



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad – Iztapalapa
División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Posgrado en Energía y Medio Ambiente

TÍTULO DE LA TESIS:

" Evaluación de sitios con restauración activa de arrecifes en la península de Yucatán "

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**Maestra en Ciencias
(Energía y Medio Ambiente)**

TESIS QUE PRESENTA

Gabriela Alejandra Vargas Cruz

MATRÍCULA: 2181800397

CORREO ELECTRÓNICO PERSONAL:

alejandra.vargas.cruz@gmail.com

DIRECTORA: Dra. Patricia Ramírez Romero

JURADO:

Presidenta: Dra. Gabriela Georgina Nava Martínez

Secretario: Dr. Juan Miguel Gómez Bernal

Vocal: Dr. Guadalupe Reyes Victoria

FECHA: Iztapalapa, Ciudad de México, 03 de mayo 2022



**LABORATORIO DE
ECOTOXICOLOGÍA**



Agradecimientos

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad de CONACyT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el Convenio 003893, por lo que agradezco la beca recibida, para el desarrollo de esta tesis.

Gracias al Comité del Posgrado en Energía y Medio Ambiente, por el apoyo en la realización de este trabajo de investigación para la generación de esta tesis.

Gracias a la Dra. Patricia Ramírez por apoyarme en todo momento y brindarme todo su conocimiento y sobre todo por ser un extraordinario ser humano y una excelente amiga por eso y más mil gracias.

Gracias a Gabriela Nava por su apoyo incondicional para poder llevar a cabo la parte práctica del proyecto y todas las facilidades que me brindo para concluir la tesis.

Gracias a Oceanus A.C. y cada uno de los integrantes de este gran equipo por brindarme todo el apoyo y conocimiento a lo largo de mi estancia en el caribe.

Agradecimientos Personales.

Quiero agradecer infinitamente el apoyo y el amor incondicional a mi mamá, Amada Vargas, que siempre estuvo para apoyarme y alentarme. “Porque me diste la vida y me entregaste tu amor, porque velaste mis sueños y modelaste mi corazón, porque escuchaste mis dudas y tu consejo me hizo mejor, porque hoy lucho y trabajo y tu nombre me da valor”.

A mis hermanos Elizabeth y Francisco por su apoyo incondicional y siempre estar a mi lado, por sus palabras y sabios consejos tan certeros.

A Itzel Tort por estar a mi lado durante todo este proceso e impulsarme a seguir adelante y nunca desertar, y sin duda por sus hermosas palabras cariño y motivación.

Comité Tutorial.

Directora

Dra. Patricia Ramírez Romero

Departamento de Hidrobiología

División de Ciencias Biológicas y de la Salud

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa

Asesora

Dra. Gabriela Georgina Nava Martínez

Directora ejecutiva de OCEANUS, A.C.

El jurado designado por la
Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente
de la Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó **Gabriela Alejandra Vargas
Cruz**

El día

Iztapalapa, Ciudad de México, 03 de mayo 2022

Miembros del jurado.

M. en C. Gabriela Georgina Nava Martínez

Presidente.

Dr. Juan Miguel Gómez Bernal

Secretario.

Dr. Guadalupe Reyes Victoria

Vocal.

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. OBJETIVO GENERAL	8
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
6. ÁREA DE ESTUDIO	9
7. METODOLOGÍA	11
7.1 METODOLOGÍA DE CAMPO	12
7.2 METODOLOGÍA DE LABORATORIO	18
8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
9. RESULTADOS Y DISCUSION	23
9.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE LAS ZONAS DE XCALAK NORTE Y LA POZA	23
9.2 DESCRIPCIÓN DE PARAMETROS FISICOQUIMICOS POR MES DE MUESTREO	25
9.2.1 TEMPERATURA	25
9.2.2 SALINIDAD	26
9.2.3 pH	27
9.2.4 OXÍGENO DISUELTO	28
9.2.5 NITRATOS	29
9.2.6 NITRITOS	30
9.2.7 AMONIO	31
9.2.8 ORTOFOSFATOS	32
9.3 MORTANDAD	33
9.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	36
9.5 FUNCIONES DE PORCENTAJE DE MORTANDAD EN XCALAK NORTE Y LA POZA	42
10. CONCLUSIONES	45
11. RECOMENDACIONES	45
12. BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Distribución de arrecifes de coral en México. Tomado de Lara. et al 2008	4
Figura 2. Ubicación del Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Quintana Roo. (Tomado de: Programa de Manejo Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. CONANP)	9
Figura 3. Diagrama metodología	11
Figura 4. Área de Xcalak Norte y sitios de muestreo ubicados en la comunidad de Xcalak, México (Tomado de: Google Earth). ...	12
Figura 5. Área de La Poza y sitios de muestreo ubicados en la comunidad de Xcalak, México (Tomado de: Google Earth).	12
Figura 6. Toma de muestras in situ en el sitio	13
Figura 7. Equipo de medición de parámetros fisicoquímico	13
Figura 8. Estructuras del área de restauración Xcalak Norte de la especie <i>Acropora cervicornis</i>	14
Figura 9. Estructuras del área de restauración La Poza de la especie <i>Acropora cervicornis</i>	14
Figura 10. Hoja de datos para colonias de coral	15
Figura 11. FRAGMENTO de coral en buen estado de salud, de la especie <i>Acropora cervicornis</i>	16
Figura 12. Fragmento de coral con muerte antigua, especie <i>Acropora cervicornis</i>	16
Figura 13. Fragmento de coral con muerte reciente, especie <i>Acropora cervicornis</i>	17
Figura 14. Colorímetro utilizado para la medición de nutrientes.	18
Figura 15. Muestras de amonio.....	18
Figura 16. Muestras de fosfatos.	19
Figura 17. Muestras de nitratos.	19
Figura 18. Muestras de nitritos.	20
Figura 19. Ajuste de mortandad global por interpolación para obtener un polinomio, Xcalak Norte.....	21
Figura 20. AJUSTE DE MORTANDAD GLOBAL POR INTERPOLACIÓN PARA OBTENER UN POLINOMIO, la Poza	22
Figura 21. Temperatura (°C) agua de fondo Xcalak Norte.....	25
Figura 22. Temperatura (°C) agua de fondo la Poza 2019.....	25
Figura 23. Salinidad (UPS) agua de fondo Xcalak Norte 2019.....	26
Figura 24. Salinidad (UPS) agua de fondo la Poza 2019.	26
Figura 25. Potencial de hidrogeno (pH) agua de fondo Xcalak Norte 2019.	27
Figura 26. Potencial de hidrogeno (pH) agua de fondo la Poza 2019.	27
Figura 27. Oxígeno Disuelto (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.	28
Figura 28. Oxígeno Disuelto (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.	28
Figura 29. Nitratos (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.....	29
Figura 30. Nitratos (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.....	29
Figura 31. Nitritos (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.....	30
Figura 32. Nitritos (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.....	30
Figura 33. Amonio (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.	31
Figura 34. Amonio (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.	31

Figura 35. Ortofosfatos (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019. 32

Figura 36. Ortofosfatos (mg/l) agua de fondo la Poza 2019. 32

Figura 37. Gráfico de sedimentación del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss) 38

Figura 38. Gráfico de sedimentación del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)..... 38

Figura 39. Gráfico de componentes del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss) 41

Figura 40. Gráfico de componentes del sitio la Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss). 41

Figura 41. Mortandad global por interpolación. Del sitio de Xcalak Norte. 43

Figura 42. Mortandad global por interpolación. Del sitio de la Poza. 44

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Interpolación global de la mortandad	21
Tabla 2. Interpolación global de la mortandad	22
Tabla 3. Promedio, mínimos y máximos de los parámetros fisicoquímicos del agua de Xcalak Norte y La Poza de agosto a diciembre 2019.....	23
Tabla 4. Correlación de los parámetros tomados en cada sitio de muestreo de superficie y fondo.	23
Tabla 5. Comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo de Xcalak Norte con los Valores Máximos permisibles (VMP) ¹ SEMARNAT, 2019; ² Hernández, 2010; ³ LFD, 2019	24
Tabla 6. Comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo de La Poza con los Valores Máximos Permisibles (VMP) ¹ SEMARNAT, 2019; ² Hernández, 2010; ³ LFD, 2019	24
Tabla 7. Análisis de comunalidades del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)	36
Tabla 8. Análisis de comunalidades del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)	36
Tabla 9. Análisis varianza total explicada del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)	37
Tabla 10. Análisis varianza total explicada del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)	37
Tabla 11. Matriz de componentes del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)	39
Tabla 12. Matriz de componentes del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)	39
Tabla 13. Interpolación global de la mortandad	42
Tabla 14. Interpolación global de la mortandad	43

1. RESUMEN

El presente trabajo tuvo como propósito evaluar la relación que existe entre los parámetros fisicoquímicos y nutrientes con la mortandad de fragmentos de coral de la especie *Acropora cervicornis*, en dos zonas de restauración del sistema Arrecifal de Xcalak. Se llevaron a cabo monitoreos mensuales para obtener parámetros fisicoquímicos (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, amonio y ortofosfatos), al igual que la sobrevivencia de los fragmentos de coral. Los parámetros fisicoquímicos se tomaron in situ. Por otra parte, el análisis de los nutrientes se llevó a cabo en el laboratorio, con técnicas espectrofotométricas. La mortandad de los fragmentos de coral se obtuvo con un marcaje en cada estructura de las zonas de restauración. Mediante análisis de correlación y análisis de componentes principales, se observó que los parámetros con mayor influencia en la mortandad fueron la temperatura, salinidad, nitritos, nitratos, amonio y ortofosfatos; los cuales rebasaron su valor máximo permisible. En ambos sitios la mortalidad se fue incrementando cada mes, alcanzando 30% en La Poza y casi el 100% en Xcalak Norte. Se concluyó que la temperatura, la salinidad, el amonio y los ortofosfatos son factores de estrés importantes en ambos sitios para las colonias de coral. En el caso de la temperatura y la salinidad es difícil que se pueda hacer algo al respecto dado el panorama de cambio climático mundial. En el caso de los nitratos, ortofosfatos y amonio será necesario realizar estudios para identificar las fuentes de éstos y proponer las medidas de mitigación pertinentes.

2. ABSTRACT

The objective of the present work was to evaluate the relationship among physicochemical parameters, nutrients and mortality of the coral fragments of the *Acropora cervicornis* species in two restoration zones of the Xcalak Reef system. Monthly samplings were carried out to obtain temperature, salinity, pH, dissolved oxygen, nitrites, nitrates, ammonia and orthophosphates, as well as survival of the coral fragments. Physicochemical parameters were obtained in situ. Nutrients were analyzed in the laboratory with spectrophotometric techniques. Mortality of the coral fragments was evaluated through marking each structure in the restoration zones. Through correlation analysis and principal component analysis we observed that the parameters more related with mortality were temperature, salinity, nitrites, nitrates, ammonia and orthophosphates, all of which were above their quality criteria. In both sites mortality increased with time, reaching 30 % in La Poza and almost 100% in Xcalak Norte. We concluded that temperature, salinity, ammonia and orthophosphates are important stress factors for the coral colonies in both sites. Temperature and salinity are difficult to have an influence on given today's global climate change panorama. In the case of nitrates, orthophosphates and ammonia, it will be necessary to look for their sources and to propose the pertinent mitigation measures.

3. INTRODUCCIÓN

Uno de los ecosistemas más importantes que existen hoy en día y que se encuentran en la mira de todos, son los arrecifes de coral ya que estos ecosistemas traen consigo muchos beneficios tanto para los humanos como para los organismos marinos, los arrecifes de coral son estructuras rocosas que se encuentran conformados en gran parte por los esqueletos de carbonato de calcio de los corales, estos a su vez se encuentran formados por varias colonias de corales que son pequeños pólipos que hacen una gran simbiosis con un alga llamada zooxantela, el cual los dos resultan realmente beneficiados obteniendo, alimento, protección, nutrientes, entre otras. Estos grandes arrecifes los podemos encontrar en las zonas tropicales y subtropicales de todo el mundo.

Aunque su superficie no es mayor al 1 % del océano se estima que ahí se encuentra el 35% de toda la biodiversidad marina que existe y el 25% aproximadamente de los peces marinos registrados (Pizarro et al., 2014). Debido a esta gran biodiversidad ha despertado el interés de muchos estudios para poder documentar la gran importancia que tiene cada una de las comunidades de organismos que habitan dentro del arrecife de coral y así poder tener bioindicadores que les permita detectar alguna alteración que haya dentro del mismo y poder tomar alguna acción al respecto.

No todos los corales pueden formar arrecifes ya que estos se encuentran separados en dos grandes grupos; los corales ahermáticos o mejor conocidos como corales blandos, estos son organismos sésiles que carecen de esqueleto de carbonato de calcio lo cual no les permite formar parte de la construcción de arrecifes pero habitan en ellos, y también tenemos los corales hermatípicos también conocidos como corales pétreos o duros, estos en comparación con los corales blandos son capaces de construir estructuras que forman parte de un arrecife coralino. Gracias a los registros obtenidos de la tasa de crecimiento alta que tienen algunas especies de corales duros como son: *Acropora palmata*, *A. cervicornis* y *Montastrea anularis*, son consideradas una de las principales especies constructoras de arrecifes en la región del Caribe (Gutiérrez, 2016)

Si bien los corales pétreos son de suma importancia ya que son los formadores de arrecifes de coral, hay una familia que es considerada una, si no es que la más importante por ser una de las familias más grandes y con mayor contribución en la formación de arrecifes, es la familia Acroporidae que habita en todos los océanos del mundo. Encontrando en distintos sitios y cada especie predominando en distintas zonas como lo es; *A. palmata* en la subzona de la Transición Barlovento, pero también la podemos encontrar en la Rompiente y en el arrecife posterior; mientras que *A. cervicornis* predomina más en la parte media de la pendiente (subzona del Arrecife Frontal Interior) (semarnat, 2018)

En México, se cuenta con dos especies de *Acropora*: el coral cuerno de alce, *A. palmata*, y el coral cuerno de ciervo, *A. cervicornis* (Bonilla, 2005). La distribución de estas dos especies la podemos regionalizar en tres sitios: 1) La costa del Pacífico incluye: los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Colima, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. 2) Costas de Veracruz y Campeche, por último 3) Costa oriental de la Península de Yucatán, corresponde:

desde isla Contoy, Xcalak, hasta Banco Chinchorro. En esta última zona, se encuentra una parte de la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, el “arrecife mesoamericano”. El área estimada que ocupan los arrecifes en el país es de aproximadamente cerca de 1,780 kilómetros cuadrados. Comúnmente, los arrecifes pueden existir desde a unos pocos centímetros de la superficie hasta 50 metros de profundidad. En el pacífico podemos encontrar sistemas arrecifales de gran importancia que son; Parque Nacional Cabo Pulmo, Bahía de La Paz y Los Frailes. En el Golfo de México también se encuentran grandes arrecifes de suma importancia gracias a su nivel estructural e importancia económica y ecología que tienen, los cuales son: el Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, Banco de Campeche y Parque Nacional Arrecife Alacranes en Yucatán. En el mar Caribe también podemos encontrar arrecifes de gran importancia que incluyen: Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, Sistema Arrecifal Mesoamericano, Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro, Parque Nacional Arrecifes de Xcalak y la Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka’an. Debido a la importancia y el gran impacto que estos arrecifes tienen en la vida marina y en la población mexicana las leyes mexicanas protegen estos grandes ecosistemas, teniendo leyes como son: La Ley General de Equilibrio y Protección al Ambiente (LEGEEPA), la NOM-059-SEMARNAT-2010 (enlista a las especies de flora y fauna en alguna condición de riesgo) y la NOM-022-SEMARNAT-2003 (establece la preservación, conservación, y restauración, de los humedales costeros) (Padilla. 2009, CONABIO. 2020).

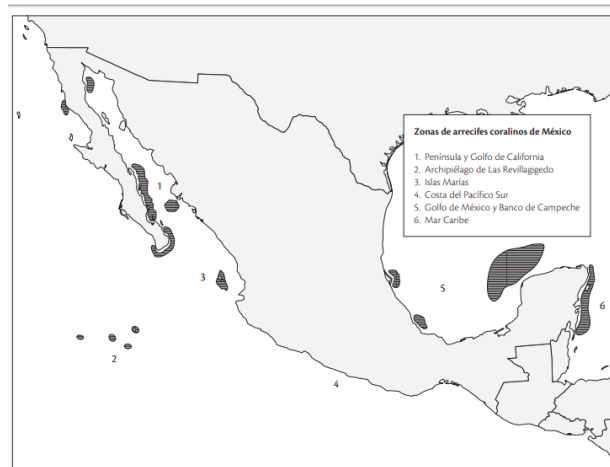


Figura 1. Distribución de arrecifes de coral en México. Tomado de Lara. et al 2008

Desafortunadamente la vulnerabilidad de los ecosistemas del Caribe Mexicano hoy en día se encuentra amenazados por el crecimiento acelerado que tiene el sector turístico, al igual que el aumento poblacional y los impactos de fenómenos naturales que cada vez causan más impactos sobre los ecosistemas. Estas perturbaciones o el conjunto de ellas pueden generar alteraciones en los ecosistemas más rápido de lo que se espera, no solo afectando directamente a los ecosistemas sino también a las actividades económicas asociadas. Adicionalmente, el mal manejo y control del sistema de alcantarillado y uso de fosas sépticas deficientes favorecen la filtración de desechos al manto freático, cenotes y a la costa (Camacho, 2016). Actualmente La Región Península de Yucatán y Caribe Mexicano está conformada por 25 Áreas Naturales Protegidas reconocidas a nivel mundial por su alto valor ambiental, las cuales suman 8,562,758 hectáreas (CONANP, 2008).

Las causas y los impactos positivos que tienen estos organismos es que dominan las aguas poco profundas y gracias a su rápida tasa de crecimiento, genera un mayor y rápido crecimiento del arrecife. Se han encontrado múltiples beneficios a través de diferentes estudios sobre la gran importancia de los numerosos bienes y servicios ambientales que ofrecen los arrecifes de coral para el bienestar social y económico (PNSAV, 2017; Pérez, 2017). De los cuales podemos encontrar la protección de costa ya que gracias a sus barreras formadas protegen del oleaje, huracanes, tsunamis o tormentas a las comunidades cercanas. Ya que son el hogar de muchas especies marinas son considerados grandes zonas de biodiversidad el cual también funciona como refugio, protección, sitios de crianza y crecimiento de muchas especies, algunas de ellas de importancia comercial. Proveen empleos a millones de personas al ser uno de los atractivos turísticos más llamativos hoy en día (Calderón, 2017).

Lamentablemente hoy en día podemos encontrar más amenazas que beneficios en los arrecifes de coral, teniendo como resultado, pérdida de la cobertura coralina, daño y muerte de los corales. Diversos autores han expuesto las principales amenazas que sufren estas especies debido a que se le atribuye ser altamente vulnerable a factores de perturbación local como lo son: encallamientos de embarcaciones, esto es debido al incremento del tránsito portuario y la poca o falta de señalización de las zonas arrecifales; actividades pesqueras, esto ocurre por el tipo de pesca o bien por los instrumentos que los pescadores usan para llevar esta actividad como pueden ser redes, palangres, líneas de mano, el gancho, el arpón e incluso la recolección manual, que inevitablemente causan un daño al arrecife, pero también tenemos lo que es la sobrepesca que ha perjudicado considerablemente las poblaciones de varios grupos de peces que son claves en el funcionamiento del arrecife y la disminución de organismos comerciales, como lo son langosta, caracol, pulpo y escama. Esto está llevando a un desequilibrio en el ecosistema (Garzón, 1997; SEMARNAT, 2018; Hernández et al., 2011); también podemos encontrar un grave problema al aumento en el incremento del desarrollo costero, debido a que no cuentan con una adecuada planeación, tanto en el crecimiento de la población y su manejo de basura o residuos como el nulo tratamiento de sus aguas residuales, trayendo con ello contaminación por aguas negras, generando un alto incremento en los niveles de nutrientes, sedimentación y turbidez (Garzón, 1997). En las zonas costeras podemos encontrar una mayor perturbación debido al cambio del uso del suelo, tala clandestina y extracción de fauna silvestre provocando una pérdida en la calidad y el fraccionamiento de ecosistemas interconectados con los arrecifes coralinos. Uno de los beneficios que traen los arrecifes de coral también se ha convertido en una grave amenaza, esto es el turismo; que tiene actividades que provocan daños directos en el arrecife que se ocasionan cuando realizan buceo libre y autónomo y el anclaje de los barcos que llegan para visitar dichas zonas. También se han estudiado las perturbaciones que existen a escala global y que afectan a todos los arrecifes de coral del mundo uno de ellos es el cambio climático que es a escala global y podría considerarse una de las peores amenazas para los arrecifes de coralinos. El incremento e intensidad de eventos climatológicos extremos. La acidificación de los mares, afectando al crecimiento y estructura de los corales. Todos estos factores sin duda representan un riesgo potencial para los arrecifes de coral, tomando en cuenta que no se tiene registro que estos grandes ecosistemas se encuentren en recuperación.

Debido a estas amenazas y la pérdida acelerada de los arrecifes de coral ha despertado el interés de muchas personas para tomar acciones y ayudarles a su supervivencia, esto ha traído que uno de los corales más importantes por la función o los beneficios que este trae como los son *A. palmata*

y *A. cervicornis* están consideradas como especies en peligro crítico de extinción en el libro rojo de Especies Amenazadas elaborado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés). México no se ha quedado atrás para ser parte de la protección de esta especie y poniendo en la categoría de protección especial y es bajo este régimen de protección que se determina la necesidad de propiciar la recuperación y conservación de sus poblaciones y hábitat. Otra acción que se llevó a cabo es la de crear Áreas Naturales Protegidas en áreas donde se encuentran estos sistemas arrecifales (SEMARNAT, 2018).

Pero no solo las leyes son las únicas acciones que sean implementado, hoy en día y que esto ha tomado un incremento significativo en los últimos años es el de la restauración de arrecifes de coral, esto ha llevado a desarrollar varios métodos y técnicas con el único objetivo de lograr que estos arrecifes estén en aumento y logren recuperar su cobertura o bien el aumento de la cobertura coralina; el método llamado cultivo de corales o coral gardening, es una de las técnicas de propagación y trasplante de especies coralinas, teniendo como objetivo restaurar zonas arrecifales que se encuentran con algún daño o perturbación, ocasionado por factores naturales o antropogénicos (huracanes, encallamientos de embarcaciones). Se consideran dos técnicas para llevar a cabo la restauración biológica: una es la propagación sexual; que tiene como objetivo el de la colecta y crianza de larvas de coral, esta técnica es muy difícil de llevar a cabo ya que las condiciones que necesitan los corales para poder crecer y llevar a cabo su adecuado desarrollo son muy específicas y alguna variación no controlada de sus parámetros podría no funcionar su adecuada propagación. Segunda técnica es la de forma asexual que se lleva a cabo colectando de fragmentos de coral esto con la finalidad de trasplantar colonias o fragmentos coralinos a zonas de arrecife de las que se sabe que tiene un cierto nivel de daño, que es posible que se pueda volver a recuperar (Romero, 2017).

Para llevar a cabo esta práctica, deben considerarse ciertos puntos para lograr en lo posible y con éxito la restauración en la zona perturbada, ya que estas especies se encuentran con un tipo de protección se deben de llevar a cabo la revisión de la legislación local y contar con los permisos necesario antes de realizar cualquier colectar trasplantes o inclusive antes de introducirlos a un área degradada. Se deben analizar bien los corales a trasplantar y utilizar los llamados “corales de oportunidad”, estos fragmentos son los que se encuentran naturalmente en el arrecife y que tienen poca probabilidad de sobrevivir a menos que sean trasplantados o bien se pueden utilizar fragmentos obtenidos de los donantes llamados “colonias madres” son colonias intactas, es recomendable no utilizar más del 10% de la colonia donante esto es para no generar un estrés mayor a esta colonia. Un punto muy importante para considerar es que los fragmentos que se obtuvieron o recuperaron de la zona de perturbación sean trasplantados en áreas que más se asemejen al área afectada (Alasdair et al., 2007).

Algunos parámetros a consideran en el área de trasplante son: profundidad, exposición, sedimentación, salinidad, sustrato, temperatura, pH, oxígeno disuelto, nutrientes, entre otros, estos parámetros son de suma importancia tomarse ya que desafortunadamente el decrecimiento de la calidad del agua hoy en día va en aumento y esto ocurre principalmente por la concentración de uno o varios contaminantes como lo son: hidrocarburos, metales pesados, nutrientes y compuestos orgánicos. Las variables como pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, solidos suspendidos totales, amonio, nitrato, fosforo total, y coliformes totales son considerados indicadores importantes de salud de los ambientes costeros (Acosta, 2015) Diversos estudios han comprobado la gran importancia de los parámetros para los organismos y la relación que estos tienen para con

su entorno, el cual consideran la temperatura uno de los parámetros más importantes en los ambientes marinos por la influencia que este tiene en los eventos físicos, químicos, geoquímicos y biológicos; por ejemplo: las reacciones físicas y químicas, la distribución de las especies marinas entre otros al aumentar o disminuir la temperatura. También otro parámetro que debe considerarse como importante es la salinidad ya que esta al verse alterada puede llegar a afectar a los organismos acuáticos en funciones fisiológicas alterando su balance osmótico, distribución y comportamiento. El oxígeno disuelto es esencial para casi todos los organismos es por eso por lo que es un parámetro que no se puede dejar de lado. El pH hoy en día se ha vuelto un parámetro que llama la atención de muchos y que se ha considerado esencial en la medición en los estudios, ya que el aumento constante de niveles de CO₂ atmosférico está provocando la acidificación de los océanos, trayendo con esto problemas a los organismos marinos para poder llevar a cabo la calcificación de sus esqueletos.

Gracias a estos estudios y la fuerte relación que tienen los parámetros fisicoquímicos en los ambientes acuáticos se debe de considerar como parte de un monitoreo mínimo en el lugar de restauración y así poder tener un registro más amplio y preciso del sitio. Pudiendo identificar posible correlación en cualquier cambio observado por muy pequeño que sea dentro del arrecife. Ya que varios organismos son susceptibles a estos cambios de parámetros y uno de ellos son los corales, que desafortunadamente están resultando sumamente afectados por estas variaciones en los parámetros físico y químicos del agua la mayoría de estas especies solo pueden sobrevivir dentro de estrechos rangos de salinidad, temperatura y pH, pero encontramos parámetros como transmisión de luz, sedimentación y oxígeno disuelto que pueden afectar el crecimiento y supervivencia de los organismos del arrecife (Roger et al., 1994).

También existen factores que son adecuados para el crecimiento y el desarrollo de los organismos acuáticos pero que hoy en día se han notados aún más por el exceso en los que estos se encuentran y ellos son los nutrientes que son esenciales para las aguas costeras los cuales los podemos encontrar de forma natural, si bien sabemos que los corales necesitan a los nutrientes para su desarrollo y crecimiento también debemos considerar que estos deben de vivir en aguas cálidas con concentraciones muy bajas de nutrientes. El exceso de nutrientes puede traer consigo problemas al arrecife, ya que puede causar florecimientos de macroalgas y fitoplancton. En especialmente en aguas poco profundas cercanas a la costa, y esto puede traer consecuencias como la descomposición de las algas el cual disminuyen el oxígeno disuelto el cual es vital para los organismos, también se pueden presentar contaminación por bacterias como es *Echerichia coli*, que es peligrosa para el humano, estos florecimiento y bacterias que se encuentran en el agua pueden ser un indicador de contaminación ya sea por aguas residuales, domésticas e industriales y de escorrentías agrícolas (Roger et al., 1994).

Para poder llevar un mejor control del arrecife y ya que consideramos medir los parámetros fisicoquímicos, es importancia definir cómo es que estos se pueden analizar y puede ser por medio del uso de bioindicadores, identificación de manera oportuna variaciones en las propiedades fisicoquímicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, amonio, nitratos, nitritos, nitrógeno total, fósforo total, ortofosfatos y silicatos), y tener localizado las descargas de aguas subterráneas, lo cual nos permitirá evaluar impactos potenciales en el medio de manera oportuna, además de prevenir pérdidas ambientales, económicas y daños en la salud humana (Camacho, 2016)

Con el paso del tiempo cada uno de estos parámetros se consideran cada vez más importantes ya que, con el aumento de temperatura, contaminación, aumento de población entre otros ha traído consigo problemas cada vez más graves para los organismos acuáticos y si bien no hay muchos estudios acerca de la relación que tiene un parámetro con otro debemos considerar que algunos autores han estudiado las reacciones que los parámetros pudieran tener al relacionarse uno con el otro, en el caso de la temperatura y la salinidad según Roldan-Pérez (1992), cuando estas tienden a bajar de sus niveles normales la solubilidad del oxígeno disuelto disminuye, trayendo con esto la disminución en la saturación en un cuerpo de agua. Diversos autores como Mann y Lazier (1996), Lalli y Parsons (1997), y Mann (2000), también encuentran que la combinación que se da al variar la temperatura y la salinidad influye significativamente en el movimiento de las masas de agua en sus movimientos verticales y horizontales, teniendo como consecuencia cambios en los eventos químicos y biológicos en la columna de agua. Al igual que existen estudios sobre la relación de estos parámetros y el impacto que tiene en los organismos acuáticos, también hay estudios que comprueban la relación de estos parámetros con el alza de nutrientes que hoy en día encontramos en los cuerpos de agua. Marubini (1996) y Atkinson (2008), realizaron un experimento el cual comprobaron los efectos que tiene el pH bajo con el aumento de nitratos, aunque la calcificación sigue siendo mayor por el aumento del CO_2 atmosférico y la baja de CO_3^{2-} , se notó que si existe una relación de calcificación al tener el pH bajo y los nutrientes altos.

4. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la relación que tienen los parámetros fisicoquímicos con la sobrevivencia de los fragmentos de coral cultivados en dos zonas de restauración del sistema Arrecifal de Xcalak.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Monitorear mensualmente los parámetros fisicoquímicos del agua de dos zonas de restauración del sistema Arrecifal de Xcalak.
- ✓ Cuantificar las concentraciones de nutrientes (amonio, fosfatos, nitritos y nitratos) en muestras mensuales del agua marina de dos zonas de restauración del sistema Arrecifal de Xcalak.
- ✓ Cuantificar la sobrevivencia de fragmentos de *Acropora* cultivados en dos zonas de restauración del sistema Arrecifal de Xcalak.
- ✓ Analizar la influencia de los parámetros fisicoquímicos y los nutrientes sobre la sobrevivencia de los fragmentos de coral *Acropora* cultivados en las dos zonas de restauración del sistema Arrecifal de Xcalak.

6. ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se llevó a cabo en el Parque Nacional "Arrecifes de Xcalak" que se encuentra, en latitud 18°30'00" N y longitud 87°44'49" W; a 60 kilómetros del poblado de Mahahual. Esta localidad pertenece al municipio de Othón P. Blanco Chetumal Quintana Roo. Cubre una superficie total de 17 949 ha; 13 935 corresponden a ecosistemas marinos y 4 543 a ecosistemas terrestres (CONANP, 2004).

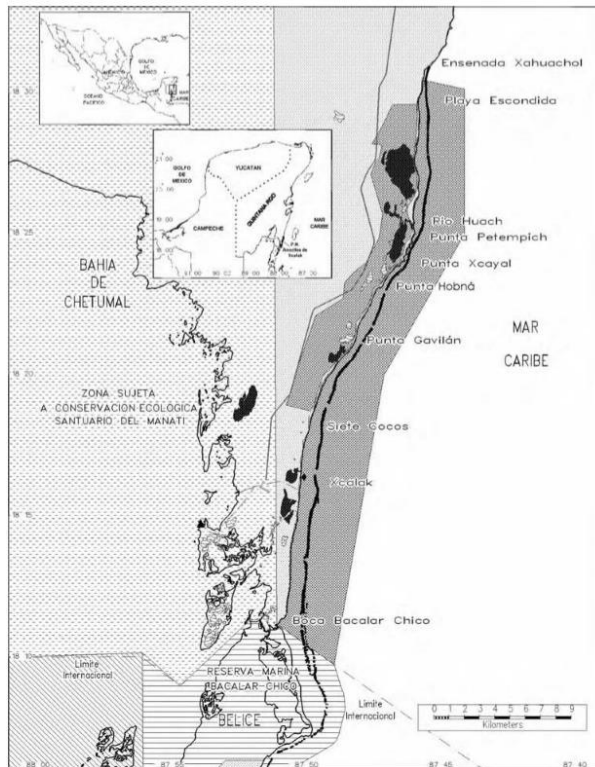


Figura 2. Ubicación del Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Quintana Roo.
(Tomado de: Programa de Manejo Parque Nacional Arrecifes de Xcalak.
CONANP)

Gracias a la inquietud que surgió en los pobladores de Xcalak y al gran interés que estos tenían para proteger y conservar los recursos naturales marinos y costeros, el 27 de noviembre de 2000 en el Diario Oficial de la Federación fue decretado la creación del "Parque Nacional Arrecifes de Xcalak" (PNAX) (López, 2017).

Los registros indican que la temperatura promedio del agua de mar es 29.3 °C y fluctúa entre 26.7° y 31.72 °C durante el año. Se han observado oscilaciones diurnas y cambios abruptos de la temperatura que llegan a hacer hasta de 2.8°C, esto es por eventos de tormenta o huracanes. La salinidad en la región es de aproximadamente 35.3-36.0 ups. La marea presenta intervalos de -0.12 a 0.12 m; pero puede llegar a presentar variaciones hasta de 0.5 m por efecto del paso de tormentas. La velocidad media de la corriente es de 0.02 m/s con máximos de 0.5 m/s en la componente a lo largo de la costa y 0.2 m/s en su componente perpendicular.

En un programa de monitoreo para conocer más de este parque y llevado a cabo por la Fundación Mexicana para la Educación Ambiental en colaboración con el Centro de Recursos Costeros de la Universidad de Rhode Island resultaron cuatro zonas principales: 1) Región de playa, compuesta por un mosaico de playas arenosas, playas y puntas rocosas, ecosistemas de manglar y lagunas costeras asociadas de tamaño variable. 2) Laguna arrecifal, comprende desde la línea de costa hasta la cresta arrecifal, compuesta de praderas de vegetación sumergida y conglomerados de parches coralinos cuyo desarrollo es mayor cerca de la cresta arrecifal. 3) Cresta arrecifal, comprende el arrecife posterior, la rompiente arrecifal y la transición a barlovento. El arrecife posterior es variable en amplitud, profundidad y complejidad estructural. La rompiente arrecifal es discontinua, con numerosos quebrados, ubicada a distancia variable de la costa; en algunos puntos se une a la línea de costa y en otros está alejada hasta 2 km aproximadamente (enfrente de Bacalar Chico en el límite sur del parque). 4) Arrecife frontal; comprende el arrecife frontal interior y exterior compuesto por un sistema de macizos y canales con mayor desarrollo hacia el frontal exterior. (Hernández, 2010)

Se tiene que a pesar de su pequeña área el PNAX contiene una amplia variedad de especies, pero desafortunadamente estas son extremadamente sensibles a los cambios de uso de suelo. Tanto los ambientes terrestres y como los marinos se encuentran ecosistemas y especies biológicamente importantes; de los cuales encontramos arrecifes de coral, humedales, lagunas costeras, playas y selva, que son altamente productivos y por ende las actividades socioeconómicas en Xcalak dependen de ellos. Las especies que tienen una gran importancia comercial son: caracol rosado (*Strombus gigas*) y la langosta (*Panulirus argus*). Especies que se encuentran en el PNAX y se consideran especies representativas:

•Flora: Hierba de tortuga (*Thalassia testudinum*), Hierba de manatí (*Syringodium filiforme*), Mangle rojo (*Rhizophora mangle*), Mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), Mangle negro (*Avicennia germinans*), Mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), Palma chit (*Thrinax radiata*), Chechem negro (*Metopium brownei*), Chaca o palo mulato, Palo chaca (*Bursera simaruba*).

•Fauna: Coral piña (*Dichocoenia stokesi*), Coral cuerno de alce (*Acropora palmata*), Coral de fuego aplanado (*Millepora complanata*), Coral (*Agaricia tenuifolia*), Coral estrella (*Montastraea annularis*), Coral gran estrella (*Montastraea cavernosa*), Concha reina (*Strombus gigas*), Caracol de leche (*Strombus costatus*), Concha lucha indica (*Strombus pugilis*), Caracol toburro (*Xancus angulatus*), Caracol caballo (*Pleuroploca gigantea*), Manatí (*Trichechus manatus*), Viejo de monte (*Eira barbara*), Jaguarundi, leoncillo (*Puma yagouaroundi*), Jaguar (*Panthera onca*), Tapir (*Tapirus bairdii*), Cacomixtle (*Bassariscus sumichrasti*), Venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), Delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus*), Calderón de aletas cortas (*Globicephala macrorhynchus*), Delfín (*Stenella sp.*) (López, 2017; Camarena, 2003).

En general estos arrecifes se consideran en un buen estado de conservación; ya que cuentan con un programa de manejo operativo con programas de vigilancia, monitoreo, educación ambiental entre otros. El principal daño antropogénico viene de la extracción excesiva y sin control de la langosta espinosa y caracol rosado. Aunque el turismo aún no cuenta con un fuerte impacto se han registrado que en los últimos años este ha ido en aumento. El intercambio de aguas y materiales que surgió por la apertura del canal de Zaragoza que es un canal de navegación. Aún no ha sido estudiado para evaluar los daños que este pudiera haber causado en el arrecife y en la barrera arrecifal, este no es el único factor de perturbación en el área arrecifal, también se debe considerar

el crecimiento excesivo de macroalgas que está vinculado a la drástica reducción de herbívoros bentónicos, por ejemplo: el erizo de mar *Diadema antillarum*; también la reducción de cobertura coralina por eventos de blanqueamiento (Hernández, 2010).

7. METODOLOGÍA

La metodología fue dividida en dos partes, la primera es la de campo, donde se realizaron las colectas de las muestras de agua y los datos de los parámetros fisicoquímicos, la segunda parte se realizó en la parte de laboratorio, donde se analizaron las muestras de agua obtenidas.

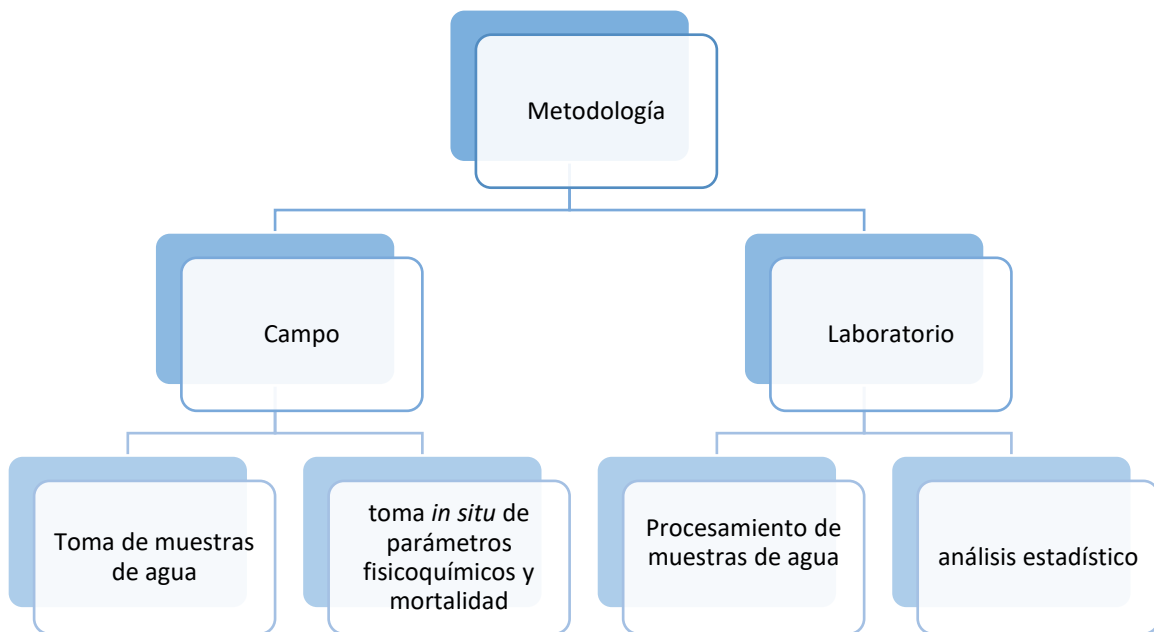


Figura 3. Diagrama metodología

7.1 METODOLOGÍA DE CAMPO

Se definió como área de estudio la zona Arrecifal de Xcalak Quinta Roo, donde se establecieron dos sitios de muestreo: Xcalak Norte (Figura 4) y La Poza (Figura 5); cada sitio contó con 5 puntos de muestreo que se distribuyeron entre la playa y la zona de restauración.

En el caso de Xcalak Norte los puntos se establecieron cada 100 metros. En contraste, debido a que en La Poza la zona de restauración se encuentra más lejos de la playa, los puntos de muestreo se distribuyeron cada 200 metros.

Se decidió tomar los diferentes parámetros y las muestras de agua en intervalos mensuales, abarcando los meses de agosto a diciembre de 2019.



Figura 4. Área de Xcalak Norte y sitios de muestreo ubicados en la comunidad de Xcalak, México (Tomado de: Google Earth).

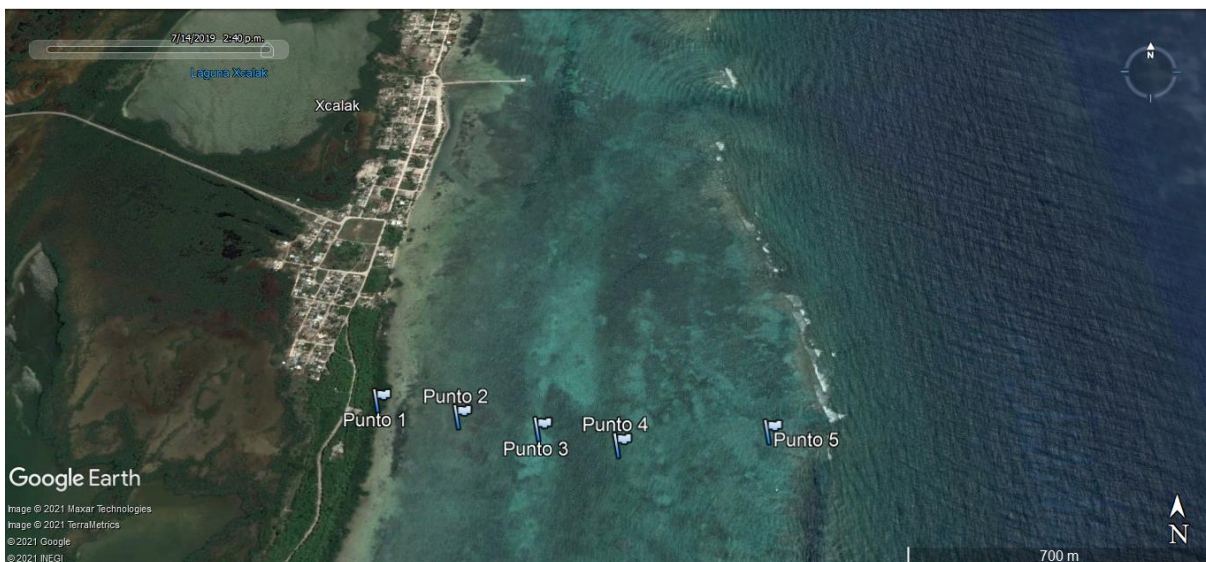


Figura 5. Área de La Poza y sitios de muestreo ubicados en la comunidad de Xcalak, México (Tomado de: Google Earth).



Figura 6. Toma de muestras *in situ* en el sitio

En cada punto de muestreo de las dos zonas de restauración activa se tomaron 250 ml de agua de superficie y 250 ml de agua de fondo, en botellas de plástico previamente lavadas. Las muestras fueron preservadas en hielo para su posterior análisis en las instalaciones de Oceanus A.C.

Se tomaron datos *in-situ* de parámetros fisicoquímicos (Figura 6): pH, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura. Estos datos se tomaron de fondo y de superficie de cada punto de muestreo. La salinidad se tomó con un refractómetro de la marca ATC, la temperatura y la profundidad se midieron con una computadora marca ZOO, para la medición de pH se utilizó un potenciómetro de campo marca Ketoket y para el oxígeno disuelto se utilizó un oxímetro marca MILWAUKEE (Figura 7).



Figura 7. Equipo de medición de parámetros fisicoquímico

Las colonias están colocadas en estructuras en forma de arañas (Figuras 8, 9), las cuales poseen una placa de identificación, para tener mayor control sobre las colonias que se monitorean mes con mes. La sobrevivencia de los corales fue evaluada en el punto 5 de cada zona; para ello se utilizó la observación directa de las colonias, accediendo a ellas por buceo libre.



Figura 8. Estructuras del área de restauración Xcalak Norte de la especie Acropora cervicornis



Figura 9. Estructuras del área de restauración La Poza de la especie Acropora cervicornis



Figura 11. Fragmento de coral en buen estado de salud, de la especie *Acropora cervicornis*

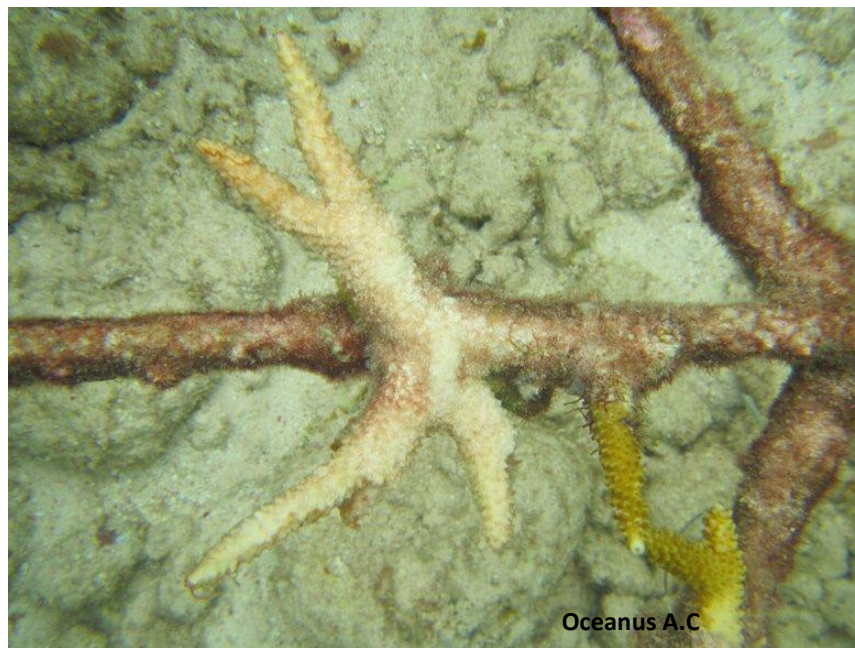


Figura 12. Fragmento de coral con muerte antigua, especie *Acropora cervicornis*

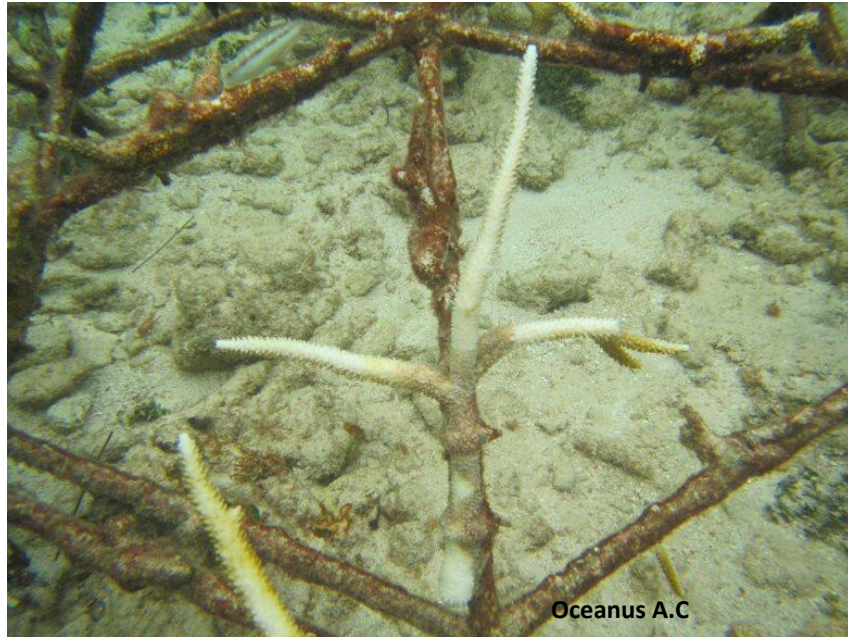


Figura 13. Fragmento de coral con muerte reciente, especie *Acropora cervicornis*

7.2 METODOLOGÍA DE LABORATORIO

Las muestras de agua se analizaron para la cuantificación de nutrientes (nitritos, nitratos, amonio, fosfatos), con un laboratorio portátil HACH (Figura 14), sin exceder 24 horas después de la colecta.



Figura 14. Colorímetro utilizado para la medición de nutrientes.

Nitrógeno amoniacal: se midió utilizando el método del salicilato, mide un rango 0.01 a 0.50 mg/L $\text{NH}_3\text{-N}$. Se tomaron 10 ml de la muestra a la cual se le agregó el reactivo denominado salicilato de amonio, esperando por 3 min. Para que se realizara la reacción, posteriormente se agregó el reactivo llamado cianurato de amonio dándole 15 min. para la reacción; finalmente se leyó en el colorímetro. Las reacciones que se dan durante los minutos de espera son componentes de amonio que se combinan con el cloro formando monocloramidas que reaccionan a su vez con el salicilato para formar 5 aminosilicilato; el cual es oxidado en presencia de un catalizador nitroprusiato de sodio dándole una coloración amarilla a verde al final de la reacción dependiendo de la concentración de amonio (Figura 15).



Figura 15. Muestras de amonio.

Ortofosfato se utilizo el método de Ácido ascórbico, teniendo rango de lectura de 0.02 a 2.50 mg/L PO_4^{3-} Se tomaron 10 ml de la muestra a la cual se le agrego el reactivo denominado PhosVer 3, se agito durante 30 segundo y se dejó reaccionar durante 2 min. La muestra, finalmente se leyó en el colorímetro. El método de ácido ascórbico es un proceso de dos pasos. En la primera etapa, el ortofosfato reacciona con el molibdato en una solución ácida para formar un complejo de fosfomolibdato de color amarillo. El complejo de fosfomolibdato se reduce luego utilizando un aminoácido o ácido ascórbico, creando una molécula que hará que la muestra se vuelva azul. El color azul producido es proporcional a la concentración de fosfato en la muestra (Figura 16).



Figura 16. Muestras de fosfatos.

nitratos se utilizó el método de reducción de cadmio que tiene un rango de 0.3 a 30.0 mg/L NO_3^- -N. Se ocuparon 10 ml de la muestra añadiéndole el reactivo NitraVer 5, se agito durante un minuto y se dejó reposar durante 5 min. para que terminara la reacción. El cadmio reduce los nitratos que se encuentran en la muestra. El ion nitrato reacciona en un medio acidificado con el ácido sulfanílico formando una sal diazódica intermedia, que junto con el ácido gentísico da una coloración ámbar (tenue) a la muestra (Figura 17).



Figura 17. Muestras de nitratos.

Los nitritos se cuantificaron con el método de diazotación, Este método fue desarrollado por Shinn (1941) y modificado por Bendschneider y Robinson (1952) que tiene rangos de 0.005 a 0.350 mg/L NO_2^- -N. Para este método se usaron 10 ml de la muestra la cual se le agregó el reactivo NitriVer 3. El nitrato que se encuentra en la muestra reacciona con el ácido sulfanílico formando una sal diazinódica intermedia, ésta con el ácido cromófico producen una coloración rosada la cual está directamente relacionada con la concentración de nitrito presente en la muestra (Figura 18).



Figura 18. Muestras de nitritos.

Con los valores de los parámetros fisicoquímicos, los nutrientes y la sobrevivencia de los corales mes con mes, se construyó una base de datos en Excel para proceder al análisis estadístico de los mismos.

8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos y de mortandad se usaron para obtener valores de estadística descriptiva: promedios, máximos, mínimos y desviación estándar.

Se analizó la normalidad de los datos y se comparó cada mes de muestreo utilizando ANOVA para cada parámetro obtenido para probar si existía variabilidad temporal.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis estadístico de correlación con el software NCSS en el que se buscó el coeficiente de correlación entre los nutrientes y los parámetros fisicoquímicos de los datos obtenidos de superficie y fondo para saber que parámetros tenían más relación con la mortandad de los corales en la zona de restauración.

Se llevo a cabo el análisis de componentes principales, para saber que componentes se encuentran altamente relacionados para cada sitio.

Se hizo un modelo matemático con los datos obtenidos en cada uno de los sitios y con esto tener una herramienta de importancia para futuros muestreos y posible selección de un sitio de restauración. Desafortunadamente por tener una N tan pequeña los resultados no eran confiables y viables para poder validar este modelo matemático.

Funciones de porcentaje de mortandad en Xcalak Norte y la Poza

Con el objetivo de construir una relación con todos los elementos que intervienen en el proceso y encontrar su interrelación entre éstos, buscamos inicialmente una función para determinar la mortandad en el fondo en Xcalak Norte conforme a los datos obtenidos durante las temporadas de estudio.

Primeramente, construimos la tabla de porcentajes globales durante todas las temporadas conforme a los datos del libro "Datos reales de las arañas" en Excel, obteniendo.

Tabla 1. Interpolación global de la mortandad

0	0
1	18.06%
2	19.67%
3	60.47%
4	96.67%
5	97.67%

Después, realizamos el ajuste de mortandad global por interpolación para obtener un polinomio y su gráfica, la cual mostramos en la figura 19. La variable t se utiliza como variable universal en los periodos normalizados por unidades unitarias.

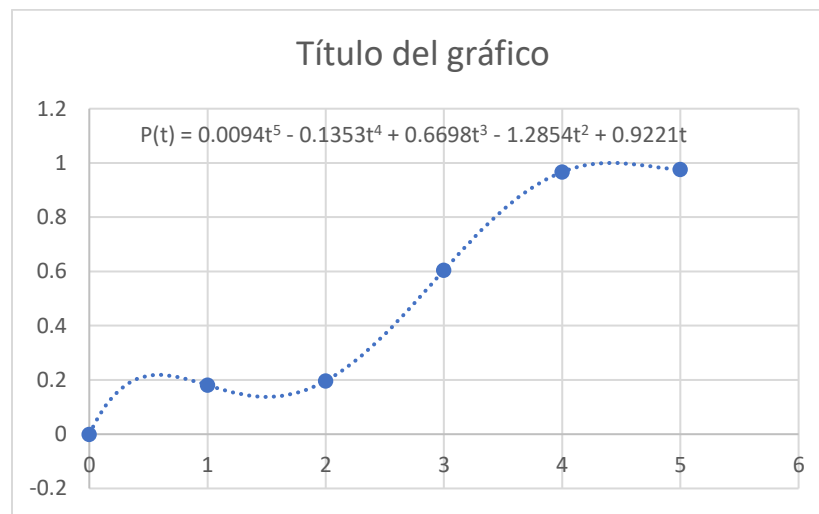


Figura 19. Ajuste de mortandad global por interpolación para obtener un polinomio, Xcalak Norte

El polinomio que ajusta la mortandad global en el fondo de Xcalak Norte, dependiente de la variable temporal t es

$$P(t) = 0.0094t^5 - 0.1353t^4 + 0.6698t^3 - 1.2854t^2 + 0.922t$$

De manera análoga, construimos una relación funcional para determinar la mortalidad en el fondo en “La Poza” conforme a los datos obtenidos durante las temporadas de estudio.

Igualmente, construimos la tabla de porcentajes globales durante todas las temporadas conforme a los datos del libro “Datos reales de las arañas” en Excel, obteniendo:

Tabla 2. Interpolación global de la mortandad

La Poza	% muertos
0	0
1	9.73%
2	10.67%
3	22%
4	27.42%
5	30.33%

Posteriormente, y de igual manera, realizamos el ajuste de mortandad global por interpolación para obtener un polinomio y su gráfica, la cual mostramos en la figura 20. La variable t se utiliza como variable universal

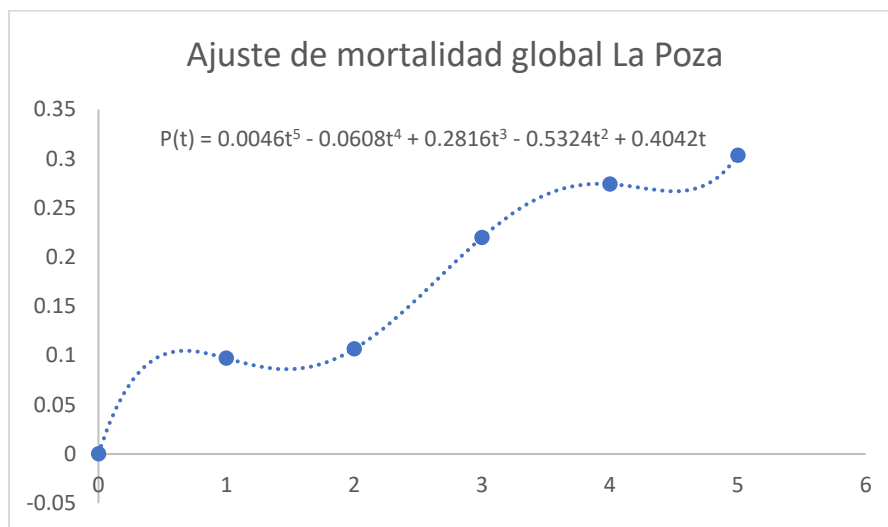


Figura 20. Ajuste de mortalidad global por interpolación para obtener un polinomio, en el sitio La Poza.

El polinomio que ajusta la mortandad global en el fondo de “La Poza” en función de la variable t en este caso es:

$$P(t) = 0.0046 t^5 - 0.0608 t^4 + 0.2816 t^3 - 0.5324t^2 + 0.4042 t$$

Mencionamos que, a pesar de haber obtenido esas relaciones explícitas de mortandad por periodo en cada caso, el uso de interpolación de Lagrange para encontrar una interrelación jerárquica entre varios elementos principales que intervienen y han sido medidos durante el proceso de mortandad, como la temperatura, pH, salinidad, nitritos, nitratos, amonio y oxígeno disuelto, no ha sido posible en virtud de que las cantidades obtenidas de cada uno de ellos están muy distantes las unas de las otras en sus unidades correspondientes.

Consecuentemente, este objetivo será tratado y analizado con otra metodología matemática en estudios posteriores.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE LAS ZONAS DE XCALAK NORTE Y LA POZA

En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos de los dos sitios muestreados, se incorporan datos de superficie y fondo para analizar de manera general el comportamiento de los parámetros durante los cinco meses de muestreo.

La temperatura promedio es muy similar, alrededor de 31 °C; sin embargo, “Xcalak Norte” presenta una temperatura máxima 2.4 °C por encima del sitio “La Poza”. Para el caso de la salinidad, pH y el O.D. podemos observar que los parámetros no varían de un sitio a otro, el pH y el O.D en su lectura máxima es ligeramente más alto en “La Poza”. En contraste, los nitritos y fosfatos si son significativamente diferente los nutrientes en la zona de “La Poza” tienen los promedios más altos en los cinco meses de muestreo.

Tabla 3. Promedio, mínimos y máximos de los parámetros **fisicoquímicos** del agua de Xcalak Norte y La Poza de agosto a diciembre 2019.

Fisicoquímicos	TEMPERATURA (°C)			SALINIDAD (ups)			pH			O. D. (mg/l)		
	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
Xcalak Norte	28	38.6	31.9	34	40	37.9	7.53	8.27	7.99	4.5	8.7	6.8
La Poza	29	36.2	31.09	35	40	38.18	6.98	8.33	8.02	0.4	9.8	6.72
Nutrientes	NITRATOS mg/l			NITRITOS mg/l			AMONIO mg/l			ORTOFOSFATOS mg/l		
Xcalak Norte	0	3.1	0.84	0	0.023	0.0031	0	0.18	0.08	0.02	1.55	0.3
La Poza	0.2	4.2	1.06	0	0.02	0.0035	0	0.04	0.125	0.07	2.44	0.708

En el análisis de la correlación de los datos de superficie y fondo de ambos sitios de restauración podemos observar (tabla 4) que aunque el oxígeno disuelto, el pH, el amonio y los fosfatos presentan valores altos de correlación (> 0.85), la temperatura en Xcalak Norte presenta un valor de correlación bajo (0.57), por lo que se decidió continuar con el análisis del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y de su relación con la mortalidad solo con los valores de fondo, ya que ésta es la capa de agua que está directamente en contacto con los corales.

Tabla 4. Correlación de los parámetros tomados en cada sitio de muestreo de superficie y fondo.

PARAMETRO	XCALAK NORTE	LA POZA
Temperatura	0.57	0.75
Salinidad	0.75	0.79
pH	0.92	0.96
Oxígeno Disuelto	0.92	0.95
Nitratos	0.80	1
Nitritos	0.71	1
Amonio	0.86	1
Fosfatos	0.86	1

Tabla 5. Comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo de Xcalak Norte con los Valores Máximos permisibles (VMP) ¹SEMARNAT, 2019; ²Hernández, 2010; ³LFD, 2019

PARAMETRO	VMP	MES				
		AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura	29 °C ¹	35	37	31	34	31
Salinidad	35ups ²	40	40	38	38	38
pH	6.0-9.0 ³	8.04	8	8.08	8.25	8.27
O.D.	5.0 mg/l ³	5.2	4.5	5.6	6.3	5.2
Nitratos	0.04 mg/l ³	2.1	3.1	0.4	0.9	1.6
Nitritos	0.01 mg/l ³	0.004	0.023	0.005	0.003	0.003
Amonio	0.01 mg/l ³	0.13	0.13	0.09	0.06	0.04
Ortofosfatos	0.01 mg/l ³	0.3	0.71	0.23	1.15	0.17

Tabla 6. Comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo de La Poza con los Valores Máximos Permisibles (VMP)

¹SEMARNAT, 2019; ²Hernández, 2010; ³LFD, 2019

PARAMETRO	VMP	MES				
		AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura	29 °C ¹	32.8	36.2	33	31	30
Salinidad	35ups ²	40	38	39	39	40
pH	6.0-9.0 ³	7.89	8.19	8.08	8.28	8.33
O.D.	5.0 mg/l ³	0.4	3.8	6.7	5.8	6.1
Nitratos	0.04 mg/l ³	4.5	1.2	2.8	1.1	2.3
Nitritos	0.01 mg/l ³	0.018	0.006	0.013	0.006	0.002
Amonio	0.01 mg/l ³	0.13	0.37	0.19	0.17	0.07
Ortofosfatos	0.01 mg/l ³	0.43	0.93	1.8	2.19	0.11

Al comparar los resultados obtenidos cada mes con los límites máximos se observa que en el caso de Xcalak Norte el promedio de la temperatura rebasó el VMP en agosto, septiembre y noviembre; así mismo, la salinidad rebasó el VMP en los cinco meses de muestreo. Los valores del pH se mantuvieron dentro del rango del VMP; y el oxígeno disuelto (O.D.) solo en el mes de septiembre estuvo por debajo del VMP. Por su parte los nitratos, amonio y fosfatos rebasaron el valor máximo permisible durante los cinco meses de muestreo, y los nitritos solo en el mes de septiembre rebasaron su respectivo VMP. Así, septiembre fue el mes en el que más parámetros rebasaron los VMP; y tanto la temperatura como la salinidad, los nitratos y los ortofosfatos estuvieron por encima de sus respectivos VMP en todos los muestreos.

En el caso de La Poza, observamos que la temperatura rebasó el VMP todos los meses, lo mismo que la salinidad, los nitratos y los ortofosfatos. El pH se mantuvo dentro del rango aceptable, pero el O.D. en los meses agosto y septiembre, estuvo por debajo del VMP. El amonio rebasó el VMP solo en el mes de diciembre.

9.2 DESCRIPCIÓN DE PARAMETROS FISICOQUIMICOS POR MES DE MUESTREO

A continuación, se describe el comportamiento de los parámetros mes con mes y se analiza si los valores tienen diferencias estadísticamente significativas. Adicionalmente se muestran los VMP con una línea de color verde.

9.2.1 TEMPERATURA

En las dos zonas de estudio, el mes de septiembre registró la temperatura más alta siendo estadísticamente diferente de los demás meses ($p > 0.05$). Cabe destacar que todos los meses rebasaron el límite máximo permisible (29°C) que establece la SEMARNAT (2019) en ambos sitios (Figura 21, 22) En la caracterización realizada por Hernández (2010) al Parque Nacional Arrecifes de Xcalak se obtuvo una temperatura promedio del agua de 29.3°C , que es ligeramente mayor que la temperatura máxima permitida ya mencionada.

Existen estudios de cómo el aumento de la temperatura afecta a los arrecifes de coral, por ejemplo, en un experimento llevado a cabo con larvas de corales escleractinios Bassim y Sammarco (2003) concluyeron que puede haber problemas con la reproducción, dispersión y reclutamiento de las larvas con el aumento de temperatura. En otro estudio se observó que la calcificación aumenta linealmente con el aumento de la temperatura de la superficie del mar a gran escala, pero responde de manera no lineal a las anomalías de temperatura anual. Este estudio sugiere que el aumento del estrés por temperatura y la disminución del estado de saturación del aragonito del agua de mar pueden estar disminuyendo la capacidad de los corales para depositar carbonato de calcio (Glenn et al., 2009). Guldberg y Smith (1989), probaron mediante el conteo de zooxantelas, el efecto que tiene el aumento de la temperatura, teniendo como control 27°C . Se observó pérdida de la zooxantela en temperaturas de 30 y 32°C , expuestos durante 7 días, y se encontró que la recuperación total de la colonia fue después de 19 días de la exposición. Lo anterior indica que es probable que los corales en las dos zonas de estudio estén estresados por las altas temperaturas registradas.

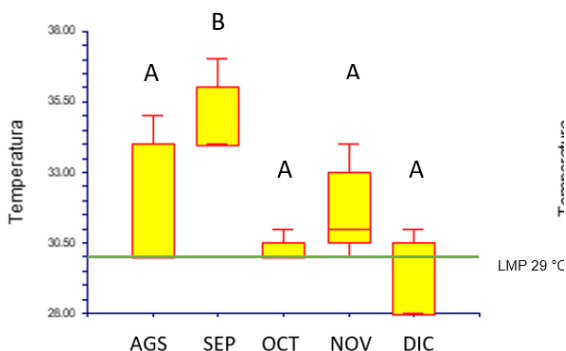


Figura 21. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

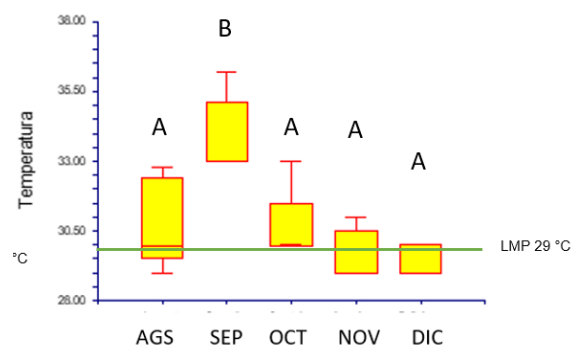


Figura 22. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.2 SALINIDAD

Hernández (2010), realizó un estudio para la caracterización del Parque Nacional Arrecifal de Xcalak donde obtuvo que la salinidad en la región es de 35.3 a 36.0 UPS, también menciona que el valor óptimo de la salinidad para un arrecife de coral es de 35 UPS, basados en esta información tenemos que en la zona de Xcalak Norte se rebasó este valor en todos los meses muestreados, registrando los valores más altos en agosto, septiembre y diciembre, los cuales fueron significativamente diferentes ($p > 0.05$) de octubre y noviembre que tuvieron registros un poco más bajos (Figura 23).

En el sitio de La Poza también se rebasó el óptimo de salinidad en todos los meses; asimismo agosto, octubre y diciembre tuvieron los registros más altos de salinidad; y septiembre y noviembre fueron un poco más bajos (Figura 24) y significativamente diferentes ($p > 0.05$) de los anteriormente mencionados.

Muthiga y Szmant (1987) mediante un experimento en el que se expuso a un coral escleractino de Florida (en donde se tienen salinidades de 28 a 30 UPS) a salinidades tan altas como 40 UPS y tan bajas como 12 UPS y en el que se midió la respiración y la fotosíntesis, observaron que los corales son capaces de soportar cambios de salinidad prolongados, pero en el caso de aumentos repentinos mostraron lecturas bajas en su respiración y fotosíntesis, los efectos pueden ser entonces mensurables en el animal completo. Sin embargo, también comentan que se necesitan más estudios para determinar si los arrecifes de coral son más tolerantes al cambio de salinidad de lo que generalmente se cree. De cualquier forma, fue obvio que las salinidades registradas en este estudio estuvieron por encima del óptimo.

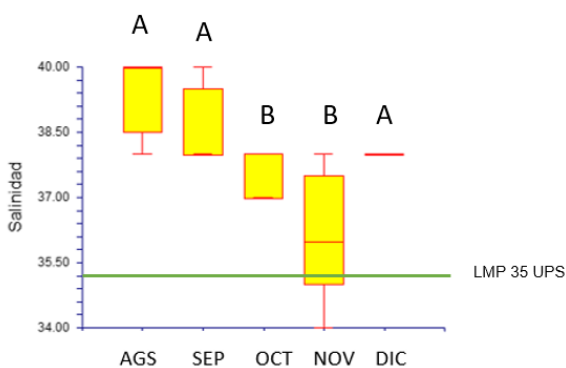


Figura 23. Salinidad (UPS) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

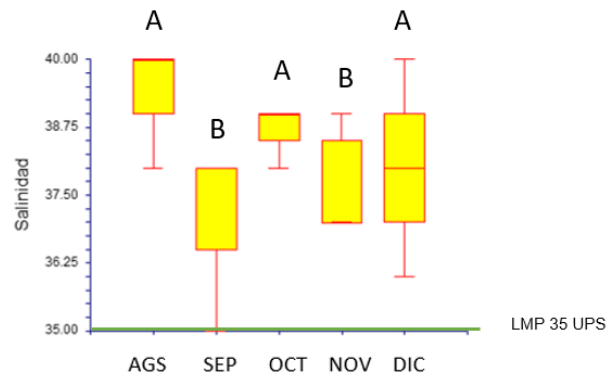


Figura 24. Salinidad (UPS) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.3 pH

En el caso de este parámetro, en ningún mes de muestreo se rebaso el valor máximo permisible según la LFD (2019) para ambos sitios. Se tienen valores registrados por encima de 8, pero ninguno tan elevado para llegar a 9 (Figura 25, 26). Sin embargo, dadas las altas temperaturas registradas en ambos sitios, se tiene la incertidumbre de que este parámetro pueda descender y provocar la disminución en la producción de carbonato de calcio, junto con un aumento en la disolución de carbonato de calcio; esto disminuiría la construcción de arrecifes y los beneficios que brindan, como la alta complejidad estructural que respalda la biodiversidad en los arrecifes y los efectos de rompeolas que protegen las costas y crean hábitats tranquilos para otros ecosistemas, como manglares y praderas marinas (Kleypas y Yates, 2009; Dove et al., 2020).

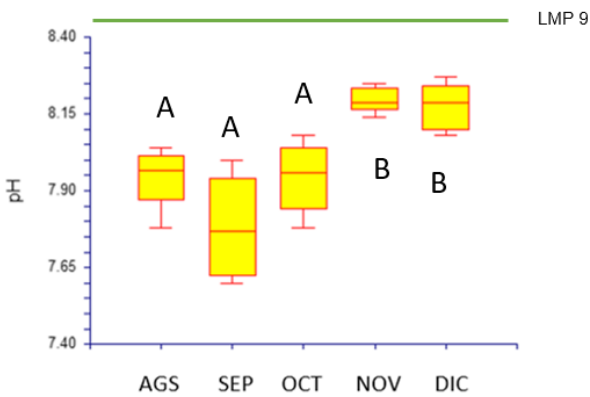


Figura 25. Potencial de hidrogeno (pH) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

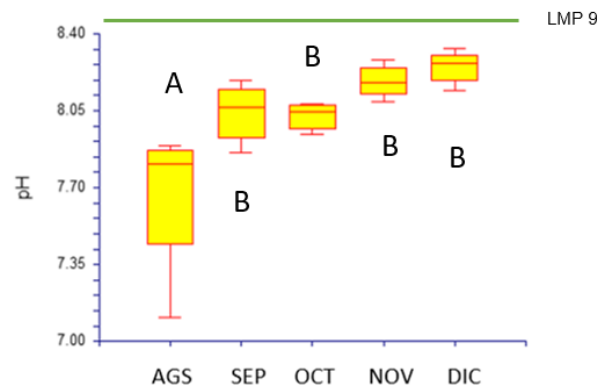


Figura 26. Potencial de hidrogeno (pH) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.4 OXIGENO DISUELTO

Para la LFD (2019)., hay un valor mínimo permisible que es de 5 mg/l; en el sitio de Xcalak Norte en el mes de septiembre se presentó un registro por debajo de este valor. En La Poza, en los meses de agosto y septiembre las lecturas bajas de oxígeno disuelto se pueden asociar a la presencia de sargazo en abundancia y a las temperaturas que eran muy altas en las orillas de la playa (Figura 27, 28). Algunos estudios han demostrado que las bajas concentraciones de oxígeno (2-4 mg/l) conducen a una rápida pérdida de tejido coralino y a la mortalidad (Haas, 2014). Por otra parte, Nelson y Altieri (2019), presentaron evidencia de que la acidificación y otros factores de estrés en los corales suelen estar mediados por el oxígeno. Como consecuencia, la huella de la variación del oxígeno es evidente en muchos patrones, incluida la biodiversidad de los arrecifes, el blanqueamiento de los corales, la morfología de las colonias y el comportamiento de los peces.

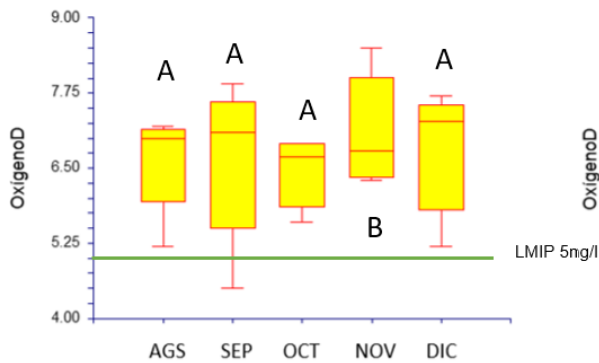


Figura 27. Oxígeno Disuelto (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

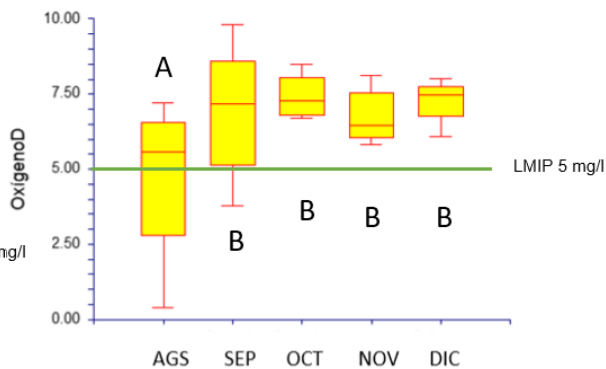


Figura 28. Oxígeno Disuelto (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.5 NITRATOS

En general los valores de nitratos registrados sobrepasaron el valor máximo permisible para los ambientes arrecifales, teniendo en la zona de Xcalak Norte en el mes de agosto y septiembre los valores más altos registrados durante los cinco meses del presente estudio (Figura 29); en la zona de La Poza agosto y diciembre tuvieron los valores más altos (Figura 30). Esto lo podemos asociar con el exceso de sargazo que se encontraba en la zona al momento de tomar las muestras, el cual se encontró con mayor frecuencia en los primeros dos meses del muestreo, algunos autores reportan beneficios en concentraciones altas de nutrientes, como el trabajo de Martínez et al., (2020), evaluó las concentraciones de pigmentos en los corales y las concentraciones de nitratos y fosfatos. Otros estudios al exponer a los corales a altas concentraciones de nitratos observaron que se redujo significativamente la tasa de producción primaria, aunque la densidad de las zooxantelas y las concentraciones de clorofila no se vieron afectadas (Nordemar et al., 2003).

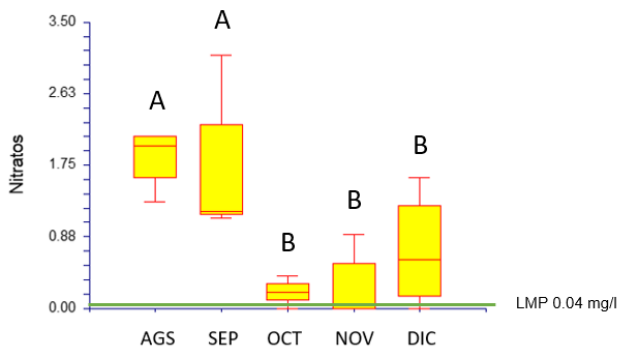


Figura 29. Nitratos (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

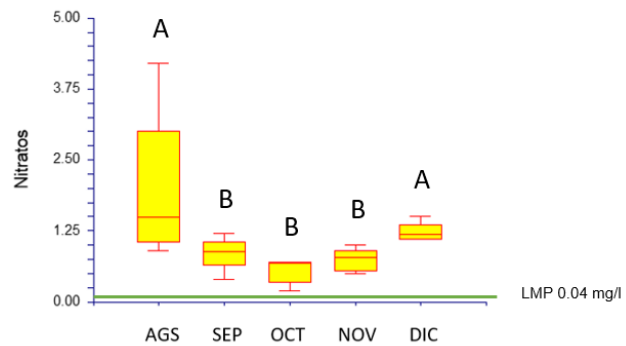


Figura 30. Nitratos (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.6 NITRITOS

Los valores de los nitritos para Xcalak Norte el mes de septiembre rebasaron el valor máximo permisible (Figura 31). En La Poza fue en los meses de agosto y octubre (Figura 32). Se sabe que los nutrientes resultan ser favorables para los corales, ejemplo de ello es el estudio de Martínez et al., (2020) en el que la combinación de nitritos y fosfatos resultó en un aumento en la densidad del simbiote en las colonias de coral. Pero al rebasar los valores permitidos de estos nutrientes Kuta y Richardson (2002) encontraron una correlación estadísticamente significativa entre las concentraciones de ortofosfato y nitritos y la enfermedad de la banda negra.

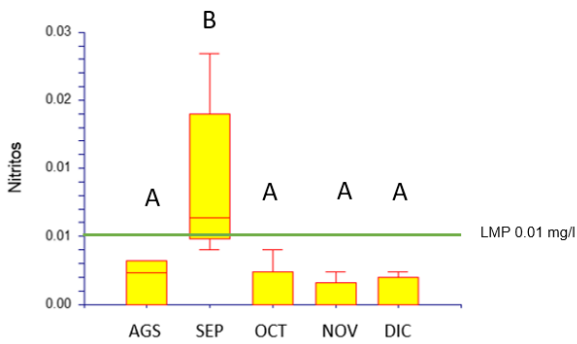


Figura 31. Nitritos (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

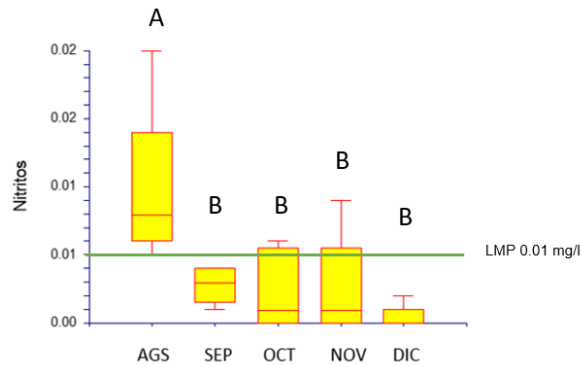


Figura 32. Nitritos (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.7 AMONIO

El amonio en las dos zonas de restauración supero el valor máximo permisible (0.01 mg/L), teniendo los valores más altos en los meses de agosto y septiembre en el sitio de Xcalak Norte (Figura 33) y en septiembre en La Poza (Figura 34). Investigaciones previas indican que los valores altos de amonio favorecen a los corales teniendo como resultado un aumento de la densidad zooxantelar, pero en condiciones de laboratorio se pudo observar mortalidad en una porción baja de los corales (Hoegh-Guldberg y Williamson 1999). Adicionalmente, Bassim y Sammarco (2003) al experimentar con valores altos de amonio en temperaturas de 28 °C y hasta 32° C, observaron que el enriquecimiento de nutrientes en aguas tropicales y subtropicales representa una amenaza para las larvas de coral. Al igual que Harrison y Ward (2001) quienes indican que el enriquecimiento de amonio y fosfato perjudica significativamente el éxito de la fertilización y el desarrollo del embrión en los corales de arrecife escleractinios. De lo anterior podemos concluir que las concentraciones altas de amonio no parecen perjudicar a los corales adultos, pero la bibliografía indica que estas mismas concentraciones pueden ser perjudiciales para la reproducción y el éxito de las larvas de coral.

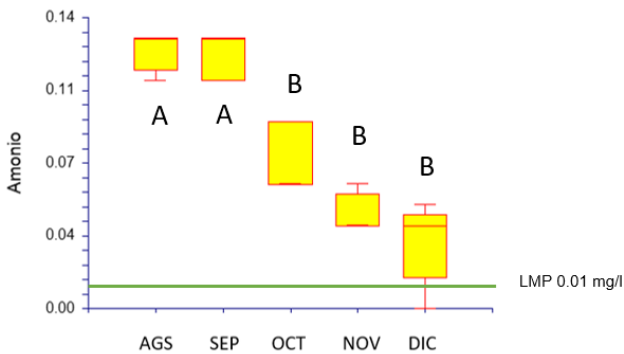


Figura 33. Amonio (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

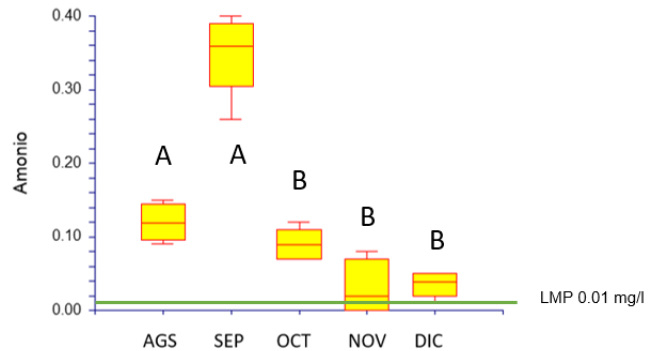


Figura 34. Amonio (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.

9.2.8 ORTOFOSFATOS

Las concentraciones de ortofosfatos en las dos zonas de estudio superaron el valor máximo permisible (0.01 mg/l), en la zona de Xcalak Norte el mes de noviembre y diciembre (Figura 35) y para La Poza tenemos el valor más alto registrado el mes de octubre (Figura 36). Los sistemas arrecifales son en general oligotróficos y que estos están perdiendo esta condición debido a las actividades asociadas con el crecimiento de la población y por el alza del turismo (Romeu, 1995).

Algunos estudios indican que los niveles altos de fosfatos favorecen a las colonias de arrecifes, ya que su crecimiento es mucho más rápido de lo normal (Koop et al., 2001; Bucher y Harrison, 2002). Sin embargo, en este estudio también se observó que las colonias de coral tienden a tener un esqueleto más débil y frágil, siendo así susceptibles a una mayor erosión y a una resiliencia baja a los efectos de tormentas y oleaje fuerte (Rosen 1981; Neudecker, 1983; Dunn et al., 2012). Bruno et al. (2003) experimentaron con altas concentraciones de nutrientes observando un aumento de enfermedades del coral como son la aspergilosis que es causada por un hongo y la enfermedad de banda amarilla, causada por una bacteria. Asimismo, el exceso de fosfatos puede hacer crecer a los corales más rápidamente pero su estructura no será resiliente.

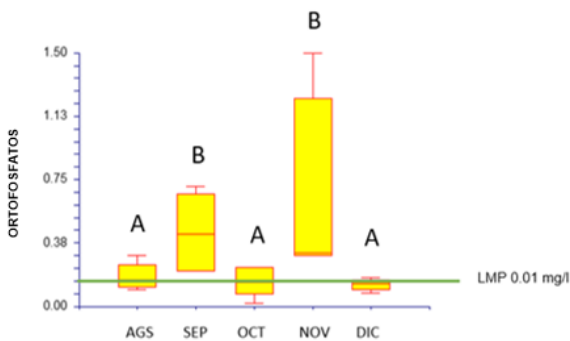


Figura 35. Ortofosfatos (mg/l) agua de fondo Xcalak Norte 2019.

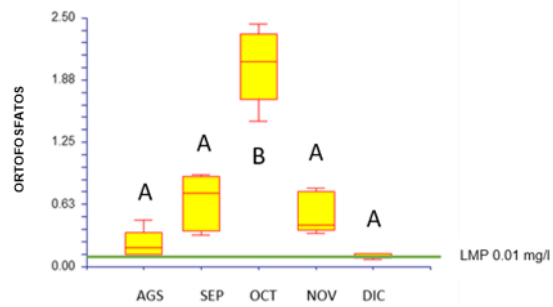


Figura 36. Ortofosfatos (mg/l) agua de fondo la Poza 2019.

9.3 MORTANDAD

Para el caso de la mortandad se obtuvo un porcentaje mensual por sitio. En Xcalak Norte se observó el mayor número de muertes en comparación con La Poza, como se puede ver en la tabla 6. En ambos sitios la mortalidad se fue incrementando cada mes, pero en Xcalak Norte casi llegó al 100% y en La Poza solo al 30% (Figura 37).

Tabla 7. Porcentaje de mortandad en los sitios de Xcalak Norte y La Poza 2019.

Xcalak Norte					La Poza				
periodo	Muerto	Vivo	Total	%muertos	periodo	Muerto	Vivo	Total	%muertos
Agosto	54	245	299	18.06%	Agosto	29	269	298	9.73%
Septiembre	59	241	300	19.67%	Septiembre	32	268	300	10.67%
Octubre	182	119	301	60.47%	Octubre	66	234	300	22.00%
Noviembre	290	10	300	96.67%	Noviembre	82	217	299	27.42%
Diciembre	294	7	301	97.67%	Diciembre	91	209	300	30.33%

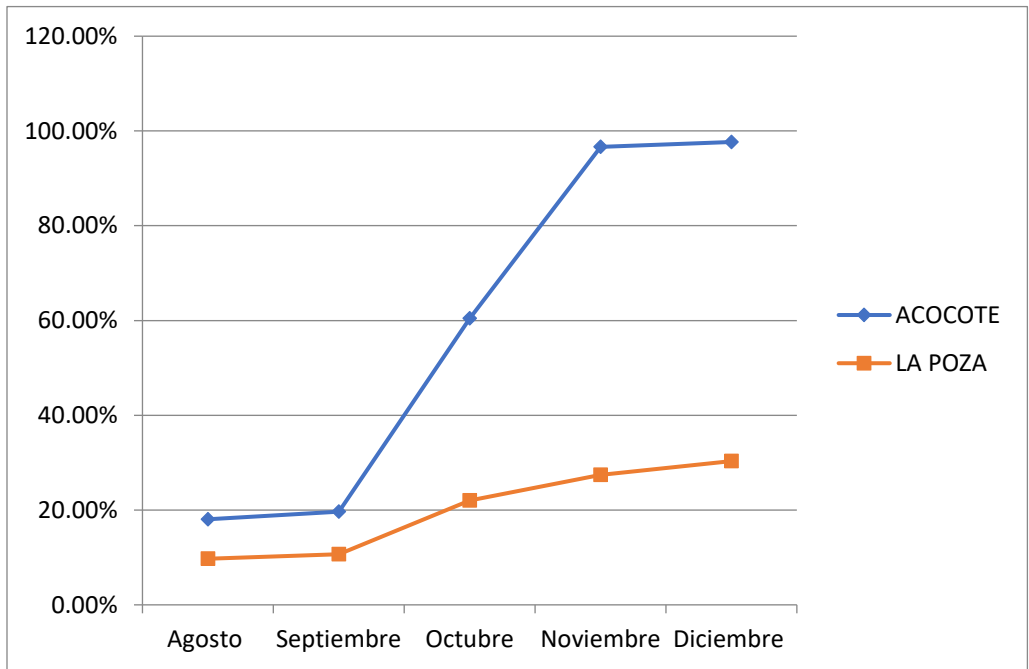


Figura 37. Mortandad durante los cinco meses de muestreo en los sitios de Xcalak Norte y La Poza 2019.

Se realizó un análisis de correlación para cada parámetro fisicoquímico con respecto a la mortandad de los corales. Como se ve en la tabla 8 el pH, el amonio y los nitritos son los tres parámetros que coinciden para ambos sitios. El pH tiene una influencia muy alta con más del 90% en la mortandad de los corales para ambas zonas. En el caso del amonio para Xcalak Norte tiene una correlación negativa de -0.95 y en La Poza del -0.68 y los nitratos en ambas zonas tiene una correlacion positiva del 0.70.

Tabla 8. Correlación de los parámetros fisicoquímicos y mortandad en los sitios de Xcalak Norte y La Poza.

XCALAK NORTE		LA POZA	
	MORTANDAD		MORTANDAD
pH	0.978018	pH	0.945376
Amonio	-0.952593	Nitritos	-0.771087
Nitritos	-0.7682	Amonio	-0.683578
Temperatura	-0.680675	Oxígeno D.	0.602643
Salinidad	-0.544581	Nitratos	-0.366363
Nitratos	-0.459574	Salinidad	-0.236174
Fosfatos	-0.175461	Fosfatos	0.20471
Oxígeno D.	-0.01115	Temperatura	-0.1676

Una correlación alta no indica una causalidad, en este caso, aunque la correlación de la mortalidad y el pH fue alta, la literatura indica que los valores de pH medidos no deben ser perjudiciales para los corales, por ello se decidió comparar los datos del punto 5 de cada sitio con los valores máximos permisibles.

Como se puede observar en la Tabla 9, en Xcalak Norte el pH, el O.D. y los nitratos son adecuados para los corales, pero tanto la temperatura, como la salinidad, los nitritos, el amonio y los ortofosfatos registrados durante los cinco meses de muestreo representan factores de estrés para los corales.

En el caso de La Poza (Tabla 10) tampoco representan un problema para los corales el pH, el O.D. y los nitritos, caso contrario de la salinidad, temperatura, nitratos, ortofosfatos y amonio.

De esto podemos concluir que la temperatura, la salinidad, el amonio y los ortofosfatos son factores de estrés importantes en ambos sitios para las colonias de coral. En el caso de la temperatura y la salinidad será poco probable que se pueda hacer algo al respecto dado el panorama de cambio climático mundial. En el caso de los nitratos, ortofosfatos y amonio será necesario realizar estudios para identificar las fuentes de éstos y proponer medidas de mitigación pertinentes.

Tabla 9. Comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del sitio 5 de Xcalak Norte con los Valores Máximos Permisibles (VMP)

¹SEMARNAT, 2019; ²Hernández, 2010; ³LFD, 2019

PARAMETRO	MES					
	VMP	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura	29 °C ¹	30	34	30	30	28
Salinidad	35ups ²	38	38	38	36	38
pH	6.0-9.0 ³	7.97	8	8.08	8.14	8.19
O.D.	5.0 mg/l ³	7.1	7.1	6.7	6.8	7.4
Nitratos	0.04 mg/l ³	0.003	0.007	0	0.001	0
Nitritos	0.01 mg/l ³	.11	0.13	0.06	0.05	0.03
Amonio	0.01 mg/l ³	0.13	0.43	0.13	0.03	0.17
Ortofosfatos	0.01 mg/l ³	1.3	1.7	1.8	1.8	1.5

Tabla 10. Comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del sitio 5 de La Poza con los Valores Máximos Permisibles (VMP)

¹SEMARNAT, 2019; ²Hernández, 2010; ³LFD, 2019

PARAMETRO	MES					
	VMP	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura	29 °C ¹	29	33	33	30	30
Salinidad	35ups ²	40	35	39	37	36
pH	6.0-9.0 ³	7.89	7.99	8.07	8.28	8.24
O.D.	5.0 mg/l ³	7.2	7.4	7.3	8.1	7.5
Nitratos	0.04 mg/l ³	1.8	0.9	0.7	1	1.2
Nitritos	0.01 mg/l ³	0.008	0.002	0	0	0
Amonio	0.01 mg/l ³	0.09	0.35	0.07	0	0.05
Ortofosfatos	0.01 mg/l ³	0.13	0.39	1.46	0.79	0.07

Una vez comparado los datos de los valores fisicoquímicos de cada sitio, específicamente del punto 5 donde se encuentran las zonas de restauración, se tomó la decisión de dejar fuera los parámetros que se encuentran dentro del rango de los VMP y con los que rebasaron dicho valor se llevó a cabo el análisis de componentes principales.

Tabla 11. Correlación de los parámetros que se encuentran arriba del VMP, fisicoquímicos y mortandad del punto 5 en los sitios de Xcalak Norte y La Poza.

XCALAK NORTE		LA POZA	
	MORTANDAD		MORTANDAD
Temperatura	-.681	Temperatura	-.168
Salinidad	-.545	Salinidad	-.236
Nitritos	-.768	Nitratos	-.366
Amonio	-.953	Amonio	-.684
Ortofosfatos	-.175	Ortofosfatos	.205

9.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica proveniente del análisis exploratorio de datos cuyo objetivo es la síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante una tabla de datos con muchas variables, el objetivo sería reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible. El ACP es utilizado en una amplia gama de aplicaciones en el estudio de fenómenos ambientales, desde el análisis de campos meteorológicos hasta en la evaluación de redes de control y vigilancia de la calidad del aire (Rojas, 2009).

En base a la información obtenida en la tabla de comparación de datos de cada sitio en el punto 5 contra los VMP, se tomó la decisión de dejar fuera los parámetros pH, O.D., nitratos para el caso de Xcalak Norte y pH, O.D., nitritos para el caso de La Poza. Esto debido a que ninguno de estos parámetros rebasa su VMP, y al momento de realizar el análisis los resultados se inclinaban a dichos valores, y no habría manera de justificarlos dentro de este estudio, al contrario de cuando se realizó el análisis sin estos parámetros, se obtuvo lo que se esperaba por los resultados obtenidos y observados en campo. La tabla de comunalidades es una herramienta que permite identificar que parte de la varianza o dispersión de la variable se está logrando reproducir, mostrando la representatividad de las variables. Si el nivel de extracción que muestra la tabla de comunalidades es menor a 0.5, significa que la variable estudiada no se está explicando bien dentro del modelo, debido a que no tiene un nivel importante de representación. Entre más cercana a uno esté la variable, mejor representada estará, por lo que el modelo mismo hace la selección de variables justo en esta primera etapa del análisis.

En el caso de Xcalak Norte se observa que la columna de extracción muestra un grado de representación significativo para todas las variables, siendo el menor de 0.822 correspondiente a la salinidad; mientras que el valor más elevado (0.969) corresponde a los nitritos (Tabla 7). Para el sitio de La Poza al igual que en Xcalak Norte se muestra un grado de representación significativo para todas las variables, siendo el menor de 0.977 para la temperatura, mientras que el valor más elevado (1.000), corresponde al amonio (Tabla 8). Todas las variables en ambos sitios se encuentran bien representadas dentro del modelo.

Tabla 7. Análisis de comunalidades del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa

Comunalidades		
XCALAK NORTE	Inicial	Extracción
Temperatura	1.000	.944
Salinidad	1.000	.822
Nitritos	1.000	.969
Amonio	1.000	.948
Ortofosfatos	1.000	.927
Mortandad	1.000	.939

Tabla 8. Análisis de comunalidades del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)

Comunalidades		
LA POZA	Inicial	Extracción
Temperatura	1.000	.977
Salinidad	1.000	.990
Nitratos	1.000	.998
Amonio	1.000	1.000
Ortofosfatos	1.000	.987
Mortandad	1.000	.990

La siguiente medida importante de confiabilidad que se analizó fue el número de componentes. Para ello en la tabla de varianza total explicada se muestran los componentes principales de la varianza con autovalores superiores a 1. Teniendo así para el caso de Xcalak Norte que el primer componente explica el 66.90%; el segundo explica el 25.60%, con lo que se obtiene un acumulado aproximado al 92 % de la explicación total de la varianza (Tabla 9). Para el caso de La Poza, el primer componente explica el 44.37%; el segundo explica el 32.93% y el tercero 21.72% Se obtiene un acumulado aproximado al 99 % de la explicación total de la varianza (Tabla 10).

Tabla 9. Análisis varianza total explicada del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa SPSS)

Componente	XCALAK NORTE			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	4.014	66.900	66.900	4.014	66.900	66.900
2	1.536	25.603	92.503	1.536	25.603	92.503
3	.367	6.111	98.614			
4	.083	1.386	100.000			
5	1.002E-013	1.031E-013	100.000			
6	-1.005E-013	-1.085E-013	100.000			

Tabla 10. Análisis varianza total explicada del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa SPSS)

Varianza total explicada

Componente	LA POZA			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2.663	44.379	44.379	2.663	44.379	44.379
2	1.976	32.936	77.315	1.976	32.936	77.315
3	1.304	21.726	99.042	1.304	21.726	99.042
4	.057	.958	100.000			
5	-1.001E-013	-1.019E-013	100.000			
6	-1.005E-013	-1.087E-013	100.000			

Cada dimensión va a representar a las variables en cierta proporción, siendo las primeras dimensiones las que van a tener un mayor grado de representación, esto se expresa en la Gráfica de Sedimentación como una mayor distancia en el eje vertical a cero. El Gráfico de Sedimentación originalmente propuesto por Cattell (1966) es una representación gráfica del tamaño de los autovalores, permite ver si se está dejando fuera algún componente importante (Cox y Cox, 1994) (Figura 37, 38).

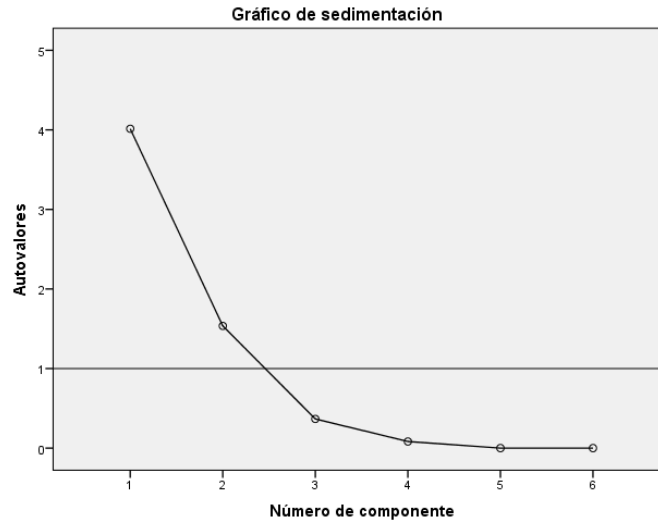


Figura 37. Gráfico de sedimentación del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa SPSS)

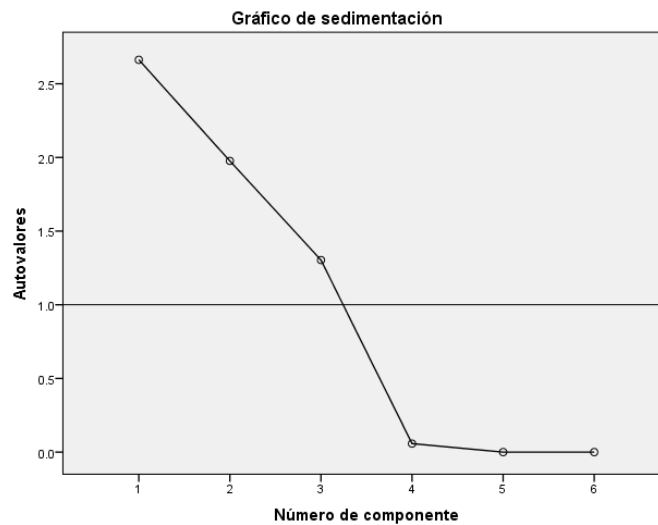


Figura 38. Gráfico de sedimentación del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa SPSS)

En este estudio para el sitio de Xcalak Norte, tenemos que en el primer componente (dimensión) las variables mejor explicadas son: temperatura (.939), nitritos (.978), amonio (.959). Para el segundo componente están: salinidad (-.853), ortofosfatos (.707) (Tabla 11). Para el sitio de La Poza las variables mejor explicadas son: temperatura (.955) nitratos (-.941). Para el segundo componente esta: amonio (-.972) y en el tercer componente solo se tiene salinidad (.807) (Tabla 12).

Tabla 11. Matriz de componentes del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)

XCALAK NORTE	Componente	
	1	2
Temperatura	.939	.252
Salinidad	.307	-.853
Nitritos	.978	.115
Amonio	.959	-.169
Ortofosfatos	.654	.707
Mortandad	-.858	.451

Tabla 12. Matriz de componentes del sitio La Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del

LA POZA	Componente		
	1	2	3
Temperatura	.955	-.138	.214
Salinidad	-.488	.317	.807
Nitratos	-.941	-.319	.106
Amonio	.489	-.872	.022
Ortofosfatos	.621	.593	.501
Mortandad	.056	.802	-.586

En el gráfico de componentes principales (CP) de Xcalak Norte (Figura, 39), observamos que el CP1 explica el 66.90 % de todo el sitio, aquí los componentes predominantes son los nitritos, amonio y la temperatura. Hoy en día se realizan varios estudios para saber el impacto que este aumento de nutrientes trae en estos organismos. Bassim y Sammarco (2003) llevaron a cabo un experimento en laboratorio exponiendo a larvas de coral a altas temperaturas y concentraciones de amonio, su temperatura control fue de 29°C y el experimento fue a temperaturas de 30 y 32° C, trayendo como consecuencia entre un 50 y 70% de mortandad para estas temperaturas, con el aumento de temperatura aumento el amonio en 20 µM de NH₄, que esta concentración es similar de donde se obtuvieron las larvas, se observó que se detuvo el desarrollo larvario en sus últimas etapas. No solo se ha encontrado el problema en el ciclo larvario, sino también en el blanqueamiento de coral, al aumentar la temperatura y al rebasar los VMP del amonio y los nitratos la zooxantelas salen del coral y esto provoca su blanqueamiento, así lo comprobó Zhu et al., (2004). Al realizar estas pruebas con tres especies distintas de corales, aumentando la temperatura, amonio y nitratos más allá de su VMP.

Para el CP2 solo el 25.60 % del sitio. Podemos observar que la salinidad y los ortofosfatos son los más relacionados. En la actualidad los efectos de la salinidad en los arrecifes de coral, no se han estudiado a fondo, a pesar de la importancia que esta tiene para la supervivencia de los organismos relacionados a los arrecifes de coral incluyendo a los corales; como es la osmorregulación entre otros procesos fisiológicos necesarios de arrecife (Stephen et al., 1992).

Para el grafico de la poza (Figura 40), tenemos tres componentes principales, el CP1 que explica el 44.38%, está representado por temperatura, nitratos y ortofosfatos. Lam et al., (2015) realizaron experimentos para observar el efecto que tiene el aumento del nitrógeno amoniacal y los ortofosfatos en etapas del estado larvario como son: fertilización, motilidad, asentamiento de larvas de plánula, desarrollo embrionario y la supervivencia. Se obtuvo que los efectos de los nutrientes elevados parecen volverse más significativos solo en los gametos o las larvas que experimentan actividades celulares activas en la fertilización, el desarrollo temprano y el asentamiento.

No solo se tienen estudios relacionados al efecto negativo en las etapas larvianas de los corales ni al blanqueamiento de las colonias de coral, sino que también se ha encontrado una alta relación con las enfermedades que actualmente están atacando a los corales y que son más frecuentes. Una de ellas es la enfermedad de la banda negra, que en pruebas in situ y de laboratorio se encontró el progreso de dicha enfermedad, ya que en pruebas in situ se llegaron a concentraciones de hasta 3 μM los corales expuestos, demostraron aumentos similares en la progresión de la banda negra (Voss y Richardson, 2006).

Para el CP2 el 32.93 % que es solamente el amonio, para este parámetro se encuentran diversos estudios que han encontrado una respuesta positiva para el aumento de este, ya que puede ayudar en la reproducción rápida de la zooxantela del coral, como lo demostró Hoegh-Guldberg (1994). El cual expusieron a un coral a varias concentraciones de amonio y el resultado fue que en concentración de 20mM aumento el número de zooxantelas, pero en concentraciones de 50mM esta reproducción se vio afectada y disminuyo el conteo de la zooxantelas. Si bien podemos encontrar que para algunos nutrientes le favorece para el crecimiento, desarrollo, reproducción a los corales. también vemos que cualquier parámetro con niveles elevados o en relación con algún otro parámetro igual con valores altos, llega afectar el funcionamiento correcto de los corales. Para el CP3 el 21.72% se encuentra la salinidad, que como bien ya lo mencionamos aún falta bastante información para saber a ciencia cierta qué tipo de beneficio o daño le puede traer a los corales.

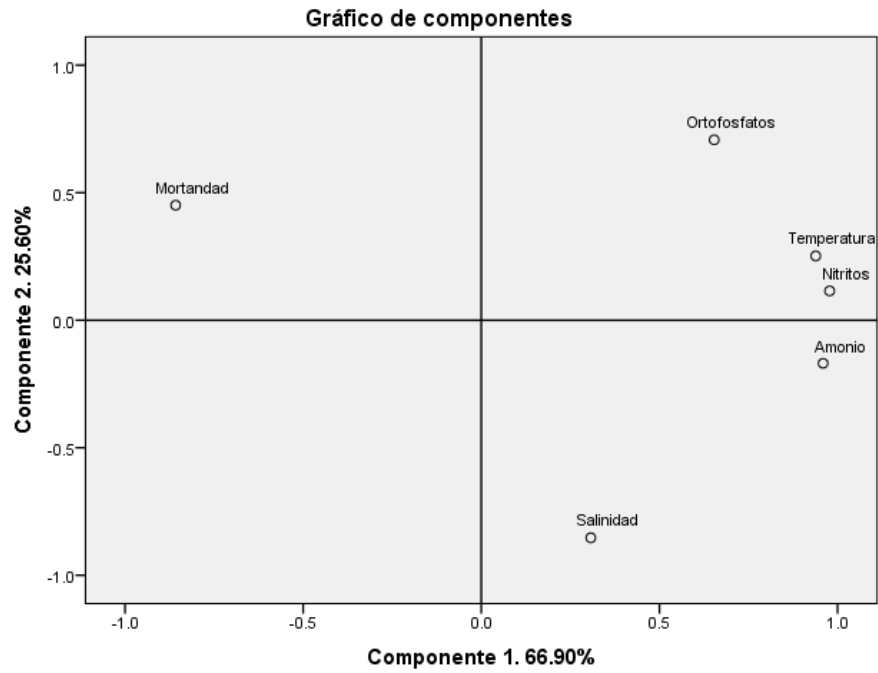


Figura 39. Gráfico de componentes del sitio Xcalak Norte. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss)

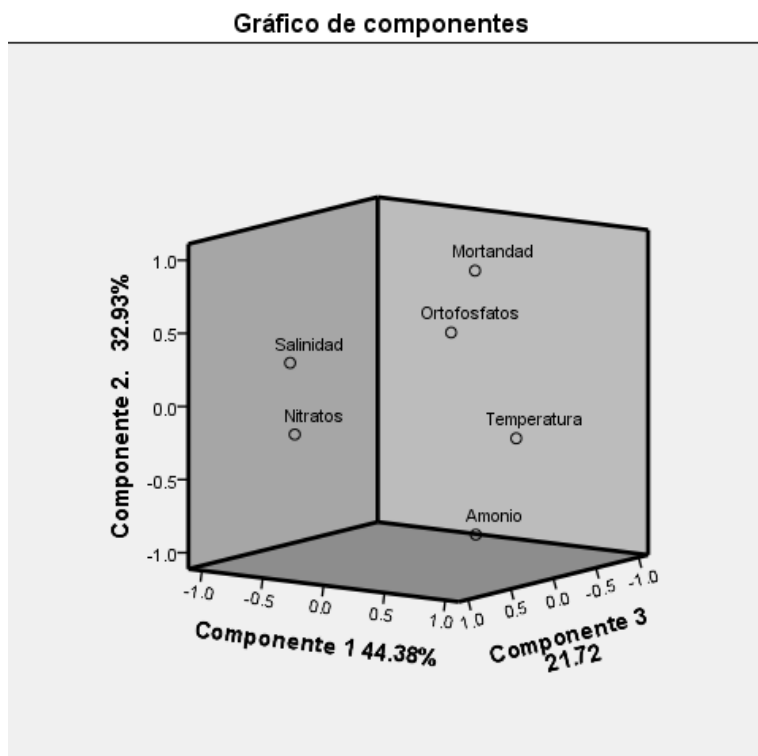


Figura 40. Gráfico de componentes del sitio la Poza. (Análisis de componentes principales; Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos del programa spss).

El análisis de componentes principales demostró que las variables temperatura, nitritos y amonio juegan un papel importante en ambos sitios y que su inclusión en estudios similares está confirmando los resultados aquí obtenidos en cuanto a las principales áreas de impacto positivo o negativo.

A pesar de estas limitaciones, la técnica de análisis de componentes principales no deja de ser útil a la hora de identificar, cuantificar y determinar las principales variables que influyen en los corales y adoptar las medidas de corrección que correspondan para su óptimo crecimiento.

Cabe señalar que en este trabajo no se evaluaron otro tipo de contaminantes como los relacionados con el uso de combustibles fósiles (hidrocarburos policíclicos aromáticos) (ko et al., 2014; Jafarabadi et al., 2018; Yang et al., 2020. Ganadería o agricultura (plaguicidas) (Acevedo, 1991; Roche and Ramade, 2011) y otras actividades (contaminantes emergentes) que se sabe causan mortalidad en los corales (; Bargar et al., 2013; Stien et al., 2020; Huang et al., 2021), por lo que en estudios futuros será necesario la inclusión de este tipo de parámetros para tener una visión más amplia de lo que se debe controlar para tener sitios de restauración activa exitosos.

9.5 FUNCIONES DE PORCENTAJE DE MORTANDAD EN XCALAK NORTE Y LA POZA

Con el objetivo de construir una relación con todos los elementos que intervienen en el proceso y encontrar su interrelación entre éstos, buscamos inicialmente una función para determinar la mortandad en el fondo en Xcalak Norte conforme a los datos obtenidos durante las temporadas de estudio.

Primeramente, construimos la tabla de porcentajes globales durante todas las temporadas conforme a los datos del libro “Datos reales de las arañas” en Excel, obteniendo,

Tabla 13. Interpolación global de la mortandad

0	0
1	18.06%
2	19.67%
3	60.47%
4	96.67%
5	97.67%

Después, realizamos el ajuste de mortandad global por interpolación para obtener un polinomio y su gráfica, la cual mostramos en la figura 42. La variable t se utiliza como variable universal en los periodos normalizados por unidades unitarias.

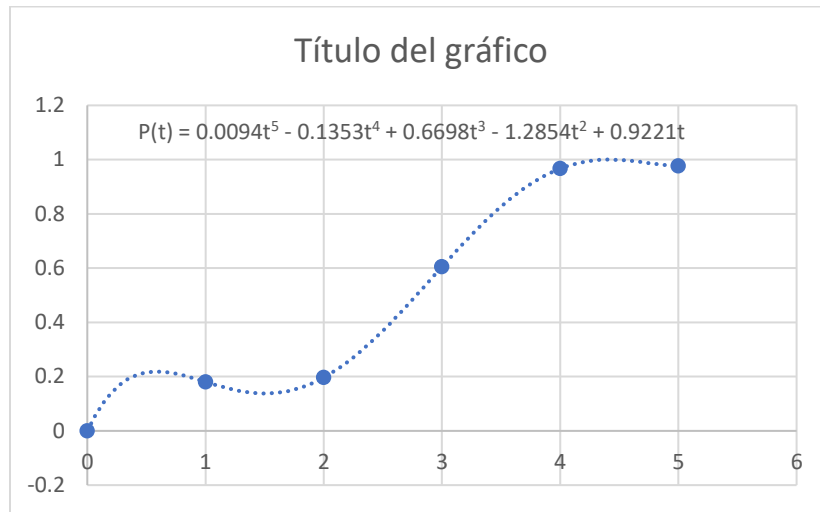


Figura 41. Mortalidad global por interpolación. Del sitio de Xcalak Norte.

El polinomio que ajusta la mortalidad global en el fondo de Xcalak Norte, dependiente de la variable temporal t es

$$P(t) = 0.0094t^5 - 0.1353t^4 + 0.6698t^3 - 1.2854t^2 + 0.9221t$$

De manera análoga, construimos una relación funcional para determinar la mortalidad en el fondo en La poza conforme a los datos obtenidos durante las temporadas de estudio.

Igualmente, construimos la tabla de porcentajes globales durante todas las temporadas conforme a los datos del libro “Datos reales de las arañas” en Excel, obteniendo:

Tabla 14. Interpolación global de la mortalidad

La poza	% muertos
0	0
1	9.73%
2	10.67%
3	22%
4	27.42%
5	30.33%

Posteriormente, y de igual manera, realizamos el ajuste de mortalidad global por interpolación para obtener un polinomio y su gráfica, la cual mostramos en la siguiente figura. La variable t se utiliza como variable universal.

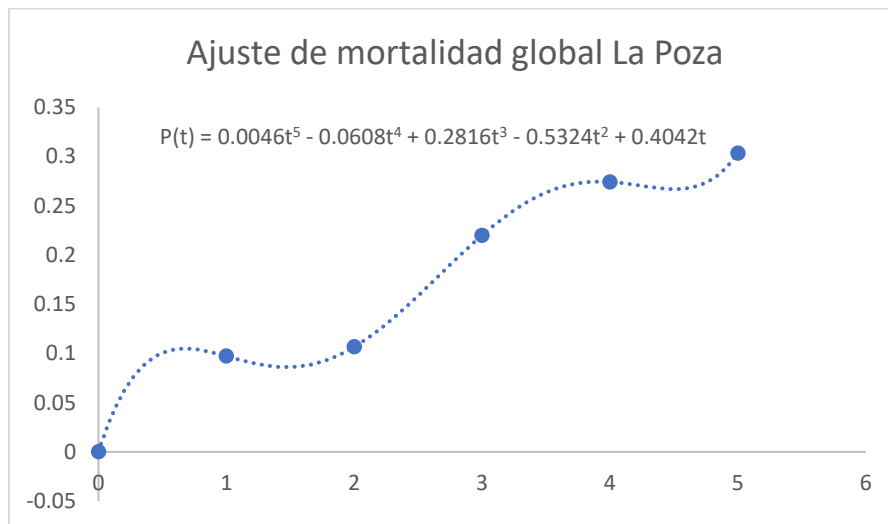


Figura 42. Mortandad global por interpolación. Del sitio de la Poza.

El polinomio que ajusta la mortandad global en el fondo de la Poza en función de la variable t en este caso es:

$$P(t) = 0.0046 t^5 - 0.0608 t^4 + 0.2816 t^3 - 0.5324t^2 + 0.4042 t$$

Mencionamos que, a pesar de haber obtenido esas relaciones explícitas de mortandad por periodo en cada caso, el uso de interpolación de Lagrange para encontrar una interrelación jerárquica entre varios elementos principales que intervienen y han sido medidos durante el proceso de mortandad, como la temperatura, pH, salinidad, nitritos, nitratos, amonio y oxígeno disuelto, no ha sido posible en virtud de que las cantidades obtenidas de cada uno de ellos están muy distantes las unas de las otras en sus unidades correspondientes.

Consecuentemente, este objetivo será tratado y analizado con otra metodología matemática en estudios posteriores.

10. CONCLUSIONES

El Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, actualmente es una zona poco desarrollada, por lo que se esperaría que un proyecto de restauración de arrecifes tuviera amplias posibilidades de éxito. Sin embargo, en el presente trabajo se observaron alteraciones importantes en la calidad del agua en Xcalak Norte, lo que pone en riesgo el desarrollo de los organismos acuáticos y la sustentabilidad del arrecife.

Las altas temperaturas y salinidades registradas son consecuencia del cambio climático global, por lo que no será posible controlar su alteración. En este sentido se debe poner énfasis en parámetros como los nutrientes.

Los nitritos, nitratos, amonio y ortofosfatos rebasaron los VMP, posiblemente por la influencia de los aportes de agua residual sin tratamiento que se relacionan con los asentamientos humanos en la región, y debido a que existen proyectos para atraer mayor turismo a la zona, es necesario proteger este frágil ecosistema a través del tratamiento de las aguas residuales municipales y del hotelería.

11. RECOMENDACIONES

Se deben considerar estudios a largo plazo, antes, durante y después de la restauración.

Para lograr sitios con restauración activa exitosa es necesario un análisis de los contaminantes del agua y sedimentos relacionados con las actividades antrópicas que se desarrollan en el área.

Es necesario llevar a cabo programas de concientización dirigidos a los pobladores, a las ANP, los turistas y los hoteleros que incluyan la difusión del trabajo que implica realizar la restauración, involucrando a la comunidad en grupos de restauración para sus arrecifes.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, R. (1991). Preliminary observations on effects of pesticides carbaryl, naphthol, and chlorpyrifos on planulae of the hermatypic coral *Pocillopora damicornis*.
- Acosta, J. C., Baldiris, I., & Pacheco, H. P. (2015). Análisis De La Variación En La Calidad Del Agua En La Bahía De Barbacoas-Cartagena Durante El Periodo 2001-2014. *Ingeniería e Innovación*, 3(1).
- Aguilera, L., Bonilla, H., López, C., & Pérez, R. (2017). Los arrecifes coralinos de México: servicios ambientales y secuestro de carbono. *Elementos para Políticas Públicas*, 53-62.
- Alasdair, E. J., Gómez, E.D. (2007). Reef Restoration Concepts & Guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management program: St. Lucia, Australia. iv + 38pp
- Almaguer, Y. R., Sánchez, M. A. L., & García, C. M. (2021). Análisis de variables predictores del índice de competitividad en los destinos turísticos de América Central y el Caribe. *Avances*, 23(1), 2-14.
- Arias-González, J.E., J. Calle-Triviño, C. Cortés-Useche, J.L. Cabrera-Pérez, A.I. Muñiz-Castillo, J.P. Cabrera-Martínez & C.I. Viveros-Martínez. (2015). Restauración y manejo de sitios arrecifales impactados por fenómenos naturales y antrópicos. CINVESTAV, PNAA, Yucatán, México
- Atkinson, M. J., & Cuet, P. (2008). Possible effects of ocean acidification on coral reef biogeochemistry: topics for research. *Marine Ecology Progress Series*, 373, 249-256.
- Bargar, T. A., Garrison, V. H., Alvarez, D. A., & Echols, K. R. (2013). Contaminants assessment in the coral reefs of Virgin Islands National Park and Virgin Islands Coral Reef National Monument. *Marine pollution bulletin*, 70(1-2), 281-288.
- Barón, M. F. R. (2017). La restauración de arrecifes de coral; una alternativa de conservación en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).
- Bartice Hodgson, D. D. (2020). Caracterización del blanqueamiento de corales en los arrecifes coralinos en Black Mangrove Cay, Cayos Perlas, en el año 2019 (Doctoral dissertation, Bluefields Indian & Caribbean University).
- Bassim, K., & Sammarco, P. (2003). Effects of temperature and ammonium on larval development and survivorship in a scleractinian coral (*Diploria strigosa*). *Marine Biology*, 142(2), 241-252.
- Blanchon, P., Iglesias-Prieto, R., Jordán Dahlgren, E., & Richards, S. (2010). Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 229-248.
- Bonilla, H. R., & Martínez, R. (2005). Estado actual de los corales arrecifales en México: especies en riesgo. *La Jornada UNAM*.
- Bruckner, A. W., Hourigan, T. F., Moosa, M., Soemodihardjo, S., Soegiarto, A., Romimohtarto, K., ... & Suharsono, S. (2002). Proactive management for conservation of *Acropora cervicornis* and *Acropora palmata*: application of the U. S. Endangered Species Act. In *Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali, 23-27 October 2000*, (Vol. 2, pp. 661-665).

- Bruno, J. F., Petes, L. E., Drew Harvell, C., & Hettinger, A. (2003). Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases. *Ecology letters*, 6(12), 1056-1061.
- Bucher, D.J., Harriott, V.J., Roberts, L.G., 1998. Skeletal micro-density, porosity and bulk density of acroporid corals. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 228, 117–136.
- Bucher, D. J., & Harrison, P. L. (2002). Growth response of the reef coral *Acropora longicyathus* to elevated inorganic nutrients: do responses to nutrients vary among coral taxa. *In Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali (Vol. 1, pp. 443-448).*
- Buddemeier, R. W., Kleypas, J. A., & Aronson, R. B. (2004). Potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems. *Coral reefs and global climate change. Pew Center on Global Climate Change, Virginia, USA.*
- Call, K. A., Hardy, J. T., & Wallin, D. O. (2003). Coral reef habitat discrimination using multivariate spectral analysis and satellite remote sensing. *International Journal of remote sensing*, 24(13), 2627-2639.
- Camacho-Cruz, K., & Navarrete, A. (2016). Tesis de maestría: Calidad del Agua y Bioindicadores en el Caribe Mexicano. El Colegio de la Frontera Sur. Chetumal Quintana Roo.
- Casas Figueroa, D. C. (2017). Supervivencia y crecimiento de esquejes de *Acropora palmata* en dos técnicas de restauración, in situ y ex situ en isla Fuerte (Caribe colombiano).
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CNA), 2003. Ley federal de derechos y normas aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Diario Oficial de la Federación, México. Enero 2:173-191.
- CONABIO <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/arrecifes>)
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2004). Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. México: Autor.
- Conanp. 2008. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.
- DE LA OFICINA, P. U. I. (2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR).
- De'ath, G., Lough, J. M., & Fabricius, K. E. (2009). Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 323(5910), 116-119.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2017. Acuerdo por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Parque Nacional la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano. 22/05/2017, SAGARPA, Ciudad de México
- Dunn, J. G., Sammarco, P. W., & LaFleur Jr, G. (2012). Effects of phosphate on growth and skeletal density in the scleractinian coral *Acropora muricata*: A controlled experimental approach. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 411, 34-44.
- El-Sikaily, A., Khaled, A., El Nemr, A., Said, T. O., & Abd-Alla, A. M. A. (2003). Polycyclic aromatic hydrocarbons and aliphatics in the coral reef skeleton of the Egyptian Red Sea coast. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 71(6), 1252-1259.
- Garzón-Ferreira, J. (1997). Arrecifes Coralinos: ¿ Un tesoro camino a la extinción?.
- Gutiérrez, D. (2016). Evaluación del reclutamiento de coral en el arrecife de Mahahual: como indicador de recuperación. Universidad de Quintana Roo, división de ciencias e ingeniería. Chetumal Quintana Roo, México.

- Haas, A. F., Smith, J. E., Thompson, M., & Deheyn, D. D. (2014). Effects of reduced dissolved oxygen concentrations on physiology and fluorescence of hermatypic corals and benthic algae. *PeerJ*, 2, e235.
- Harrison, P., & Ward, S. (2001). Elevated levels of nitrogen and phosphorus reduce fertilisation success of gametes from scleractinian reef corals. *Marine Biology*, 139(6), 1057-1068.
- Hernández Arana, H. 2010. Caracterización del ANP Parque Nacional Arrecifes de Xcalak y formulación de un programa de monitoreo. El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Chetumal. Informe final SNIBCONABIO proyecto No. DM015. México D. F.
- Hernández-Zárate, G., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. D. R., Zamora-Castro, J. E., & Maldonado-Hernández, J. R. (2011). Cultivo del coral cuerno de alce *Acropora palmata* en un sistema recirculado utilizando agua de mar sintética. *Revista de biología marina y oceanografía*, 46(3), 477-482.
- Higuchi, T., Yuyama, I., & Nakamura, T. (2015). The combined effects of nitrate with high temperature and high light intensity on coral bleaching and antioxidant enzyme activities. *Regional studies in marine science*, 2, 27-31.
- Hoegh-Guldberg, O., & Smith, G. J. (1989). The effect of sudden changes in temperature, light and salinity on the population density and export of zooxanthellae from the reef corals *Stylophora pistillata* Esper and *Seriatopora hystrix* Dana. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 129(3), 279-303.
- Hoegh-Guldberg, O., & Williamson, J. (1999). Availability of two forms of dissolved nitrogen to the coral *Pocillopora damicornis* and its symbiotic zooxanthellae. *Marine Biology*, 133(3), 561-570.
- Huang, W., Chen, M., Song, B., Deng, J., Shen, M., Chen, Q., ... & Liang, J. (2021). Microplastics in the coral reefs and their potential impacts on corals: A mini-review. *Science of The Total Environment*, 762, 143112.
- Iijima, M., Yasumoto, K., Yasumoto, J., Yasumoto-Hirose, M., Kuniya, N., Takeuchi, R., ... & Watabe, S. (2019). Phosphate enrichment hampers development of juvenile *Acropora digitifera* coral by inhibiting skeleton formation. *Marine biotechnology*, 21(2), 291-300.
- Jafarabadi, A. R., Bakhtiari, A. R., Hedouin, L., Toosi, A. S., & Cappello, T. (2018). Spatio-temporal variability, distribution and sources of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in reef surface sediments of Kharg and Lark coral reefs, Persian Gulf, Iran. *Ecotoxicology and environmental safety*, 163, 307-322.
- Jiménez, L. N. L. (2017). Conservación en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. *Teoría y Praxis*, (21), 9-30. Universidad de Quintana Roo Cozumel, México
- Jokiel, P. L., & Coles, S. L. (1977). Effects of temperature on the mortality and growth of Hawaiian reef corals. *Marine Biology*, 43(3), 201-208.
- Kitada, Y., Kawahata, H., Suzuki, A., & Oomori, T. (2008). Distribution of pesticides and bisphenol A in sediments collected from rivers adjacent to coral reefs. *Chemosphere*, 71(11), 2082-2090.9
- KLEYPAS, J., & YATES, K. (2009). Coral Reefs and Ocean Acidification. *Oceanography*, 22(4), 108-117. Retrieved May 12, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/24861028>

- Ko, F. C., Chang, C. W., & Cheng, J. O. (2014). Comparative study of polycyclic aromatic hydrocarbons in coral tissues and the ambient sediments from Kenting National Park, Taiwan. *Environmental Pollution*, 185, 35-43.
- Koop, K., Booth, D., Broadbent, A., Brodie, J., Bucher, D., Capone, D., ... & Yellowlees, D. (2001). ENCORE: the effect of nutrient enrichment on coral reefs. Synthesis of results and conclusions. *Marine pollution bulletin*, 42(2), 91-120.
- Kuta, K., & Richardson, L. (2002). Ecological aspects of black band disease of corals: relationships between disease incidence and environmental factors. *Coral Reefs*, 21(4), 393-398.
- Lam, E. K. Y., Chui, A. P. Y., Kwok, C. K., Ip, A. H. P., Chan, S. W., Leung, H. N., ... & Ang, P. O. (2015). High levels of inorganic nutrients affect fertilization kinetics, early development and settlement of the scleractinian coral *Platygyra acuta*. *Coral Reefs*, 34(3), 837-848.
- Lapointe, B. E., Barile, P. J., & Matzie, W. R. (2004). Anthropogenic nutrient enrichment of seagrass and coral reef communities in the Lower Florida Keys: discrimination of local versus regional nitrogen sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 308(1), 23-58.
- Lara-Lara, J.R., et al. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pp. 109-134.
- Maina, J., Venus, V., McClanahan, T. R., & Ateweberhan, M. (2008). Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecological modelling*, 212(3-4), 180-199.
- Martínez, J. M. P. (2016). El papel del análisis por componentes principales en la evaluación de redes de control de la calidad del aire. *Comunicaciones en Estadística*, 9(2), 271-294.
- Martínez-Castillo, V., Rodríguez-Troncoso, A. P., Santiago-Valentín, J. D., & Cupul-Magaña, A. L. (2020). The influence of urban pressures on coral physiology on marginal coral reefs of the Mexican Pacific. *Coral Reefs*, 39(3), 625-637.
- Marubini, F., & Davies, P. S. (1996). Nitrate increases zooxanthellae population density and reduces skeletogenesis in corals. *Marine Biology*, 127(2), 319-328.
- Montagna, P., McCulloch, M., Taviani, M., Mazzoli, C., & Vendrell, B. (2006). Phosphorus in cold-water corals as a proxy for seawater nutrient chemistry. *Science*, 312(5781), 1788-1791.
- Muthiga, N. A., & Szmant, A. M. (1987). The effects of salinity stress on the rates of aerobic respiration and photosynthesis in the hermatypic coral *Siderastrea siderea*. *The Biological Bulletin*, 173(3), 539-551.
- Nedelec, S. L., Simpson, S. D., Holderied, M., Radford, A. N., Lecellier, G., Radford, C., & Lecchini, D. (2015). Soundscapes and living communities in coral reefs: temporal and spatial variation. *Marine Ecology Progress Series*, 524, 125-135.
- Nelson, H. R., & Altieri, A. H. (2019). Oxygen: the universal currency on coral reefs. *Coral Reefs*, 38(2), 177-198.
- Neudecker, S. (1981). Growth and survival of scleractinian corals exposed to thermal effluents at Guam. In 4. International Coral Reef Symposium, Manila (Philippines), 18-22 May 1981.
- Nordemar, I., Nyström, M., & Dizon, R. (2003). Effects of elevated seawater temperature and nitrate enrichment on the branching coral *Porites cylindrica* in the absence of particulate food. *Marine Biology*, 142(4), 669-677.

- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water research*, 39(12), 2621-2635.
- Parsons, T. R., Maita, Y., & Lalli, C. M. (1984). A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. In *Biological Oceanographic Processes* (p. 173). New York: Pergamon Press.
- Pérez, C. E., Navarro, E. E., Estrada, S. A., Espinosa, A. N., Melo M. S., Rivas, S. M., & Álvarez, F. L. (2017). Estado de conservación de los arrecifes de coral de la península de Yucatán. Puerto Morelos, México. Greenpeace y UNAM.
- Pineda Martínez, L. F. (2021). Restauración ecológica mediante la implementación de guarderías de coral de las especies *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata*, en el Acuario y Museo del Mar El Rodadero, Santa Marta-Colombia.
- Pizarro, V., Carrillo, V., & García-Rueda, A. (2014). Revisión y estado del arte de la restauración ecológica de arrecifes coralinos. *Biota colombiana*, 15.
- Prerna, R., Naidu, V. S., Sukumaran, S., & Gajbhiye, S. N. (2015). Observed decadal changes in extent of mangroves and coral reefs in southern Gulf of Kachchh using principal component analysis and geo-spatial techniques: a case study. *Journal of coastal conservation*, 19(3), 257-267.
- Richmond, R. H. (1993). Coral reefs: present problems and future concerns resulting from anthropogenic disturbance. *American Zoologist*, 33(6), 524-536.
- Roche, H., Salvat, B., & Ramade, F. (2011). Assessment of the pesticides pollution of coral reefs communities from French Polynesia. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 66(1), 3-10.
- Rodríguez, D. (2007). Composición y estructura de las comunidades bentónicas asociadas a la unidad ecológica de *Acropora palmata*, y *Acropora cervicornis* Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (PNNCRSB) Cartagena Colombia.
- Rogers, C. S., & Garrison, G. (2001). Manual para el monitoreo de arrecifes de coral en el Caribe y Atlántico occidental. Servicio de Parques Nacionales.
- Rojas, O. R. (2009). Análisis en componentes principales. *San José: Universidad de Costa Rica*.
- Romeu, E. (1995). El arrecife como recurso. *Biodiversitas CONABIO*, 3, 8-13.
- Rosen, B. R. (1981). The tropical high diversity enigma-the corals'-eye view. *Chance, change and challenge: the evolving biosphere*, 103-129.
- Schlöder, C., & D'Croz, L. (2004). Responses of massive and branching coral species to the combined effects of water temperature and nitrate enrichment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 313(2), 255-268.
- SEMARNAT, 2018. Programa de Acción para la Conservación de las Especies *Acropora* (Cuerno de Ciervo *Acropora cervicornis* y Cuerno de Alce *Acropora palmata*).
- Shaw, C., Boothroyd, J., Kilinger, J., & Rubinoff, P. (1997). Geología costera de la región de Xcalak. *Amigos de Sian Kaan, Número Especial*, 17, 16-23.
- Silbiger, N. J., Nelson, C. E., Remple, K., Sevilla, J. K., Quinlan, Z. A., Putnam, H. M., ... & Donahue, M. J. (2018). Nutrient pollution disrupts key ecosystem functions on coral reefs. *Proceedings of the Royal Society B*, 285(1880), 20172718.
- Souza, C. P., Alafita-Vásquez, H., & Andreu-Montalvo, E. (2010). Factores de riesgo para los arrecifes coralinos y sus mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático global. *CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO*, 181.

- Stambler, N., Popper, N., Dubinsky, Z. V. Y., & Stimson, J. (1991). Effects of nutrient enrichment and water motion on the coral *Pocillopora damicornis*.
- Stien, D., Suzuki, M., Rodrigues, A., Yvin, M., Clergeaud, F., Thorel, E., & Lebaron, P. (2020). A unique approach to monitor stress in coral exposed to emerging pollutants. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
- Strickland, J. D. H., & Parsons, T. R. (1972). A practical handbook of seawater analysis.
- Suryanti, S., Ain, C., & Latifah, N. (2018, February). Mapping of Nitrate, Phospat And Zooxanthelae With Abundance Of Sea Urchins on Massive Coral Reef in Karimunjawa Island. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 116, No. 1, p. 012086). IOP Publishing.
- Szmant, A. M. (2002). Nutrient enrichment on coral reefs: ¿is it a major cause of coral reef decline? *Estuaries*, 25(4), 743-766.
- Torrijo, E. M., & Rumbaut León, F. (2019). Análisis de componentes principales para obtener indicadores reducidos de medición en la búsqueda de información. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 30(3).
- Veron, J. E. N. (2000). *Corals of the World* (No. C/593.6 V4).
- Vogt, N. B., Moksness, E., Sporstøl, S. P., Knutsen, H., Nordenson, S., & Kolset, K. (1986). SIMCA principal component analysis of fatty acid patterns in Day-1 and Day-8 cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) eggs. *Marine Biology*, 92(2), 173-182.
- Voss, J. D., & Richardson, L. L. (2006). Nutrient enrichment enhances black band disease progression in corals. *Coral Reefs*, 25(4), 569-576.
- Wiedenmann, J., D'Angelo, C., Smith, E. G., Hunt, A. N., Legiret, F. E., Postle, A. D., & Achterberg, E. P. (2013). Nutrient enrichment can increase the susceptibility of reef corals to bleaching. *Nature Climate Change*, 3(2), 160-164.
- Wilson, S. K., Graham, N. A. J., & Polunin, N. V. (2007). Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs. *Marine Biology*, 151(3), 1069-1076.
- Wu, M. L., & Wang, Y. S. (2007). Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72(4), 732-742.
- Yang, T., Diao, X., Cheng, H., Wang, H., Zhou, H., Zhao, H., & Chen, C. M. (2020). Comparative study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals (HMs) in corals, sediments and seawater from coral reefs of Hainan, China. *Environmental Pollution*, 264, 114719.
- Zhao, H., Yuan, M., Stokal, M., Wu, H. C., Liu, X., Murk, A., ... & Osinga, R. (2021). Impacts of nitrogen pollution on corals in the context of global climate change and potential strategies to conserve coral reefs. *Science of the Total Environment*, 774, 145017.
- Zhu, B., Wang, G., Huang, B., & Tseng, C. K. (2004). Effects of temperature, hypoxia, ammonia and nitrate on the bleaching among three coral species. *Chinese Science Bulletin*, 49(18), 1923-1928.
- Zitko, V. (1994). Principal component analysis in the evaluation of environmental data. *Marine Pollution Bulletin*, 28(12), 718-722.
- Rodier, J. (1981). Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar, química, fisicoquímica, bacteriología, biología (No. 543.3 R6Y).

- Bendschneider, K., & Robinson, R. J. (1952). A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water.
- Rodier, J. (1981). Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar, química, fisicoquímica, bacteriología, biología (No. 543.3 R6Y).
- Roger, C. S., Garrison, G., Grober, T., Hillis, Z. M., & Franke, M. A. (1994). Manual para el Monitoreo de Arrecifes de Coral en el Caribe y el Atlántico occidental: St. John, VI: National Park Service, Virgin Islands National Park.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00099

Matrícula: 2181800397

Evaluación de sitios con restauración activa de arrecifes en la Península de Yucatán.

Con base en la Legislación de la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México se presentaron a las 10:00 horas del día 3 del mes de mayo del año 2022 POR VÍA REMOTA ELECTRÓNICA, los suscritos miembros del jurado designado por la Comisión del Posgrado:

DRA. GABRIELA GEORGINA NAVA MARTINEZ
DR. GUADALUPE REYES VICTORIA
DR. JUAN MIGUEL GOMEZ BERNAL

Bajo la Presidencia de la primera y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: GABRIELA ALEJANDRA VARGAS CRUZ

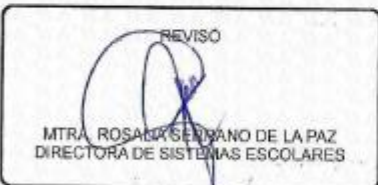
y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

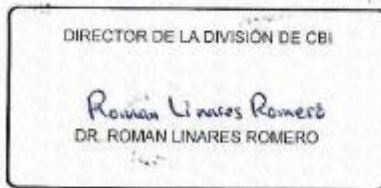
Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



GABRIELA ALEJANDRA VARGAS CRUZ
ALUMNA

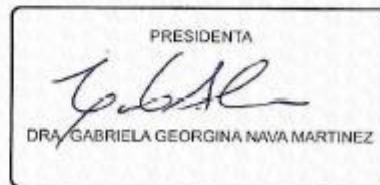


REVISÓ
MTRA. ROSALVA SERVANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES



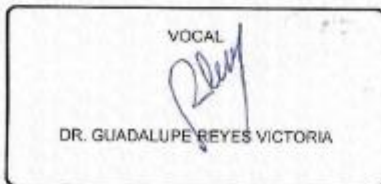
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

Roman Linares Romero
DR. ROMAN LINARES ROMERO



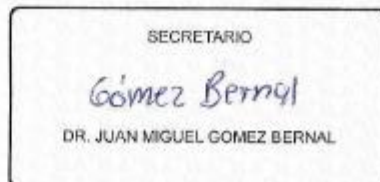
PRESIDENTA

DRA. GABRIELA GEORGINA NAVA MARTINEZ



VOCAL

DR. GUADALUPE REYES VICTORIA



SECRETARIO

DR. JUAN MIGUEL GOMEZ BERNAL