



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

“Análisis de la calidad de agua en la zona costera y marina
del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo,
México”

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales

PRESENTA
Br. Angela Márquez Reyes



DIRECTOR DE TESIS
Dr. Adrián Cervantes Martínez

ASESORES
Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre
Mtro. Gabriel Sánchez Rivera



COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

TESIS ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE
TESIS DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES APROBADA COMO REQUISITO
PARA OBTENER EL GRADO DE:

Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales



COMITÉ DE TESIS



DIRECTOR: **Dr. Adrián Cervantes Martínez**

ASESOR: **Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre**

ASESOR: **Mtro. Gabriel Sánchez Rivera**

ASESOR SUPLENTE: **Dr. Gerardo Hernández Flores**

ASESOR SUPLENTE: **Mtra. Blanca Alicia Quiroga García**

Dedicatoria

*Para Bruny, Ray y Bruno,
por inspirarme a seguir mis sueños, pero, sobre todo, por apoyarme y
acompañarme incondicionalmente en este camino.*

Los amo infinitamente.

Gracias familia.

Agradecimientos

A mi mamá y papá, por transmitirme su amor por el conocimiento y aprendizaje, así como también enseñarme que la dedicación y perseverancia son la clave del éxito. Los admiro y agradezco infinitamente todo su apoyo.

A la Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo, por abrirme las puertas del conocimiento y acogerme cálidamente a lo largo de estos años, además de prestarme sus instalaciones para poder llevar a cabo este trabajo de investigación.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Isla Cozumel, que brindo invaluable recursos materiales y humanos para que este proyecto pudiera llevarse a cabo. Agradezco especialmente a los capitanes de las embarcaciones que apoyaron en los monitoreos y a la actual directora de esta dependencia, la Mtra. Blanca A. Quiroga García, porque sin su apoyo y gestión este trabajo de investigación no hubiera sido posible. Gracias Mtra., por confiar en mí, recibirme tan cálidamente y transmitirme sus conocimientos.

A la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Cozumel por brindarme los insumos necesarios para la realización de los análisis bacteriológicos. En especial, agradezco la asesoría y supervisión de la Ing. Soledad, así como el apoyo del Ing. Valentín y el Ing. Mendoza, personal de dicha dependencia.

A mi director de tesis, el Dr. Adrián Cervantes Martínez, por creer en mí, guiarme y apoyarme en cada paso de mi formación profesional. Gracias por todo el conocimiento que me ha transmitido y cada oportunidad que me ha brindado para seguir formándome en el ámbito de la investigación. Siempre estaré agradecida con usted.

A la Dra. Martha A. Gutiérrez Aguirre por sus asesorías y valiosas observaciones que contribuyeron a mejorar este trabajo de investigación. De igual forma, gracias por todos los conocimientos transmitidos en clase.

Al Dr. Gabriel Sánchez Rivera por formar parte de mi comité y contribuir en la mejoría de este trabajo de investigación.

Al Dr. Gerardo Hernández Flores, por guiarme y apoyarme en los análisis de laboratorio, así como por sus asesorías, las cuales contribuyeron sustanciosamente a mejorar este trabajo de investigación. Gracias por el apoyo motivacional durante el trayecto.

A mi amiga y colega, la M. en C. Sarahi Jaime, por transmitirme sus conocimientos y ser un ejemplo para mí de la dedicación y esfuerzo. Gracias por todo tu apoyo y asesorías durante la realización de este proyecto.

A mis compañeros manejadores de recursos naturales de la generación 2017-2022, por su amistad y compañerismo.

A mis compañeros manejadores de recursos naturales que me apoyaron en el trabajo de campo y de laboratorio: José Pablo Romero, Dafne Payan, Sandy Javier, Pedro, Alondra y Félix.

A Francisco Chávez Villa, por todo su amor, apoyo incondicional y compañía a lo largo de este camino. Gracias por hacer más ameno el proceso regalándome grandiosos momentos de felicidad.

A Virginia Reyes, por recibirme cálidamente en este estado hace 5 años y acompañarme amorosamente en el trayecto.

A Bruno Márquez, por creer en mí incondicionalmente y recordarme constantemente la importancia de la disciplina.

A Angelina Amaro Galindo, por cuidar de mí a distancia y apoyarme económicamente. Muchas veces, tu cariño fue una motivación para seguir adelante.

índice de contenido

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	5
JUSTIFICACIÓN	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	10
HIPOTESIS	11
ÁREA DE ESTUDIO	12
CLIMA	13
HIDROLOGÍA	14
GEOLOGÍA	15
EDAFOLOGÍA.....	15
VEGETACIÓN	16
FAUNA	17
AMBIENTE MARINO.....	18
OCEANOGRAFÍA Y CORRIENTES.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS	21
TRABAJO DE CAMPO	22
TRABAJO DE LABORATORIO	23
METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
RESULTADOS	26
SALINIDAD	26
OXÍGENO DISUELTO	28
TEMPERATURA.....	30
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (PH).....	31
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	32
SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (TDS)	33
NITRITOS (NO ₂ ⁻)	34
NITRATOS (NO ₃ ⁻)	35
COLIFORMES TOTALES Y FECALES	36
ANÁLISIS CLUSTER.....	37
<i>Época de lluvias</i>	37
<i>Época de nortes</i>	38
<i>Época de secas</i>	39
DISCUSIÓN	40
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES FINALES.....	48
LITERATURA CITADA	50
ANEXOS	60
ANEXO 1. COORDENADAS DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	60
ANEXO 2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA POR SITIO DE ESTUDIO.....	61
ANEXO 3. LÍMITES ESTABLECIDOS POR LA NOM-001-SEMARNAT-1996 Y LOS CE-CCA-001/89.....	62
ANEXO 4. RELACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE Y LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL PNAC.....	63
ANEXO 5. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL REGISTRADA EN COZUMEL DE 1989 A 2019. RECUPERADO DE: HERNÁNDEZ-FLORES, <i>ET AL.</i> , 2021.	63
ANEXO 6. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL OJO DE AGUA DEL SISTEMA CHANKANAAB DURANTE EL MONITOREO DE 2019..	64
ANEXO 7. PROPUESTA DE SITIOS DE MONITOREO PARA LA EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL PNAC.....	65

Índice de figuras

Figura 1. Localización del PNAC y ubicación geográfica de los sitios de estudio.....	13
Figura 2. Curva de calibración para nitritos (NO_2^-).....	23
Figura 3. Curva de calibración para nitratos (NO_3^-).....	24
Figura 4. Salinidad por época climática.	26
Figura 5. Salinidad promedio por sitio de estudio.	27
Figura 6. Oxígeno disuelto por época climática.	28
Figura 7. Oxígeno disuelto promedio por sitio de estudio.....	28
Figura 8. Temperatura por época climática.....	30
Figura 9. Temperatura promedio por sitio de estudio.....	30
Figura 10. pH por época climática.	31
Figura 11. pH promedio por sitio de estudio.	31
Figura 12. Conductividad eléctrica por época climática.	32
Figura 13. Conductividad promedio por sitio de estudio.....	32
Figura 14. Sólidos Totales Disueltos (TDS) por época climática.....	33
Figura 15. TDS promedio por sitio de estudio.....	33
Figura 16. Concentración de nitritos (NO_2^-) por época climática.....	34
Figura 17. Promedio de la concentración de nitritos (NO_2^-) por sitio de estudio.....	34
Figura 18. Concentración de nitratos (NO_3^-) por época climática.....	35
Figura 19. Promedio de la concentración de nitratos (NO_3^-) por sitio de estudio.....	35
Figura 20. Promedio de la concentración de Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF) por sitio de estudio.....	36
Figura 21. Dendrograma de la época de lluvias.....	37
Figura 22. Dendrograma de la época de nortes.....	38
Figura 23. Dendrograma de la época de secas.	39

RESUMEN

En el Caribe Mexicano, la calidad del agua descargada de surgencias (ojos de agua costeros) o drenajes irregulares de la zona costera hacia la zona arrecifal, así como a la intensa actividad turística que se realiza en estos ecosistemas, ha provocado la degradación de la calidad del agua marina; factor al que se le ha atribuido parte de la problemática relacionada con enfermedad coralinas, como, por ejemplo, el Síndrome Blanco. Este trabajo tiene como objetivo, analizar variables físico-químicas indicadoras de calidad de agua en la zona costera y marina del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC), ubicado en isla Cozumel, Quintana Roo, México. Se evaluó el comportamiento de dichas variables durante meses representativos de las épocas climáticas características en la región (nortes, lluvias y secas) y su posible influencia en la zona costera y arrecifal. Se midió *in situ* la temperatura del agua, salinidad, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos con una sonda multiparamétrica en 26 puntos de muestreo de la zona de estudio, considerando dos estratos de la columna de agua (superficie y fondo). Se recolectaron muestras de agua en los puntos y estratos mencionados para medir en laboratorio la concentración de nutrimentos como nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) así como coliformes fecales y totales. Los resultados mostraron que la mayoría de las variables físicoquímicas no sobrepasan los límites máximos permisibles para la protección de la vida acuática, establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, presentando pH's básicos (7-8.8), aguas bien oxigenadas (≥ 5 mg/L), transparencias totales y concentraciones bajas de nutrimentos, así como de bacterias coliformes. Los datos sirvieron para identificar y proponer sitios de monitoreo que permitan realizar evaluaciones rápidas del estado de salud de los ecosistemas costeros y marinos en el área de estudio y zonas de influencia.

Palabras clave: calidad de agua, antropogénico, ANP, zona costera, zona marina

INTRODUCCIÓN

El Caribe Mexicano abarca aproximadamente 400 km de las costas del estado de Quintana Roo, empezando al norte en Cabo Cantoche y finalizando en Banco Chinchorro, al sur del estado (Rioja-Nieto, *et al.*, 2019). Esta región incluye cuencas hidrográficas, costas, estuarios, lagunas costeras y bahías, donde se llevan a cabo importantes actividades económicas, además de proveer una gran cantidad de recursos naturales y servicios ecosistémicos (Herrera-Silveira *et al.*, 2004). En las últimas cuatro décadas, la región ha experimentado un acelerado desarrollo costero, resultado de la intensa actividad turística y crecimiento exponencial de la población reflejado en el arribo de aproximadamente 10 millones de turistas anuales y una tasa promedio de crecimiento de la población de 4% por año (INEGI, 2020); por lo que es evidente que existe una gran presión sobre los ecosistemas de la región, debido a la alta demanda de recursos naturales y la generación de residuos. Con el paso del tiempo, esto ha desencadenado problemáticas ambientales en la zona costera como la pérdida de humedales, cambios en la circulación del agua, aumento de la carga de nutrientes y liberación de sustancias químicas tóxicas y patógenos (Herrera-Silveira, *et al.*, 2004), los cuales afectan gravemente la calidad del agua subterránea y marina considerando que la conformación geológica de la región es en su mayoría sustrato calizo, caracterizado por ser altamente poroso y permeable (Cervantes-Martínez, 2007), lo que promueve el flujo de contaminantes hacia acuíferos subterráneos que probablemente tienen su zona de descarga en el área costera a través de manantiales y ojos de agua (Sánchez y Pinto, *et al.*, 2015). El agua subterránea que presenta influencia antrópica ha ganado reconocimiento como una fuente importante de nutrientes y bacterias que provocan la eutrofización de ambientes costeros poco profundos, así como de gran importancia ecológica como los arrecifes coralinos (Gobler y Boneillo, 2003), los cuales requieren condiciones de luz y temperatura que solo se pueden desarrollar en aguas claras, con pocos nutrientes y de temperaturas estables (Pérez-Cervantes, *et al.*, 2018).

La eutrofización de ambientes costeros por aportes de nutrientes ha sido frecuentemente relacionada con la disminución de la cobertura de coral vivo y la proliferación de macroalgas que desplazan a las colonias de coral en el Caribe Mexicano. Así mismo, en los últimos años, se ha demostrado que la degradación de la calidad del agua marina está relacionada con la complicación de enfermedades coralinas que han resultado en eventos de mortandad masiva (Álvarez-Filip, *et al.*, 2019). Tal es el caso de

la enfermedad conocida como Síndrome Blanco (SB), la cual fue registrada por primera vez en las costas de Quintana Roo en el año 2018 ocasionando la muerte de aproximadamente el 30% de corales formadores de arrecife pertenecientes a los géneros *Pseudodiploria*, *Colpophyllia*, *Meandrina*, *Orbicella*, y *Siderastrea* (CONANP, 2019).

Según el reporte del arrecife mesoamericano realizado en 2020 por la organización Healthy Reefs con datos del 2018, los arrecifes que mantuvieron parte importante de su estructura, aun después de la propagación del Síndrome Blanco, se encontraron principalmente dentro del Área Natural Protegida (ANP) Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC). Esta ANP alberga una importante cantidad de arrecifes que se caracterizan por tener buenas estructuras y alto porcentaje de biomasa de peces (Estrada-Saldívar, *et al.*, 2021). Sin embargo, la amenaza de la pérdida de coral vivo es aún una problemática latente en el ANP, principalmente por la presión que continúa ejerciéndose sobre estos ecosistemas por parte de la industria turística, que también es la base de la economía local en Isla Cozumel. Los arrecifes del PNAC constituyen algunos de los sitios de buceo más populares a nivel internacional, que deja una derrama económica estimada de \$ 304 millones de dólares anuales (CONANP-GIZ, 2017).

A pesar de la gran derrama económica que se obtiene de las actividades turísticas que se realizan de manera directa en la zona marino-costera (como los tours de buceo y snorkel), estas implican un factor de perturbación para los ecosistemas marinos, debido a que la práctica de estas actividades usualmente genera el levantamiento de sedimentos que afectan negativamente a los corales (CONANP-GIZ, 2017); mientras que el vertimiento de aguas residuales y fugas de combustible provenientes de embarcaciones prestadoras de servicios turísticos perturban las propiedades físicas y químicas del agua marina.

Lo anterior permite suponer que la calidad del agua de esta ANP es perturbada por diversos impactos antropogénicos y naturales de diferentes magnitudes como consecuencia de los intercambios de energía en la interacción terrestre y marina que tiene lugar en la zona costera, y que implica la mezcla de aguas dulces y marinas, así como perturbaciones humanas (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009; Cortés y Silva, 2011).

Ante este tipo de problemáticas, las evaluaciones de calidad de agua en zonas sumamente dinámicas como la marino-costera deben utilizarse como punto de referencia para la gestión de la zona costera, pues este tipo de estudios son parte fundamental para el establecimiento de programas de monitoreo y el desarrollo de estrategias de conservación y manejo (Herrera-Silveira, *et al.*, 2004).

Por ello, el presente trabajo de investigación pretende analizar el comportamiento de variables físicas, químicas y bacteriológicas indicadoras de la calidad del agua durante diferentes épocas climáticas en arrecifes con incidencia turística; lo que permitirá conocer el comportamiento heterogéneo espacial y temporal de la calidad del agua dentro de un Área Natural Protegida de gran importancia económica y biológica, como el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC). El resultado final de este trabajo de investigación consistió en establecer sitios de monitoreo estratégicos y realizar recomendaciones metodológicas para la evaluación rápida de la calidad de agua marina en el PNAC.

ANTECEDENTES

Los sustratos geológicos de la Isla de Cozumel, así como los de la Península de Yucatán, están formados básicamente por diferentes rocas calizas que confieren una gran porosidad y permeabilidad al subsuelo lo que favorece la formación de cuevas subterráneas, cenotes y dolinas (CONANP, 2007), la mayoría de estos se encuentran totalmente inundados de agua y, en algunos de los casos, conectados subterráneamente con las aguas marinas costeras por medio de conductos de disolución naturales, conocidos localmente como ojos de agua cuando la descarga sucede por debajo del nivel del agua en esteros o el mar (Sánchez y Pinto, *et al.*, 2015). Carrillo (2008) y Sánchez y Pinto, *op cit.* mencionan que se desconoce la calidad del agua que estos sistemas pudiesen estar descargando al mar, ya que a través del sistema kárstico el agua se infiltra y puede acarrear nutrientes, así como bacterias al existir aportes de agua sin tratamiento o parcialmente tratada, así como de fosas sépticas mal construidas.

Carrillo (2008) demostró la presencia de aportes de agua dulce a la zona costera en la Riviera Maya, mediante la evaluación de parámetros fisicoquímicos, encontrando que estas descargas presentan bajas concentraciones de oxígeno disuelto, menor temperatura y pH, comparados con los valores de las aguas marinas, así como también, se registraron zonas de afloramiento en las que las principales formas de Nitrógeno inorgánico fueron los nitratos y nitritos.

Otros autores como Álvarez-Gongora, *et al.*, (2012) y Herrera-Silveira y Morales-Ojeda (2009) han reportado el mismo comportamiento en zonas costeras de la Península de Yucatán, en donde la variabilidad hidrológica y química se asocian al patrón climático de la región y se comprueba que los impactos antropogénicos tienen una fuerte influencia.

El estudio realizado por Calva-Benítez (2018) dentro del PNAC, demostró la relación que guardan los nutrientes con la proliferación de algas indicadoras de contaminación en agua marina, encontrando un promedio de concentración de nitratos de 0.8 μM en época de nortes, lo que sobrepasa los límites establecidos para esta variable. Mientras que Torres-Alvarado y Calva-Benítez (2012), en su trabajo realizado para arrecifes de la zona sur de Quintana Roo, encuentra una variación heterogénea en la concentración

de nutrientes, encontrando mayor concentración de nitritos (0.41 μM) y nitratos (0.82 μM) en época de lluvias. No obstante, variables como la temperatura, pH y oxígeno disuelto se comportaron de forma más homogénea y acorde a lo registrado para ambientes marinos.

Respecto a análisis bacteriológicos en zonas marinas y costeras del caribe mexicano, autores como Barrera-Escorcia y Namihira-Santillán en 2004, reportan valores máximos de hasta 460 NMP/100ml en la laguna Yalkú en las costas de Akumal, Quintana Roo, en donde los valores máximos se vieron asociados a la época en la que incrementa la actividad turística en la zona (verano y el mes de diciembre). Así mismo, Hernández-Terrones (2010), reporta coliformes fecales en concentraciones de hasta 679.9 UFC/100 ml en una descarga submarina de las costas de Puerto Morelos, rebasando el límite máximo permisible establecido en las normas oficiales mexicanas.

De acuerdo con la bibliografía revisada, las concentraciones de nutrientes y bacterias encontradas en algunas zonas costeras del caribe mexicano sobrepasan el límite máximo permisible para la protección de la vida acuática, por lo que dichos trabajos de investigación sugieren repensar el método actual para atender la problemática de la calidad del agua en los ecosistemas de arrecifes coralinos.

Una buena forma de empezar es seleccionando aquellos lugares dentro del área de interés que son estratégicos para el monitoreo de variables ambientales, análisis que aún no ha sido realizado en el PNAC, pues hasta el momento, solo se han identificado áreas prioritarias para conservación, esto en función de un análisis del paisaje marino, de la variación espacio-temporal de cobertura de sustrato y de la frecuencia de uso de los arrecifes para el buceo (Ortiz-Cajica, *et al.*, 2020). Es por ello que la implementación de estudios que contemplen el establecimiento de sitios estratégicos para evaluación rápida de la calidad de agua en zonas arrecifales y costeras es de suma importancia para vigilar las fluctuaciones en las concentraciones de nutrientes y organismos patógenos. Actualmente, las evaluaciones rápidas solo han sido desarrolladas para cobertura coralina (Bastida-Zavala, *et al.*, 2000) pero no en función de la calidad del agua.

JUSTIFICACIÓN

En conjunto, los ecosistemas marino-costeros suelen ser ambientes complejos y dinámicos, receptores de material, agua dulce, sólidos disueltos, partículas y recursos vivos provenientes de los continentes a través de desembocaduras de ríos o afloramientos de agua subterránea, lo que implica una alta variabilidad en el tipo de sedimentos, hábitat biológico y procesos de transporte y deposición; que al mismo tiempo se encuentran frecuentemente impactados por muchas actividades antropogénicas dentro de las cuales se encuentran los asentamientos humanos, industrias y descargas de aguas residuales (Cortés y Silva, 2011).

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua, que pueden ser de origen natural o antropogénico, define su composición física y química. Algunos procesos fisicoquímicos que ocurren en el agua pueden ser evaluados si se recurre a los principios de equilibrio químico, teniendo en cuenta la correlación de iones y los factores que gobiernan el comportamiento de los componentes del agua, etc. (Barrenechea-Martel, 2004). No obstante, problemáticas como la degradación de la calidad de agua marina por descargas provenientes de la costa, debe contemplar estudios que permitan conocer la concentración de nutrientes, ya que estos compuestos inorgánicos como el nitrógeno y fósforo son utilizados principalmente por los productores primarios para la elaboración de biomasa durante la fotosíntesis, lo que influye en el proceso de eutrofización de los sistemas acuáticos (Camargo y Alonso, 2007; Sánchez, *et al.*, 2011). Directamente, dichos nutrientes aumentan la prevalencia y la gravedad de las enfermedades coralinas (Álvarez-Filip, *et al.*, 2019; Estrada-Saldívar, *et al.*, 2021) e indirectamente, los nutrientes promueven el crecimiento de macroalgas, que compiten con los corales, reduciendo su fecundidad, crecimiento y supervivencia a través de varios mecanismos (Calva-Benítez, 2018); por lo que determinar la concentración de algunas formas nitrogenadas como los nitritos y los nitratos, permite evaluar las condiciones ambientales bajo las que se encuentran las comunidades coralinas del PNAC, lo que a su vez, contribuye en la toma de decisiones respecto a estrategias de conservación.

Aunado a la problemática que implica los diversos tipos de aportes de nutrientes a la zona costera y marina, las actividades turísticas como el buceo deportivo y tours de snorkel también han sido consideradas como un factor de estrés ambiental para las comunidades arrecifales en el área de estudio de este trabajo de investigación, puesto que las malas prácticas turísticas como el uso de bloqueadores solares, el levantamiento de sedimento con las aletas, contacto directo con las especies y depósito de aguas residuales proveniente de las embarcaciones perturban las condiciones físicas y químicas naturales del agua. Ante esta problemática, la determinación de organismos coliformes fecales y totales es útil para evaluar el impacto de las actividades turísticas en los sitios de mayor visitación puesto que los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en el tracto digestivo de animales y humanos, y su presencia podría indicar contaminación por aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición (Ramos-Ortega, *et al.*, 2008; Larrea-Murrell, *et al.*, 2013)

En este sentido, la presente investigación aportará información útil sobre la dinámica de la calidad de agua en un Área Natural Protegida de gran importancia económica y biológica, lo cual, permitirá establecer sitios de monitoreo estratégicos, así como consolidar importantes recomendaciones metodológicas para la evaluación rápida de la calidad del agua en la zona costera y arrecifal del PNAC, lo que contribuye en la mejoría de las técnicas de manejo de esta ANP

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cuál es el comportamiento espacio-temporal de algunas variables indicadoras de calidad del agua en la zona marino-costera del PNAC durante diferentes épocas climáticas, considerando los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y en Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89?

OBJETIVO GENERAL

Evaluar espacial y temporalmente la calidad del agua en la zona costera y marina del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) con base en variables físicas, químicas y bacteriológicas considerando los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y en Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Analizar espacial y temporalmente el comportamiento de algunas variables físicas, químicas y bacteriológicas indicadoras de la calidad del agua: temperatura (C°), salinidad (ppm), pH, oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica ($\mu\text{Sm/cm}$), sólidos totales disueltos (mg/L), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-), coliformes fecales y totales (UFC/100 ml) durante meses representativos de las épocas climáticas características de las regiones tropicales (secas, lluvias y nortes, 2019-2021) empleando estadística descriptiva.

Determinar nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) empleando el método de reducción con cadmio cuperizado descrito en la NMX-AA-079-SCFI-200.

Establecer sitios de monitoreo estratégicos y realizar recomendaciones metodológicas para la evaluación rápida de la calidad de agua marina en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel con base en los resultados obtenidos de las variables determinadas y análisis estadísticos de conglomerados.

HIPOTESIS

Algunas variables físico químicas indicadoras de la calidad del agua del PNAC son influenciadas por la actividad antropogénica que tiene lugar en la zona costera, por lo que es probable que algunas variables excedan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001- SEMARNAT-1996 y en Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.

ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Arrecifes de Cozumel se encuentra frente a la costa occidental del municipio de Cozumel, en el estado de Quintana Roo, aproximadamente a 16.5 km al Este de la península de Yucatán, en la zona del Caribe noroccidental, entre las coordenadas geográficas 20° 29' 02.93" y 20° 14' 27.02" N y 86° 53' 11.54" y 87° 03' 32.07" O (INE, 1998)

Cuenta con una superficie de 11,987 hectáreas y su superficie marino terrestre es de aproximadamente 120 km, tiene una forma de herradura alrededor de la parte media baja de la isla de Cozumel e inicia en el arrecife Paraíso en la parte occidental, terminando en Punta Chiqueros, ubicada en el km. 39 de la carretera costera de la porción oriental de la isla (INE, 1998).

Por lo cual, para efectos de este trabajo fue seleccionada como área de estudio la parte suroeste del Parque Nacional, la cual se encuentra comprendida entre las coordenadas 20°17'59.64" y 20°28'18.01"N y 86° 58' 53.472" y 87° 1'7.72"O, desde el Arrecife Paraíso hasta la Punta Sur de la isla. En esta área se encuentran los sistemas de arrecifes más complejos y mejor conservados del Caribe, ya que presentan una alta cobertura de coral y una alta diversidad biológica en comparación con otros arrecifes de la región, por lo que también son los más visitados por turistas nacionales e internacionales anualmente (INE, 1998; Palafox y Zizumbo, 2009; Cajica, *et al.*, 2020; Estrada-Saldivar, *et al.*, 2021).

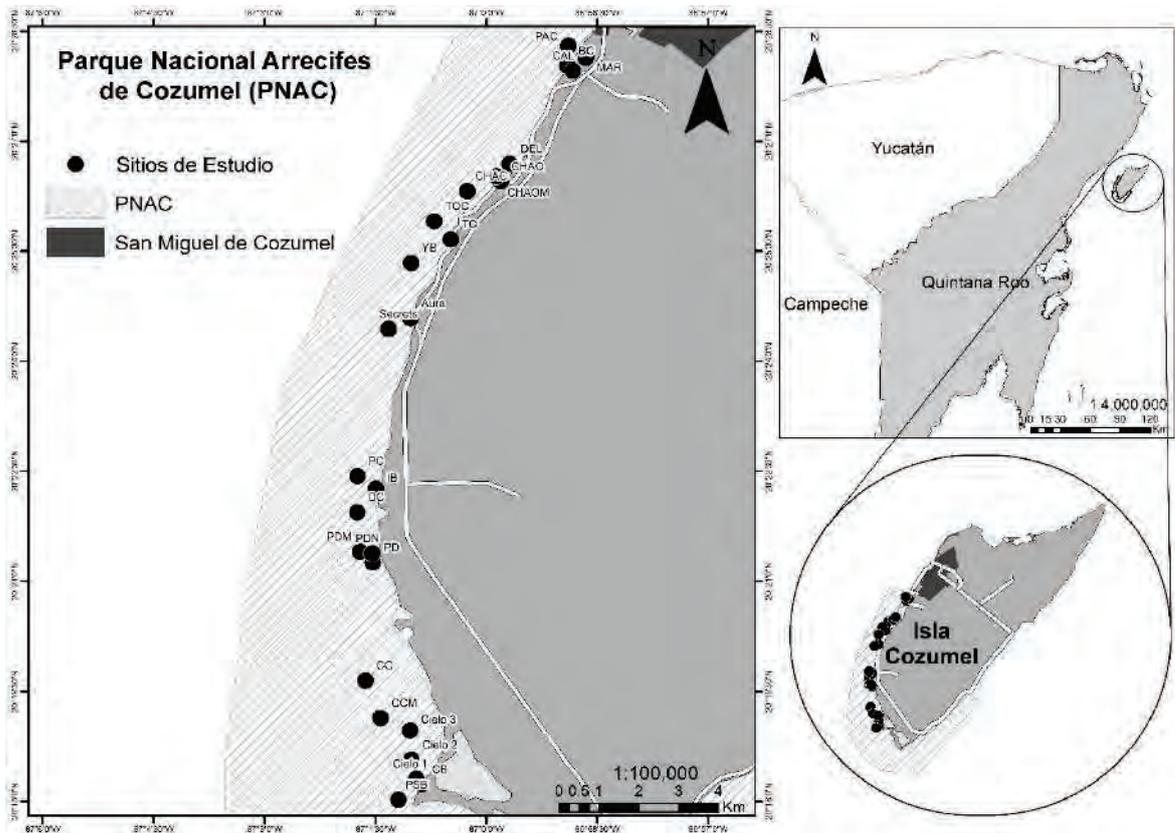


Figura 1. Localización del PNAC y ubicación geográfica de los sitios de estudio.

Nota: Consultar coordenadas y nombre de los sitios de estudio en Anexo 1.

Clima

Según la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), el clima que predomina en Cozumel es Am (f) cálido húmedo con lluvias en verano, con una precipitación pluvial media anual de 1500 mm (Cervantes-Martínez, 2007) y una temperatura media anual de 25.5 °C (García, 1981 citado por Collantes-Chávez-Costa, *et al.*, 2019).

Las lluvias en verano se deben principalmente a la ubicación geográfica de la isla y a la influencia de los vientos alisios que interactúan con Ondas Tropicales; para mediados del verano los vientos alisios son debilitados o desviados de sus trayectorias más frecuentes debido a una serie de fenómenos atmosféricos que provocan una merma en la lluvia de verano y a la que se denomina sequía intraestival o canícula, que podría atribuírsele al enfriamiento de las aguas oceánicas. A finales del verano y principios de

otoño la zona se ve altamente influenciada por los frentes fríos, algunos de los que se modifican y saturan de humedad (nortes), dejando una cantidad importante de lluvia invernal (Orellana, *et al.*, 2008).

Otro evento climático que es importante considerar durante el verano es la formación de depresiones tropicales que derivan en tormentas de diferentes intensidades, a las que se les denomina regionalmente como huracanes (Orellana, *et al.*, 2008).

Hidrología

La principal fuente de agua dulce en la isla se limita a la formación de acuíferos constituidos por una masa de agua dulce de considerable espesor que reposa sobre agua marina por cuestión de diferencias de densidad. Estos acuíferos se recargan constantemente mediante las precipitaciones gracias a la permeabilidad del subsuelo. No obstante, se pueden encontrar diferencias en cuanto a la capacidad de almacenaje, cantidad de agua drenada, recarga y descarga de los tributarios, composición química del agua, etc., producidas por las variaciones en la precipitación, clima y orografía de cada lugar (Cervantes-Martínez, 2007).

La isla es una región formada por sedimentos marinos calcáreos del Terciario los cuales se encuentran estratificados y levemente plegados. La conformación química de estos sedimentos promueve la formación de una gran cantidad de sistemas superficiales denominados “cenotes” y subterráneos como las cavernas por lo que no existen ríos superficiales y toda el agua se encuentra en ríos subterráneos que eventualmente desembocan en el mar o en las lagunas (Koch, *et al.*, 2016). La mayor parte de estos cenotes y ríos subterráneos se encuentran en la parte centro-sur de la isla. (CONANP, 2007).

En los paisajes cársticos del PNAC es típico encontrar afloramientos de agua, producto de la disolución de la roca calcárea, dichos afloramientos pueden ser útiles para detectar flujos de agua subterráneos, aunque también se ha reportado que dependiendo de la hora hay instantes en que existen importantes flujos de agua del mar hacia adentro de estos sistemas y en otros momentos los flujos subterráneos se vierten al mar. Por lo tanto, los efectos de las mareas tienen importancia significativa en la hidrodinámica de los sistemas subterráneos conectados al mar (Sánchez y Pinto, *et al.*, 2015).

Así mismo, en el área de estudio se encuentran lagunas con aportes subterráneos de agua dulce y salobre, mezcladas con agua marina. La Laguna de Chankana'ab, que se encuentra en el parque municipal del mismo nombre, representa un aporte de aguas salobres subterráneas de la zona central de la isla. Mientras que en la Punta Sur se encuentran otras cuatro lagunas costeras, conocidas como Colombia, El Chiquero, Chunchaka'ab e Istacún, todas ellas relativamente someras ya que tienen menos de 1.5 metros de profundidad (INE, 1998).

Geología

Así como el resto de la Península de Yucatán, Isla Cozumel está constituida por sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario y se ubica en la Formación Carrillo Puerto, desarrollada entre el Eoceno y el Mio-Pleoceno (CONANP, 2007).

La isla es un pilar tectónico con presencia de episodios de ascenso y descenso del nivel del mar coincidente con los periodos glaciares de hace 121 000 a 60 000 años atrás, con un incremento en las dimensiones insulares durante los episodios donde el nivel del mar registró su máximo retroceso hace 15 000-20 000 años, generando grandes depósitos carbonatados alrededor de la isla. Su formación es principalmente plana en su porción oeste y abrupta en sus costas norte y este. (Kambesis y Coke, 2013)

La característica geomorfológica más notoria de la isla es la presencia de una corta plataforma insular en el margen occidental, que termina entre 20 y 30 m de profundidad, dando lugar al talud insular que se precipita a una pendiente cercana a la vertical, hasta profundidades mayores de 400 m. Sobre el borde de esta terraza submarina, en la porción sur y a sotavento de la isla se encuentra una serie de formaciones arrecifales que, siguiendo el contorno del borde, forman una especie de valla arrecifal sobre un talud insular, y constituye los arrecifes profundos de Cozumel, ubicados sobre el borde de la plataforma insular en la porción suroeste de la isla (INE, 1998; Reyes-Bonilla, *et al.*, 2010).

Edafología

Lesser *et al.* (1978) indicaron que la litología de Cozumel se estructura en una unidad antigua conocida como Formación Cozumel y en tres unidades más recientes, denominadas: Formación Mirador, Formación Abrigo y Formación Chankanaab.

El suelo predominante en la isla son principalmente rendzinas; caracterizados por ser poco profundos y tener buena estructura y drenaje. (INEGI 2002, citado por Collantes-Chávez-Costa, *et al.*, 2019). Sin embargo, dentro del área de estudio se distinguen tres tipos de suelos claramente definidos y relacionados con los tipos de ecosistemas costeros:

En los suelos de mesetas calcáreas, predominan los litosoles, cuya característica principal es su poca profundidad (0-40 cm); mientras que, en las zonas costeras y playas, los suelos son de origen reciente, resultado de la deposición de sedimentos costeros de textura gruesa. Por último, los suelos de cuencas o bajos aluviales consisten en histosoles, gleysoles y solonchak. Estos son comunes de zonas inundables, carecen de vegetación, son fangosos, poco compactos, anaeróbicos y saturados de agua salobre o con una concentración salina superior al agua de mar (INE, 1998).

Vegetación

La flora de Cozumel representa aproximadamente el 40% de la reportada para todo el estado y está compuesta por 105 familias de plantas vasculares. Esto es muy significativo, si se toma en cuenta que la isla representa el 10% del área total del estado (CONANP, 2007).

La isla se distinguen cinco comunidades diferentes de vegetación: La selva baja caducifolia y mediana subcaducifolia, el manglar, el tular-saibal, la vegetación halófila o de dunas costeras y el tasistal. Las dos primeras constituyen asociaciones de vegetación primaria que por su mayor extensión, complejidad y estabilidad determinan las condiciones del lugar que dominan, mientras las otras tres se encuentran intercaladas entre estas (INE, 1998). En la selva mediana predominan especies arbóreas como el *Chechém* (*Metopium brownei*), *Chacá* (*Bursera simaruba*); Jabín (*Psidium communis*); y Ceiba (*Ceiba pentandra*). Por otra parte, en el área costera predomina el Mangle Rojo (*Rhizophora mangle*), Mangle Blanco (*Laguncularia Recemosa*) y el Chit (*Thrinax radiata*) (Palafox y Zizumbo, 2009).

En cuanto a la vegetación de selva baja caducifolia, la comunidad está compuesta generalmente por un estrato arbóreo principal y otro arbustivo o subarbóreo, sin presentarse un estrato herbáceo. Se localiza en suelos someros, con poca materia

orgánica.

Entre las especies más importantes que se encuentran en este tipo de vegetación están *Enriquebeltrania crenatifolia*, *Pithecellobium mangense*, *P. dulce*, *Diospyros nicaraguensis*, *Brassavola nodosa*, *Microgramma nitida*, *Aporocactus flabelliformis*, *Selenicereus testudo*, *Dioscorea floribunda* (Collantes-Chávez-Costa, et al., 2019).

Por otro lado, el Tasistal se desarrolla sobre suelos inundables no salinos, siendo la palma *Acoelorrhapha wrightii*, la especie más característica de este tipo de vegetación. Otras especies frecuentes en los tasistales son *Cladium jamaicense*, *Metopium brownei*, *Jacquinia paludicola*, *Conocarpus erectus*, *Chrysobalanus icaco* (icaco), *Thrinax radiata* (palma chit), varias trepadoras y un helecho (*Acrostichum danaefolium*) (Collantes-Chávez-Costa, et al., 2019).

En cuanto a los ecosistemas de manglar, estos presentan una zonación bien definida, según el nivel de oxigenación, inundación y salinidad del sustrato. La estructura de los bosques de mangle suele conformarse por un bosque de margen de mangle rojo, seguido por un bosque bajo de 2 a 3 m de altura de mangle negro (*Avicennia, germinans*), con manchones de *Batis maritima* y de *Salicornia sp.* Más lejos de la costa las salinidades disminuyen aún más y permiten el crecimiento de mangle blanco, conformando el bosque más rico dentro de las comunidades de manglar con una altura media de 6 a 8 metros, y gran diversidad de bromeliáceas, orquídeas y cactáceas (*Selenicereus testudo* y otras), así como de epífitas (*Brassavola nodosa*, *Schomburkia tibicinis*, *Aechmea bracteata*, *Echites yucatanensis*, *Rhabdadenia biflora*, *Batis maritima*) (Vázquez-Lule, et al., 2009)

Fauna

La parte terrestre del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel alberga a cuatro clases de vertebrados (anfibios, reptiles, aves y mamíferos) que agrupan un total de 136 especies. Las aves son las más diversificadas, con 93 especies, que representan el 68.38% del total de vertebrados de la isla. Por otro lado, los anfibios son el grupo menos diversificado, ya que solamente representan un 2.94% del total. En cuanto a los reptiles, no existe mucha diversidad de este grupo en la isla, sin embargo, algunos como *Pseudemys scripta* (tortuga), *Iguana iguana* (iguana verde), *Cnemidophorus cozumelus* (víbora), *Boa constrictor* (víbora), son muy comunes (INE, 1998).

Como es característico de las islas, Cozumel posee un alto grado de endemismo, ya que cuenta con 7 Mamíferos endémicos tales como: Rata de Cozumel (*Oryzomys couesi cozumelae*), ratón colector de Cozumel (*Reithrodontomys spectabilis*), ratón orejón de Cozumel (*Peromyscus leucopus cozumelae*) mapache enano (*Procyon pygmaeus*), tejón de Cozumel (*Nasua nelsoni*), jabalí de Cozumel (*Pecari tajacu nanus*); así como también, 19 aves endémicas. Por mencionar algunas: Cuitlacoche de Cozumel (*Toxostoma guttatum*), Vireo de Cozumel (*Vireo bairdi*), Colibrí de Cozumel (*Chlorostilbon forficatus*), Hoco faisán de Cozumel (*Crax rubra griscomi*), Troglodita de Cozumel (*Troglodytes aedon beani*), Gavilán de Cozumel (*Buteo magnirostris gracilis*), Cardenal de Cozumel (*Cardinalis cardinalis saturata*) (INE, 1998).

En cuanto a especies bajo la categoría de amenazadas y protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010, se encuentran la tortuga caguama (*Caretta caretta*), tortuga verde (*Chelonia mydas*), tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), cocodrilo (*Crocodylus acutus*), pato (*Cairina moschata*) y el hoco faisán (*Crax rubra griscomi*) (INE, 1998).

Ambiente marino

Con base en la caracterización de arrecifes insulares de Quintana Roo realizada en 2017 por Loreto-Viruel, *et al.*, y lo descrito por el INE (1998), los arrecifes presentes en el área de estudio se encuentran conformados por tres zonas:

- a) Laguna arrecifal: la cual comprende la zona cercana a la playa, con aguas tranquilas y someras en las que domina sobre el sustrato el pasto marino *Thalassia testudinum*.
- b) Zona de transición hacia el sotavento: consiste en una terraza que comprende desde la playa hasta una profundidad promedio de 6 m, donde se encuentra una antigua línea de costa representada por un escalón. Después de este escalón se encuentra una segunda terraza, en donde se localizan arrecifes en parche que se asientan sobre un arenal de escasa inclinación, en una profundidad entre 9 y 15 m, con parches de hasta 300 m de largo y de 5 m a 30 m de ancho.
- c) Arrecife profundo: este se localiza sobre el borde del cantil de la plataforma continental, el cual se inicia muy próximo a la costa, a una distancia promedio de 1000 m. De manera general, las formaciones arrecifales profundas constan de estructuras voluminosas sin forma definida que surgen desde la base del cantil a una profundidad promedio de 27 m, y se elevan hasta llegar a los 18 m de profundidad

en algunos sitios. La mayor parte de estas formaciones consta de coralmuerto e intemperizado y la parte superior de estas estructuras presenta una comunidad biológica diversa mientras que en su base dominan las algas y las esponjas. Aquí, las especies de corales más abundantes son *Montastrea cavernosa*, *Porites astreoides*, *P. porites*, *Agaricia agaricites* y *Siderastrea sidérea* (Carriquiry, et al., 2013; Hernández-Moreno, 2015).

La comunidad arrecifal se asocia a una variedad de organismos marinos, entre los que destacan el tiburón gato (*Ginglymostoma cirratum*), tintorera (*Galeocerdo cuvieri*), jaquetón (*Carcharinus limbatus*), raya (*Dasyatis americana*), morena (*Gymnothorax spp.*), mero (*Epinephelus spp.*), huachinango (*Lutjanus spp.*), pez cuchillo (*Equetus lanceolatus*), pez mariposa (*Chaetodon spp.*), pez ángel (*Pomacanthus arcuatus*), pez loro (*Sparisoma spp.*), lenguado (*Bothus lunatus*), escorpión (*Scorpaena plumieri*), pez ballesta (*Balistes vetula*), así como el endémico pez sapo (*Sanopus splendidus*) (INE, 1998). No obstante, según estudios recientes, las especies de peces *Chromis cyanea*, *Stegastes partitus* y *Thalassoma bifasciatum* son las más abundantes en los arrecifes del PNAC (Hernández-Moreno, 2015).

También se encuentran asociados diversos invertebrados marinos como esponjas (principalmente *Agelas conifera* y *Mycale laevis*) (Hernández-Moreno, 2015), poliquetos como el gusano de fuego (*Hermodice carunculata*) y el gusano medusa (*Loimia medusa*); equinoideos, holotúridos y ofiuroides como el erizo espinas largas (*Diadema antillarum*), erizo punta de lápiz (*Eucidaris tribuloides*), pepino de mar (*Euapta lappa*), pepino negro (*Holothuria mexicana*) y la estrella espinosa negra (*Ophiocoma sp.*). Así como también gastrópodos (*Cerithium literatum*, *Strombus gigas*) y crustáceos, como el camarón pistolero rojo (*Alphelus armatus*), la langosta espinosa (*Panulirus argus*) y el cangrejo araña (*Stenorhynchus seticornis*) (INE, 1998)

Otro rasgo común en el cantil de la zona oeste de la Isla Cozumel es la abundancia de hidrozoarios urticantes de las especies *Thyroscyphus ramosus* y *Macrorhunchia robusta*, esponjas principalmente del género *Agelas* y macroalgas verdes y cafés como *Halimeda goreau* y *Lobophora variegata* respectivamente (Loreto-Viruel, et al., 2017).

Oceanografía y corrientes

El Caribe mexicano presenta dos canales paralelos a la línea de costa: uno es el canal

de Cozumel, con 400 m de profundidad y 18 km de ancho, y el otro, ubicado al este de la isla Cozumel, con 1000 m de profundidad. Hacia el este de ambos canales se encuentra un umbral de 2040 m de profundidad que forma el canal de Yucatán, que se constituye como la única conexión entre el mar Caribe y el Golfo de México (Athié, *et al.*, 2011).

Athié, *et al.* (2011) mencionan que pesar de que el canal de Cozumel posee dimensiones un tanto pequeñas, en comparación con el resto del Caribe Norte, el flujo que pasa por este canal es de particular importancia debido a que forma parte de la corriente de Yucatán. Además, la corriente de Yucatán se intensifica una vez que cruza el canal de Cozumel y entra al Golfo de México, donde posteriormente se convierte en la Corriente del Lazo, lo que sugiere que Isla Cozumel juega un papel importante en el desarrollo de esta corriente.

Chávez, *et al.* (2003) en Carrillo (2010) indica que la corriente en el Canal de Cozumel es persistente noreste en el centro del canal, sin inversiones y con una velocidad variable entre uno y tres nudos, dependiendo de la época del año, con un promedio de velocidad de 1.5 nudos (75 cm/seg). Aproximadamente a un kilómetro de la costa, las corrientes son predominantemente paralelas a ella, fluyendo alternativamente al Norte o al Sur, invirtiendo su dirección con una periodicidad semidiurna; aunque esto también depende en gran medida de las condiciones de viento y oleaje, que hacen que las masas de agua se dispersen en aguas profundas o bien queden atrapadas.

Debido a lo anterior, es importante mencionar que la mayor parte del año los vientos del Este y Sureste son dominantes en la región, a excepción de la temporada invernal, cuando la dirección de estos cambia al Norte-Noreste (Orellana, *et al.*, 2008). Lo anterior ocasiona que la costa de barlovento sea la más expuesta a la energía del oleaje, mientras que la costa correspondiente al PNAC está resguardada la mayor parte del año al oleaje proveniente del Este-Noreste y únicamente se ve afectada durante la temporada de “nortes”. No obstante, en el área de estudio también se han registrado contracorrientes en dirección al Sur-Suroeste particularmente en las inmediaciones de Paraíso y Chankana’ab (INE, 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio fue realizado durante meses representativos de las épocas climáticas reconocidas en la región: época de lluvias, que abarca los meses de junio a octubre; época de frentes fríos o 'nortes', que abarca de noviembre a febrero y época de secas, que abarca de marzo-mayo (Schmitter-Soto, *et al.*, 2002). Adicionalmente el establecimiento de dichas épocas se corroboró con datos históricos de precipitación y temperatura obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional.

Se realizaron un total de 5 salidas a campo; dos durante época de nortes (diciembre 2019 y diciembre de 2020); una en época de secas (marzo 2020) y dos en época de lluvias (Julio 2020 y octubre 2021).

Fueron establecidos un total de 26 sitios en la parte suroeste del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (Fig.1), los cuales fueron geoposicionados y seleccionados con base en literatura que indica cuales son los arrecifes más frecuentados por turistas (Ortiz-Cajica, *et al.*, 2020). También, fue importante establecer sitios cerca de clubes de playa y hoteles, para evaluar algún tipo de perturbación en el ambiente marino cerca de estos lugares.

Algunos sitios como “Ojo de agua de Chankanaab” y “Caleta”, fueron elegidos debido a que se ha comprobado por diversos autores (Schmitter-Soto, 2007; Yáñez-Mendoza, *et al.*, 2007; Sánchez y Pinto, *et al.*, 2015) la existencia de ojos de agua costeros en dichos lugares, por lo que se consideró pertinente su inclusión.

Trabajo de campo

Cortés y Silva, (2011), mencionan que los muestreos estratificados son aplicados comúnmente a ambientes marinos debido a que la heterogeneidad de dicho ambiente se incrementa por el efecto de las corrientes marinas, cuyo flujo puede determinar estratificación y entrelazamiento de volúmenes de líquido con distintas características físicas y químicas, es por ello que para efectos de este trabajo de investigación fueron monitoreados el estrato superficial y el estrato de fondo en cada uno de los sitios de estudio.

Fueron determinadas *in situ variables como* la temperatura del agua, salinidad, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos empleando una sonda multiparamétrica HANNA modelo HI98194.

Cabe mencionar, que la salinidad fue corroborada empleando un refractómetro modavela modelo RFS100. Mientras que, la transparencia del agua y profundidad total fueron determinadas empleando un disco de Secchi.

Para la determinación de nitritos y nitratos, en cada sitio de estudio fueron colectadas 1 muestra de agua de mar y 1 replica por estrato, empleando una botella Van Dorn de dos litros de capacidad. Las muestras fueron almacenadas en botellas de vidrio de 500 ml previamente esterilizadas y estas fueron transportadas a bajas temperaturas dentro de una nevera con hielo para su procesamiento en laboratorio, donde el método utilizado para la determinación de nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) fue el método de reducción con cadmio cuperizado descrito en la NMX-AA-079-SCFI-2001, “para la determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

Para la determinación de coliformes totales y fecales se siguió el mismo procedimiento para la toma de muestras, con la excepción de que, para esta variable, todas las muestras colectadas pertenecieron al estrato superficial y solo fueron colectadas durante las campañas de monitoreo de julio 2020 y octubre 2021 (meses representativos de la época de lluvias). Posteriormente, en laboratorio fue aplicado el método de filtración por membrana descrito en la NMX-AA-102-1987, “para la detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración en membrana”.

Trabajo de laboratorio

La técnica para la determinación de nitritos y nitratos consiste en verter 20 ml de la muestra que se desea analizar (previamente filtrada), a través de una columna de cadmio cuperizado con una tasa de flujo de 8-10 ml/min para reducir los nitratos a nitritos.

Posteriormente a dicha muestra se agregan 0.4 ml de "Reactivo 1" el cual consiste en una solución de sulfanilamida y ácido clorhídrico. Al pasar aproximadamente 8 minutos se le agregan a esta misma muestra 0.4 ml de "Reactivo 2" el cual consiste en una solución de N-(naftil) -etilendiamina Dihidroclorado.

Por otro lado, para la determinación de nitritos, la muestra a analizar no debe pasarse por la columna de cadmio. Tan solo deben separarse 10 ml de la muestra filtrada, a la cual se agregan 0.2 ml de "Reactivo 1" y 8 minutos después, 0.2 ml de "Reactivo 2".

Finalmente, se realizó la lectura de la absorbancia empleando un espectrofotómetro modelo LUZEREN a una longitud de onda de 543 nm.

Una vez obtenida la absorbancia fue posible estandarizar una curva de calibración para nitritos y nitratos, respectivamente, con las que se tradujeron los resultados obtenidos a $\mu\text{M/L}$ (Fig. 2 y 3).

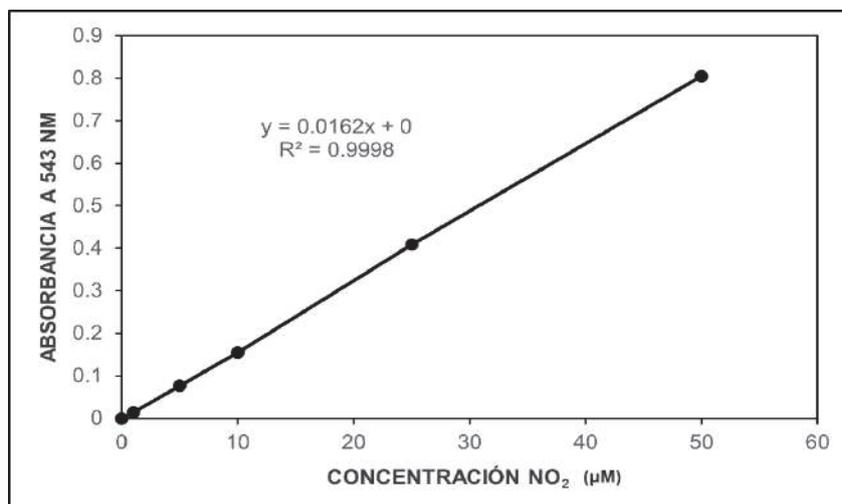


Figura 2. Curva de calibración para nitritos (NO₂-).

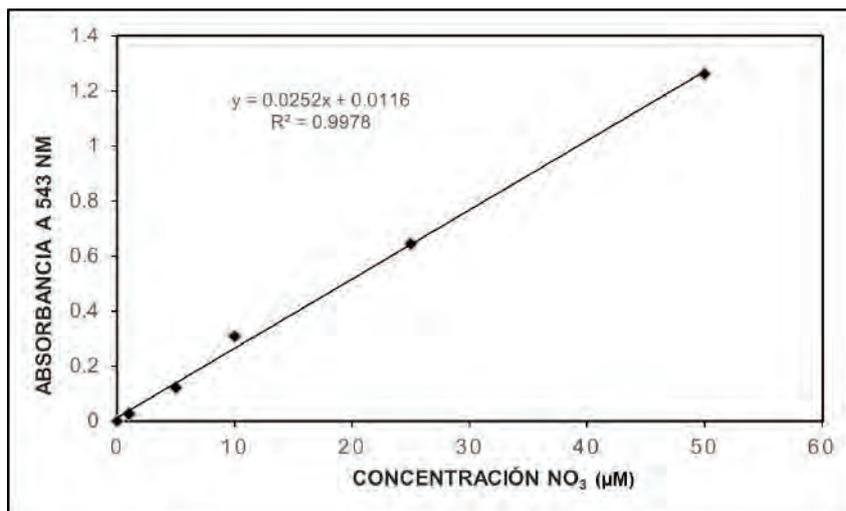


Figura 3. Curva de calibración para nitratos (NO₃⁻)

Para la determinación de organismos coliformes totales y fecales deben filtrarse 100 ml de cada muestra empleando una bomba de vacío y filtros de membrana de 0.45 μm de poro y 47 mm de diámetro. Posteriormente este filtro es transferido a un soporte, el cual es, idealmente, una caja de Petri a la cual se le agrega el medio de cultivo para que sean incubadas.

Para efectos de este trabajo de investigación, los medios de cultivo utilizados en laboratorio fueron Millipore “m-Endo Total Coliform Broth”, para la determinación de coliformes totales y Millipore “m-FC with Rosalic Acid” para la determinación de coliformes fecales. Finalmente, las cajas de Petri son incubadas durante 24 horas a una temperatura de 35 °C y 44.5 °C, respectivamente.

Una vez transcurrido el tiempo, se realiza el conteo de colonias retenidas en la superficie del filtro lo que será igual a la concentración de organismos coliformes totales o fecales en la muestra deseada en unidad de medida de UFC/100 ml (Unidades Formadoras de Colonias por 100 ml de muestra filtrada).

Metodología para análisis de resultados

Los resultados fueron analizados empleando estadística descriptiva y fueron comparados con los límites máximos permisibles para la protección de la vida acuática, establecidos en la NOM- 001-Ecol-1996 y con los establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.

Se realizó un análisis estadístico de conglomerados (dendrogramas) empleando el software Multi Variate Statistical Package (MVSP), de acuerdo con el índice de distancia métrica euclidiana que se basa en semejanzas y/o discontinuidades entre sitios de monitoreo. Para este análisis fue necesario transformar los resultados obtenidos a logaritmo (a excepción del pH) ya que los datos se encontraban en diferentes magnitudes. El resultado del análisis consistió en la conformación de grupos de sitios que se pudieron emplear para sugerir áreas de monitoreo estratégicas para la evaluación rápida de calidad de agua en el PNAC.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el periodo del trabajo de investigación (2019-2021) se evaluaron considerando las condiciones que se presentaron para cada muestreo, los cuales siempre fueron realizados entre las 9:00 y 16:00 horas.

Para la época de nortes, se analizaron los datos correspondientes a los monitoreos realizados en el mes de diciembre del año 2019 y diciembre del año 2020; para la época de lluvias, se analizan los datos correspondientes a los monitoreos realizados en el mes de julio 2020 y octubre 2021 y para la época de secas, se analizan los datos determinados en el monitoreo realizado en el mes de marzo 2020. Solo en el caso específico de coliformes totales y fecales se analizan datos de julio 2020 y octubre 2021.

Salinidad

El área de estudio presentó un promedio general de 34.7 ± 3.9 ppm en el estrato superficial y un promedio general de 35.3 ± 2.9 ppm para el estrato de fondo, lo que denota una mayor concentración de esta variable en el estrato de fondo. Así mismo, se observan diferencias entre épocas climáticas, encontrando una concentración más alta de esta variable durante la época de secas ($\bar{X} = 35.7$ ppm) y menor durante la época de lluvias ($\bar{X} = 34.8$ ppm).



Figura 4. Salinidad por época climática.

Los valores máximos de salinidad se registraron durante la época de secas en el estrato de fondo del sitio "YB" (36.8 ppm) y el estrato superficial del sitio "CB" (36.8 ppm). Mientras que los valores mínimos se encontraron durante la época de nortes en los estratos superficiales de sitios cercanos a la costa como "CHAO" (18.5 ppm) y "CAL" (27.6 ppm). En estos sitios el comportamiento de la salinidad a lo largo de la columna de agua fue diferente, encontrando menor salinidad en el estrato superficial (20.8 ppm) en comparación con el estrato de fondo (33.8 ppm), evidenciando una estratificación de la columna de agua, la cual fue más marcada durante la época de secas.

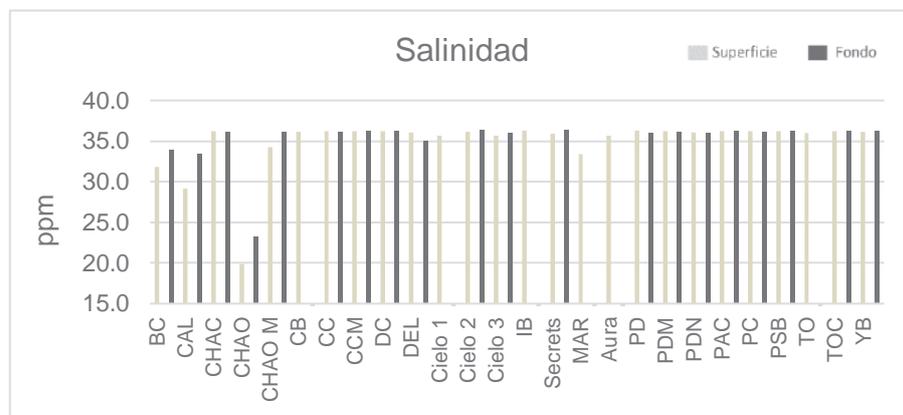


Figura 5. Salinidad promedio por sitio de estudio.

Aunque los valores más bajos de salinidad se registraron durante la época de nortes, el promedio mínimo, se obtuvo en la época de lluvias (34.5 ppm). No obstante, las diferencias entre épocas no fueron tan significativas (solo de 0.4 de acuerdo con el valor de la desviación estándar).

Oxígeno Disuelto

De manera general, el oxígeno disuelto presento un promedio de 5 ± 0.7 mg/L, sin grandes diferencias entre estratos de la columna de agua y épocas climáticas.

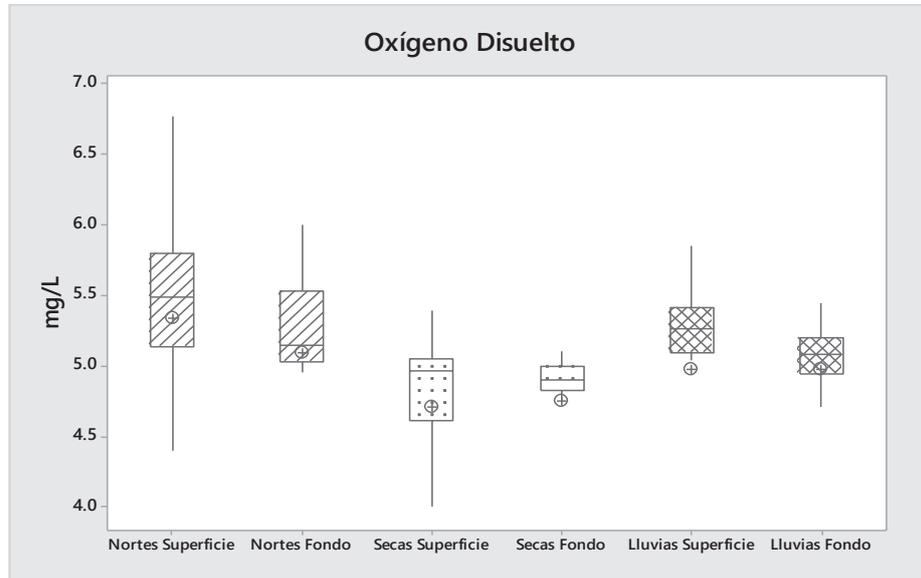


Figura 6. Oxígeno disuelto por época climática.

Los valores máximos se encontraron durante la época de nortes en el estrato superficial de los sitios "TO" (7 mg/L), "Aura" (6.7 mg/L) y "IB" (6.3 mg/L). Por otra parte, los valores mínimos de oxígeno disuelto también se registraron durante la época de nortes en los estratos superficiales de los sitios "CHAO" (1.4 mg/L) y "CAL" (3.9 mg/L). En estos sitios las concentraciones tendieron a ser mayores en el estrato de fondo (2.2 y 5.6 mg/L, respectivamente).

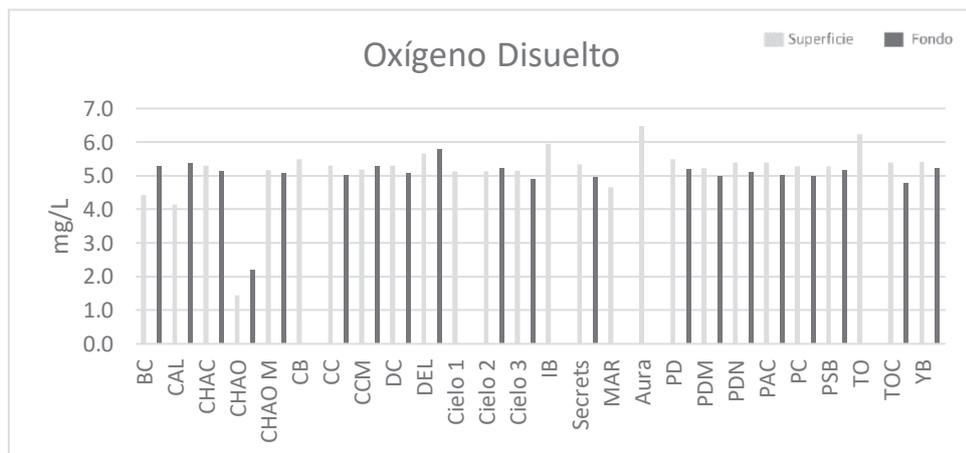


Figura 7. Oxígeno disuelto promedio por sitio de estudio.

A pesar de que los valores más bajos de oxígeno disuelto se registraron durante la época de nortes, el promedio mínimo (4.7 mg/L) lo presentó el conjunto de datos perteneciente a la época de secas.

Temperatura

El área de estudio presentó una temperatura promedio del agua de $28^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en ambos estratos, observándose un comportamiento homogéneo a lo largo de la columna de agua en cada una de las épocas climáticas. La temperatura mínima (25.7°C) se registró durante la época de secas en el estrato superficial del sitio "CHAO" y la temperatura máxima (29.9°C) se registró durante la época de lluvias en el estrato de fondo de los sitios "DEL" y "PD", (± 0.1 de diferencia con el estrato superficial).

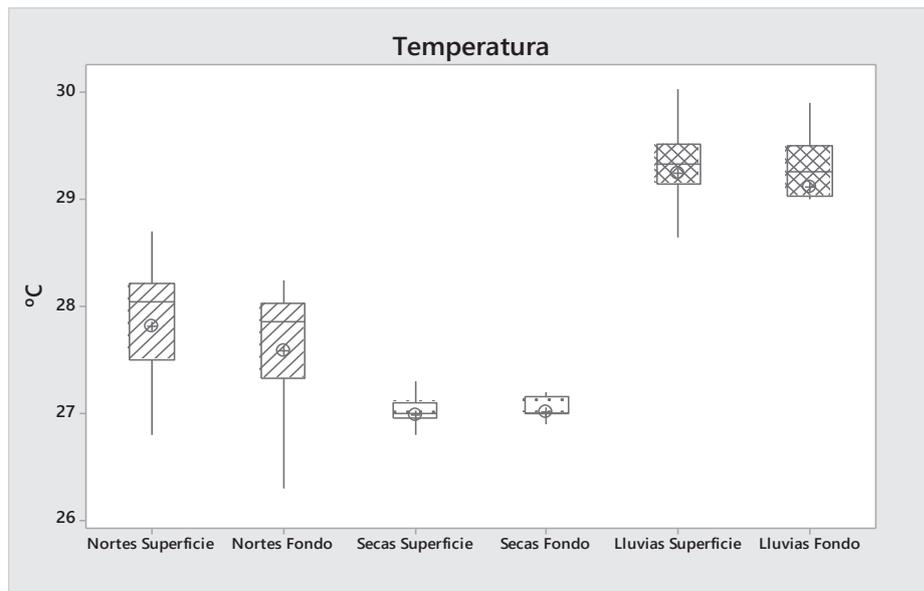


Figura 8. Temperatura por época climática.

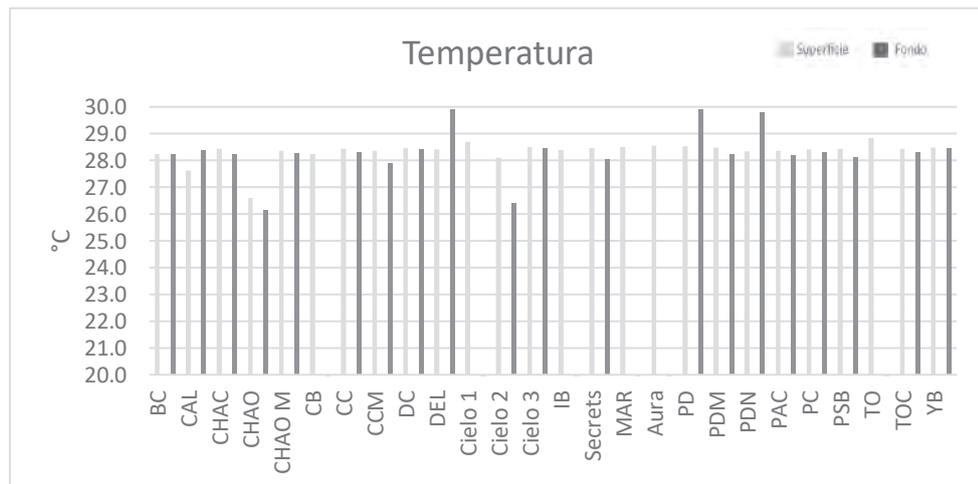


Figura 9. Temperatura promedio por sitio de estudio.

potencial de Hidrógeno (pH)

Esta variable se comportó de manera homogénea a lo largo de la columna de agua, sin grandes diferencias entre cada época climática, presentando un promedio de 8.3 ± 0.3 en el estrato superficial y un promedio de 8.4 ± 0.3 en el estrato de fondo.

El promedio mínimo se encontró en la época de lluvias (8.0 ± 0.2) mientras que el promedio máximo se registró en la época de secas (8.5 ± 0.1).

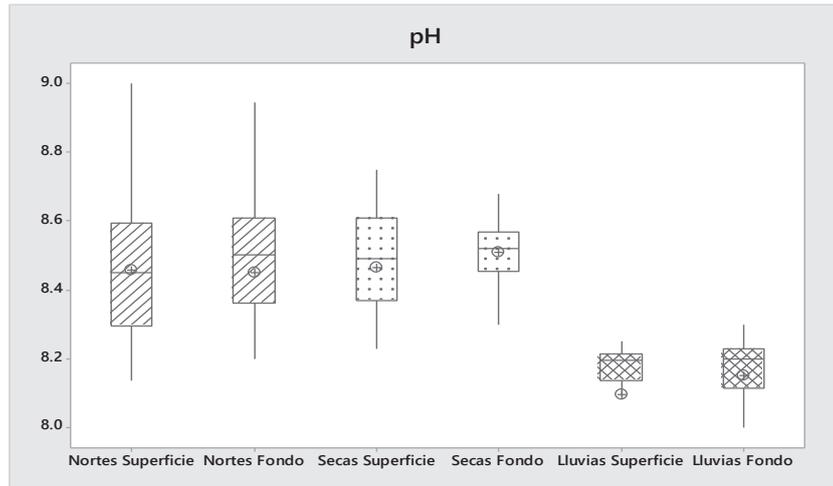


Figura 10. pH por época climática.

El valor mínimo (7.2) se registró durante la época de lluvias en el estrato superficial del sitio “CHAO” en donde el pH encontrado en el estrato de fondo fue de 7.5. Por otro lado, el valor máximo (8.7) fue registrado durante la época de nortes en el estrato de fondo del sitio “Cielo 2”.

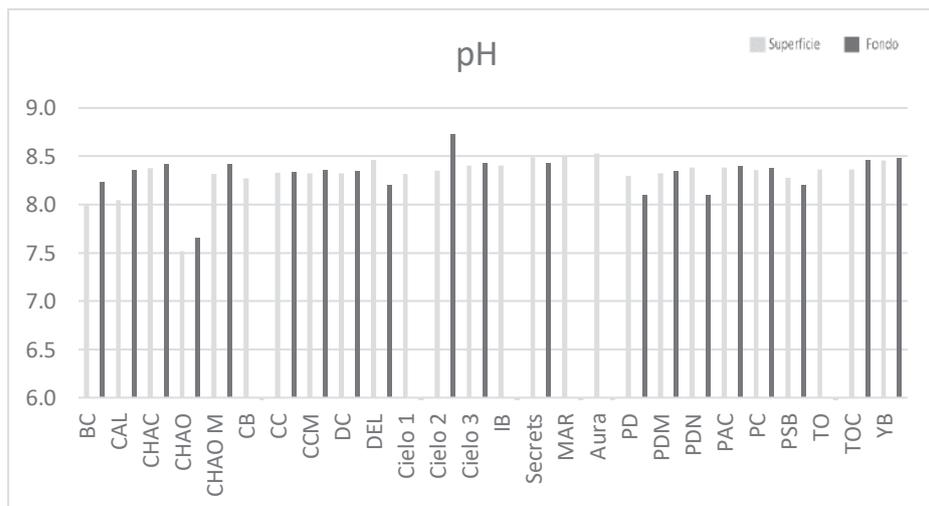


Figura 11. pH promedio por sitio de estudio.

Conductividad Eléctrica

El promedio máximo lo presento la época de secas en ambos estratos (superficie: $55146 \pm 1192 \mu\text{S/cm}$, fondo: $56586 \pm 932 \mu\text{S/cm}$), mientras que el promedio mínimo lo presento la época de nortes (superficie: $51691 \pm 1041 \mu\text{S/cm}$, fondo: $51931 \pm 1245 \mu\text{S/cm}$). Por otro lado, la época de lluvias presento un promedio de $53059 \pm 5983 \mu\text{S/cm}$ en el estrato superficial y en el fondo un promedio de $54091 \pm 4094 \mu\text{S/cm}$, comportándose de manera similar a la época de secas.

El sitio “CHAO” presentó los valores más bajos de conductividad en el estrato superficial ($28689 \pm 5306 \mu\text{S/cm}$), encontrándose fuera del promedio.

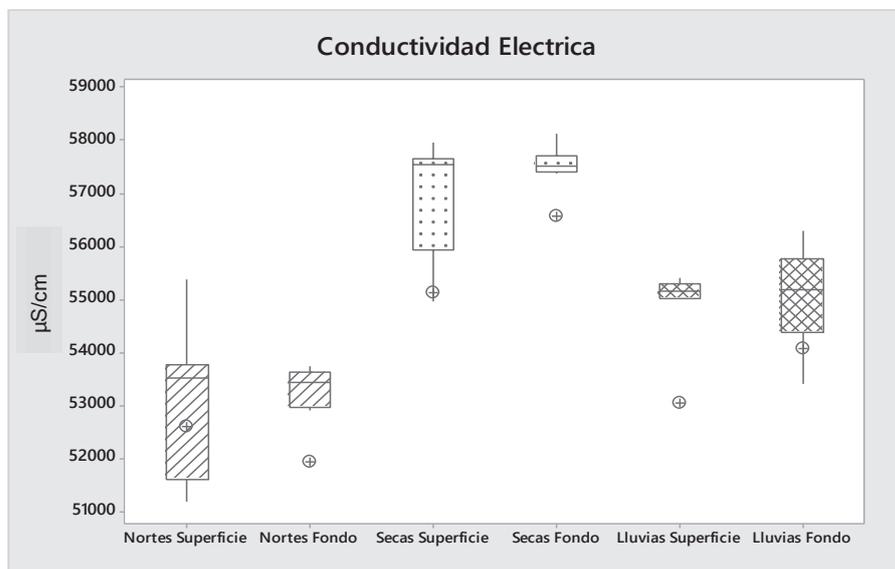


Figura 12. Conductividad eléctrica por época climática.

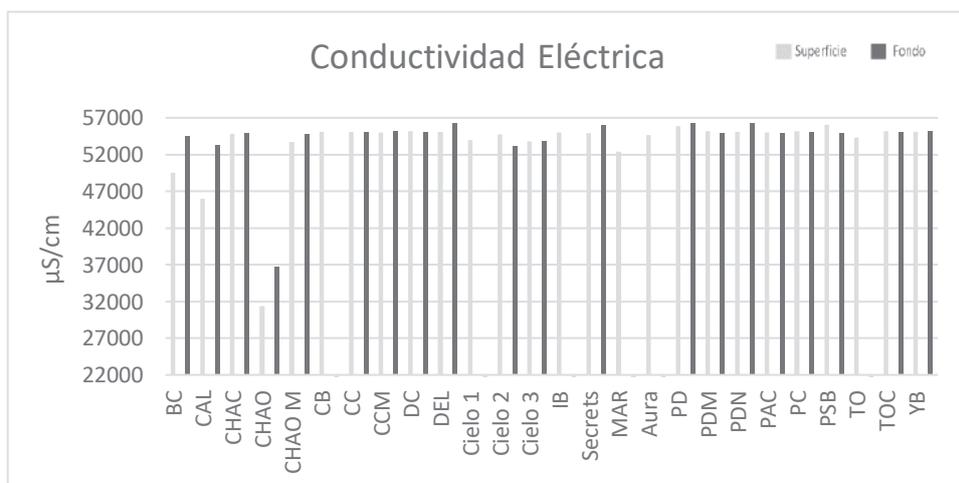


Figura 13. Conductividad promedio por sitio de estudio.

Sólidos Totales Disueltos (TDS)

Los promedios máximos se encontraron durante la época de secas para ambos estratos de la columna de agua (superficie: 34606 ± 713 mg/L, fondo: 35380 ± 554 mg/L), mientras que los promedios mínimos se obtuvieron durante la época de lluvias, también para ambos estratos (Superficie: 29225 ± 600 mg/L, fondo: 30091 ± 416 mg/L). Por su parte, la época de nortes presento un promedio aproximado de 32847.5 para ambos estratos lo que demostró un comportamiento homogéneo de esta variable a lo largo de la columna de agua en la mayoría de los sitios de estudio para dicha época.



Figura 14. Sólidos Totales Disueltos (TDS) por época climática.

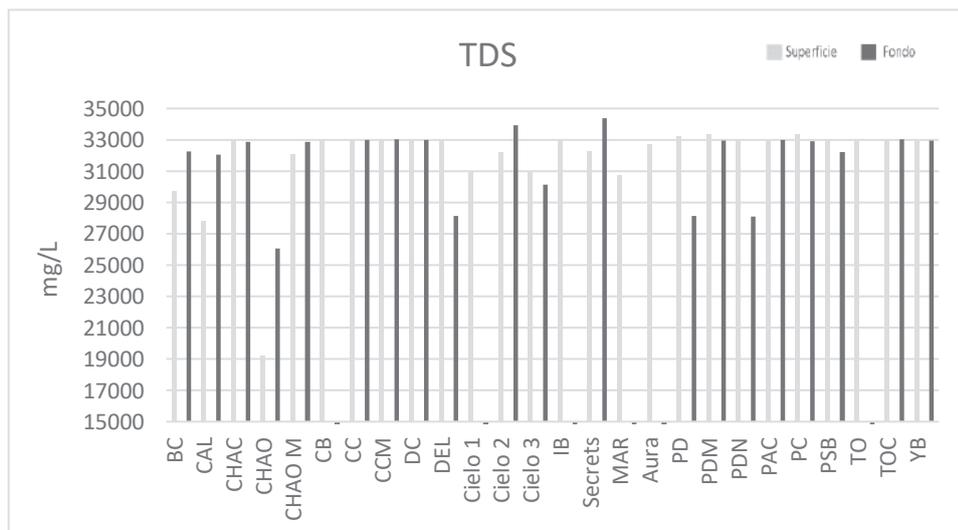


Figura 15. TDS promedio por sitio de estudio.

Nitritos (NO₂⁻)

De manera general, la concentración de nitrito se comportó de igual forma a lo largo de la columna de agua en la mayoría de los sitios de estudio. Sin embargo, hubo algunas excepciones en donde se encontraron mayores concentraciones de nitritos en el estrato superficial, como lo fue en el sitio "CHAO" en donde se registró un promedio de 0.59±0.31 µM/L, mientras que en el estrato de fondo se encontró un promedio de 0.22±0.31 µM/L. De igual forma, este sitio fue el que presentó la concentración máxima de esta variable (0.81 µM/L) durante la época de nortes (diciembre 2019).

En nortes se encontró una mayor concentración de nitritos a nivel general, encontrando un promedio de 0.17±0.2 µM/L, mientras que durante la época de secas se registró una menor concentración de esta variable en los sitios de estudio (promedio de 0.09±0.02 µM/L).

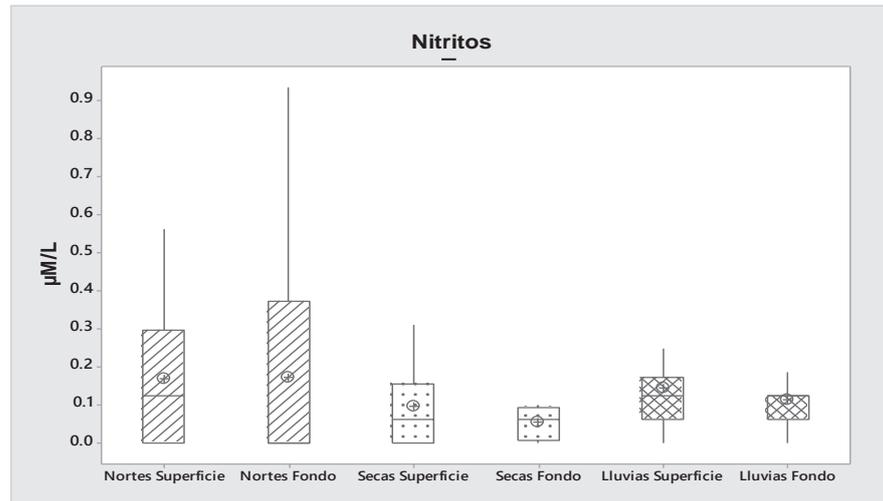


Figura 16. Concentración de nitritos (NO₂⁻) por época climática.

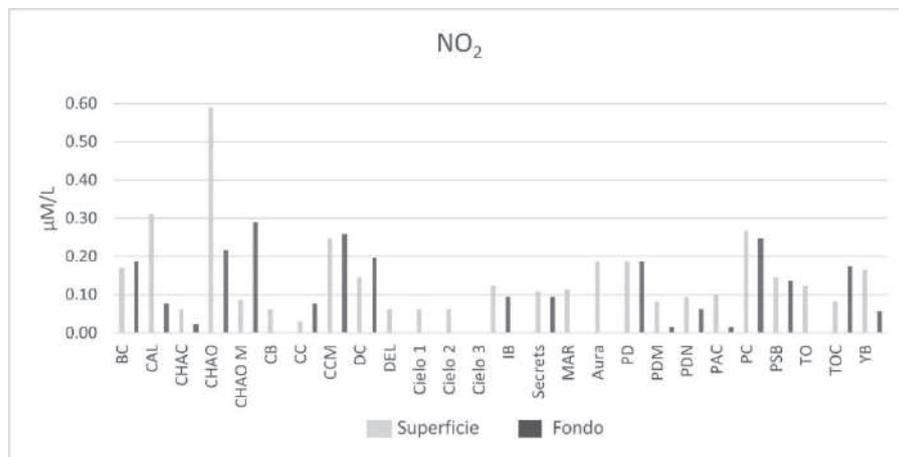


Figura 17. Promedio de la concentración de nitritos (NO₂⁻) por sitio de estudio.

Nitratos (NO₃⁻)

La mayoría de los sitios de estudio presentaron concentraciones iguales a 0 (indetectables) durante todos los monitoreos realizados. El valor máximo (4.7±2 µM/L) se registró durante la época de nortes (diciembre 2020) en el estrato de fondo del sitio “CHAO” (Ver Anexo 2). La época en la que se registraron las menores concentraciones fue la de lluvias (octubre 2021), en donde los nitratos fueron prácticamente imperceptibles.

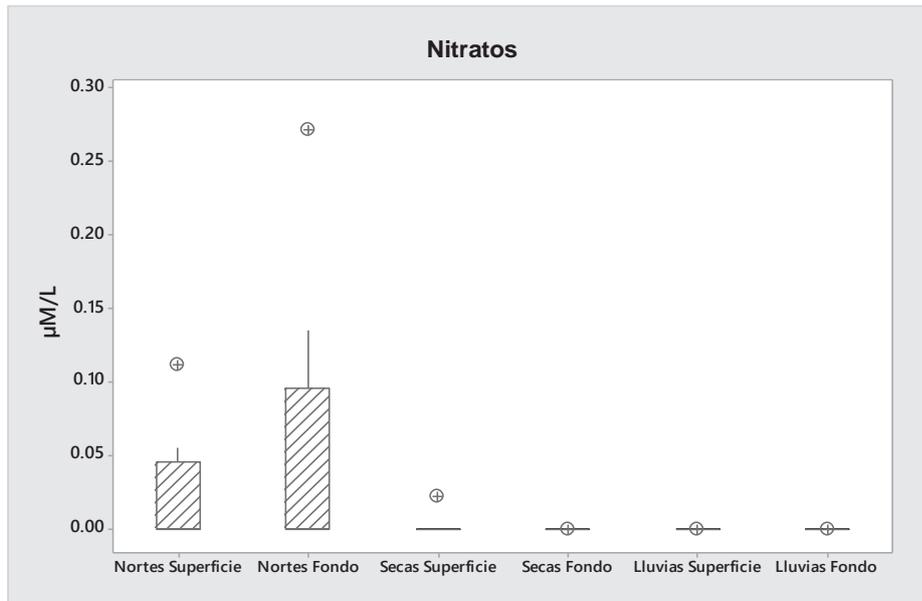


Figura 18. Concentración de nitratos (NO₃⁻) por época climática.

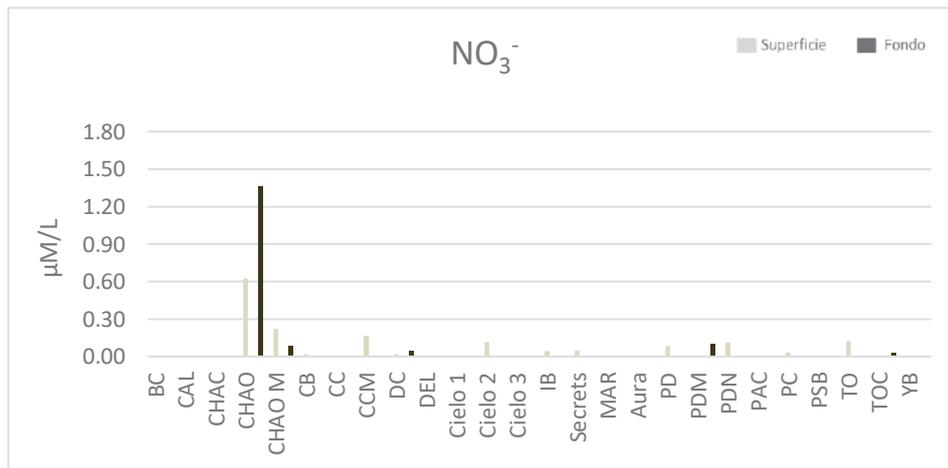


Figura 19. Promedio de la concentración de nitratos (NO₃⁻) por sitio de estudio.

Coliformes Totales y Fecales

De manera general, se encontró una mayor concentración de coliformes totales que de coliformes fecales en el área de estudio. El máximo valor promedio lo presentó el sitio “CHAO”, con una concentración de 168 UFC/100ml para coliformes totales y 28 UFC/100ml de coliformes fecales, mientras que sitios de estudio alejados de la costa presentaron las concentraciones más bajas (señalados con un ovalo en la Fig.20).

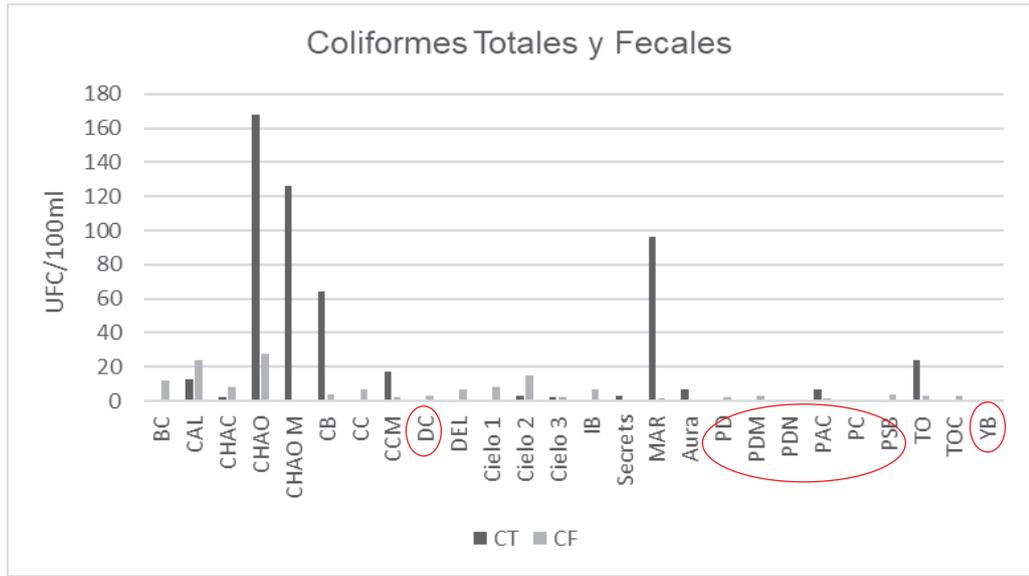


Figura 20. Promedio de la concentración de Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF) por sitio de estudio.

Análisis Cluster

Época de Lluvias

De acuerdo con el análisis de conglomerados, el cual se encarga de agrupar sitios de muestreo en función de las semejanzas de las variables físicas y químicas y, que fue aplicado a los datos correspondientes de la época de lluvia, se pueden identificar 2 principales grupos (los cuales se encuentran señalados en la Fig. 21 con un recuadro rojo), de los cuales, el grupo II es el que contiene a la mayoría de los sitios de estudio; mientras que el grupo III lo conforma únicamente el sitio “CHAO”.

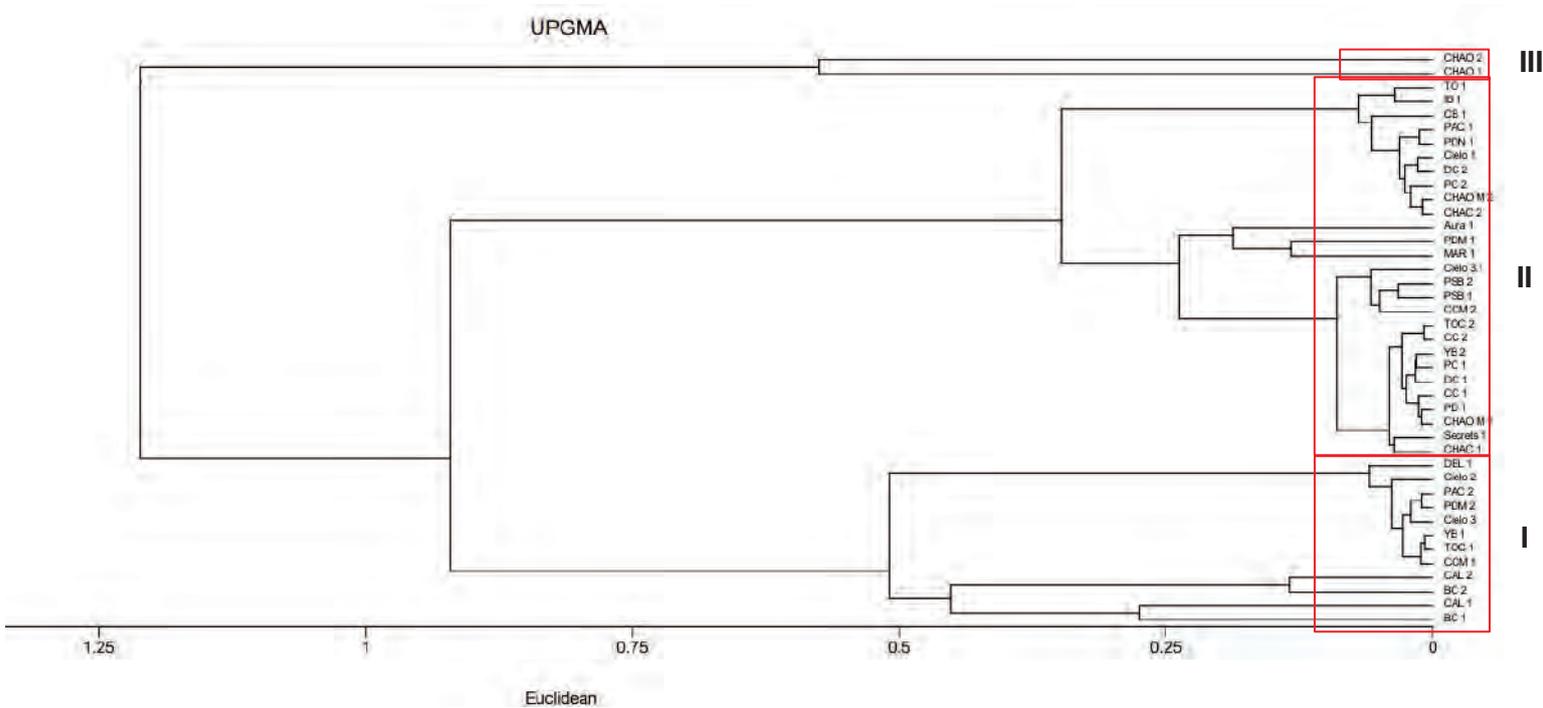


Figura 21. Dendrograma de la época de lluvias. 1=estrato superficial 2= estrato de fondo. Nota: consultar clave de los sitios en Anexo 1.

Época de nortes

De acuerdo con el análisis de conglomerados aplicado a los datos correspondientes de la época de nortes, se pueden distinguir dos principales grupos: I y II (los cuales se encuentran señalados en la Fig.22 con un recuadro rojo). El grupo I agrupa a la mayoría de los sitios de estudio.

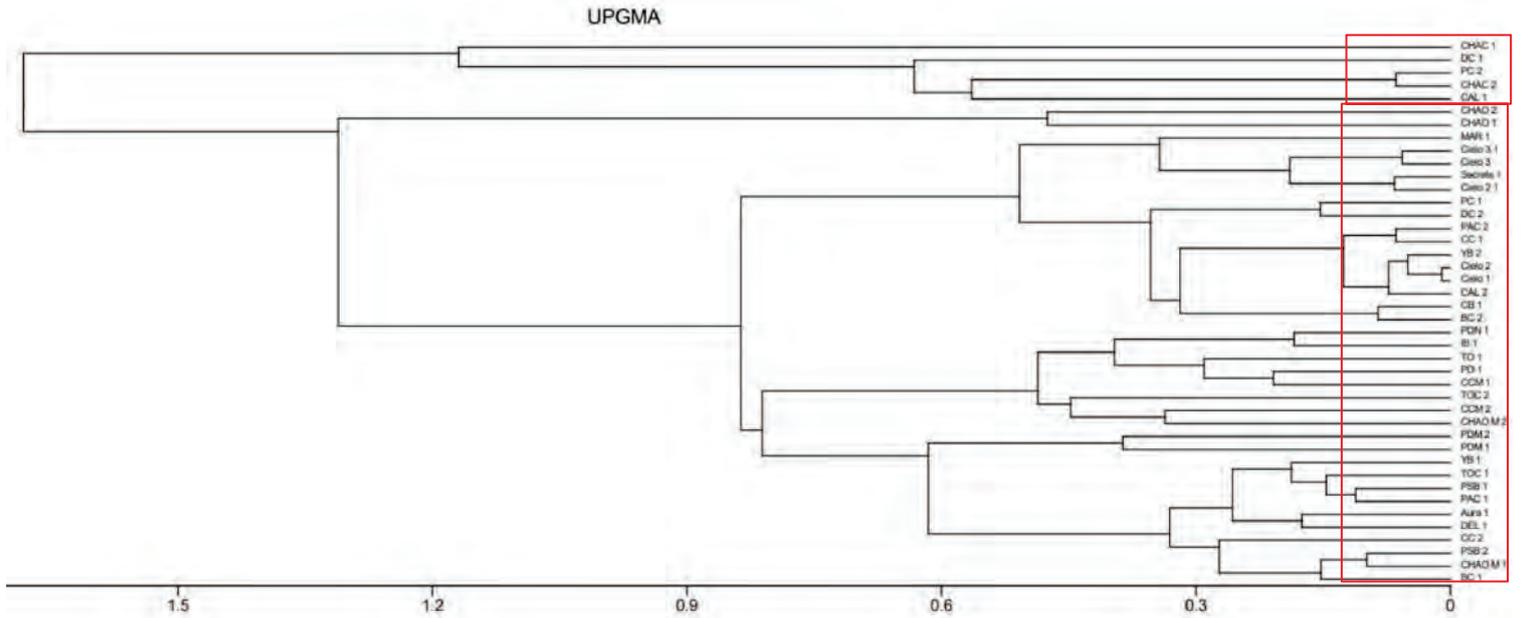


Figura 22. Dendrograma de la época de nortes. 1=estrato superficial 2= estrato de fondo. Nota: consultar clave de los sitios en Anexo 1.

Época de secas

De acuerdo con el análisis de conglomerados aplicado a los datos correspondientes de la época de secas, se pueden distinguir dos grupos homogéneos: I y II (los cuales se encuentran señalados en la Fig.22 con un recuadro rojo). También, se observa una distribución más equitativa de los sitios de estudio entre grupos.

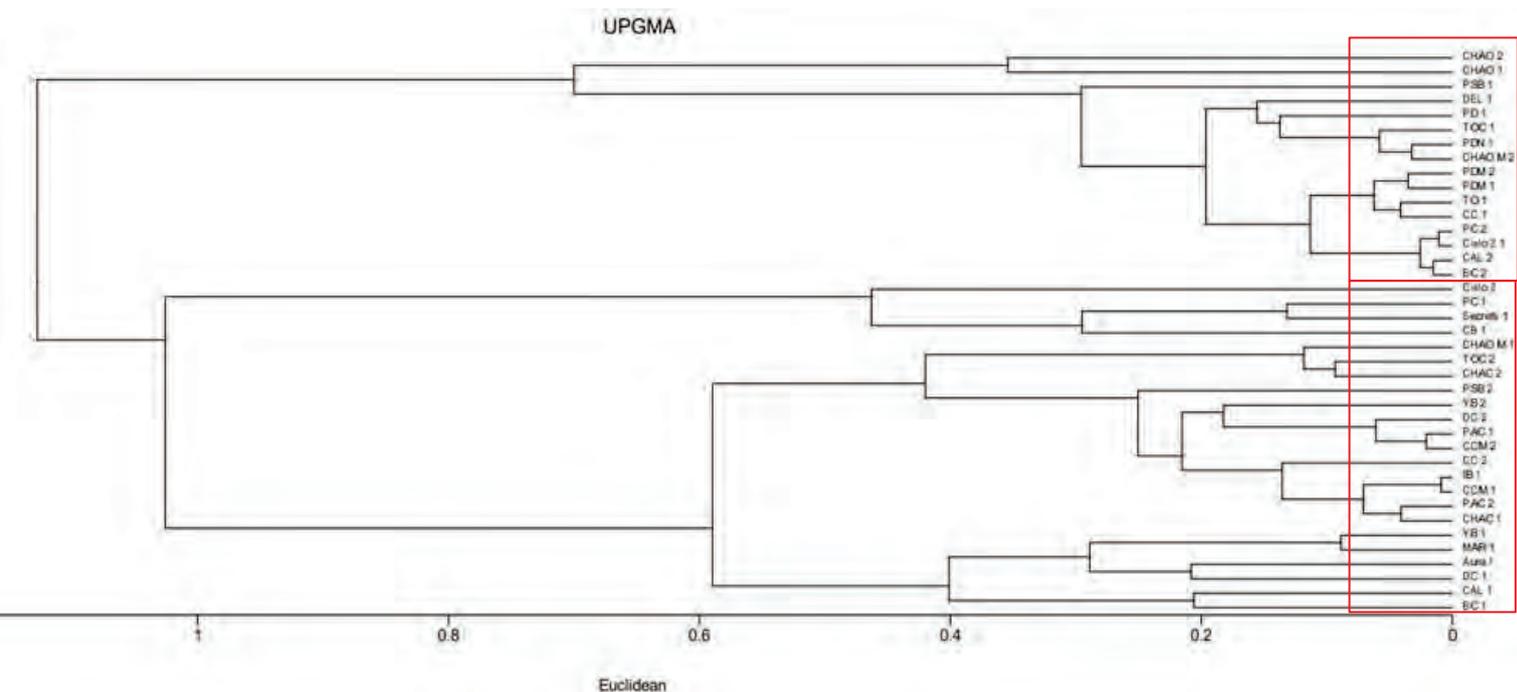


Figura 23. Dendrograma de la época de secas. 1=estrato superficial 2= estrato de fondo. Nota: consultar clave de los sitios en Anexo 1.

DISCUSIÓN

La salinidad encontrada en el área de estudio coincide con lo reportado por de la Lanza-Espino (2006) para las épocas de secas (37 ppm) en las costas del municipio de Tulum, Quintana Roo; lo reportado por Medina-Esquiliano (2008) en Camacho-Cruz (2021) para la época de nortes (34.5 – 35 ppm) para la bahía de Akumal y lo reportado por Vázquez-Delfín, *et al.* (2021) para la época de lluvias (34.6-37 ppm) en diversas playas de municipios de la parte norte y centro del estado de Quintana Roo.

Esta variable se comportó de acuerdo con las condiciones meteorológicas que se presentaron en cada monitoreo. Por ejemplo, el promedio máximo de salinidad (36.8 ppm) lo presento la época de secas, lo que es explicado por la influencia de la temperatura ambiente que suele presentarse entre los meses de marzo a mayo, las cuales alcanzan los 30 °C (Orellana, *et al.*, 2009) y que provocan una rápida evaporación en el agua superficial del mar, aumentando la concentración de las sales presentes. Por el lado contrario, el promedio mínimo (34 ppm) registrado en la época de lluvias, podría ser explicado por las condiciones meteorológicas características de la época como las continuas precipitaciones, las cuales llegan a ser mayores a 100 mm (Orellana, *et al.*, 2008) e influyen en el ecosistema marino diluyendo las sales presentes en la columna de agua.

Refiriéndonos a la distribución de esta variable en ambos estratos medidos (superficie y fondo), se encontró que la salinidad fue más homogénea a lo largo de la columna de agua durante la época de nortes, encontrando variaciones mínimas entre estratos (± 0.1) mientras que durante la época de secas (marzo 2020) se encontró hasta 1.5 unidades de diferencia entre el estrato de superficie y fondo, por lo que se observó una estratificación de la columna de agua en todos los sitios de estudio durante ese monitoreo; lo que podría explicarse por la disminución de los eventos de precipitación (Vidal-Zepeda, 2005) que diluyen las sales presentes en el ambiente marino. Este mismo comportamiento espacio-temporal fue observado para las demás variables determinadas en este estudio, por lo que se hará énfasis en dicho aspecto a manera de conclusión.

La temperatura se comportó de manera similar a lo reportado por otros autores para zonas del Caribe Mexicano (promedio de 28 °C) (de la Lanza-Espino, *et al.*, 2006; Carrillo, 2008, Hernández-Terrones, *et al.*, 2015, Vázquez-Delfín, *et al.*, 2021) presentando una variación principalmente temporal (± 1 °C entre épocas climáticas), mientras que de manera espacial se comportó de manera homogénea, en lo que respecta a lo largo de la columna de agua y entre sitios de estudio.

Las temperaturas mínimas fueron registradas durante la época de secas (marzo 2020) mientras que las más altas durante la época de lluvias (julio 2020), lo que coincide con lo reportado por de la Lanza-Espino (2006) para los mismos meses en la zona costera del municipio de Solidaridad, Quintana Roo (secas: 24.95 a 27.8 °C y lluvias: 28.98 a 30.84 °C), así como lo reportado por Torres-Alvarado y Calva-Benítez (2012) para las costas de Mahahual (secas: 29 °C, lluvias: 28.3 °C)

Autores como Coronado (2007) y Vidal-Zepeda (2005), sugieren que la influencia climática de la época de nortes prevalece hasta el mes de marzo e incluso abril (meses de transición), lo que podría explicar que las temperaturas mínimas se encontraran durante la época de secas. Para corroborar dicha influencia fueron revisadas las temperaturas medias de los meses de febrero y marzo de 2020 (CONAGUA, 2020) lo que explica en gran manera la temperatura promedio encontrada (27 °C) (Dicha relación puede observarse en el Anexo 4).

Así mismo, las altas temperaturas registradas durante la época de lluvias (julio 2020) podrían ser explicadas por la influencia de las condiciones climáticas que se presentaron para ese mes (Ver Anexo 4). De igual forma, el periodo en el que se efectuó el monitoreo (10:00 a 15:00 horas) pudo haber influido en los valores encontrados en los sitios de estudio durante los monitoreos de julio 2020 y octubre 2021, ya que entre ese horario suelen registrarse las temperaturas máximas del día (32 °C) en dicha época. Sin embargo, estas temperaturas se mantuvieron por debajo del límite máximo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (35 °C) durante todas las épocas climáticas.

En el monitoreo realizado en octubre de 2021 (Lluvias) se observó un aumento de hasta 1°C en comparación con los demás monitoreos realizados en los años 2019 y 2020, lo que sugiere un aumento en la temperatura superficial a través del tiempo. Observación que coincide con el comportamiento hidrometeorológico encontrado por Hernández-Flores, *et al.* (2021), en donde, de acuerdo con un análisis histórico de 30 años de la temperatura media mensual de Isla Cozumel, fue comprobado el incremento mensual de esta variable a partir del año 2012 (Consultar Anexo 5).

Así mismo, investigaciones realizadas en el Caribe en relación con el cambio climático (Campbell, *et al.*, 2010; Castro-Borges y Mendoza-Rangel, 2010; Cashman, 2014; Stephenson, *et al.*, 2014) comprueban un aumento en la temperatura a nivel regional de 0.7 a 4 °C por década, así como también una disminución del 10-30% en la precipitación anual (condición que podría tener efectos en la salinidad del mar).

Esta observación es de suma importancia en relación con los ecosistemas marino-costeros de la región, sobre todo para la conservación de los arrecifes coralinos, ya que la temperatura, además de la salinidad y el pH (Burke, *et al.*, 2011), constituyen unos de los factores ambientales determinantes para el óptimo desarrollo de los corales formadores de arrecifes, por lo que un aumento de 1 a 2 °C por arriba del límite térmico en el que la mayoría de las especies de coral se desarrollan adecuadamente (18 a 30 °C, según Hoegh-Guldberg, 1999) podría provocar blanqueamiento, donde el sistema fotosintético de las algas zooxantelas asociadas al coral se reduce o anula dejando sin fuente de alimento al coral, lo que trae como consecuencia la disminución del crecimiento o bien su mortalidad (Villanueva-Fragoso, *et al.*, 2010). No obstante, esta afectación depende de la resistencia de cada familia coralina (Marshall y Schuttenberg, 2006).

Villanueva-Fragoso, *et al.* (2010) analizaron si existía un impacto estacional por la fluctuación de la temperatura del agua en especies coralinas sensibles a estos cambios encontrando un mayor impacto durante la época de lluvias, lo que coincide con las temperaturas máximas encontradas en este trabajo de investigación (octubre 2021: 29.4 °C). Debido a lo anterior, se considera imperativo monitorear constantemente esta variable (así como la salinidad) para asegurar las condiciones óptimas para el desarrollo y crecimiento de las comunidades coralinas del PNAC, así como su diversidad y cobertura.

En cuanto a la variable de oxígeno disuelto, el área de estudio presentó un rango de 5 a 5.5 mg/L, lo que cumple con el límite mínimo establecido por los CE-CCA-001/89 para la protección de la vida acuática marina. Las concentraciones máximas encontradas en la época de nortes podrían explicarse por la influencia de los fuertes vientos (característicos de la época, según Orellana, *et al.*, 2008 y Vidal-Zepeda, 2006) sobre la superficie del mar. Por su parte, concentraciones de oxígeno mayores a 6 mg/L, como las que presentaron los sitios "IB", "Aura" y "TO", suelen encontrarse en partes someras debido a factores como la poca profundidad y actividad fotosintética que se lleva a cabo en la zona fótica (Lampert & Sommer, 2006), lo que puede constatarse por las profundidades registradas en dichos sitios (<1 m) (Ver en Anexo 2). Por otro lado, concentraciones menores a 4 gm/L, como las encontradas en los sitios "CHAO" y "CAL", podrían explicarse por la influencia de las descargas de agua subterránea, provenientes de los sistemas anquihalinos Chankanaab y Areolito, respectivamente (descritos en Yáñez-Mendoza, *et al.*, 2007). La influencia también puede corroborarse con los bajos niveles de salinidad (19.9 ppm) y temperatura (25 °C) encontrados en el estrato superficial de estos sitios, debido a que estas condiciones son características de descargas subterráneas (Cervantes-Martínez, *et al.*, 2015). Sin embargo, dicha influencia desaparece alrededor

de los 200 metros de la línea de costa, lo que es comprobado con los valores de oxígeno encontrados en el sitio más cercano “CHAOM” (Consultar el Anexo 6).

No obstante, el comportamiento de estas variables no fue igual a lo largo de la columna de agua en estos sitios de estudio, puesto que las concentraciones de salinidad, oxígeno disuelto así como la temperatura tendieron a ser mayores en el estrato de fondo, siendo muy parecidas a las concentraciones encontradas en las zonas arrecifales; lo que puede explicarse por la diferencia de densidades entre el agua subterránea y el agua marina, manteniéndose en la superficie aquella de menor densidad (Moore, 1999). Encontrando una estratificación más marcada en la época de secas (marzo 2020), mientras que en la época de nortes (diciembre 2019 y 2020) el comportamiento de las variables fue homogéneo a lo largo de la columna de agua lo que es comprobado con las salinidades mínimas encontradas durante esta época en ambos estratos de la columna de agua en el sitio “CHAO” (superficie:17 ppm, fondo: 16 ppm).

El pH promedio tendió a incrementar durante la época de secas (8.5) y a disminuir en la época de lluvias (8), comportamiento que es coincidente con el de la salinidad. Respecto a este comportamiento, Torres-Alvarado y Calva-Benítez (2012) explican que, a mayor salinidad, el pH se desplaza hacia los carbonatos lo que provoca el incremento de esta variable y por el lado contrario, cuando la salinidad disminuye el pH se ve influenciado por la presencia de bicarbonatos y CO₂, lo que provoca su disminución. A pesar de estas variaciones, el pH promedio presentó características alcalinas en todos los sitios de estudio, encontrándose dentro del rango establecido por los CE-CCA-001/89 y la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Ver Anexo 3).

Los Sólidos Totales Disueltos (TDS) presentaron un comportamiento temporal semejante a la salinidad y el pH demostrando una relación entre estas tres variables. Así mismo, los niveles más bajos se registraron en aquellos puntos de muestreo en donde se identificó la influencia de agua subterránea (“CHAO”, “CAL”), la cual se caracteriza por presentar bajos niveles de TDS mientras que el agua marina tiende a presentar elevados niveles de Sólidos Disueltos por la presencia de sales inorgánicas y materia orgánica (Cruz-Falcón *et al.*, 2017)

Así mismo, la conductividad del agua está mediatizada por variables como las sales presentes, temperatura, gases disueltos, pH, entre otros (Marín-Galvín, 2019), lo que explica el aumento de esta variable durante la época de secas debido a que se encuentran influenciados por el contenido iónico del medio, sin embargo, los valores encontrados disminuyeron durante la época de nortes lo que podría ser explicado por la influencia de una mayor disponibilidad de oxígeno disuelto, relación que se evidencia al comparar las

concentraciones de ambas variables en superficie y fondo durante dicha época (Ver Figura 6 y 12).

En cuanto a los nutrimentos, las concentraciones encontradas de nitratos fueron prácticamente imperceptibles en los muestreos correspondientes a la época de secas y lluvias, pero tendieron a aumentar durante la época de nortes, en donde, de manera general, el estrato de fondo fue el que presentó las concentraciones máximas (promedio de $0.27 \pm 0.20 \mu\text{M}$) en contraste con el estrato superficial (promedio de $0.11 \pm 0.04 \mu\text{M}$). Lo reportado por Giacomán-Vallejos, *et al.* (2020) para zonas costeras de Chelem y Progreso en el estado de Yucatán coincide con lo registrado en este estudio de manera temporal obteniendo las concentraciones mínimas de nitritos ($0 \mu\text{M}$) y nitratos ($0.18 \mu\text{M}$) durante la época de lluvias y concentraciones máximas de nitritos ($0.46 \mu\text{M}$) y nitratos ($12.9 \mu\text{M}$) durante nortes.

De igual forma coincide con las concentraciones encontradas por Carriquiry, *et al.* (2013) dentro del PNAC (nitratos: $0.54 \mu\text{M}$, nitritos $0.09 \mu\text{M}$), así como con Hernández-Terrones, *et al.* (2010) para la costa de Puerto Morelos durante lluvias (nitratos: $0.22 \mu\text{M}$, nitritos: $0.06 \mu\text{M}$) y lo reportado por Vázquez-Delfín, *et al.* (2021) para las costas de Playa del Carmen para la misma época (nitratos: $1.08 \mu\text{M}$, nitritos: $0.46 \mu\text{M}$).

Las concentraciones de nitritos sobrepasaron el límite máximo permitido por los CE-CCA-001/89 principalmente durante la época de nortes, mientras que los nitratos se mantuvieron dentro del límite permitido durante todos los monitoreos realizados, lo que es benéfico para las comunidades coralinas del PNAC. Las bajas concentraciones de nitratos se deben a que el fitoplancton aprovecha rápidamente esta forma nitrogenada, liberando en este proceso más nitrito del que las bacterias nitrificantes son capaces de oxidar durante el día, generando una acumulación de esta forma nitrogenada en el medio marino (French, *et al.*, 1983), lo que podría explicar las concentraciones de nitritos encontradas en este estudio. No obstante, debido a la procedencia natural de los nitritos, las concentraciones reportadas no son perjudiciales para el ecosistema marino.

Vale la pena destacar el comportamiento de los nitritos en el sitio "CHAO" durante diciembre de 2019 (nortes) puesto que presentó una concentración de $0.81 \mu\text{M/L}$ en el estrato superficial; misma concentración que presentó el sitio CHAOM (ubicado a aproximadamente 30 metros del sitio CHAO) en el estrato de fondo, lo que indica la influencia de la descarga subterránea. Sin embargo, como se mostró anteriormente dicha influencia disminuye conforme se aleja de la costa (Ver Anexo 6) y la distribución encontrada podría explicarse por la influencia de los fuertes vientos característicos de la época, por lo que el comportamiento observado en este sitio de estudio no implica

un impacto hacia la zona arrecifal y esto también es comprobado con las concentraciones registradas en el sitio arrecifal más cercano: "CHAC" (Ver Fig. 5,7,9) (Ver Anexo 2)

Las concentraciones registradas de NO_2^- y NO_3^- , junto con el comportamiento descrito sobre la salinidad y oxígeno disuelto del sitio "CHAO", podría sugerir que la descarga de agua en estos sitios es de mayor magnitud durante la época de nortes y Hernández-Terrones, *et al.* (2010), Torres-Alvarado y Calva-Benítez (2012); Giacomán-Vallejos, *et al.* (2020) y Camacho-Cruz (2021) desarrollaron conclusiones similares que podrían sustentar esta hipótesis.

Por su parte, los coliformes totales y fecales se mantuvieron dentro del límite máximo permisible establecido en los CE-CCA-001/89 y la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Consultar Anexo 3); al menos para los meses muestreados representativos de la época de lluvias (julio 2020 y octubre 2021). Las concentraciones encontradas durante esta época coinciden con lo reportado por Giacomán-Vallejos, *et al.* (2020) para las costas de Chelem y Progreso en Yucatán (CT=1-13 UFC/100ml, CF=5 UFC/100ml) durante la época de lluvias, lo que, contrario a lo reportado por Barrera-Escorcia y Namihira-Santillán (2004) para la Laguna Yalkú y la Bahía de Akumal en lluvias (460 NMP/100ml), demuestra que la presencia de estas bacterias el ambiente marino-costero durante la época de lluvias podría ser de menor magnitud como se esperaba en el área de estudio. Así mismo, se observa que las mayores concentraciones las presentaron, nuevamente, aquellos sitios en los que se identificó la influencia de alguna descarga subterránea (como los sitios "CHAO", "CHAOM", "CAL" y "MAR"), lo que podría indicar que el agua descargada tiene influencia antropogénica pero como se demostró anteriormente, su influencia no llega hasta las zonas arrecifales cercanas. Las concentraciones de coliformes totales encontradas en CB (68 UFC/100 ml) y TO (28 UFC/100ml) podrían explicarse por la influencia del bosque de manglar que se encuentra en la costa de estos sitios de monitoreo (condición que podría promover la presencia de heces fecales de las aves que interactúan en el ecosistema marino-costero), así como la profundidad de los sitios de estudio (Consultar en Anexo 2).

Cabe mencionar que, en todos los sitios de estudio, las concentraciones de coliformes totales fueron mayores a la concentración de coliformes fecales. No obstante, debido a que el grupo de coliformes totales está conformado por una amplia diversidad de bacterias (en términos de género y especie) que se encuentran de forma natural en aguas, suelos o vegetación (Larrea-Murrell, *et al.*, 2013), las concentraciones encontradas en este estudio no representan un riesgo para la vida acuática marina del PNAC.

SITIOS DE MONITOREO

De acuerdo con las agrupaciones del dendrograma, así como el análisis de las variables físicas, químicas y bacteriológicas, fue posible seleccionar sitios de monitoreo estratégicos para la evaluación rápida de la calidad de agua del PNAC. Estos pueden consultarse en el Anexo 7.

Los sitios "CCM", "DC", "TOC" y "BC" fueron seleccionados como sitios representativos de los grupos que se conformaron en los análisis de conglomerados.

Es importante mencionar que, de los análisis cluster, fue el de la época de lluvias (Fig.21) el que presentó el número máximo de agrupaciones (3), una de ellas conformada únicamente por el sitio CHAO, aislándolo del resto de los sitios. Lo cual podría explicarse por las diferencias entre las propiedades químicas y físicas del agua descargada de manera subterránea en este sitio y el agua marina de los demás sitios de estudio, acentuadas por las precipitaciones características de la época climática. Debido a lo anterior, se considera de suma importancia monitorear este sitio durante dicha época climática. Así como también el sitio "cielo 2", ya que este fue ubicado en otra agrupación (I) por el dendrograma. Además, su cercanía con la Bocana de la Laguna Colombia lo hace de suma importancia para la evaluación de la calidad de agua del PNAC, ya que suele tener conexión con el ambiente marino durante esta época climática, además de ser un sitio de gran importancia turística.

CONCLUSIONES

- Las variables determinadas en este estudio se encontraron dentro de los rangos y/o límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua durante todos los meses representativos de las épocas climáticas de la región que fueron evaluados, por lo que, junto con las transparencias totales observadas y las bajas concentraciones de nutrientes, las aguas del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel pueden clasificarse de buena calidad. Sin embargo, este trabajo de investigación sugiere un aumento en la temperatura superficial de esta Área Marina Protegida del año 2019 al año 2021, lo que podría tener repercusiones negativas en las comunidades coralinas aquí se encuentran, por lo que se sugiere continuar monitoreando esta variable, así como la salinidad y el pH, ya que los resultados obtenidos demostraron que son principalmente estas variables las que determinan en gran parte el comportamiento de otras, además de ser cruciales para el óptimo desarrollo de los arrecifes coralinos ante el escenario del cambio climático.
- Esta investigación muestra que existe una influencia muy marcada de las condiciones meteorológicas en el comportamiento de las variables físicas y químicas de la zona costera y marina del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, presentando un comportamiento principalmente temporal, puesto que espacialmente no fueron encontradas variaciones diferenciales en cuanto a estratos evaluados de la columna de agua y sitios de estudio.
- La homogeneidad observada a lo largo de la columna de agua y entre sitios de estudio es explicada en gran parte por la circulación del agua que genera el oleaje, el cual es más intenso durante la época de nortes e influye en la distribución espacial de las variables físicas y químicas, lo que queda demostrado en este trabajo de investigación.

-
- Así mismo, otro factor que se debe considerar al evaluar el área es el patrón de corrientes que predomina ya que, al parecer, este mantiene cierta velocidad a lo largo del año, que podría influir en la distribución de las propiedades físicas y químicas del agua
 - Fue posible sugerir sitios de monitoreo con base en la similitud encontrada entre sitios mediante un dendrograma, lo que, junto con las recomendaciones que se plantean a continuación, permitirá conformar un plan de monitoreo que permita evaluar rápidamente la calidad del agua en un Área Natural Protegida de gran importancia económica y biológica como el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, lo que eventualmente se espera que contribuya a orientar la toma de decisiones en cuanto a conservación y manejo.

RECOMENDACIONES FINALES

- Revisando la legislación empleada en este estudio se encontró que no existe un rango o valor límite para la variable de salinidad que permita comparar si las concentraciones obtenidas son adecuadas para la conservación de la vida acuática marina, por lo que a través de este trabajo se sugiere actualizar dichos instrumentos e incluir algún valor de referencia para esta variable.
- Respecto a los nitritos y nitratos, este estudio demostró que analizar dichas formas nitrogenadas con el propósito de encontrar indicios de influencia antropogénica no fue tan informativo como se esperaba debido a que las concentraciones fueron prácticamente imperceptibles, por lo que habría que replantearse el emplear el análisis de estas variables para dicha hipótesis. En cambio, se sugiere analizar $\delta^{15}\text{N}$ en agua y algas, o en su defecto, determinar los grupos de bacterias presentes en componentes ambientales del ecosistema marino como sedimento, algas y agua, lo que podría brindar más información sobre el impacto antropogénico en la zona costera y marina del PNAC.

-
- Para el área de estudio, se sugiere monitorear el estrato medio de la columna de agua durante las tres épocas climáticas, ya que en cada una se observó el aumento de variables específicas, como la temperatura en lluvias, la salinidad en secas y los nutrientes en nortes, por lo que monitorear las tres épocas es fundamental para asegurar que existan las condiciones óptimas para el desarrollo de la vida acuática marina.

Así mismo, esto contribuirá a comprender de manera más detallada el efecto que tienen los procesos hidrodinámicos estacionales que se efectúan en el área del PNAC en la concentración y distribución de variables indicadoras de la calidad de agua ya que mediante este trabajo de investigación se observó una estrecha relación entre estos.

LITERATURA CITADA

- Alvarez-Filip, L. 2015. El arrecife Mesoamericano, un paraíso que pelagra por su belleza. Rev. La jornada ecológica. Número especial 199: 3-4.
- Alvarez-Filip, L., N. Estrada-Saldívar, E. Pérez-Cervantes, A. Molina-Hernández y F. J. González-Barrios. 2019. A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean. PeerJ. 7. e8069: 2-17. doi:10.7717/peerj.8069
- Álvarez-Góngora C.C., J.A. Herrera-Silveira y M. de los A. Liceaga-Correa. (2012). Variaciones estacionales de la estructura comunitaria del fitoplancton (Algae) en zonas de descargas de agua subterránea en la costa norte de la Península de Yucatán. Rev. Biol. Trop. 60 (1): 157-172.
- Athié, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A., & Ochoa, J. (2011). Yucatan Current variability through the Cozumel and Yucatan channels. Ciencias Marinas, 37(4A), 471-492.
- Barrenechea-Martel, A. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. En: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría (Vol.1), p.3-53. Lima, Perú. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Barrera-Escorcía, Guadalupe, & Namihira-Santillán, Patricia Esperanza. (2004). Contaminación microbiológica en la zona costera de Akumal, Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 14(1), 27-35.
- Bastida-Zavala, R, Beltrán, A., Gutiérrez-Aguirre, M. y Fuente-Betancourt, M.G. 2000. Evaluación rápida de los arrecifes parche de Majagual, Quintana Roo, México. Revista de Biología Tropical, Vol. 48 (3), 137-143. Doi:10.15517/RBT.V48I1.18250.
- Burke, L., Reynter, K., Spalding, M. & Perry, A. (2011). Reefs at Risk: Revisited. World Resources Institute. Washington, D.C. 115 pags. ISBN 978-1-56973-762-0
- Calva-Benítez, L. G. 2018. Evaluación ambiental y de macroalgas bioindicadoras de contaminación en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. p. 19.

-
- Camacho-Cruz K. A. (2021). Variación espacio-temporal de la calidad del agua en la zona costera del caribe mexicano: caso de estudio, influencia de una descarga de agua subterránea. Tesis de doctorado, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. México.
- Camargo, J. A. y A. Alonso. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Rev. Ecosistemas*, vol. 16, núm. 2: 1-13. Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España.
- Campbell, J. D., Taylor, M. A., Stephenson, T. S., Watson, R. A., & Whyte, F. S. (2010). Future climate of the Caribbean from a regional climate model. *International Journal of Climatology*, 31(12), 1866–1878. doi:10.1002/joc.2200
- Carrillo, L. E. 2008. Informe técnico Final CNA-2004-C02-3 “Estudio de la calidad del agua y dispersión de contaminantes en la zona costera de la Riviera Maya (Playa del Carmen, Quintana Roo)”. Colegio de la Frontera Sur. Quintana Roo. México. p. 58-59.
- Carrillo, L. E. 2010. Informe Final: Calidad de Agua en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. Colegio de la Frontera Sur. Quintana Roo. México. p. 12-14.
- Carrillo, L., Johns, E. M., Smith, R. H., Lamkin, J. T., & Largier, J. L. (2015). Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research*, 109, 164–176. doi:10.1016/j.csr.2015.09.014
- Carrquiry, J. D., L. M. Barranco-Servin, J. A. Villaescusa, V. F. Camacho-Ibar, H. Reyes-Bonillay A. L. Cupul-Magaña. 2013. Conservation and Sustainability of Mexican Caribbean Coral Reefs and the Threats of a Human-Induced Phase-Shift. *Environmental Change and Sustainability*. Cap. 2. p. 33. doi: 10.5772/54339
- Cashman A. (2014). Water security and services in the Caribbean. *Water* 6: 1187–1203.
- Castro-Borges y Mendoza-Rangel J.M. (2010). Influence of climate change on concrete durability in Yucatan Peninsula. *Corros Eng Sci Technol* 45: 61–69
- Cervantes-Martínez A. y M. A. Gutiérrez Aguirre. 2015. Physicochemistry and zooplankton of two karstic sinkholes in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of Limnology*, Vol.74: 1-10.

Cervantes-Martínez A., M. A. Gutiérrez Aguirre y T. Álvarez- Legorreta. 2015. Indicadores de calidad del agua en lagunas insulares costeras con influencia turística: Cozumel e Isla Mujeres, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, Vol.18: 60-83.

Cervantes-Martínez, A. 2007. El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán: realidades y retos. *Teoría y Praxis*. 3: 163-172.

Collantes-Chávez-Costa, A., E. Alanís-Rodríguez, O. Yam-Uicab, C. López-Contreras, T. Sarmiento-Muñoz y J. L. Tapia-Muñoz. 2019. Composición, estructura y diversidad de la vegetación costera del Noreste de Cozumel, México. *Botanical Sciences* 97 (2): 135- 147. doi: 10.17129/botsci.2044

Comisión Nacional del Agua. 2020. Registros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas. CONAGUA. Fecha de consulta: julio 2020. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>

CONANP. 2007. Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del Área de Protección de Flora y Fauna Isla de Cozumel, Quintana Roo, México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 243 p.

CONANP. 2019. Plan de Acción del Síndrome Blanco en Arrecifes del Caribe Mexicano, México, Proyecto Manejo Integrado “de la Cuenca al Arrecife” de la Ecorregión del Arrecife Mesoamericano- MAR2R/CCAD. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 48 p. Recuperado de: <https://www.conanp.gob.mx/cambioclimatico/PlanDeAccionSindromeBlanco.pdf>

CONANP-GIZ. 2017. Valoración de los Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y Área de Protección de Flora y Fauna Isla Cozumel. Ciudad de México. Proyecto de Valoración de Servicios Ecosistémicos de Áreas Naturales Protegidas Federales de México: una herramienta innovadora para el financiamiento de biodiversidad y cambio climático (EcoValor MX). Ciudad de México, 2017. 90 p.

Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M., & Ocampo-Torres, F. J. (2007). On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*, 26(1), 149–163. doi:10.1007/s00338-006-0175-9

Cortés, I. y Silva, A. 2011. “Armonización de criterios de muestreo y análisis tendientes a la modelación de la calidad ambiental de estuarios y bahías”. Centro Nacional del Medio Ambiente. Informe consolidado. Universidad de Chile, Santiago de Chile. 40 p.

-
- Cruz-Falcón, Arturo, Troyo-Diéguéz, Enrique, Murillo-Jiménez, Janette M., García-Hernández, J.L. y Murillo-Amador, B. 2017. Familias de agua subterránea y distribución de sólidos totales disueltos en el acuífero de La Paz, Baja California Sur, México. *Terra Latinoamericana* 36: 39-48.
- de la Lanza-Espino G., Hernández-Pulido S., Penié-Rodríguez I., Gómez-Rojas J.C. (2006). Calidad del agua de las playas del municipio de Solidaridad. *Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad* 2:25-34 pp. Universidad del Caribe. ISSN 1870-1515
- Estrada-Saldívar, N., B. A. Quiroga-García, E. Pérez-Cervantes, O. O. Rivera-Garibay y L. Alvarez-Filip. 2021. Effects of the Stony Coral Tissue Loss Disease Outbreak on Coral Communities and the Benthic Composition of Cozumel Reefs. *Front. Mar. Sci.* 8: 1-13 doi: 10.3389/fmars.2021.632777
- Frausto-Martínez, O., N. A. Zapi-Salazar y O. Colin Olivares. 2018. Identification of Karst Forms Using LiDAR Technology: Cozumel Island, Mexico. Cap. 3. En: Abdalla, Rifaat (editor). *Trends in Geomatics: An Earth Science Perspective* (p. 33-44). Londres, Inglaterra. IntechOpen. ISBN 978-1-78985-436-7
- French, D. P., Furnas, M. J., & Smayda, T. J. (1983). Diel changes in nitrite concentration in the chlorophyll maximum in the Gulf of Mexico. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 30(7), 707–722. doi:10.1016/0198-0149(83)90018-3
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie Libros No 6. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 90 p. ISBN 970-32-1010-4
- Giácoman-Vallejos, G., Pone-Caballero, C., Méndes-Novelo, R. y Vidal, G. (2020). Monitoreo de calidad del agua de mar en la región costera del municipio de Progreso, Yucatán. En: Pérez-Morales, A., Aké-Castillo, J. A. y Poot-Delgado, C. A. 2020. *Investigaciones marinas en el Golfo de México y mar Caribe mexicano*. Universidad de Colima. México. 560 p. ISBN: 978-607-8549-81-8
- Gobler, J. C. y G. E. Boneillo. 2003. Impacts of anthropogenically influenced groundwater seepage on water chemistry and phytoplankton dynamics within a coastal marine system. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 255: 101-114.

-
- Healthy Reefs Organization: M. McField, P. Kramer, A. Giró Petersen, M. Soto, I. Drysdale, N. Craig y M. Rueda Flores. 2020. Mesoamerican Reef Report Card. Healthy Reefs Organization. 36 p. Recuperado de: https://www.healthyreefs.org/cms/wpcontent/uploads/2020/02/SmithReefs_RC19_Pages_BIL_f_E_LO.pdf
- Hernández-Flores G, Gutiérrez-Aguirre MA, Cervantes-Martínez A, Marín-Celestino AE. 2021. Historical analysis of a karst aquifer: recharge, water extraction, and consumption dynamics on a tourist island (Cozumel, Mexico). *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 57: 16
- Hernández-Moreno, R. G. 2015. Informe final del protocolo de monitoreo de arrecifes coralinos en el complejo Cozumel: P. N. Arrecifes de Cozumel y A.P.F.F. Isla Cozumel. PROMOB I N° 9.1. Ejercicio fiscal 2015. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz. B.C.S. México. 46 p.
- Hernández-Terrones, L. M., Null, K. A., Ortega-Camacho, D., & Paytan, A. (2015). Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem. *Continental Shelf Research*, 102, 62–72. doi:10.1016/j.csr.2015.04.015
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., & Monroy-Ríos, E. (2010). Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1-4), 517–528. doi:10.1007/s11270-010-0664-x
- Herrera-Silveira, J. A. y Morales-Ojeda, S. M. 2009. Evaluation of the health status of a coastalecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin* 59: 72–86. doi:10.1016/j.marpolbul.2008.11.017
- Herrera-Silveira, J. A., F. A. Comin, N. Aranda-Cirerol, L. Troccoli y L. Capurro. 2004. Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: management implications. *Ocean and Coastal Management* 47: 625-639.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 839. doi:10.1071/mf99078

-
- INE. 1998. Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo. Instituto Nacional de Ecología. 165 p.
- INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/poblacion/>
- Kambesis, P.N. y J.G. Coke. 2013. Overview of the controls on eogenetic cave and karst development in Quintana Roo, Mexico. En: Lace M., Mylroie J. (eds). Coastal Karst Landforms. Coastal Research Library, vol 5. Springer, Dordrecht. p. 347-373. doi:10.1007/978-94-007-5016-6_16
- Koch, C., O. Frausto, S. Giese, M. Schirmer, y T. Steenbeck. (2016). Impact on groundwater of a karstic aquifer in the informal settlement "Las Fincas" on Cozumel Island, Mexico. WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol. 203: 147-158. doi:10.2495/EID160141.
- Larrea-Murrell, J. A., Rojas-Badía, M. M., Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. M. y Heydrich-Pérez, M. 2013. Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, vol. 44, núm. 3, 2013, pp. 24-34. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Lesser, H., J. Azpeitia y J. M. Lesser. 1978. Geohidrología de la Isla de Cozumel, Quintana Roo. Recursos Hidráulicos 7: 32-49.
- Loreto Viruel, R. M., G. García Beltrán y J. Bezaury Cree. 2017. Caracterización de Arrecifes Insulares de Quintana Roo, México. Amigos de Sian Ka'an. 2017. Serie de documentos No. 7: 11- 40.
- Marín-Galvín, Rafael. 2019. Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y control de calidad de aguas. Díaz de Santos. Segunda Edición
- Márquez-García, A. Z., Pérez-Aguilar, V., Márquez-García, E. y Florez-Erazo, Z. 2006. Cambios en el tamaño de los sedimentos de las playas del litoral del municipio de Solidaridad por efectos climáticos estacionales. Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad 2:59-68. Universidad del Caribe. ISSN 1870-1515
- Marshall, P., y H. Schuttenberg, 2006. The Impacts of Climate Change on the Coral Reefs of the Caribbean. In: Reef Managers guide to coral bleaching. IUCN, Townsville,

Australia. 163 p. ISBN 1-876945-40-0

Moore, W.S. (1999). The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Marine Chemistry* 65, 111-125 pp.

Morales-Ojeda, S. M. y J. A., Herrera-Silveira, 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin* 59: 72–86. doi:10.1016/j.marpolbul.2008.11.017

Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas- Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- método de prueba (cancelaa NMX-AA-079-1986). Secretaria de economía. México.

Norma Mexicana NMX-AA-102-1987. (1992). “NMX-AA-102-1987, para la detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración en membrana”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de noviembre de 1992. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>

Orellana, R., F. Nava y C. Espadas. 2007. El clima de Cozumel y la Riviera Maya. Cap 1. En: Mejía-Ortíz, L. M. (Editor). Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel (p. 23-32). Ciudad de México. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés. ISBN-978-968-7864-95-2.

Ortiz-Cajica, A. K., G. Hinojosa-Arango, J.R. Garza-Pérez, y R. Rioja-Nieto. 2020. Seascape metrics, spatio-temporal change, and intensity of use for the spatial conservation prioritization of a Caribbean marine protected area. *Ocean and Coastal Management* 194: 1-10.

Palafox, Muñoz, A. y V. L. Zizumbo. 2009. Distribución territorial y turismo en Cozumel. *Gest. tur.*, N° 11: 69-88.

Pérez-Cervantes, E., E. Navarro-Espinoza, N. Estrada-Saldívar, N. Espinosa-Andrade, S. Melo-Merino, M. Rivas-Soto y L. Alvarez-Filip. 2018. Estado de conservación de los arrecifesde coral de la Península de Yucatán. Resumen Ejecutivo. Barcolab. 22 p. Recuperado de: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2018/11/73265866-73265866-arrecifes-reporte.pdf>

-
- Ramos-Ortega, L. M., Vidal, L. A., V. Q. S. & Saavedra-Díaz, L. 2008. Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. *Acta biol. Colomb.*, Vol. 13 No. 3. 87 – 98.
- Reyes-Bonilla, H., L. E. Escobosa-González y P. A. Álvarez del Castillo. 2010. Informe final “Monitoreo complementario de algas, invertebrados y peces en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel: Primera Etapa” PROYECTO FB1168/DM007/06. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. 68 p.
- Rioja-Nieto, R. y L. Alvarez-Filip. 2018. Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 140: 616-625. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.005>
- Sánchez y Pinto, I. A., A. Cervantes-Martínez, R. A. González Herrera, M E. Vázquez Campos y M. A. Gutiérrez-Aguirre. 2015. Evidencia de flujo preferencial al mar, del Cenote Caletita, en Cozumel, México. *Ingeniería*, vol. 19, núm. 1, p. 1-12. Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México.
- Sánchez, R. M., M. Castro-González y Z. Sven. 2011. Efecto del enriquecimiento por nitrógeno y fósforo en los cambios netos de nutrientes y producción fitoplanctónica en la desembocadura del río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35 (134), 35-43.
- Schmitter-Soto J. J., F. A. Comín, E. Escobar-Briones, J. Herrera-Silveira, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, V. Díaz-Arce, L. E. Marín y B. Steinich. 2002. Hydrogeochemical and Biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia* 467: 215-228.
- Schmitter-Soto, J. J. 2007. Peces dulceacuícolas. Cap. 15. En: Mejía-Ortíz, L. M. (Editor). *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel* (p. 257-264). Ciudad de México. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés. ISBN-978-968-7864-95-2.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. *Diario Oficial de la Federación*. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de

contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-ecol-1996.pdf>

- Stephenson, T.S., Vincent, L.A., Allen, T., Van Meerbeck, C.J., McLean, N., Peterson, P.C., Taylor, M.A., Aaron-Morrison, A.P., Auguste, T., Bernard, D., Boekhoudt, J.R., Blenman, R.C., Braithwaite, G.C., Brown, G., Butler, M., Cumberbatch, C.J.M., Etienne-Leblanc, S., Lake, D.E., Martin, D.E., McDonald, J.L., Ozoria Zaruela, M., Porter, A.O., Santana Ramirez, M., Tamar, G.A., Roberts, B.A., Sallons Mitro, S., Shaw, A., Spence, J.M., Winter, A. and Trotman, A.R. (2014) Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961-2010. *International Journal of Climatology*, 34(9), 2957–2971. <https://doi.org/10.1002/joc.3889>
- Torres Alvarado, M. R. y L. G. Calva Benítez. 2012. Nutrientes en arrecifes de coral. Un caso de estudio. *Rev. ContactoS*. Edición 85: 42–50. México.
- Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Salazar-Garibay, A., Serviere-Zaragoza, E., Méndez-Rodríguez, L. C., & Robledo, D. (2021). Species composition and chemical characterization of Sargassum influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast. *Science of The Total Environment*, 795, 148852. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148852
- Vázquez-Lule, A. D., J. R. Díaz-Gallegos y M. F. Adame. 2009. Caracterización del sitio de manglar Cozumel, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO. Ciudad de México, México.
- Vidal-Zepeda, R. (2005). Las regiones climáticas de México 1.2.2: Península de Yucatán. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: UNAM 970-32-2394-X
- Villanueva-Fragoso, S., G. Ponce-Vélez, C. García, y J. Presa, 2010. Vulnerabilidad de la zona costera. *Ecosistemas costeros*, p. 37-72. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. Semarnat-ine, unam-icmyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

Yañez-Mendoza, G., E. Zarza-González y L. M. Mejía-Ortíz. 2007. Sistemas Anquihalinos. Cap. 4. En: Mejía-Ortíz, L. M. (Editor). Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel (p. 49- 61). Ciudad de México, México. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés. ISBN- 978-968-7864-95-2.

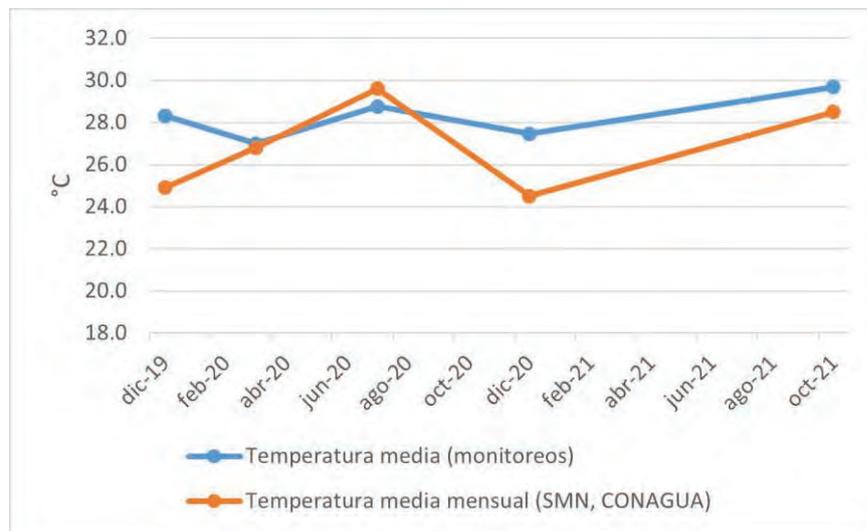
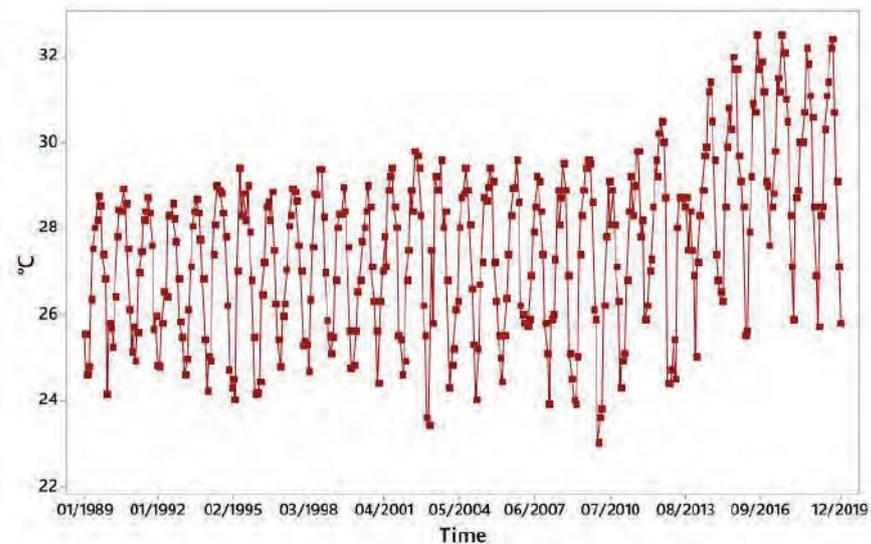
ANEXOS
Anexo 1. Coordenadas de los sitios de estudio

ID	Nombre de sitio	- x	y
Aura	Hotel Aura	-87.0171	20.4097
BC	Bocana Caleta	-86.9817	20.4671
CAL	Caleta	-86.9805	20.4660
CB	Colombia Bocana	-87.0147	20.3038
CC	Colombia Cordillera	-87.0272	20.3275
CCM	Colombia Cordillera Media	-87.02387	20.3189
CHAC	Chankanaab coordillera	-87.0043	20.4387
CHAO	Chankanaab ojo de agua	-86.9968	20.4408
CHAO M	Chankanaab Medio	-86.9978	20.4420
Cielo 1	"El Cielo"	-87.0158	20.3051
Cielo 2	"El Cielo"	-87.0169	20.3094
Cielo 3	"El Cielo"	-87.0172	20.3161
DC	Dalila cordillera	-87.0291	20.3657
DEL	Delfinario	-86.9948	20.4448
IB	Hotel Iberostar	-87.0249	20.3711
MAR	Marina Fonatur	-86.9776	20.4689
PAC	Paraíso cordillera	-86.9815	20.4717
PC	Paso del cedral	-87.0291	20.3739
PD	Palancar Dalila cordillera	-87.0256	20.3543
PDM	Palancar Dalila Medio	-87.0285	20.3567
PDN	Palancar Dalila Norte	-87.0257	20.3563
PSB	Punta Sur Bolones	-87.0198	20.3004
Secrets	Hotel Secrets	-87.0220	20.4073
TO	Tormentos	-87.0080	20.4277
TOC	Tormentos Cordillera	-87.0117	20.4318
YB	Yucab Cordillera	-87.0170	20.4223

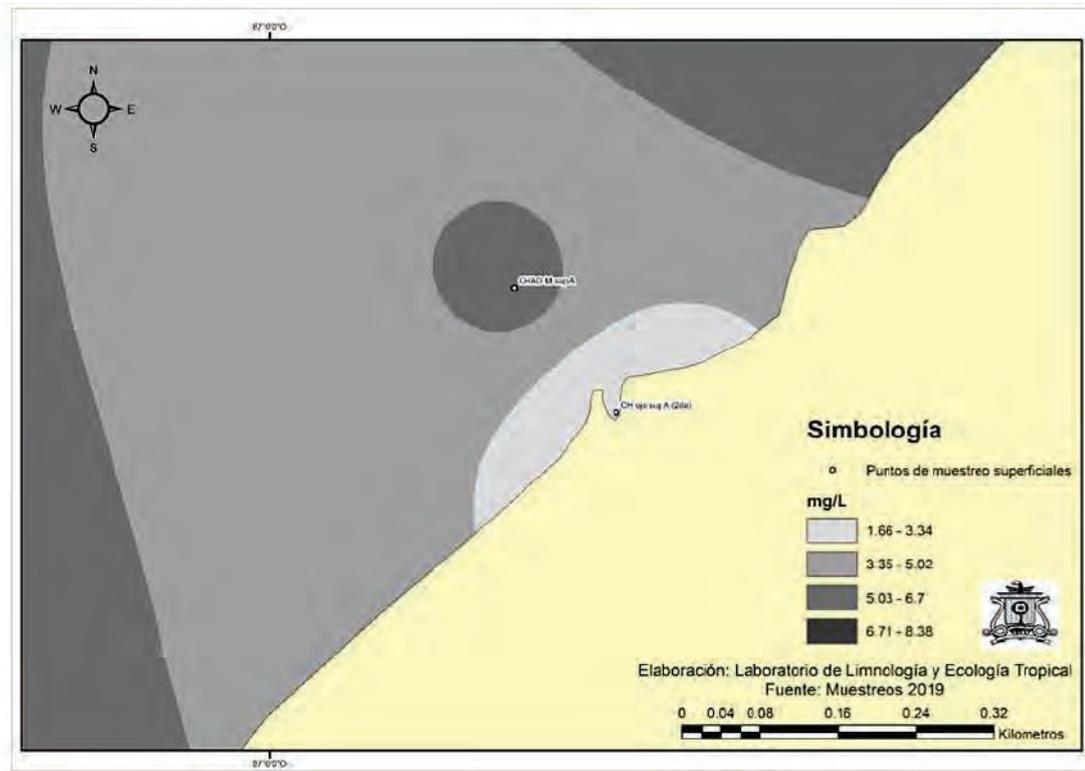
Anexo 3. Límites establecidos por la NOM-001- SEMARNAT-1996 y los CE-CCA-001/89.

Variable	CE-CCA-001/89	NOM-001-SEMARNAT-1996
Oxígeno disuelto	5.0 mg/L (límite mínimo para protección de vida acuática en aguas costeras)	N/A
Salinidad (ppm)	N/A	N/A
Temperatura (° C)	Condiciones naturales +1.5	35
pH	sin variaciones mayores a 0.2 tomando como base el valor natural estacional	6-9
Conductividad (mS/cm)	N/A	N/A
Sólidos Totales Disueltos	N/A	N/A
Nitritos	0.002 mg/L (límite máx. permisible para protección de vida acuática en aguas costeras) = 0.14 µM	N/A
Nitratos	0.04 mg/L (límite máx. permisible para protección de vida acuática en aguas costeras) = 2.85 µM	N/A
Coliformes Totales	70 NMP/100 (límite máx. permisible para acuicultura)	N/A
Coliformes Fecales	200 NMP/100 ml (límite máx. permisible para uso recreativo con contacto primario)	200 NMP/100 ml (promedio diario para aguas vertidas)

N/A= No Aplica

Anexo 4. Relación de la temperatura ambiente y la temperatura superficial del PNAC.**Anexo 5.** Temperatura media mensual registrada en Cozumel de 1989 a 2019. Recuperado de: Hernández-Flores, *et al.*, 2021.

Anexo 6. Concentración de oxígeno disuelto en el área de influencia del Ojo de agua del sistema Chankanaab durante el monitoreo de 2019. Esta condición se observó durante todos los monitoreos realizados. Se observa en el mapa el sitio “CHAO” cercano a la costa y el sitio “CHAOM”, mar adentro.



Anexo 7. Propuesta de sitios de monitoreo para la evaluación rápida de la calidad del agua del PNAC.