como criterio para detectar estados eutróficos de lagos, lagunas y ríos (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). El ingreso de este elemento puede deberse al escurrimiento de aguas con fertilizante producto de la actividad agrícola, siendo un indicador de contaminación antropogénica (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). Según las concentraciones de este elemento se puede estimar la calidad del agua, cuando los valores son menores a 50 µg/l de PT la calidad es excelente, entre 51 y 100 µg/l la calidad es regular a mala; y con valores mayores a 101 µg/l la calidad es muy mala (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

Justificación

Los estudios sobre calidad de agua en sistemas lacustres de la Península de Yucatán (PY) son escasos, y por lo general utilizan pocas variables, que resultan insuficientes para la caracterización adecuada; estos trabajos generalmente no utilizan índices como el Índice de Calidad de agua (ICA), que contemplan una serie de variables (temperatura, pH, oxígeno disuelto, DBO, turbidez, nitrógeno, fósforo, coliformes totales, sólidos totales disueltos) considerados a nivel mundial por instituciones como el Departamento de Calidad Ambiental de Oregón (ODEQ) y el Ministerio de Medio Ambiente de Canadá como la mejor forma de determinar la calidad de agua (Poonam *et al.*, 2013). Por otra parte, la importancia de conocer la calidad del agua es indispensable para el desarrollo de las actividades de los seres vivos dado que la contaminación de este recurso puede generar afecciones a nivel de ecosistemas enteros, y repercutir gravemente en la salud humana, por mencionar algunos ejemplos (Sánchez, 2007; SEMARNAT, 2012).

Actualmente en la PY el crecimiento poblacional, el cambio de uso de suelos, la intensificación del uso de tierra y la alteración de los ecosistemas acuáticos superficiales, generan contaminación, eutrofización, degradan los servicios ecosistémicos, ocasionando un aumento de riesgos biológicos y la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos por la infiltración de los contaminantes desde la superficie (Beniwal *et al.*, 2021; Cervantes, 2007; Ledesma *et al.*, 2020). Por otra parte, la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos es una condición intensificada por la geología kárstica de la PY, ya que al ser muy permeable, los cuerpos de aguas superficiales como fuente primaria para los mantos acuíferos, llevan contaminantes a los cuerpos subterráneos (Cohuo *et al.*, 2023; Ledesma *et al.*, 2020).

El ICA no solo brinda una calificación al estado en que se encuentra el cuerpo de agua, sino que determina las actividades que se pueden llevar a cabo en este, y también desarrollar estrategias para atender las fuentes de contaminación (Uddin *et al.*, 2021). Considerando lo anterior, resulta importante

desarrollar estudios que den a conocer el estado de calidad de agua en el que se encuentren los cuerpos acuáticos y las principales problemáticas que enfrentan respecto a los niveles permisibles de acuerdo a las normativas mexicanas ambientales vigentes permitiendo mejorar su aprovechamiento y cuidado (Sánchez, 2007), el desarrollo de futuros proyectos con una gestión adecuada, así como profundizar en la aplicación de indicadores de contaminación. También es importante conocer el estado actual de la calidad del agua porque esto permitirá hacer comparaciones con futuros estudios y monitorear las nuevas fuentes de contaminación generadas por el constante desarrollo urbano, industrial y turístico (Karmakar & Singh, 2021; Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008). Son escasos los trabajos que se han realizado en la PY para conocer la contaminación del agua, realizados principalmente en sistemas lagunares costeros (Aranda-Cirerol et al., 2006; González et al., 2008). Sin embargo, no existen trabajos o monitoreos de los sistemas acuáticos superficiales sobre la PY, a pesar de que estos representan la principal fuente primaria para el abastecimiento de los mantos acuíferos. Por ello el presente trabajo tiene como objetivo evaluar mediante el ICA la calidad del agua de las principales lagunas interiores, afín de conocer cuál es su estado actual, reconocer los sistemas más afectados y las principales variables medidas que modelan la calidad de agua. De esta forma se puede integrar a un plan de monitoreo como un antecedente de la calidad del agua, para el conocimiento de los sistemas que deben ser atendidos. Por otra parte, contribuye al conocimiento para las poblaciones humanas que dependen de estos cuerpos de agua para su uso y consumo, generando una alerta para su cuidado y/o el tratamiento adecuado antes de ser usada.

Objetivo general

Evaluar la calidad del agua mediante el Índice de calidad de agua (ICA) de 31 sistemas acuáticos superficiales de la Península de Yucatán.

Objetivos específicos

1. Estimar los parámetros ambientales que describen la calidad del agua de acuerdo con el índice de calidad del agua (ICA) para 31 sistemas de la Península de Yucatán.
2. Determinar el índice de calidad del agua (ICA) para los sistemas muestreados.
3. Establecer una zonación en función del ICA para los cuerpos acuáticos de la Península de Yucatán.
4. Analizar los resultados obtenidos en función de la normativa mexicana ambiental vigente para calidad del agua.

Metodología

Área de estudio

La Península de Yucatán (PY) en la parte mexicana está compuesta por los estados de Quintana Roo, Campeche y Yucatán. En cuanto a vegetación se pueden encontrar comunidades de manglar, vegetación costera, petenes, sabanas, selva baja caducifolia, selva media subperennifolia, selva media subcaducifolia, selva baja inundable y vegetación secundaria (Pérez-Sarabia *et al.*, 2017). La hidrogeografía, de la PY está compuesta por un sistema generalizado de corrientes subsuperficiales y con una ausencia de ríos (Frausto-Martínez & Ihl, 2015). Esta región se encuentra en una zona tropical y se caracteriza por tener una composición kárstica, lo cual hace que sus suelos y aguas tengan carbonatos presentes (Carrillo *et al.*, 2024; Cohuo *et al.*, 2023; Lin *et al.*, 2018). El agua de esta zona sufre de procesos de mineralización que ocasiona estos niveles elevados de carbonatos que a su vez pueden variar entre las zonas dependiendo de la velocidad e intensidad en que este proceso sucede (Carrillo *et al.*, 2024; Marisa *et al.*, 2024). Esta región se caracteriza por tener una elevación máxima de 250 metros sobre el nivel del mar en zona centro-sur (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

La PY es influenciada por los vientos alisios, sequía intraestival, tormentas tropicales, huracanes, ondas del este, vientos polares y nortes, corrientes marinas y las altas presiones. De acuerdo con la clasificación de Koppen se pueden hallar

dos tipos de clima: Cálidos húmedos y Secos. Para el presente estudio se muestrearon un total de 31 cuerpos de agua, siendo estos los principales cuerpos lacustres de la PY (ver tabla 3 y figura 1). De los cuales la Laguna de Bacalar y La Sabana se subdividieron en tres subsistemas. En el caso de la laguna de Bacalar Alvarez-Legorreta y colaboradores en 2021 subdividieron la laguna en tres zonas, donde identificaron que la zona norte recibe corrientes superficiales de agua provenientes de la laguna de Chacchoben, Noh-Bec y San Felipe Bacalar, la zona centro se encuentra la ciudad de Bacalar y la zona sur por arriba de Xul-Ha, donde se reporta una corriente subterránea que alimenta al sistema. Y en el caso de la Sabana, el sistema se encuentre subdividido por dos puentes que dividen al sistema en tres zonas las centro, sur y norte (Cohuo *et al.*, 2023).

Tabla 3. Sitios de muestreo

No	Laguna	Latitud	Longitud
1	Nopalitos	20.1033333	-87.5816667
2	Cobá	20.4916667	-87.7380556
3	Punta Laguna	20.6486111	-87.6347222
4	Chabela	20.660925	-87.613242
5	Campamento Hidalgo	20.594143	-87.661624
6	Yalahau	20.657567	-89.216104
7	Roja Q. Roo	18.803582	-88.353547
8	Guerrero	18.7097222	-88.2513889
9	Negra	18.5002778	-88.3952778
10	Encantada	18.4988889	-88.3897222
11	Milagros	18.5138889	-88.4238889
12	Xul-Ha	18.5486111	-88.4608333
13	Bacalar Sur	18.6013889	-88.4305556
14	Bacalar Centro	18.6869444	-88.3830556
15	Bacalar Norte	18.8783333	-88.2344444
16	San Felipe Bacalar	18.8125	-88.4686111
17	Miguel Hidalgo	18.8035823	-88.3535475
18	Guadalupe	18.503304	-88.450567
19	Sabana norte	18.5167597	-88.34878
20	Sabana centro	18.5243582	-88.3389756
21	Sabana sur	18.5291144	-88.330062
22	Chacchoben	19.0369444	-88.1794444
23	Chojkaan	19.0197222	-88.215
24	Noh-Bec	19.1461111	-88.1741667
25	El Ocho	19.0213889	-88.2519444

26	San José de la Montaña	18.368911	-89.012158
27	Om (Caobas)	18.448646	-89.098554
28	Zoh Laguna	18.587197	-89.417969
29	Silvituc	18.629995	-90.285381
30	Las Maravillas	18.512357	-90.304557
31	Chan Laguna	18.478335	-90.210111
32	Xbacab	18.939371	-90.719299
33	Chuiná	18.961862	-90.715114

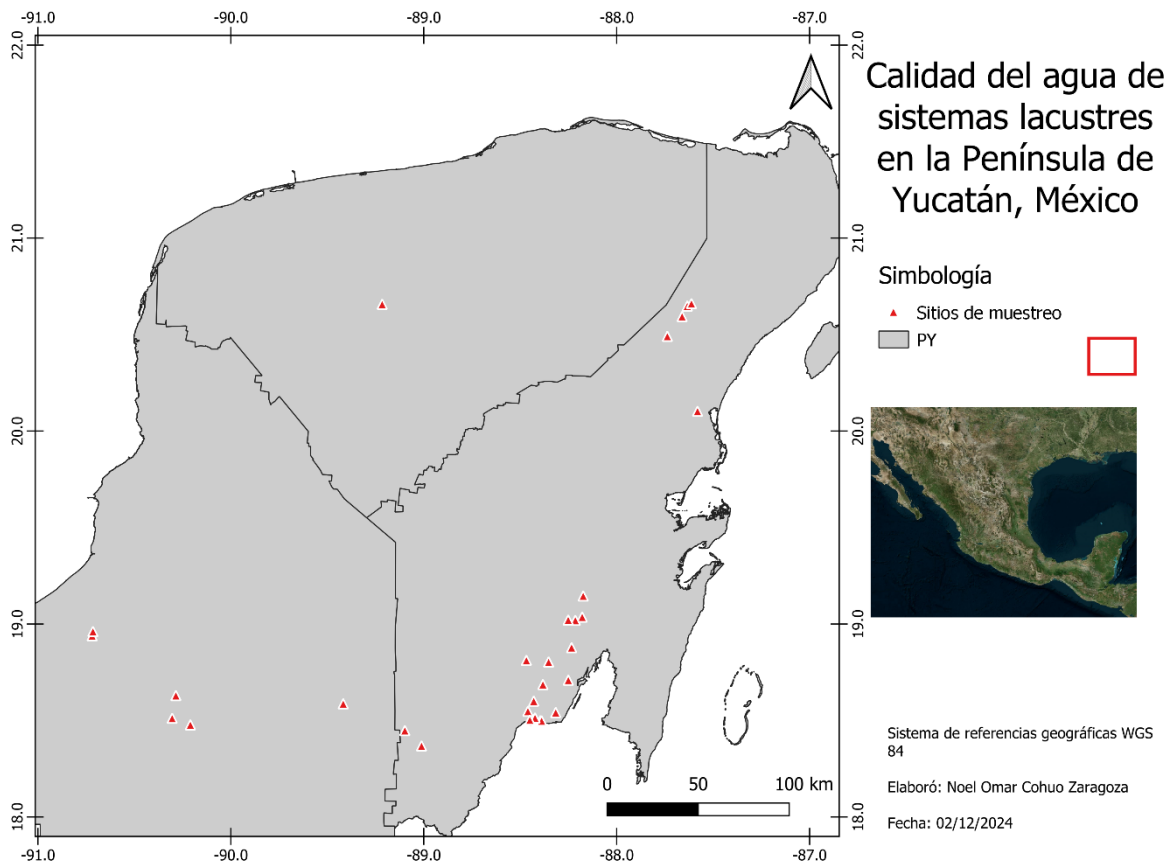


Figura 1. Mapa de sitios de muestreo.

Método

Se realizó un monitoreo de 31 sistemas lagunares en la PY en los meses de marzo y mayo que corresponden a la temporada de secas. Para cada sitio de muestreo, se registraron los parámetros pH, Conductividad, Temperatura, Oxígeno

disuelto, sólidos totales disueltos y turbidez mediante sondas multiparamétricas Hanna HI98130, WTW Multi Set 350i y Turbidímetro marca Hach. Las muestras de agua se tomarán en botellas de polietileno de 1.5L (Cohuo *et al.*, 2023), las cuales se colocaron en neveras con hielo, evitando la menor exposición a la luz para ser trasladadas al laboratorio de Microbiología del ITCH para el análisis del agua.

Determinación de Clorofila-a

Mediante espectrofotometría UV Vis se midió para cada uno de los sitios la Clorofila-a mediante el método de Determinación de Clorofilas Strickland y Parson (1972). El método consistió en filtrar las muestras con una bomba de vacío y un filtro de fibra de vidrio de nitrocelulosa de tamaño de poro de 45 µm. Posteriormente los filtros se colocaron en tubos de ensayo con ocho ml de acetona al 90% que actúa como solvente, los tubos se envolvieron en papel aluminio y se agitaron para disolver los filtros. Por último, se le agregó dos gotas de acetona para homogenizar las muestras a 10 ml. Las muestras se refrigeran durante 24 horas para extraer la Clorofila que se encuentra en los filtros, después del tiempo transcurrido las muestras se centrifugaron por 5 minutos 3000 rpm. El sobrenadante obtenido se analizó a una absorbancia de longitud de onda de 750, 664, 667 y 630 nm (Orejarena *et al.*, 2004; Rivera *et al.*, 2005). Para el cálculo de la concentración de Clorofila se utilizó las ecuaciones tricotómicas propuestas por Jeffrey y Humphrey en 1975:

$$\text{Clorofila } a = 11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}$$

Donde E es la absorbancia obtenida a las diferentes longitudes de onda, tomando en cuenta la corrección hecha por la lectura de 750 nm.

$$\text{Clorofila } a \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Lectura de fluorescencia} \times \text{Volumen de acetona usado}}{\text{Volumen filtrado}}$$

Determinación de fósforo total, nitrógeno total y coliformes totales

Para determinar las concentraciones de fósforo total se utilizó un kit de Hach PhosVer® 3 with Acid Persulfate Digestion y para el nitrógeno total el kit de

Hach Persulfate Digestion Method LR (0.5 to 25.0 mg/L N). Para cada uno de los sitios también se determinó la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) mediante el método de los cinco días (5210 BOD Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) (Peirce *et al.*, 1998). Por último, se determinó los coliformes totales mediante el Kit Placa 3M Petrifilm®.

Estimación del Índice de Calidad de Agua (ICA)

Para determinar el valor del ICA es necesario medir los siguientes parámetros (Brown *et al.*, 1972):

- pH
- Nitrógeno
- Fosfatos
- Temperatura
- Turbidez
- Sólidos disueltos totales
- Oxígeno disuelto
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Coliformes Totales

La evaluación numérica del ICA, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de pesos específicos se debe a Brown, para ello se utiliza una suma lineal ponderada de los subíndices (ICA_a) (Brown *et al.*, 1972). Expresándose matemáticamente de la siguiente manera:

$$ICA_a = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

Donde:

w_i = Pesos relativos asignados a cada parámetro (Sub_i), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

Sub_i = Subíndice del parámetro i.

Sin embargo, existen calculadoras del Índice de Calidad de Agua, que utilizan el modelo de Brown para realizar el cálculo. Para el presente estudio se utilizó la calculadora del Water Research Center. Esta calculadora hace un cambio

en la ecuación de Brown, el cual consiste en usar la diferencia de temperatura entre el sitio muestreado y un sitio de referencia. El sitio de referencia necesita ser un sistema que cuente con una buena calidad de agua. Y con base al resultado obtenido la califica la calidad del agua en 5 categorías (ver tabla 4)

Tabla 4. Categorías de la CA (recuperado de Water Research Center, 2024)

Valor	Calidad del agua
90 a 100	Excelente
70 a 89	Buena
50 a 69	Regular
25 a 49	Mala
0 a 24	Pésima

Zonación del ICA de los sistemas acuáticos

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas útiles en la calidad del agua para el análisis geoestadístico. El análisis espacial mediante las SIG permite la interpolación parámetros de la calidad del agua de una locación determinada y a partir de valores crea una superficie continua que ayuda a entender escenarios de los parámetros de calidad de agua en el sitio de estudio (Singh & Khan, 2011).

Dentro de las técnicas de interpolación se utilizará la técnica de ordinaria Kriging, este método puede usarse para la interpolación de una variable aleatoria en una locación desconocida considerando el valor más cercano al sitio (Shahzad *et al.*, 2020). Kriging ayuda a generar mapas de datos de espacialidad irregular, este método trata de sugerir tendencias en los datos, lo que hace a este método muy flexible (Yang *et al.*, 2004). Previo al análisis de los datos con el software geoestadístico se hizo una transformación de los datos aplicando Log_{10} , para luego ser procesados en el software SURFER GOLDEN versión 28.1.248 (Shahzad *et al.*, 2020).

Para hacer la interpolación se buscaron datos de calidad del agua publicados por la CONAGUA, los cuales se utilizaron para calcular el índice de calidad de agua para 13 sistemas acuáticos adicionales, con el fin de tener más

datos para realizar la interpolación y una mayor representación de la calidad del agua general de la PY.

Normatividad de la calidad del agua

Para comparar los resultados de las variables medidas con las normas oficiales mexicanas se realizó una investigación en las plataformas oficiales mexicanas como el Diario Oficial de la Federación, así como los indicadores de calidad de agua propuestos por la CONAGUA. Y adicionalmente se consultaron normativas de países extranjeros.

Análisis de datos

Previo al análisis de datos se transformaron los datos con la función de Logaritmo base 10, con el fin reducir la variación de la magnitud de los datos sin afectar a las medidas de tendencia central, adicionalmente se preestableció que para el análisis de datos se usará el método de Bray-Curtis para medir la disimilitud. El software utilizado para el análisis de datos fue Rstudio versión 4.3.3.

Análisis NMDS: Para analizar el ordenamiento basado en la similitud de los sistemas muestreados de acuerdo con las variables ambientales medidas y el índice de calidad de agua (ICA) (Hammer *et al.*, 2001).

Análisis de varianzas permutacional multivariable (PERMANOVA): Este análisis geométrico de partición de la multivariada, permitió comparar la similitud entre los sitios de muestreo (Pérez-López, 2004) para validar la formación de grupos en el análisis de Escalamiento Multidimensional No Métrico.

Análisis de Componentes Principales (PCA): Este análisis multivariado transforma un conjunto de variables correlacionadas en un conjunto de variables no correlacionados que se denominan factores o componentes principales. Este análisis nos indicó cuáles son las variables que tienen una mayor influencia en los sistemas acuáticos (Pérez-López, 2004).

Mapa de calor con clústeres: Se realizó un mapa de calor para representar la influencia de ciertas variables sobre los sitios de muestreo, que, al ser combinado

con el clúster de similitud, se logra apreciar la formación de grupos y las variables que se asocian a los grupos formados.

Resultados

Variables ambientales

En total se obtuvieron un total de 9 variables físico-químicas y 2 variables biológicas. De las cuales, las variables biológicas (Clorofila-a y Coliformes totales) tuvieron una gran variación entre los sitios muestreados.

La temperatura registró valores de entre 29 y 34 °C, el sitio que registró la menor temperatura fue Yalahau, mientras que los sitios que registraron 34 °C fueron La Sabana norte, Laguna Noh, Zoh Laguna, Silvituc y Laguna Om. El caso particular del sistema La Sabana, el sitio del centro del sistema presento una temperatura de 31 °C y la zona sur obtuvo una temperatura de 33 °C. La Laguna de Bacalar registró una temperatura de 31 °C en la zona centro y norte, mientras que la zona sur tuvo una temperatura de 30 °C (tabla 5). Los altos niveles de temperatura del agua son indicadores de temperaturas ambientales altas, siendo esta su causa e influenciada por la profundidad de los sistemas acuáticos.

La conductividad eléctrica obtuvo variaciones más grandes entre los sistemas muestreados, el sitio que obtuvo una menor conductividad eléctrica fue Zoh Laguna, con un valor registrado de 0.35 ms, mientras que el sitio que obtuvo una mayor conductividad eléctrica fue la Laguna de Nopalitos, esta registró un valor de 19.01 ms, seguida de Laguna Roja con 13.41 ms (tabla 5). Los altos niveles indican que hay una gran presencia de iones en el agua, que el caso de Nopalitos puede deberse a que lagunas cercanas a esta reciben entradas de agua del mar, aunado a ello la naturaleza del agua de la región es kárstica.

El pH registró un valor máximo de 8.93 en el sitio de Laguna Yalahau lo cual indica que el pH del sistema es alcalino. Otros sistemas que registraron un pH ligeramente alcalino fueron Laguna Chabela con 8.58, Campamento Hidalgo 8.49,

Laguna Nopalitos 8.46, Punta Laguna 8.45 y la Laguna El Ocho 8.32, y el valor más bajo registrado fue de 5.95 para La Sabana centro, teniendo un pH ligeramente ácido. La zona norte de La Sabana tubo un pH de 6.4 y en la zona sur fue de 7.59. El sistema de la Laguna de Bacalar en la zona sur tuvo un pH de 6.533, la zona centro de 6.883 y la zona norte registró un pH de neutro de 7.057 (tabla 5). Los niveles ligeramente ácidos del agua en la Sabana pueden deberse a que el sistema recibe aguas de una planta de tratamiento, otra posible causa de las variaciones del pH son los carbonatos disueltos en el agua.

El oxígeno disuelto vario entre 2.6 y 9.6 mg/l en los sitios muestreados. El sitio que registró la menor concentración fue La Sabana centro, seguida de La Sabana norte que obtuvo 4.9 mg/l, la zona sur de La Sabana obtuvo una concentra de 5.8 mg/l. El sitio que registró la mayor concentración de oxígeno disuelto fue laguna Guerrero con 9.6 mg/l. La Laguna de Bacalar en la zona norte registró una concentración de 8.633 mg/l, la zona centro registró una concentración de 7.833 y la zona sur registró 5.733 mg/l de oxígeno disuelto (tabla 5; figura 2). Las concentraciones bajas de oxígeno presentes en la Sabana centro pueden deberse a que el sitio presento una gran cantidad de Clorofila-a que es indicador a su vez de altos niveles de nutrientes que son degradados por los organismos usando el oxígeno presente en el medio. El resto de sitios muestreados tuvieron concentraciones normales de oxígeno.

Los sólidos disueltos totales registraron una variación grande, el sitio que registró la menor concentración de solidos disueltos totales fue Zoh Laguna con 173 ppm, mientras que el sitio que registró la mayor concentración de solidos totales disueltos fue Nopalitos con 8690 ppm, seguida de Cobá con 6890 ppm. El sistema de La Sabana en la zona norte registró 2150 ppm, la zona centro obtuvo una concentración de 1960 ppm y la zona sur tuvo 1240 ppm de solidos disueltos totales. La Laguna de Bacalar en la zona norte se registró una concentración de 1527 ppm, la zona centro tuvo 1337 ppm y la zona sur registró 1220 ppm (tabla 5). Los solidos disueltos es una variable que indica la presencia de solidos en el agua, pudiendo ser de fuentes naturales o contaminantes, por lo cual esta variable es un

indicador poco preciso, sin embargo una posible explicación de los niveles altos de Sólidos disueltos totales es la alta concentración de carbonatos presentes en el agua característicos de la región.

La demanda bioquímica de oxígeno registró el valor más bajo en Xul-Ha con una demanda de 1.65 mgO₂/l, y el sitio con la mayor demanda fue Nopalitos con 23.6 mgO₂/l. El sistema de La Sabana en la zona sur registró una demanda de 13.2 mgO₂/l, en las zonas centro y norte registró una demanda de 8.4 mgO₂/l. La Laguna de Bacalar en la zona sur registró una demanda de 5.1 mgO₂/l, en la zona centro fue de 1.8 mgO₂/l y la zona norte tuvo una demanda bioquímica de oxígeno de 3.9 mgO₂/l (tabla 5). Esta variable es el indicador de la actividad biológica del sistema, sus niveles altos pueden ser causa de la presencia de bacterias coliformes, a su vez puede deberse a los altos niveles de nutrientes y Clorofila-a en el medio, debido a que los organismos degradadores usan el oxígeno para degradar la materia orgánica.

Los coliformes totales fue la variable que tuvo la mayor variación entre todos los sistemas, el sitio que registró la menor concentración fue Xul-Ha con 500 UFC/ml, seguido de Miguel Hidalgo con 700 UFC/ml, mientras que el sitio que obtuvo la mayor concentración de coliformes totales fue La Sabana sur con 270,000 UFC/ml, seguido de la zona centro de La Sabana con 198,000 UFC. Por otra parte, la zona norte de La Sabana tuvo una concentración de 19,800 UFC/ml. En cuanto a la Laguna de Bacalar, la zona centro registró 10,800 UFC/ml, la zona sur tuvo una concentración de 7,200 y la zona norte 1,400 UFC/ml (tabla 5). Los altos niveles de estos organismos son indicadores de contaminación fecal, que puede provenir de plantas de aguas residuales como en el caso de La Sabana en Chetumal, o el uso de fosas sépticas en sitios como Bacalar o Nopalitos.

La Clorofila-a también tuvo una gran variación entre los sistemas, el sitio que tuvo la mayor concentración fue La Sabana sur con 716.41 mg/m³ seguida de Chacchoben con 673.61 mg/m³ y El Ocho con 576.95 mg/m³. Mientras que el sitio que obtuvo menor concentración fue Xul-Ha con 0.21 mg/m³ de Clorofila-a. La zona centro de La Sabana registró 8.4 mg/m³ y la zona norte 3.58 mg/m³. La

Laguna de Bacalar en la zona norte registró 0.47 mg/m³, la centro 0.403 mg/m³ y la zona sur registró 0.263 mg/m³ de Clorofila-a (tabla 5). La clorofila-a es un indicador de altas concentraciones de algas, eutrofización, así como niveles altos de nutrientes y afloramientos algales, esto pudiendo indicar la descarga de aguas residuales, el arrastre de nutrientes en zonas donde hay actividad ganadera o agrícola, como podría ser el caso de Chacchoben, El Ocho y Chojkaan.

Las concentraciones de Nitrógeno total obtuvieron valores de entre 29.167 y 0.167 mg/l, siendo Nopalitos el sitio que presento la menor concentración de Nitrógeno total y el sitio con mayor concentración fue Chacchoben, seguido de El Ocho con 17.3 mg/l. El sistema de La Sabana tuvo un valor de 13.5 mg/l en la zona sur, 3.9 mg/l en el norte y 1.8 mg/l en la zona centro. El sistema de la Laguna de Bacalar en la zona norte registró 1.5 mg/l de Nitrógeno total, en la zona sur tuvo 0.433 mg/l y en la zona centro tuvo 0.3 mg/l de Nitrógeno total, siendo este el sitio que registró la segunda concentración más baja (tabla 5; figura 3). Los altos niveles de nitrógeno es indicador de la contaminación por fertilizantes, aguas residuales y fuentes de contaminación orgánica, como plantas de aguas residuales como la Sabana, el arrastre de fertilizantes, estiércol o materia orgánica provenientes de actividades agrícolas.

Los niveles de fosfatos estuvieron entre 3.21 y 0.28 mg/l, siendo La Sabana sur el sitio que registró la mayor concentración de fosfatos y Xbacab, este último con la menor concentración de fosfatos. La zona centro de La Sabana tuvo una concentración de 0.67 mg/l y la zona norte 0.52 mg/l. En el sistema de la Laguna de Bacalar la zona norte y centro registraron una concentración de 0.4 mg/l y la zona sur 0.373 mg/l de fosfatos (tabla 5; figura 3). Los fosfatos altos niveles de fosfatos pueden tener como orígenes agroquímicos, fertilizantes, aguas residuales y fuentes de contaminación orgánica. En el caso de La Sabana el origen puede ser la planta de tratamiento de aguas residuales.

La turbidez también fue una variable que registró una gran variación, el sitio que tuvo la mayor turbidez fue Chacchoben con 429.7 NTU, mientras que el sitio que registro la menor turbidez fue Laguna Encantada con 0.793 NTU. EL sistema

de La Sabana registró en la zona norte una turbidez de 2.23 NTU, la zona centro 6.93 NTU y la zona sur 239.3 siendo el tercer sistema con mayor turbidez. El sistema de la Laguna de Bacalar la zona norte tuvo una turbidez de 3.69 NTU, la zona centro 2.04 NTU y la zona sur 1.65 NTU (tabla 3). Los niveles de turbidez se pueden ver afectados por el arrastre de sedimentos, el vertido de aguas negras, la resuspensión de sedimentos en el medio, etc. En el caso de La Sabana la causa de esto es la planta de tratamiento, en el caso de Chacchoben, El Ocho y Chojkaan podría ser a que estas lagunas contaban altos niveles de Clorofila-a.

Tabla 5. Variaciones de las Variables ambientales de los sitios estudiados

No	Laguna	Tempe ratura (°C)	Condu ctivida d (ms)	pH	SDT (pp m)	OD (mg/ l)	DB O	CT (UFC/ 100m l)	Chl-a (mg/m ³)	Turbid ez (NTU)	Nitroge no (mg/l)	Fosfato s (mg/l)
1	Nopalitos	30	19.01	8.4	8690	7.9	23.6	25200	25.595	1.217	0.167	0.667
2	Cobá	30	1.38	7.7	6890	7.6	7	29400	6.145	7.25	1.667	0.603
3	Punta Laguna	30	1.42	8.4	710	5.7	5.2	16800	2.496	1.71	4.367	0.44
4	Chabela	30	1.38	8.5	6080	6.6	11.7	9800	2.073	2.625	0.95	0.655
5	Campame nto Hidalgo	30	1.18	8.4	5930	5.8	9.4	11000	15.516	13.04	0.933	0.437
6	Yalahau	29	2.27	8.9	1140	5.7	3.8	22400	15.637	14.02	2.267	0.387
7	Roja	30	13.41	7.2	6697	6.6	8.4	4000	1.993	5.083	1.4	0.387
8	Guerrero	31	8.7825	6.7	4380	9.6	3.6	8000	0.538	2.975	2.6	0.325
9	Negra	30	3.277	6.9	1640	7.5	3.1	4200	1.397	0.953	2.2	0.37
10	Encantada	32	3.32	6.8	1667	6.2	6.45	9000	1.797	0.793	2.5	0.36
11	Milagros	30	3.31	7.0 2 1	1653	6.63 3	5.2	1300	0.377	3.757	2	0.4
12	Xul-Ha	30	2.407	6.5	1200	7.6	1.6	500	0.21	2.45	0.667	0.323
13	Bacalar sur	30	2.433	6.5	1220	5.7	5.1	7200	0.263	1.65	0.433	0.373
14	Bacalar centro	31	2.667	6.8	1337	7.8	1.8	10800	0.403	2.04	0.3	0.4
15	Bacalar Norte	31	3.053	7.0	1527	8.6	3.9	1400	0.47	3.69	1.5	0.47
16	San Felipe Bacalar	31	0.628	7.0	314	6.9	3.7	4980	18.064	9.842	1.52	0.394
17	Miguel	33	0.73	7.7	367	7.7		700	16.363	14.97	2.433	0.46

	Hidalgo											
18	Guadalupe	31	3.26	6.8	1617	6.4	6.3	2300	0.297	1.707	0.4	0.367
19	Sabana norte	34.4	4.37	6.4	2150	4.9	8.4	19800	3.58	2.23	3.9	0.52
20	Sabana centro	30.8	3.9	5.9	1960	2.6	8.4	19800 0	8.4	6.93	1.8	0.67
21	Sabana sur	32.6	3.32	7.5	1240	5.8	13.2	27000 0	716.41	239.3	13.5	3.21
22	Chacchoben	32	0.803	7.9	400	7.5	6.2	8400	673.61	429.7	29.167	0.91
23	Chojkaan	32	1.653	7.4	827	6.3	10.5	12133. 3	56.813	41.78	3.5	0.7
24	Noh-Bec	32	2.463	7.3	1230	6.2	3.15	3666.7	1.313	2.363	1	0.37
25	El Ocho	32	0.423	8.3	210	7.8	6.3	28000	576.95	349.53 3	17.3	1.63
26	San José de la Montaña	31	0.497	6.9	250	6.4	6.4	19800	11.5666 6667	5.41	1.833	0.883
27	Om (Caobas)	33	0.41	7.2	207	8	14.7	15600	14.2	3.583	1.5	0.357
28	Zoh Laguna	34	0.35	7.5	173	8.8	10.7	6766.7	10.8666 6667	9.73	2.167	0.4
29	Silvituc	34	0.507	7.3	253	7.4	6	9066.7	24.6666 6667	15.967	1.867	0.283
30	Laguna Noh	34	0.38	7.8	190	6.6	5.1	11400	39.65	26.37	4.333	0.39
31	Chan Laguna	34	0.5	7.0	250	5.6	3.5	6333.3	18.85	5.137	1.833	0.293
32	Xbacab	32	4.273	7.2	2137	5.2	6.5	9200	52.65	35.74	1.5	0.28
33	Chuiná	33	0.74	7.6	370	5.4	4.6	3066.7	11.9	11.34	0.833	0.29

Análisis de Similitud de las variables ambientales entre los sitios evaluados

El NMDS es un análisis estadístico que permite identificar la similitud entre sitios, usando un conjunto de datos. En este caso se usaron las variables medidas para determinar que sitios comparten similitud e identificar la formación de grupos.

Cómo resultado del análisis de similitud se formaron 3 grupos y dos sitios que quedaron separados (figura 4). La laguna Nopalitos y Xul-Ha fueron los sitios que quedaron aislados. El grupo uno está compuesto por los sitios de Cobá, Punta Laguna, Laguna Chabela, Campamento Hidalgo, Yalahau, Laguna Roja, Laguna Guerrero, Laguna Negra, Laguna Encantada, Laguna Milagros, Bacalar sur, Bacalar centro, Bacalar norte, Laguna Guadalupe, La Sabana norte, La Sabana centro, Chojkaan, Noh-Bec y Xbacab. El grupo dos está formado por laguna San Felipe Bacalar, Laguna Guadalupe, San José de la Montaña, Laguna Om, Zoh Laguna, Laguna Silvituc, Laguna Noh, Chan Laguna, y Chuiná. El grupo tres está formado por La Sabana sur, Chacchoben y El Ocho.

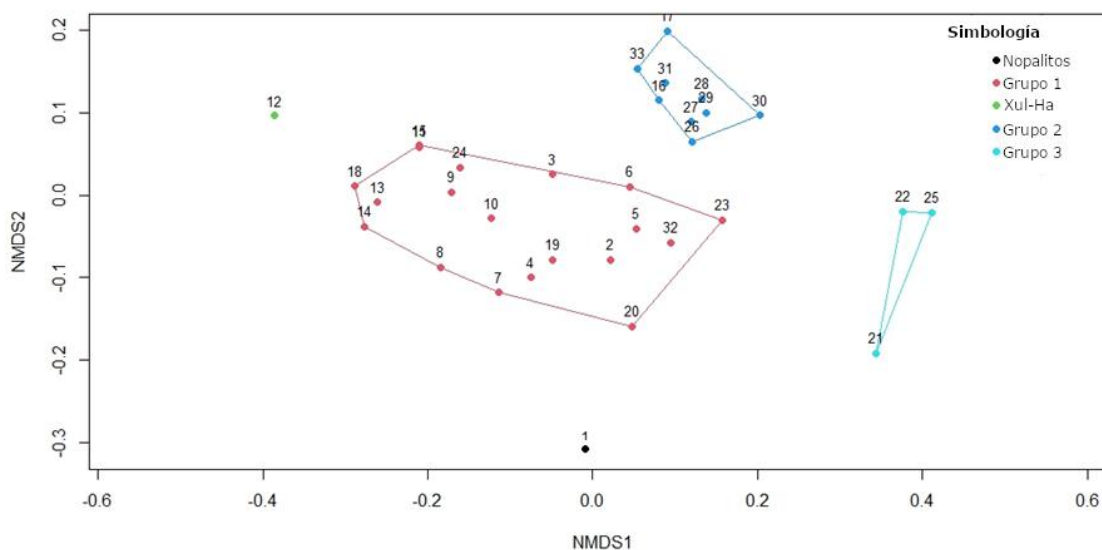


Figura 2. Similitud entre sitios de muestreo. El grupo 1 se caracterizo por tener altos niveles de Sólidos Disueltos Totales, el grupo 2 se caracterizo por presentar bajos niveles de Sólidos Disueltos Totales y registrar las mayores temperaturas, el grupo 3 presentó mayores niveles de Nitrógeno, Fosfatos, Clorofila-a y Coliformes Totales, Nopalitos presento el mayor número de Sólidos Disueltos

Totales y Xul-Ha fue el sitio que presento menor concentración de Coliformes Totales, Nitrógeno y Fosfatos.

Para comprobar que había sí diferencias de los grupos formados de la similitud se realizó un análisis de validación por medio de un PERMANOVA. El cual es un test estadístico no paramétrico que permite identificar sí los grupos realmente tienen similitud. Con este se confirmó que hay diferencias significativas entre los grupos formados (grupo 1, 2 y 3) en el NMDS, obteniéndose un valor de $p=0.0001$ con un valor de confianza del 95% ($\alpha=0.05$) (tabla 5). Los resultados del PERMANOVA indican que todos los grupos son diferentes, ya que no comparten similitud entre ellos.

Tabla 6. Resultados del PERMANOVA de los grupos obtenidos en NMDS, donde se analizaron las variables ambientales para identificar sí los grupos formados realmente eran diferentes.

<i>PERMANOVA</i>			
	1	2	3
1		0.0001	0.0006
2	0.0001		0.0042
3	0.0006	0.0042	

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) es un análisis que permite identificar que variables tienen una mayor influencia sobre los sitios de muestreo, incluso permite identificar que variables tienen una mayor influencia sobre los grupos que se puedan formar.

Mediante El PCA se observó que variables tienen influencia positivo y negativa en los sitios evaluados en el estudio, por lo consiguiente se muestra que en Nopalitos influyeron positivamente las variables Conductividad Eléctrica y Solidos Disueltos Totales (la laguna aparece marcada como el grupo uno) (figura 5). Por otro lado, el sitio Xul-Ha no existió ninguna relación significativa con respecto a las variables (la laguna aparece marcada como grupo tres). Mientras

que en el grupo dos se vio influenciado por la Conductividad Eléctrica, los Sólidos Disueltos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Fosfatos y Coliformes Totales. El grupo cuatro presento una fuerte influencia negativa con respecto a la temperatura. Para el grupo cinco, las variables que tuvieron una mayor influencia fueron la Clorofila-a, turbidez, el Nitrógeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Fosfatos y Coliformes Totales. Dentro de las variables analizadas la Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales se relacionan negativamente con la temperatura, es decir que a mayor temperatura existe menos Sólidos Disueltos Totales y una menor Conductividad Eléctrica. También se observa en el grafico que existe una correlación entre los Sólidos Disueltos Totales y la Conductividad Eléctrica, Demanda Bioquímica de Oxígeno y las Coliformes Totales, y entre el Nitrógeno Total y la Turbidez (Figura 5).

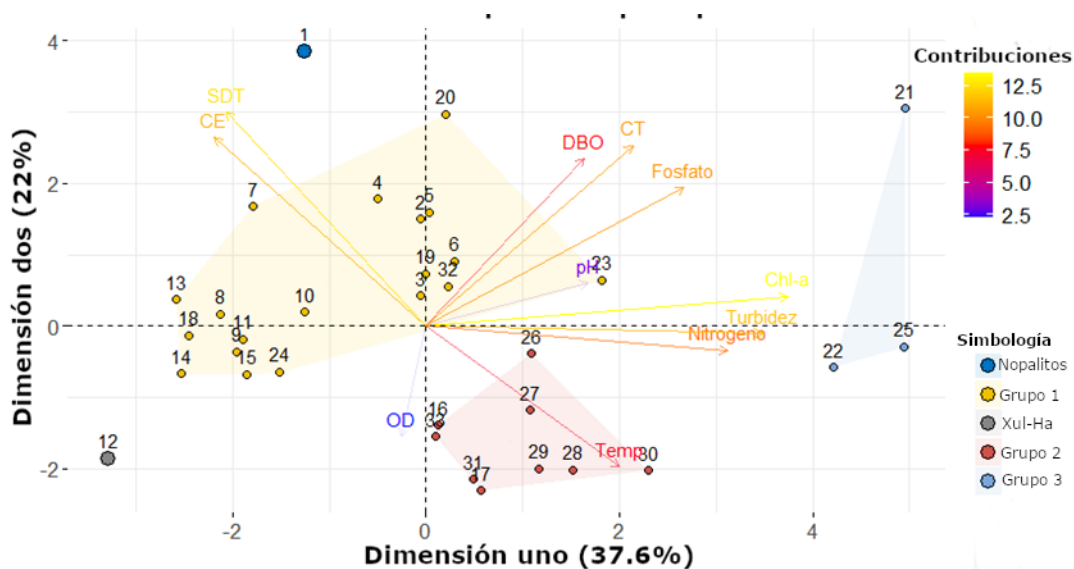


Figura 3. Análisis de componentes principales de Coliformes Totales (CT), Potencial de Hidrogeno (pH), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Conductividad Eléctrica (CE), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Clorofila-a (Chl-a), Turbidez, Nitrógeno, Fosfatos, Temperatura (Temp) y Oxígeno Disuelto (OD). Los puntos representan los sitios de muestreo. El color de las líneas que señalan las variables indica la contribución que tienen las variables sobre los sitios.

En el PCA es un análisis que genera dimensiones que explican la variación entre los sitios con base a las variables, y cada dimensión explica un cierto porcentaje de la varianza entre los sitios. En este caso en particular, la dimensión uno representa el 37.6 % y la dimensión dos representa el 22 % (figura 6), por lo tanto, ambas explican el 59.6 % de la varianza entre los grupos.

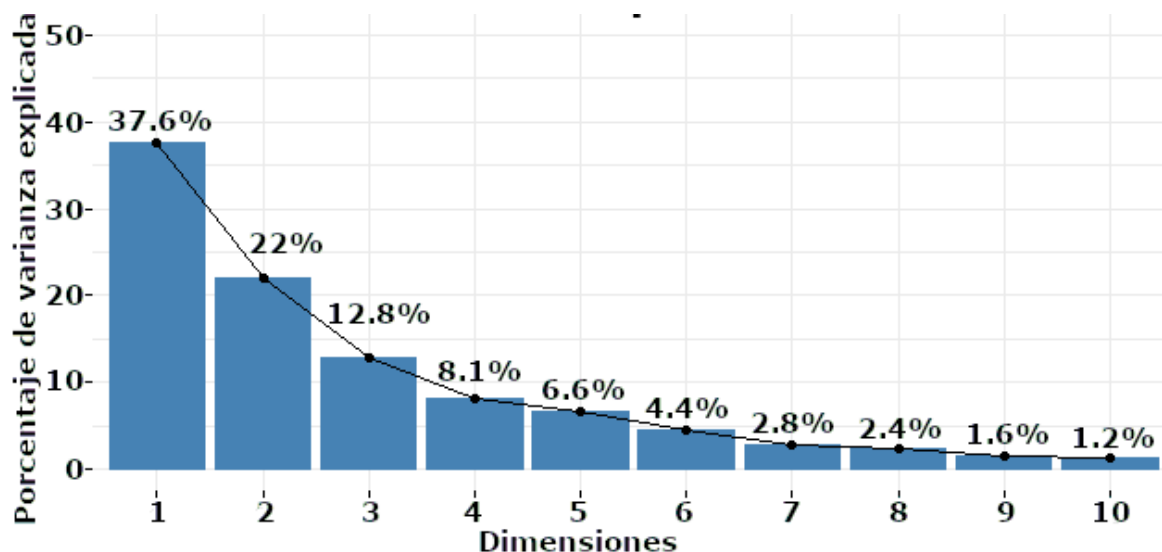


Figura 4. Porcentaje de varianza explicado. Donde 1=Clorofila-a, 2=Sólidos disueltos totales, 3=Turbidez, 4= Conductividad eléctrica, 5=Coliformes totales, 6=Fosfatos, 7=Nitrógeno, 8=Demanda bioquímica de oxígeno, 9=Temperatura, 10=pH.

La dimensión uno explica que la Clorofila-a, Turbidez, Nitrógeno y Fosfatos son las variables que tienen mayor influencia en los sitios. Mientras que en la dimensión dos los Sólidos Totales Disueltos, Conductividad Eléctrica, Coliformes Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Temperatura son las variables que tienen mayor influencia en los sitios de muestreo (tabla 7).

Tabla 7. Contribución de las dimensiones uno y dos. Donde se muestran las contribuciones de cada variable medida.

Variable	Dimensión uno	Dimensión dos
Temperatura	6.06	10.12
Conductividad	7.24	18.08

Eléctrica		
pH	4.24	0.94
Sólidos Disueltos	6.45	23.26
Totales		
Oxígeno Disuelto	0.10	6.23
Demanda	4.04	14.26
Bioquímica de		
Oxígeno		
Coliformes Totales	6.93	16.56
Clorofila-a	21.16	0.44
Turbidez	18.33	0.03
Nitrógeno	14.69	0.31
Fosfatos	10.75	9.76

Se observó que la variable que tiene una mayor contribución es la Clorofila-a, seguida de los Sólidos Disueltos Totales, Turbidez, Conductividad Eléctrica, Fosfatos y Nitrógeno (figura 7).

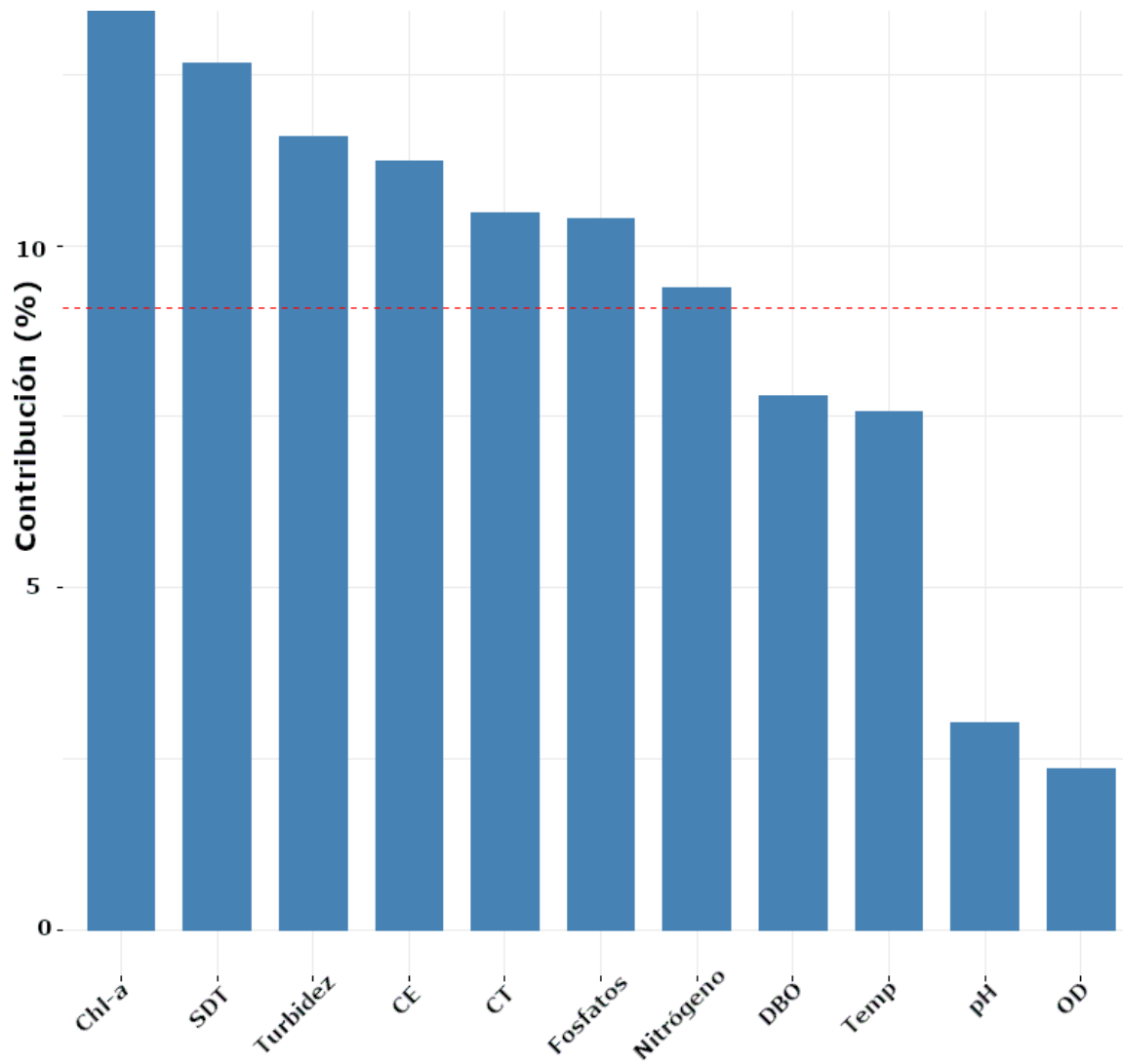


Figura 5. Suma de las contribuciones de las variables de las dimensiones 1 y 2.

El mapa de calor identificó cuáles eran las variables relacionadas a la contaminación y que relación tienen con los sitios de muestreo (figura 8). Este gráfico se formó a partir de la relación entre las variables (clúster superior) donde se aprecia una relación entre los Coliformes Totales y los Sólidos Disueltos Totales, y entre la Clorofila-a, Nitrógeno y Fosfatos. El análisis formó cuatro grupos: El primer grupo está formado por La Sabana sur, Chacchoben y el Ocho, debido a que sus niveles de Clorofila-a, Nitrógeno y Fosfatos son similares. El segundo grupo por Punta Laguna, La Sabana norte, Laguna Chabela, Laguna Roja, Laguna Guerrero, Noh-Bec, Laguna Negra, Laguna Encantada, Laguna

Guadalupe, Bacalar sur, Bacalar centro, Xul-Ha, Laguna Milagros y Bacalar norte que comparten similitud debido a los bajos niveles de Fosfatos, Nitrógeno Total y Clorofila-a. El tercero por las lagunas de Miguel Hidalgo, Laguna Yalahau, Chojkaan, Xbacab, Chuiná, Laguna Noh, Zoh Laguna, San Felipe Bacalar, Silvituc, Chan Laguna, San José de la Montaña y Laguna Om, las cuales comparten similitud por tener una baja concentración de Solidos Totales Disueltos, Clorofila-a, Nitrógeno Total y Fosfatos. El cuarto grupo compuesto por las lagunas de la Sabana centro, Nopalitos, Cobá y Campamento Hidalgo las cuales son similares a qué cuentan con altos niveles de Coliformes Totales, Solidos Disueltos Totales, bajos niveles de Clorofila-a y Fosfatos.

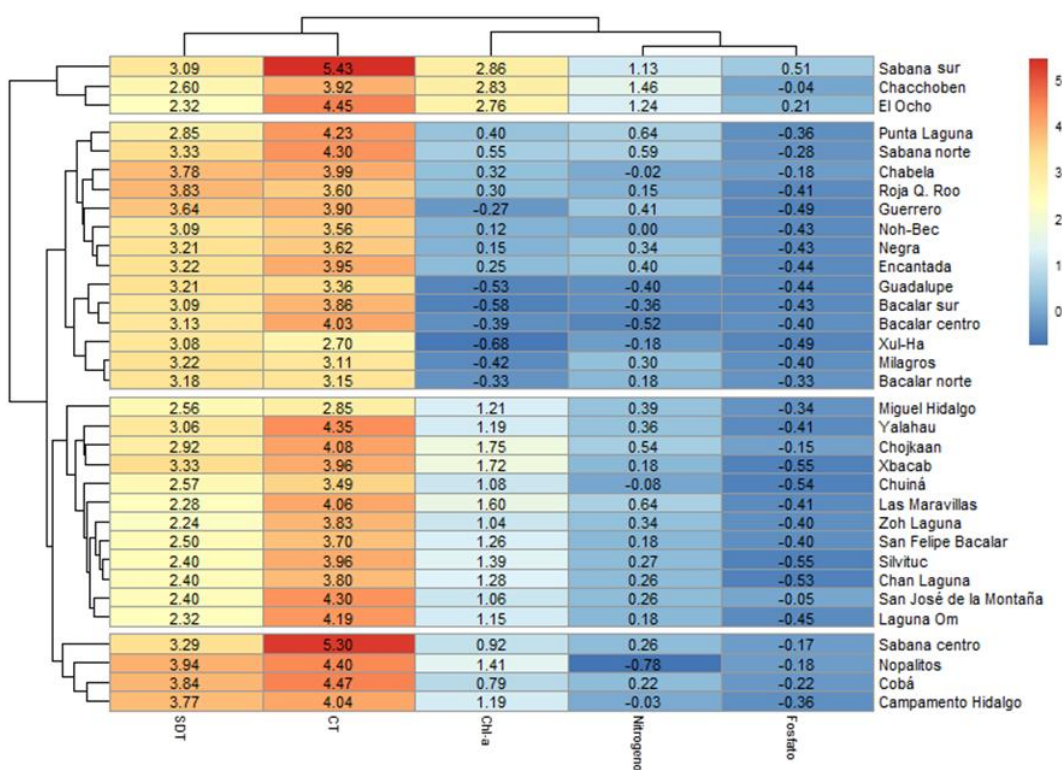


Figura 6. Mapa de calor de las variables indicadoras de contaminación, datos usados para la elaboración del mapa corresponden a las variables que tuvieron una mayor influencia sobre los sitios de muestreo según lo obtenido en el PCA.

Índice de Calidad de Agua

Se obtuvo que solamente un sitio obtuvo la categoría de calidad buena, con índice de 70, siendo este la laguna de Xul-Ha. Por otra parte solamente 5 sitios presentaron una calidad mala, siendo La Sabana sur con un índice de 31, seguido

por El Ocho con un índice de 37, Chacchoben tuvo un índice de 43, seguido de la Sabana norte y Sabana centro con un índice de 49. El resto de los sitios presentaron una calidad media y un índice que varía entre los 51 y 67 (tabla 8).

Tabla 8. Distribución de los resultados del Índice ICA y categorización de Calidad de Agua pertenecientes a los sitios de muestreo.

Laguna	ICA	Valoración
Sabana sur	31	Mala
El Ocho	37	Mala
Chacchoben	43	Mala
Sabana norte	49	Mala
Sabana centro	49	Mala
Yalahau	51	Media
Chojkaan	52	Media
Nopalitos	53	Media
Chabela	54	Media
Campamento Hidalgo	54	Media
Cobá	55	Media
Punta Laguna	55	Media
Encantada	56	Media
San José de la Montaña	57	Media
Xbacab	57	Media
Zoh Laguna	58	Media
Guerrero	59	Media
Om	59	Media
Roja	60	Media
Silvituc	60	Media
Laguna Noh	61	Media
Milagros	62	Media
Bacalar sur	62	Media
Negra	64	Media
San Felipe Bacalar	64	Media
Miguel Hidalgo	64	Media
Chan Laguna	64	Media
Chuiná	64	Media
Guadalupe	65	Media
Bacalar norte	65	Media
Noh-Bec	65	Media
Bacalar centro	67	Media
Xul-Ha	70	Buena

Zonación de la calidad de agua en la Península de Yucatán

Para la zonación se usaron los datos de los 31 sistemas muestreados y los datos de 13 sistemas obtenidos de la CONAGUA, dentro de los cuales hay datos de cenotes, lagunas costeras y ecosistemas salobres de la PY. La CONAGUA tiene datos de los Sólidos Suspendidos Totales y Coliformes Fecales, en este caso solo se utilizaron los Coliformes para estimar el índice de calidad de agua que se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Datos obtenidos de CONAGUA (Recuperado de CONAGUA, s. f.)

Sitio	Coliformes fecales UFC/100l	ICA	Calidad
<i>Chinchancanab</i>	95	65	Media
<i>Noc-ac</i>	430	60	Media
<i>Sian-kan</i>	2603	44	Mala
<i>Nichupté</i>	1464	47	Mala
<i>Laguna Manatí</i>	3616	41	Mala
<i>Laguna</i>	3	87	Buena
<i>Chacmochuc</i>			
<i>Laguna Conil</i>	20	74	Buena
<i>Ria lagartos</i>	120	63	Media
<i>coloradas</i>			
<i>Ria lagartos 2</i>	249	59	Media
<i>Laguna de</i>	3	87	Buena
<i>Términos</i>			
<i>Celestún</i>	3	87	Buena
<i>Laguna</i>	3	87	Buena
<i>Yucalpetén</i>			
<i>Laguna Conil</i>	86	65	Media
<i>Holbox</i>			

En total se utilizaron los datos de 46 lagunas (tabla 10) para realizar la interpolación. Lo que mostró que la mayoría de los sistemas acuáticos epicontinentales de los cuales se obtuvieron datos a través de a plataforma de.... de la Península de Yucatán, tiene una calidad media. En el mapa se representan los sitios que presentaron una calidad mala en color azul intenso, habiendo zonas

de interés en la interpolación. La primera zona es La Sabana, el segundo es la zona donde se encuentran las lagunas de Chacchoben, El Ocho y Chojkaan; en tercera la zona costera centro y sur del estado de Quintana Roo; y en cuarto la zona de la Laguna Nichupté en Cancún. Las zonas costeras del noroeste de la Península de Yucatán tienden a tener una calidad buena, con valores mayores a 80.

Tabla 10. Lista de lagunas adicionales usadas para la interpolación.

No. Sitio	Laguna
34	Chinchancanab
35	Noc-Ac
36	Sian-Kan
37	Nichupté
38	Laguna Manatí
39	Laguna Chacmochuc
40	Laguna Conil
41	Ria Lagartos Coloradas
42	Ria lagartos 2
43	Laguna de Términos
44	Celestún
45	Laguna Yucalpetén
46	Laguna Conil Holbox

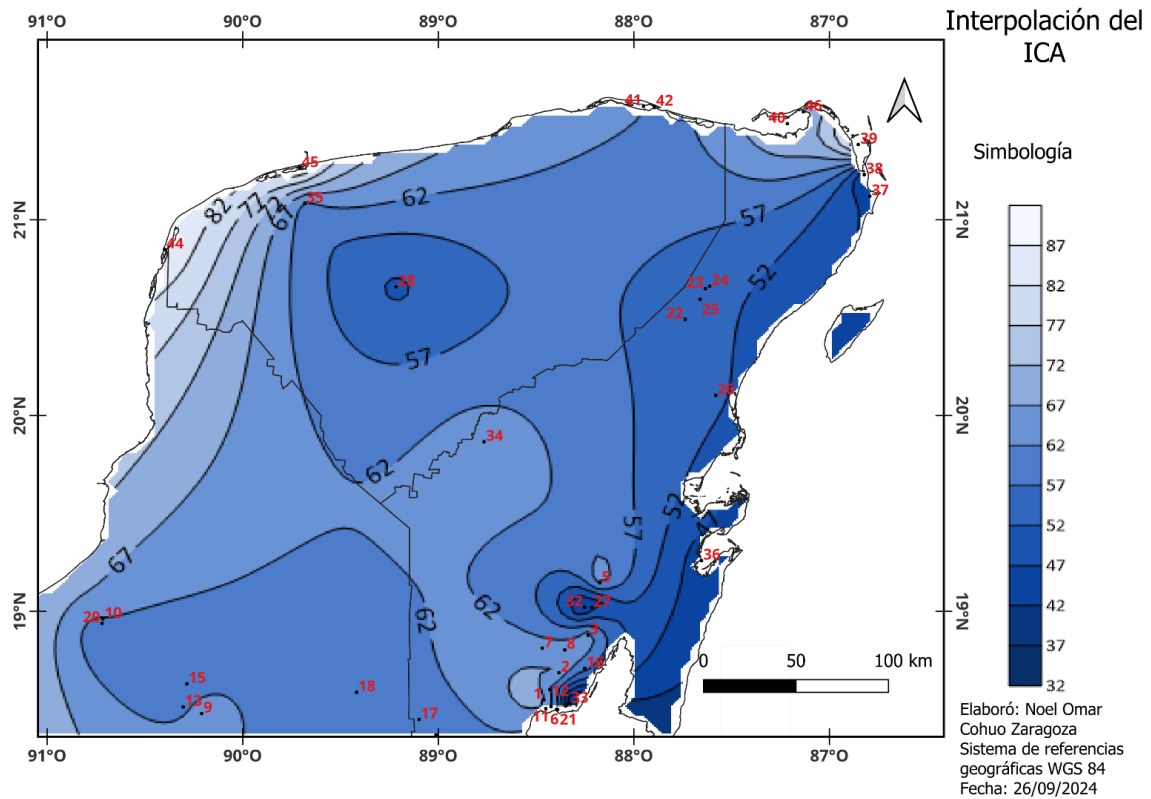


Figura 7. Interpolación del ICA en la Península de Yucatán, la intensidad del color azul refleja la calidad del agua, mientras más oscuro sea el color peor es la calidad de agua y mientras más claro la calidad del agua es mejor.

Normatividad de la calidad de agua

Las variables ambientales obtenidas fueron comparadas con la NOM-127-SSA1-2021 (Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua) y los criterios que deben cumplir según la normatividad de Canadá y de la Columbia Británica para aguas de uso de recreacional. La NOM-127-SSA1-2021 sobre calidad de agua para uso y consumo humano. Los valores obtenidos de sitios de muestreo se compararon con los límites permisibles de México, Canadá y la Columbia Británica (tabla 11).

Tabla 11. Límites permisibles de Sólidos Disueltos Totales, Clorofila-a, pH y Turbidez según la NOM-127-SSA1-2021 y los lineamientos bases para aguas de usos recreativos de Canadá y de la Columbia Británica

Parámetro variable ambiental	México	Canadá	Columbia Británica
Clorofila-a	No hay límites	No hay límites	50 mg/m ²
pH	6.5 a 8.5	5.0 – 9.0	5.0 – 9.0
Turbidez	4 NTU	50 NTU	50 NTU
Sólidos Disueltos Totales	1000 ppm	No menciona	No menciona

En cuanto a la normatividad mexicana, no hay alguna norma o ley específica relacionada a la calidad de agua que deban cumplir los cuerpos de agua para uso recreativo. Sin embargo, se tomó como referencia la NOM-127-SSA1-2021 que aplica para el uso y consumo humano y niveles de coliformes para aguas de recreación. Los límites permisibles de pH (6.5 a 8.5) estuvieron dentro del rango a excepción del sitio de La Sabana centro, Laguna Chabela y Yalahau no cumplen con este parámetro. En cuanto a los Sólidos Disueltos Totales establecidos con en la NOM solamente los sitios de Punta Laguna, San Felipe Bacalar, Miguel Hidalgo, Chacchoben, Chojkaan, El Ocho, San José de la Montaña, Laguna Om, Zoh Laguna, Silvituc, Laguna Noh, Chan Laguna y Chuiná estuvieron dentro de los límites permisibles. Tomando en cuenta los valores de la Turbidez los sitios de El Ocho, Chacchoben, La Sabana sur, Campamento Hidalgo, Yalahau, Laguna Roja, San Felipe Bacalar, Miguel Hidalgo, La Sabana centro, Chojkaan, San José de la Montaña, Zoh Laguna, Silvituc, Laguna Noh, Chan Laguna, Xbacab y Chuiná no cumplen con establecido en la norma.

En cuanto a los niveles de pH propuestos por los lineamientos bases de Canadá y la Columbia Británica todos los sitios se encuentran dentro de los límites permisibles (5.0 a 9.0). Tomando en cuenta ambos lineamientos la Turbidez en los

sitios de El Ocho, Chacchoben y La Sabana sur no cumplen con los límites permisibles que establecen.

Los lineamientos bases de la Columbia Británica establecen límites de Clorofila-a ($>50 \text{ mg/m}^2$) y estos límites son excedidos por los sitios de El Ocho, Chacchoben, La Sabana sur, Chojkaan y Xbacab sobrepasan los límites sugeridos.

Adicionalmente se utilizó como referencia los indicadores de calidad del agua propuestos por la CONAGUA (2024). La Conagua separa los cuerpos de agua dependiendo si son superficiales y subterráneos, los cuerpos superficiales los separa en costeros, lóticos y lénticos. Tomando en cuenta esto, se utilizaron los criterios para cuerpos lénticos, de los 12 indicadores de calidad del agua presentados por la CONAGUA, solo se tiene datos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno. Con base en estos indicadores de la CONAGUA se clasifica la calidad del agua de los sistemas acuáticos en semáforos, el color del semáforo se asigna dependiendo del número de parámetros que no se encuentran dentro de los límites aceptables, si todos los parámetros están dentro del límite de los parámetros el color será verde, si los niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Toxicidad o Enterococo incumplen los límites el color será rojo, si los niveles de *E. coli*, Coliformes Fecales, Sólidos Suspendidos Totales o la Saturación de Oxígeno Disuelto incumplen los límites el color será amarillo. Los límites de las variables se aprecian en el anexo 1.

Con base a los límites permisibles se obtuvo que los sitios de Xul-Ha y Bacalar centro obtuvieron una calidad excelente (ver tabla 12). Por otra parte, Punta Laguna, Yalahua, Laguna Guerrero, Laguna Milagros, Bacalar sur, Bacalar norte, Laguna Negra, San Felipe Bacalar, Noh-Bec, Chan Laguna, Laguna Noh y Chuiná tuvieron una calidad de agua buena. Los sitios de Nopalitos, Cobá, Laguna Chabela, Campamento Hidalgo, Laguna Roja, Laguna Encantada, Laguna Guadalupe, La Sabana norte, La Sabana sur, La Sabana centro, Chacchoben, Chojkaan, El Ocho, San José de la Montaña, Laguna Om, Silvituc, Zoh Laguna y Xbacab tuvieron una calidad de agua aceptable.

Tabla 12. Calidad de agua según indicadores de CONAGUA.

No	Laguna	DBO (mg/l)	
1	Nopalitos	23.6	Aceptable
2	Cobá	7	Aceptable
3	Punta Laguna	5.2	Buena calidad
4	Chabela	11.7	Aceptable
5	Campamento Hidalgo	9.4	Aceptable
6	Yalahau	3.8	Buena calidad
7	Roja	8.4	Aceptable
8	Guerrero	3.6	Buena calidad
9	Negra	3.1	Buena calidad
10	Encantada	6.45	Aceptable
11	Milagros	5.2	Buena calidad
12	Xul-Ha	1.6	Excelente
13	Bacalar sur	5.1	Buena calidad
14	Bacalar centro	1.8	Excelente
15	Bacalar norte	3.9	Buena calidad
16	San Felipe Bacalar	3.7	Buena calidad
17	Miguel Hidalgo	-	-
18	Guadalupe	6.3	Aceptable
19	Sabana norte	8.4	Aceptable
20	Sabana centro	8.4	Aceptable
21	Sabana sur	13.2	Aceptable
22	Chacchoben	6.2	Aceptable
23	Chojkaan	10.5	Aceptable
24	Noh-Bec	3.15	Buena calidad
25	El Ocho	6.3	Aceptable
26	San José de la Montaña	6.4	Aceptable
27	Om (Caobas)	14.7	Aceptable
28	Zoh Laguna	10.7	Aceptable
29	Silvituc	6	Aceptable
30	Laguna Noh	5.1	Buena calidad
31	Chan Laguna	3.5	Buena calidad
32	Xbacab	6.5	Aceptable

Discusión

Parámetros ambientales que describen la calidad del agua

Las variables ambientales que presentaron una mayor influencia sobre la calidad del agua fueron la concentración de Nitrógeno Total, Fosfatos, Turbidez, Coliformes Totales y Sólidos disueltos totales. También se encontró que los sitios que presentaron una peor calidad del agua tenían altos niveles de Clorofila-a, lo cual está relacionado con los altos niveles de Nitrógeno en el agua (Bucheli *et al.*, 2021). Los altos niveles de nutrientes se deben al exceso de materia orgánica en los cuerpos de agua, los cuales pueden proceder del desarrollo urbano, la deforestación, el vertido de aguas residuales, ganadería y agricultura (Bucheli *et al.*, 2021; Falconi *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2018). En el presente trabajo los sistemas que presentaron la mayor concentración de Clorofila-a fueron los sistemas de La Sabana, Chacchoben, El Ocho y Chojkaan. La Sabana es un sistema que recibe descargas de aguas procedentes de una planta de tratamiento de agua (Cohuo *et al.*, 2023). En el caso de la laguna de Chacchoben, Chojkaan y El Ocho se encuentran en una zona donde se desarrollan actividades agrícolas como la ganadería y la agricultura (CONABIO & ITVO, 2019). Los efectos de la ganadería sobre los niveles de fosfatos y nitrógeno son consecuencia del arrastre de estiércol durante la temporada de lluvias (Li *et al.*, 2022). Por otra parte, la ganadería requiere del cultivo de forraje para el ganado y este proceso de cultivo es acompañado por el uso de fertilizantes que durante la temporada de lluvias pueden ser arrastrados hacia los sistemas acuáticos por la escorrentía (Bucheli *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022). Pacheco-Ávila y colaboradores (2004) encontraron que en municipios del estado de Yucatán que presentaban granjas agrícolas cercanas a fuentes de agua, habían elevados niveles de nutrientes procedentes de las granjas. Pudiendo ser esta una explicación del porque las lagunas de Chacchoben, El Ocho y Chojkaan presentan altos niveles de nutrientes.

Los altos niveles de Turbidez están relacionados a la presencia de partículas suspendidas en el agua que evitan que la luz penetre a mayores profundidades de los cuerpos de agua (Beniwal *et al.*, 2021). Esta variable tuvo una correlación positiva con el Nitrógeno Total, la Clorofila-a y Coliformes Totales. Las causas de los aumentos en la turbidez de agua está relacionada a procesos naturales como la erosión, el arrastre de sedimentos durante las lluvias, los bajos niveles de agua como resultado de sequías (Beniwal *et al.*, 2021; Patil *et al.*, 2012). Pero también es afectada por las actividades humanas tales como el desarrollo urbano, la descarga de aguas residuales, teniendo como resultado el aumento de partículas suspendidas (Matos *et al.*, 2024; Beniwal *et al.*, 2021). Otra posible fuente de altos niveles de turbidez en los sistemas acuáticos es la presencia de arcilla presente en el agua, altos niveles de fitoplancton, lo cual ha sido reportado en un estudio hecho en India por Karmakar y Singh en 2021, lo relacionado a los altos niveles de fitoplancton podría estar relacionado en los sistemas que presentaron altos niveles de Clorofila-a, puesto que las altas concentraciones de Clorofila son indicadores de niveles altos de fitoplancton (Ledesma *et al.*, 2020; Orejarena *et al.*, 2004).

Las altas concentraciones de Coliformes Totales en los sistemas se deben a fuentes de contaminación humana, derivado de aguas negras y la presencia de materia orgánica en descomposición (Ramos-Ortega *et al.*, 2008). En el caso de La Sabana en estudios previos como el de Cohuo y colaboradores (2023) se detectaron altas concentraciones de Coliformes Totales y Fecales que están relacionadas al vertido de aguas residuales no tratadas. La laguna de Chacchoben, El Ocho y Chojkaan a su alrededor mantienen desarrollo de ganadería, la cual es una fuente de contaminación hacia los sistemas por Coliformes Totales debido al arrastre de estiércol por las escorrentías (Li *et al.*, 2022; Mancilla-Villa *et al.*, 2022). Este origen de contaminación ya ha sido reportado en el estado de Yucatán en un estudio hecho por Pacheco-Ávila y colaboradores (2004) que encontraron que las granjas de cerdos estaban contaminando cenotes y el agua subterránea cercana a las granjas. Otro sitio que también presento niveles altos de coliformes totales fue la laguna de Nopalitos, en

la cual hay desarrollo de actividades turísticas que también están relacionadas con la presencia de Coliformes Totales dado al desarrollo humano que existe en lugares turísticos (Hernández-Morales & Poot-Delgado, 2018). El desarrollo y actividad turística como fuentes de contaminación fecal ya se ha reportado en el estado de Quintana Roo, en sitios como la Laguna Nichupté que ha reportados en los trabajos de León-Galván y colaboradores (2009) y en el de Ortega-Almazán y colaboradores (2024). Esta variable está relacionada con la Demanda Bioquímica de Oxígeno, observándose que en los sitios que presentaron altas concentraciones de Coliformes Totales había una mayor demanda de Oxígeno, debido al proceso metabólico de las bacterias (Ramos-Ortega *et al.*, 2008).

La temperatura tubo una variación de entre 29 y 30 °C, en el caso de los sistemas acuáticos tropicales la temperatura se ve afectada por la temperatura ambiental (Lin *et al.*, 2018), debido a las temperaturas cálidas y largos periodos de reflectancia solar (Kleypas, 2019), en este caso las temperaturas en los sitios de muestreo variaron entre 29 y 34 °C lo cual es similar a lo encontrado por Lin y colaboradores (2008) en la Laguna Milagros. Por otra parte, Carrillo y colaboradores (2024) encontraron que en el sistema lagunar de la Laguna de Bacalar los niveles de temperatura tenían una variación pequeña durante las temporadas del año, lo cual se debe a que la Península de Yucatán se encuentra en la región tropical.

Los sólidos disueltos totales presentaron un rango de variación entre 100 y 9000. Las altas concentraciones en zonas kársticas se debe principalmente a la presencia de carbonatos y bicarbonatos, que son resultado natural del proceso de mineralización que tiene el agua por la erosión de las rocas calcáreas (Lin *et al.*, 2018; Marisa *et al.*, 2024). Aunado a ello las actividades antropogénicas como la agricultura, la construcción y el desarrollo urbano genera desechos que llegan a los sistemas acuáticos por las escorrentías superficiales, lo cual ocasiona el aumento de los sólidos disueltos (Marisa *et al.*, 2024). Está variable tuvo una correlación positiva con la conductividad eléctrica, lo cual coincide con el trabajo Marisa y colaboradores (2024) que en una laguna kárstica en Chiapas encontró

que había una alta concentración y una correlación de Sólidos Disueltos Totales y Conductividad Eléctrica. La presencia de iones de carbonatos y bicarbonatos en el agua incrementan la conductividad Eléctrica (Marisa *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2018). En el caso de estas variables el sitio que presentó un mayor niveles de ambas fue la laguna de Nopalitos la cual esta cercas de Tulum donde Saint-Loup y colaboradores (2018) encontraron que en las lagunas cercanas a Tulum había una intrusión de agua salada proveniente de la costa, lo cual puede estar relacionado con los altos niveles de Sólidos Totales Disueltos y Conductividad Eléctrica en Nopalitos.

Los niveles de pH que se obtuvieron tuvieron una variación de entre 5 y 9. Esto se debe a que está variable ambiental no es estable en los sistemas kársticos, debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos que pueden modificar el pH en los sistemas (Marisa *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2018; Marisa *et al.*, 2024).

De acuerdo con el NMDS y el PCA, la laguna Nopalitos se diferenció del resto por tener altos niveles de Conductividad Eléctrica y Solidos Disueltos Totales entre los sistemas muestreados, debido a la posible intrusión de agua marina en lagunas cercanas lo cual fue reportado por Saint-Loup y colaboradores en 2018 para la laguna Kaan Lunn ubicada en la misma zona de estudio. Sin embargo, harían falta más estudios para determinar si Nopalitos recibe intrusiones de agua de mar, o cual es la razón por la cual este sitio presenta altos niveles de estas variables.

Por otra parte, el segundo sitio que se diferenció del resto de grupos fue la laguna de Xul-Ha, la cual no mostro tener una relación fuerte con alguna variable. Este sitio se caracteriza por tener bajos niveles de Clorofila-a, Coliformes Totales, Nitrógeno, Fosfatos y Turbidez, variables indicadoras de contaminación en niveles altos (Beniwal *et al.*, 2021). Este sitio está conectado a la laguna de Bacalar, siendo Xul-Ha un sitio donde se desarrolla una corriente de agua superficial que se mueve hacia el norte, lo cual ayuda a transportar y diluir los contaminantes

presentes en el sistema (Carrillo *et al.*, 2024). Aunado a ello este sitio se caracteriza por tener una condición oligotrófica, es decir que tiene una baja concentración de nutrientes (Carrillo *et al.*, 2024), lo cual coincide con lo encontrado en este estudio. Las bajas concentraciones nutrientes y coliformes son indicativos de la buena condición ecológica del sistema (Beniwal *et al.*, 2021).

El grupo uno está compuesto por sistemas que forma parte la región hidrológica 33 y 32 (INEGI, 2002). Este grupo está compuesto por lagunas que están influenciadas por la Laguna de Bacalar (Carrillo *et al.*, 2024; Lizardi-Jiménez & Hernández Martínez, 2016) con excepción de la Laguna Yalahau, Punta Laguna, Campamento Hidalgo Laguna Chabela que se encuentra en al norte de la Península de Yucatán. Este grupo se caracteriza por su diferencia de los demás, debido a los altos niveles de Sólidos Disueltos Totales y bajos niveles de nutrientes. Los altos niveles de Sólidos Disueltos Totales presentes se deben a causas naturales, influenciada por la presencia desarrollo urbano y turístico en los sitios estudiados (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2024; Marisa *et al.*, 2024). Dentro de las causas naturales se encuentra la composición kárstica y posiblemente por la temporada de secas en la cual se tomaron las muestras (Carrillo *et al.*, 2024; Marisa *et al.*, 2024). Estudios como el Karmakar y Singh en 2021 en encontraron que la calidad del agua en la India disminuía en la temporada de secas, debido a que el nivel del agua era bajo y había una mayor concentración de contaminantes, por otra Carrillo y colaboradores en 2024 hicieron un estudio hidrológico en la laguna de Bacalar, donde encontraron que el nivel del agua era bajo, lo cual posiblemente afectaría la calidad del agua en el sistema. Aunado durante el 2024 se experimentó un periodo de sequías prolongado, intensificado por el fenómeno de El Niño, lo cual afecto el nivel del agua de las lagunas trayendo como consecuencia una concentración de las partículas presentes en el agua (Carrillo *et al.*, 2024).

El grupo dos se caracteriza por tener bajas concentraciones de Sólidos Disueltos totales, Conductividad eléctrica baja, niveles y son los sitios que presentaron mayores temperaturas. Los sitios que conforman este grupo se

caracterizan por tener pueblos a su alrededor que presentan desarrollo de ganadería y agricultura (INEGI, 2016), pudiendo ser estas actividades las responsables de los altos niveles de nutrientes en este grupo formado. Sin embargo, aún falta investigar que ocasiona esta similitud. Los parámetros fisicoquímicos pueden verse afectados por la naturaleza del sitio y por las actividades humanas que se llevan a cabo (Beniwal *et al.*, 2021; Carrillo *et al.*, 2024; Marisa *et al.*, 2024). Otra de las causas que determinan la similitud entre los sistemas de este grupo son el tipo de vegetación, suelo y uso de suelo que tienen las zonas alrededor de las lagunas (INEGI en 2016).

El grupo tres está formado por los sitios de La Sabana sur, Chacchoben y El Ocho. Este se caracteriza por tener altos niveles de Clorofila-a, Nitrógeno y Turbidez. Estos parámetros en altas concentraciones son indicadores de problemas de contaminación relacionada a actividades humanas (Beniwal *et al.*, 2021). En el caso de La Sabana estudios anteriores indican que su fuente de contaminación se debe a la planta de tratamiento de aguas residuales a un costado de la laguna (Cohuo *et al.*, 2023). Sin embargo en el caso de El Ocho y Chacchoben el origen de la contaminación no está identificado, una causa posible podría ser la presencia de ganadería y agricultura en la zona que se han reportado por CONABIO & ITVO (2019). Pero aún falta determinar si estas actividades son la principal fuente de contaminación, o si esta condición puede ser de forma natural del sistema. Olivares-Casillas (2022) menciona que una posible causa de las condiciones eutróficas de los sistemas lacustres podría ser la acumulación de sedimentos que provoca un proceso de maduración en los sistemas, relacionado con el aumento del nivel trófico de los sitios.

Índice de calidad de agua de los sistemas muestreados

La calidad del agua en la Península de Yucatán es de mediana calidad, con problemas de contaminación locales, que se deben al desarrollo urbano, turístico y agrícola que presentan algunas regiones (CONABIO, 2003; INEGI, 2002). La región, en los últimos años ha experimentado un crecimiento demográfico y la expansión de las principales ciudades, lo que ha representado un incremento en la

contaminación del agua, debido principalmente a la necesidad de su uso y desecho de aguas residuales por la construcción de infraestructura, y el desarrollo turístico (Guzmán, 2021; Rubio-Cisneros *et al.*, 2018). Este crecimiento demográfico ocasiona la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, potenciado por la naturaleza kárstica de la península y la presencia de múltiples sistemas acuáticos subterráneos interconectados (CONABIO, 2003; Guzmán, 2021; Lin *et al.*, 2018).

Una de las lagunas más importantes en el sur de Quintana Roo es Bacalar, la cual en los últimos años ha experimentado un crecimiento demográfico a sus alrededores debido a su atractivo turístico (Alvarez-Legorreta *et al.*, 2021). Con los resultados obtenidos se encontró que la calidad de agua de la laguna es media lo cual podría verse influenciado por este crecimiento demográfico como lo describe (Carrillo *et al.*, 2024) Otros estudios como el de Lizardi-Jiménez y Hernández Martínez (2016) han encontrado que en este sitio hay la presencia de hidrocarburos, relacionado a la presencia de lanchas y vehículos acuáticos en la laguna. Otro sitio que presenta problemas de calidad media es la laguna Las Maravillas y Silvituc, las cuales son lagunas que presentan un desarrollo demográfico a sus alrededores con la presencia de actividades agrícolas (Martín-Canché *et al.*, 2021).

Zonación de la calidad de agua en la Península de Yucatán

Esta contaminación se ve reflejada de mayor manera en la región de la costa este de la Península de Yucatán, lo cual se deben al crecimiento que esa zona está experimentando actualmente debido al aumento del turismo nacional e internacional y la migración de la población por la oferta de trabajo (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Esto se ve reflejado ciudades como Cancún y Mérida, la cual ha experimentado un gran crecimiento y con ello también se ha producido un impacto en sistemas acuáticos como la Laguna Nichupté que presenta problemas de contaminación fecal (León-Galván *et al.*, 2009; Ortega-Almazán *et al.*, 2024). En el estudio se encontró que un sitio que sufre de contaminación fecal es Nopalitos, que es un sitio con un desarrollo turístico en aumento, estudios de

aguas subterráneas en zonas cercanas han encontrado que esta contaminación fecal son resultado del crecimiento turístico que está experimentando el municipio de Tulum al cual pertenece esta laguna (Leal-Bautista *et al.*, 2013; Saint-Loup *et al.*, 2018). Otro sitio que presenta problemas de contaminación fecal es La Sabana, la cual es un sistema que se encuentra dividido un puente y una carretera, este sistema en la parte sur ha recibido descargas de agua tratadas que han ocasionado que el sitio tenga problemas de contaminación fecal y exceso de nutrientes (Cohuo *et al.*, 2023). Por otra parte, sitios como Chacchoben y El Ocho cuentan con una calidad del agua mala, influenciada por los altos niveles de Nitrógeno Total, Turbidez y Coliformes Totales, donde su fuente de contaminación podría ser la ganadería. Este tipo de contaminación se ha reportado en el estado de Yucatán donde se han encontrado cenotes y pozos de agua potable con presencia de altos niveles de nutrientes y coliformes totales como consecuencia de la presencia de granjas de cerdos (Pacheco-Ávila *et al.*, 2004).

Algo importante y alarmante sobre la contaminación de cuerpos de agua superficial en la Península de Yucatán es la infiltración de estos contaminantes hacia el manto acuífero (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2024; Leal-Bautista *et al.*, 2013; Marisa *et al.*, 2024; Pacheco-Ávila *et al.*, 2004). En Yucatán el 55% de sus municipios presentan problemas de contaminación fecal según Pacheco-Ávila (2004). En caso de Quintana Roo, en sitios como Tulum ya hay contaminación fecal (Leal-Bautista *et al.*, 2013). La CONABIO (2003) menciona que la Península de Yucatán es una zona con cierta fragilidad y susceptibilidad a la contaminación debido al desarrollo humano, aunado a ello la esta institución remarca que el agua que se usa en esta región proviene del subsuelo, lo cual es un problema para las comunidades rurales donde no existe el abasto de agua potable. La importancia de asegurar la calidad del agua en la Península de Yucatán recae en que este recurso es vital para la vida, el ser humano depende de este recurso no solo para su consumo, sino que este brinda fuentes de alimento, sitios de recreación y sitios que tienen una importancia cultural (Escobar-Castillejos, 2015; Guzmán, 2021; Leal-Bautista *et al.*, 2013; Pérez *et al.*, 2018).

Análisis de resultados en función de la normativa mexicana vigente de calidad de agua

La calidad de agua en México se encuentra reguladas por normas que regulan su calidad para uso y consumo (NOM-127-SSA1-2021), así como los parámetros que deben cumplir las aguas tratadas para ser vertidas en cuerpos de agua (NOM-001-SEMARNAT-1996) (Lin *et al.*, 2018; Martín-Canché *et al.*, 2021; Pacheco-Ávila *et al.*, 2004). Sin embargo, no existe alguna Norma Oficial Mexicana que regule la calidad del agua para uso recreacional, en este estudio se usó NOM-127-SSA1-2021 para comparar los límites permisibles de algunas variables que se midieron debido a que no todas las variables medidas en este estudio se encontraron dentro de esta NOM. Lo que refleja aún más la falta de normativas que regulen la calidad del agua para uso recreacional (Lin *et al.*, 2018). La calidad del agua para uso recreacional es de vital importancia puesto que los problemas de vacíos legales en la legislación Mexicana pueden conducir con problemas de salud (Li *et al.*, 2022; Ramos-Ortega *et al.*, 2008). Algunos problemas relacionados puede ser la contaminación fecal relacionada al surgimiento de enfermedades gastrointestinales (Beniwal *et al.*, 2021; Cohuo *et al.*, 2023; Ramos-Ortega *et al.*, 2008). Otro problema es el exceso de nutrientes que puede ocasionar afloramientos algales, los cuales pueden traer como consecuencia la generación de zonas anóxicas, y algunas algas pueden traer consigo la presencia de fitotoxinas en el agua (Bucheli *et al.*, 2021; Falconi *et al.*, 2023). La presencia de las fitotoxinas en el agua puede generar intoxicación en el ser humano, por ingesta de agua o peces presentes en agua (British Columbia Ministry of Environment and Climate Change Strategy, 2020; Health Canada, 2012).

En México las principales actividades recreativas se llevan a cabo en lagunas y playas (COFEPRIS, 2024), lo cual resalta la necesidad de tener una normatividad que regule y establezca las características fisicoquímicas y biológicas que debe cumplir el agua para su uso. Por lo cual, en este estudio también se utilizaron los lineamientos bases de Canadá y la Columbia Británica, los cuales brindan una mayor cantidad de parámetros para medir la calidad del

agua para uso recreacional. Si bien estos lineamientos bases pueden ser utilizados como ejemplo para México, el país necesita de normas que regulen esto (Hoogesteijn *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2018). En enero de 2024 la COFEPRIS lanzo un manual de monitoreo mensual de calidad de agua para playas y cuerpos de agua dulce, en donde se establece que los cuerpos de agua dulce aptos para uso recreativo deben tener niveles de *E. coli* de 0 a 200 NMP/100 ml; y las playas deben tener concentraciones de Enterococos no mayores a 200 NMP/100 ml, siendo estos parámetros los únicos presentados. En México los cuerpos de agua no solo presentan contaminación fecal, por lo cual se requieren de normas o manuales que utilicen un mayor número de parámetros (Hernández-Morales & Poot-Delgado, 2018; Hoogesteijn *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2018).

Los indicadores de calidad de agua usados por la CONAGUA son una opción básica para el diagnóstico de la calidad del agua, sin embargo, CONAGUA emite semáforos de calidad de agua usando tres variables como lo son la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales (Ibarrarán *et al.*, 2017). Sin embargo estos indicadores no toman en cuenta otros indicadores de calidad de agua como los niveles de nutrientes, las concentraciones de metales pesados, entre otros (Martínez-Austria *et al.*, 2019). Estos indicadores básicos de CONAGUA reflejan la falta de criterios existentes en México, donde también las normas oficiales mexicanas tampoco brindan criterios que permitan determinar que usos se le puede dar al agua dependiendo de sus características fisicoquímicas y biológicas (Bautista, 2023; Ibarrarán *et al.*, 2017; Martínez-Austria *et al.*, 2019)

Conclusión

En conclusiones las variables que tuvieron una mayor influencia sobre los sitios de muestreo fueron la Clorofila-a, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, coliformes fecales, fosfatos, nitrógeno y la demanda bioquímica de oxígeno. De las cuales los sólidos totales y conductividad eléctrica a diferencia de las demás variables pueden ser tener niveles elevados debido a la composición química natural del agua, sin embargo, haría falta hacer análisis químico que

describan la composición del agua y así determinar si es una condición natural o resultado de contaminación, puesto que estas dos variables no son indicadores precisos de contaminantes.

Los resultados indican que la Península de Yucatán presenta una calidad de agua de media, con sitios de mala calidad puntuales en ciertas regiones, principalmente cercanos a las ciudades, como La Sabana y la laguna Nichupté, reportadas con anterioridad con problemas de contaminación. Sin embargo, en sitios como Chacchoben y El Ocho, la fuente de contaminación aún no está descrita, por lo que es necesario realizar estudios que determinen la fuente de contaminación. Si bien, los problemas de contaminación son locales, es necesario que se tomen medidas, como planes de monitoreo, la vigilancia de las descargas de agua y el tipo de infraestructura empleada cercana a los sistemas acuáticos.

Para este estudio solo se tomó en cuenta la temporada de secas, por lo que se recomienda realizar monitoreos que abarquen las tres temporadas del año (secas, lluvias y nortes), para tener un patrón de variación que permita desarrollar estrategias de manejo que atiendan las necesidades que los sistemas acuáticos. los resultados obtenidos pueden variar en las distintas temporadas.

De igual forma se observó que la calidad de agua en la Península de Yucatán tiende a empeorar en la costa este de la región, lo cual podría estar relacionado a que esta zona es la que últimamente ha experimentado un desarrollo demográfico relacionado a la explotación del potencial turístico. Por otra la zona que muestra una mejor calidad se encuentra en la zona noroeste de la región.

Además, en México no existen normas específicas para la calidad del agua de uso recreacional. Si bien existen normas que regulan la calidad del agua para su consumo humano, hace falta legislar en materia de protección y cuidado de la calidad del agua ambiental, y de normas que se ajusten a la naturaleza de sistemas acuáticos, puesto que no es posible controlar algunos parámetros presentes en los cuerpos de agua. Ejemplo de ello sería la cantidad de Sólidos Disueltos Totales, que en algunos casos sus altos niveles pueden ser ocasionados

por condiciones naturales. Aunado a ello la normatividad debería ajustarse los tipos de actividades recreacionales de primer y segundo contacto, como lo hacen los estándares de la OMS, mismos que son seguidos por la EPA y Canadá. También esta normatividad se debe ajustar al tipo de sistema, ya sea lentic, lotico, salado y dulce, puesto que existe alta variabilidad entre los factores ambientales de los sistemas

Referencias

- Alvarez-Legorreta, T., Hernández-Arana, H., de Jesús-Navarrete, A., Elías-Gutiérrez, M., Palafox, B., Yanez-Montalvo, A., Falcón, L., Gaona, O., Teutli-Hernández, C., Aguíla, B., Guerrero-Jacinto, M., Sansón, G., Herrera-Silveira, J., Maravilla-Romero, M., Fonseca-Chicho, E., Madrid, S., Ibarra, S., & Rivera, A. (2021). *Tarjeta de reporte de laguna Bacalar*. https://www.sedeturqroo.gob.mx/pmts2030/documentos/marco_normativo/TARJETA-DE-REPORTE-DE-LAGUNA-BACALAR-DIGITAL-2021.pdf
- Aranda-Cirerol, N., Herrera-Silveira, J. A., & Comín, F. A. (2006). Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3), 445-454. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.02.015>
- Avalos-Ramírez, Y. (2023). Contaminación por plomo en suelo, agua, alimentos y sus efectos en los seres humanos. *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 10, 59-68. <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2023v10n2.006>
- Band-Schmidt, C. J., Bustillos-Guzmán, J. J., López-Cortés, D. J., Núñez-Vázquez, E., & Hernández-Sandoval, F. E. (2011). El estado actual del estudio de florecimientos algales nocivos en México. *Hidrobiológica*, 21(3), 381-413.

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507-524. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Bautista, F. (2023). *El karst de México*.
- Beniwal, V. D., Kumari, R., & Jain, D. S. (2021). Physico-Chemical Parameter: An Indicator of Water Pollution. *Journal of Environmental Research*, 5(5). <https://www.imedpub.com/abstract/physicochemical-parameter-an-indicator-of-water-pollution-40875.html>
- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., Segura-Araya, G., Bolaños-Alfaro, J. D. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- British Columbia Ministry of Environment and Climate Change Strategy. (2020). *B.C. Recreational water quality guidelines: Guideline summary*. Ministry of Environment and Climate Change Strategy.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A Water Quality Index -Crashing the Psychological Barrier. En W. A. Thomas (Ed.), *Indicators of Environmental Quality* (Springer US, Vol. 1, pp. 173-182). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1698-5_15
- Bucheli, L., Rojas, B., & Mafla, F. (2021). Monitoreo de la calidad del agua mediante clorofila-a aplicando imágenes satelitales en el Humedal Ramsar, lago Guamués. *INGENIARE*, 17(31), 21-31.

- Caho-Rodríguez, C. A., & López-Barrera, E. A. (2017). Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*, 12(2), 35-49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Carrillo, L., Yescas, M., Nieto-Oropeza, M. O., Elías-Gutiérrez, M., Alcérreca-Huerta, J. C., Palacios-Hernández, E., & Reyes-Mendoza, O. F. (2024). Investigating the Morphometry and Hydrometeorological Variability of a Fragile Tropical Karstic Lake of the Yucatán Peninsula: Bacalar Lagoon. *Hydrology*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/hydrology11050068>
- Castañeda-Villanueva, A. A., Flores-López, H. E., Cuevas-Villanueva, R. A. (2018). Diagnóstico de la calidad de las aguas superficiales en la región de Los Altos Norte de Jalisco, México. *Acta universitaria*, 28(6), 1-13. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1843>
- Castro, M. F., Díaz, D. M., & Montenegro, C. E. (2015). Análisis de la Calidad del Agua del Río Bogotá Durante el Periodo 2008-2015 a partir de herramientas de minería de datos. *Universidad Nacional Abierta y Distancia*, 9. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/index>
- Cervantes, M. (2007). Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. En Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ed.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. (pp. 37-67). <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Perpectivas-sobre-conservaci%C3%B3n-de-ecosistemas-acu%C3%A1ticos-en-M%C3%A9xico.pdf>

- Cintrón-Molero, G., & Schaeffer-Novelli, Y. (2004). *Un sistema de clasificación de humedales propuesto para la Convención de Ramsar* (1.^a ed.).
- COFEPRIS. (2024). *Manual operativo: Monitoreo de la calidad del agua de uso recreativo de contacto primario en el agua de mar de playas y cuerpos de agua dulce*.
- Cohuo, S., Moreno-López, A., Escamilla-Tut, N. Y., Pérez-Tapia, A. M., Santos-Itzá, I., Macario-González, L. A., Villegas-Sánchez, C. A., & Medina-Quej, A. (2023). Assessment of Water Quality and Heavy Metal Environmental Risk on the Peri-Urban Karst Tropical Lake La Sabana, Yucatán Peninsula. *Water*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w15030390>
- CONABIO. (2003). Aguas continentales y diversidad biológica de México: Un recuento actual. *Biodiversitas*, 48.
- CONABIO & ITVO. (2019). *Identificación del uso de suelo y vegetación (mediante clasificación no supervisada/supervisada) de la Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) “Cocodrilos Chacchoben”, Bacalar, Quintana Roo, México* [Estancia no presencial a nivel licenciatura, octubre de 2018 a enero de 2019].
- CONAGUA. (s. f.). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Recuperado 21 de septiembre de 2024, de <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=calidad>
- CONAGUA. (2024). *Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/925192/Generalidades_Indicadores_de_calidad_del_agua.pdf

- CONAGUA & SEMARNAT. (2021). *Programa Hídrico Regional: Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán*. SEMARNAT.
https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_XII_Pen%C3%ADnsula_de_Yucat%C3%A1n.pdf
- Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C., & LaRoe, E. T. (1979). *Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States*.
- Duncan, A. E., Oti, J., & Potakey, M. E. (2019). Impacts of Human Activities on the Quality of River Water: A Case Study of River Densu in Nsawam Adoagyiri of the Akwapim South District, Eastern Region of Ghana. *Open Access Library Journal*, 6(12), Article 12. <https://doi.org/10.4236/oalib.1105785>
- Escobar-Castillejos, D. (2015). *De Chiapas a la Península de Yucatán: Intersticios hídricos* (1.^a ed.).
- Falconi, A. V. H., Castillo, M. M., Carranza, M. M., Sánchez, A. J., & Reyes, R. R. (2023). Cambios en el uso del suelo afectan la calidad del agua y la concentración de clorofila en arroyos tropicales. *HIDROBIOLÓGICA*, 33(1), Article 1.
<https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/1687>
- Fernández-Santisteban, M. T. (2017). Determinación de coliformes totales y fecales en aguas de uso tecnológico para las centrífugas. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 51(2), 70-73.
- Frausto-Martínez, O., & Ihl, T. (2015). Capítulo 7 Hidrogeografía del oriente de la Península de Yucatán: Nuevos elementos cartográficos a escala 1: 50000. En *De Chiapas a la Península de Yucatán: Intersticios hídricos* (1.^a ed., pp. 155-167). Universidad Autónoma de Chiapas.

- González, E., León, G., Moreno Talamantes, A., & Leal-Nares, O. (2010, noviembre 10). Inventario y clasificación de humedales en México. *Ducks Unlimited de México*.
https://www.researchgate.net/publication/279194967_INVENTARIO_Y_CLASIFICACION_DE_HUMEDALES_EN_MEXICO
- González, F., Silveira, J., & Aguirre-Macedo, M. (2008). Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, 418-430.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.07.025>
- Guzmán, M. C. (2021). *El agua en la Península de Yucatán, un recurso con alta vulnerabilidad*.
- Hammer, O., Harper, D., & Ryan, P. (2001). Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Paleontologia Electronica*, 4(1), 1-9.
- Health Canada. (2012). *Guidelines for Canadian Recreational Water Quality* (3.^a ed.). Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada.
- Hernández-Morales, S. G., & Poot-Delgado, C. A. (2018). *Coliformes Totales en Malecón Turístico*.
- Hernández-Vargas, O., Mancilla-Villa, Ó. R., Palomera-García, C., Olguín-López, J. L., Flores-Magdaleno, H., Can Chulim, Á., Ortega Escobar, H. M., Sánchez Bernal, E. I. (2020). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en dos cuencas tributarias del Río Tuxcacuesco, Jalisco, México.

- Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 689-701.
<https://doi.org/10.20937/rica.53595>
- Hoogesteijn, A., Flebes, J., & Nava, V. (2015). La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Ingeniería*, 19(4).
- Ibarrarán, M. E., Mendoza, A., Pastrana, C., Manzanilla, E. J. (2017). Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y sociedad*, 29(69), 89-125.
<https://doi.org/10.22198/rys.2017.69.a325>
- INEGI. (2002). *Estudio Hidrológico del Estado de Quintana Roo* (1.^a ed.).
- INEGI. (2016). *Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán*.
- Karki, D., & Thapa, Y. (2022). Assessing Physico-Chemical Parameters of Drinking Water in Majkhola, Tansen, Palpa. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 10(1), 60-70. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v10i1.44161>
- Karmakar, B., & Mahesh, S. (2020). Assessment of Water Quality Status of Water Bodies Using Water Quality Index and Correlation Analysis in and Around Industrial Areas of West District, Tripura, India. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(2). [https://neptjournal.com/upload-images/\(11\)B-3712.pdf](https://neptjournal.com/upload-images/(11)B-3712.pdf)
- Karmakar, B., & Singh, M. Kr. (2021). Assessment of Water Quality Status of Water Bodies Using Water Quality Index and Correlation Analysis in and Around Industrial Areas of West District, Tripura, India. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(2). <https://doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i02.011>

- Kleypas, J. (2019). Climate change and tropical marine ecosystems: A review with an emphasis on coral reefs. *UNED Research Journal*, 11(1), S24-S35. <https://doi.org/10.22458/urj.v11i1.2317>
- 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, Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 4(11), Article 11. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.411148>
- Ledesma, M., Rodríguez, C., Ledesma, C. R., Bonancea, M., Pinotti, L., Scavuzzo, C. M., Germán, A., & Ferral, A. (2020). Análisis de la distribución temporal de la concentración de Clorofila-a en el embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina. *Revista Científica FAV-UNRC Ab Intus*, 5(2), 83-87.
- León-Galván, Ma. F., Carbajal, N., Frickey, T., & Santos, L. (2009). Microbial identification of the Nichupte-Bojorquez coastal lagoon in Cancun, Mexico. *Aquatic Ecology*, 43(2), 197-205. <https://doi.org/10.1007/s10452-008-9171-1>
- Li, Y., Wang, M., Chen, X., Cui, S., Hofstra, N., Kroeze, C., Ma, L., Xu, W., Zhang, Q., Zhang, F., & Strokal, M. (2022). Multi-pollutant assessment of river pollution from livestock production worldwide. *Water Research*, 209.
- Lin, Y., Delgado-Blas, V., Cervantes-Martinez, A., & Gutiérrez-Aguirre, M. (2018). Batimetría y calidad de agua de la laguna Milagros, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, 25.
- Lizardi-Jiménez, M., & Hernández Martínez, R. (2016). *Contaminación por hidrocarburos en la Cuenca Laguna de Bacalar y biorreactores para su remediación*.

- López-Díaz, J. A., Gómez, B., González-Soriano, E., Gómez-Tolosa, M. (2021). Odonata (Insecta) como indicador de la calidad ambiental en humedales de montaña neotropicales. *Acta zoológica mexicana*, 37. <https://doi.org/10.21829/azm.2021.3712379>
- Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Olguín-Lopez, J. L., Guevara-Gutiérrez, R. D., Hernández-Vargas, O., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, Á., Sánchez-Bernal, E. I., Cruz-Crespo, E., Palomera-García. (2022). Contaminación orgánica por coliformes, Nitrógeno y Fósforo en los ecosistemas acuáticos de la cuenca Ayuquila-Armería, Jalisco, México. *Biotecnia*, 24(1), 5-14. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i1.1283>
- Marisa, M.-H., Adrián, F.-R., Jannice, A.-V., Misael Sebastián, G.-H., & Diego, D.-V. (2024). Water quality management in a tropical karstic system influenced by land use in Chiapas, Mexico. *Environmental Challenges*, 16, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100981>
- Martín-Canché, B. del R., Vanoye-Eligio, M., Chan-Palomo, M. G., Guillen-Taje, J. L., & Aguilar-Sánchez, J. de los A. (2021). Análisis De Las Variables Físico-Químicas Y Microbiológicas De Las Lagunas Del Municipio De Escárcega, Campeche, México. *European Scientific Journal, ESJ*, 17(25). <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n25p1>
- Martínez-Austria, P. F., Díaz-Delgado, C., & Moeller-Chavez, G. (2019). Seguridad hídrica en México: Diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del agua*, 23(2), 107. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>
- Matos, T., Martins, M. S., Henriques, R., & Goncalves, L. M. (2024). A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment

- concentration. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105624.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105624>
- Menchaca-Dávila, M. del S., & Alvarado-Michi, E. L. (2011). Efectos antropogénicos provocados por los usuarios del agua en la microcuenca del Río Pixquiac. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(SPE1), 85-96.
- Moreno-Casasola, P., Cejudo-Espinosa, E., Capistrán-Barradas, A., Infante-Mata, D., López-Rosas, H., Castillo-Campos, G., Pale-Pale, J., & Campos-Cascaredo, A. (2010). Composición florística, diversidad y ecología de humedales herbáceos emergentes en la planicie costera central de Veracruz, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, 29-50.
- Olivares-Casillas, G. (2022). *La ontogenia lacustre: Un vistazo a la evolución de los lagos*.
- Orejarena, J., Domínguez, J., Ricaurte-Villota, C., Mayo, G., Andrade, C., Ospina, H., & Castro, W. (2004). Variaciones de la concentración de la clorofila a y su relación con los parámetros físicos medidos en los bancos de Salmedina durante 2003 2004, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 2, 56-63.
<https://doi.org/10.26640/22159045.128>
- Ortega-Almazán, P., Cejudo-Espinosa, E., & Ortega-Camachi, D. (2024). Simplemente complejo: El Sistema Lagunar Nichupté en Cancún, Quintana Roo (México). *Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.*
https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2024/2024-06-20-ECejudo-Simplemente-complejo-el-Sistema-Lagunar-Nichupte-Cancun.pdf

- Ortegón-Aznar, I., & Ávila-Mosqueda, S. V. (2020). Arribazón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial? *Bioagrobiencias*, 13(2). <https://doi.org/10.56369/BAC.3535>
- Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., & Pérez-Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*.
- Patil, P., Swant, D., & Deshmukh, R. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water -A review. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(3), 1194-1207.
- Peirce, J. J., Weiner, R. F., & Vesilind, P. A. (1998). Chapter 4—Measurement of Water Quality. En J. J. Peirce, R. F. Weiner, & P. A. Vesilind (Eds.), *Environmental Pollution and Control (Fourth Edition)* (pp. 57-76). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075069899-3/50005-5>
- Pérez, J. I., Nardini, A. G., Galindo, A. A. (2018). Análisis Comparativo de Índices de Calidad del Agua Aplicados al Río Ranchería, La Guajira-Colombia. *Información tecnológica*, 29(3), 47-58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300047>
- Pérez-Castillo, A. G., & Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), 1905-1918.
- Pérez-López, C. (2004). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos Aplicaciones con SPSS* (1.^a ed.). Pearson educación.

https://apps.utel.edu.mx/recursos/files/r161r/w25172w/Tecnicas_de_analisis_multivariante.pdf

- Pérez-Sarabia, J. E., Duno de Stefano, R., Carnevali Fernández-Concha, G., Ramírez Morillo, I., Méndez-Jiménez, N., Zamora-Crescencio, P., Gutiérrez-Báez, C., Cetzal-Ix, W. (2017). El conocimiento florístico de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica*, 44, 39-49. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.44.3>
- Poonam, T., Bhattacharya, T., & Chakraborty, S. (2013). Water quality indices- important tools for water quality assessment: A review. *International Journal of Advances in Chemistry*, 1(1). https://www.researchgate.net/publication/262730848_Water_quality_indices_-_important_tools_for_water_quality_assessment_a_review
- Qureshimatva, U., & Maurya, R. (2015). Determination of Physico-Chemical Parameters and Water Quality Index (Wqi) of Chandlodia Lake, Ahmedabad, Gujarat, India. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 05(4). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000288>
- Ramos-Ortega, L. M., Vidal, L. A., Vilardy, S., & Saavedra-Díaz, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. *Acta Biologica Colombia*, 13(3).
- Rivera, C., Zapata, Á., Pinilla, G., Donato, J., Chaparro, B., & Jiménez, P. (2005). Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*, 10(2), 95-103.

- Rodriguez-Nuñez, E., Hernandez-Mendoza, C., Perez-Moreno, V., & Cardenas, A. (2022). Pollution Evaluation of the El Pueblito River in Queretaro, Mexico, Using the Water Quality Index. *Water*, 14(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/w14193040>
- Roldán-Reascos, G., Pérez-Lamela, C., Blas, E., & Simal-Gandara, J. (2024). Water quality indexes and water quality population perception in a rural area in Ecuador. *Water Practice & Technology*, 19. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.021>
- Rubio-Cisneros, N. T., Herrera-Silveira, J., Morales-Ojeda, S., Moreno-Báez, M., Montero, J., & Pech-Cárdenas, M. (2018). Water quality of inlets' water bodies in a growing touristic barrier reef Island "Isla Holbox" at the Yucatan Peninsula. *Regional Studies in Marine Science*, 22, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.06.006>
- Saint-Loup, R., Felix, T., Maqueda, A., Schiller, A., & Renard, P. (2018). A survey of groundwater quality in Tulum region, Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(18), 644. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7747-1>
- Samboni-Ruiz, N. E., Carvajal-Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181.
- Sánchez, O. (2007). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Instituto Nacional de Ecología.
- Sánchez, O., Bridgewater, P., Instituto Nacional de Ecología (Mexico), & U.S. Fish and Wildlife Service (Eds.). (2007). *Perspectivas sobre conservación de*

- ecosistemas acuáticos en México* (1a ed). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Scott, J., Buatois, L., & Mangano, M. (2012). Lacustrine Environments. En *Developments in Sedimentology* (1.^a ed., Vol. 64). ELSEVIER.
- SEMARNAT. (2012). *Los Humedales en México. Oportunidades para la sociedad* (1.^a ed.). SEMARNAT.
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Humedales.pdf>
- SEMARNAT. (2013). *Política Nacional de Humedales*. SEMARNAT.
- Shahzad, H., Farid, H. U., Khan, Z. M., Anjum, M. N., Ahmad, I., Chen, X., Sakindar, P., Mubeen, M., Ahmad, M., & Gulakhmadov, A. (2020). An Integrated Use of GIS, Geostatistical and Map Overlay Techniques for Spatio-Temporal Variability Analysis of Groundwater Quality and Level in the Punjab Province of Pakistan, South Asia. *Water*, 12(12), Article 12.
<https://doi.org/10.3390/w12123555>
- Silva, J., Ramírez, L., Alfieri, A., Rivas, G., & Sánchez, M. (2004). Determinación de microorganismos indicadores de calidad sanitaria. Coliformes totales, coliformes fecales y aerobios mesófilos en agua potable envasada y distribuida en San Diego, estado Carabobo, Venezuela. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 24(1-2), 46-49.
- Silveira, J., Medina-Gómez, I., Aranda-Cirerol, N., Zaldivar-Jiménez, A., Ramirez-Ramirez, J., & Trejo, J. (2002). Trophic Status In Coastal Waters Of The Yucatan Peninsula (SE, Mexico) Using Water Quality Indicators. En

Environmental Studies (Vol. 8, pp. 351-359).

<https://doi.org/10.2495/CENV020331>

Singh, P., & Khan, I. (2011). Ground water quality assessment of Dhankawadi ward of Pune by using GIS. *Journal of Geomatics and geoscience*, 2(2), 688.

SSA. (2021). *NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.*

Uddin, Md. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>

Water Research Center. (2024, mayo 20). *Simple Updated Water Quality Index Calculator for Surface Water Citizen Science*. KnowYourH2O. <https://www.knowyourh2o.com/outdoor-3/water-quality-index-calculator-for-surface-water>

WHO. (2017). *Water quality and health: Review of turbidity*. <https://fctc.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-17.01>

Yang, C. S., Kao, S.-P., Lee, F. B., & Hung, P.-S. (2004). Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, 778-785.

Anexo 1. Criterios para la asignación de semáforo en sistemas acuáticos según los criterios de CONAGUA.

Parámetro	Unidad	Código de colores				
		Cumple			Incumple	
		Excelente	Buena calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
Demanda Bioquímica	mg/l	DBO≤3	3<DBO≤6	6<DBO≤30	30<DBO≤120	DBO>120

de Oxígeno de 5 días						
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO<=10	10<DQO<=20	20<DQO<=40	40<DQO<=200	DQO>200
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	SST<=25	25<SST<=75	75<SST<=150	150<SST<=400	SST>400
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	CF<=100	100<CF<=200	200<CF<=1,000	1000<CF<=10,000	CF>10,000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	EC<=126	126<EC<=576	576<EC<=850	850<EC<=1,000	EC>1,000
Saturación de Oxígeno superficial	%	70<OD<=110	50<OD<=70 Y 110<OD<=120	30<OD<=50 Y 120<OD<=130	10<OD<=30 Y 130<OD<=150	OD<=10 Y OD>15
Saturación de Oxígeno media	%	70<OD<=110	50<OD<=70 Y 110<OD<=120	30<OD<=50 Y 120<OD<=130	10<OD<=30 Y 130<OD<=150	OD<=10 Y OD>15
Saturación de Oxígeno fondo	%	70<OD<=110	50<OD<=70 Y 110<OD<=120	30<OD<=50 Y 120<OD<=130	10<OD<=30 Y 130<OD<=150	OD<=10 Y OD>15
Parámetro	Unidad	Cumple			Incumple	
		No tóxico	Toxicidad baja	Toxicidad moderada	Toxicidad alta	
Toxicidad <i>Daphnia magna</i> , 48 h superficial	TA	TA < 1	1<=TA<=1.33	1.33<TA< 5	TA >= 5	
Toxicidad <i>Daphnia magna</i> , 48 h fondo	TA	TA < 1	1<=TA<=1.33	1.33<TA< 5	TA >= 5	
Toxicidad <i>Vibrio</i>	TA	TA < 1	1<=TA<=1.33	1.33<TA< 5	TA >= 5	

<i>Fischeri</i> , 15 minutos superficial					
Toxicidad <i>Vibrio Fischeri</i> , 15 minutos fondo	TA	TA < 1	1<=TA<=1.33	1.33<TA< 5	TA >= 5