

Estado de conservación y cambios en el arrecife de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos ante las amenazas antropogénicas

Molina Ramos, Sabrina Isabel

2020-12-10

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/4720>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>



**Estado de conservación y cambios en el arrecife del Parque Nacional
Arrecife de Puerto Morelos ante las amenazas antropogénicas.**

Sabrina Isabel Molina Ramos

Lic. Ciencias Ambientales y Desarrollo Sustentable,
Universidad Iberoamericana Puebla

LSCA1215: Investigación en Ciencias Ambientales II

Asesora: Dra. Gabriela Pérez Castresana

Mayo 08, 2020

ÍNDICE

Resumen.....	4
1. Introducción	
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Pregunta de investigación.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Estado del arte.....	7
1.5 Justificación	11
1.6 Marco metodológico.....	12
2. Los Arrecifes de coral	
2.1 Condiciones ambientales.....	14
2.2 Distribución.....	16
2.3 Sistema Arrecifal Mesoamericano.....	17
3. Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos	
3.1 Descripción del área de estudio.....	19
3.2 Estado de conservación.....	23
4. Principales amenazas al arrecife	
4.1 Amenazas locales.....	29
4.1.1 Crecimiento urbano.....	29
4.1.2 Descargas de aguas residuales.....	29
4.1.3 Aumento de inmersiones.....	30
4.2 Cambio climático.....	31
4.2.1 Aumento de la temperatura del mar.....	31
4.2.2 Acidificación del océano.....	32
4.2.3 Aumento del nivel del mar.....	32
4.2.4 Arribazones de sargazo.....	32
4.2.5 Mayor radiación.....	33
5. Cambios en la estructura y funcionamiento del arrecife	
5.1 Alteraciones por factores locales.....	35
5.1.2 Eutrofización.....	35
5.1.3 Sedimentación.....	36
5.1.4 Contaminación por plásticos.....	37
5.1.5 Ruptura de estructuras coralinas.....	37
5.2 Alteraciones por el cambio climático.....	38
5.2.1 Arribazones de sargazo.....	38
5.2.2 Estrés térmico.....	40
5.2.3 Estrés lumínico.....	41
5.2.4 Acidificación del océano.....	42
5.2.5 Cambios en la salinidad.....	43
5.2.6 Aumento del nivel del mar.....	43
5.2.7 Aumento de las enfermedades de coral.....	44

6. Conclusiones.....	46
7. Referencias.....	49

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de los arrecifes de coral.....	16
Figura 2. Ubicación del Arrecife Mesoamericano.....	17
Figura 3. Ubicación del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.....	19
Figura 4. Sitios arrecifales dentro del Parque.....	20
Figura 5. Zonificación del Parque.....	22
Figura 6. Descarga de aguas subterráneas.....	30

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros de evaluación del Índice de salud arrecifal para el norte de Quintana Roo y México	25
Tabla 2. Amenazas al arrecife de la Ecorregión Mesoamericana.....	28

Resumen

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos tropicales formados por comunidades coralinas. Los corales son organismos altamente especializados que no pueden sobrevivir en ambientes con fluctuaciones en sus parámetros físico-químicos por sus estrechos rangos de tolerancia fisiológica (Reyna-Fabián *et al.*, 2018). Por ello, el aumento de factores de estrés locales y globales que alteran el medio marino amenaza a los arrecifes, especialmente a los más vulnerables y expuestos, como los del Mar Caribe (CEPAL, 2012) donde se encuentra el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM).

El PNAPM está sujeto a los impactos locales derivados del desarrollo costero urbano y turístico principalmente (CONABIO, 2005), así como a los efectos del cambio climático global. Sin embargo, las investigaciones de este tema son escasas, dispersas y muy especializadas, por lo que el trabajo presente realiza una revisión documental para describir el estado de conservación del arrecife y los cambios en su estructura y funcionamiento. Se halló que las amenazas identificadas en el Parque tienen efectos sinérgicos, especialmente sobre el funcionamiento, que han impactado fuertemente a la comunidad coralina del PNAPM y a las especies y ecosistemas asociadas al arrecife, lo cual afecta también a la comunidad de la región. A pesar de que la falta de información sobre el arrecife de la zona de estudio dificulta la elaboración de un análisis profundo de su estado de conservación, se presenta una primera aproximación hacia un panorama más amplio para su estudio.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

Desde principios de 1980, los arrecifes del Caribe han sufrido continuas devastaciones como consecuencia de la actividad antropogénica en la región (Pérez-Cervantes *et al.*, 2017). Entre estos, se encuentra el arrecife de Puerto Morelos, declarado como Parque Nacional en 1998 (Diario Oficial, 2000).

Este ecosistema es clave para la supervivencia de más de 600 especies marinas registradas en el PNAPM y de los ecosistemas asociados al mismo, como el mangle y las dunas costeras (INE, 2000). Asimismo, el arrecife es vital para el desarrollo social del municipio de Puerto Morelos, debido a la gran cantidad de servicios ambientales que provee, desde la protección ante huracanes hasta los ingresos que genera. Tan sólo en el 2006 el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos representó un ingreso de \$3,600,000 pesos para el municipio (Zizumbo Villareal *et al.* 2012).

Por ello, su degradación como producto de los distintos factores de estrés locales y globales que lo asedian es preocupante. Lo que solían ser fenómenos eventuales se han vuelto una presión crónica sobre los corales. Por un lado, el crecimiento demográfico de 1,703% en 16 años (INAFED, 2018) y el crecimiento del sector turístico del 40% entre el 2016 y 2018 (Ayuntamiento de Puerto Morelos, 2019) resulta en procesos como descargas de aguas residuales, aumento en las inmersiones en el arrecife, remoción de sedimentos, entre otras, que afectan a los corales (CONABIO, 2005).

Aunado a esto, el cambio climático también repercute en los arrecifes coralinos puesto que altera el medio físico-químico marino por encima de los umbrales de tolerancia de los corales (CEPAL, 2012). Algunos de los cambios de este tipo registrados en esta ANP son el aumento en la temperatura del mar, así como cambios en el pH marino. Estos cambios debilitan a los corales y los vuelven más susceptibles a enfermedades,

blanqueamiento y mortalidad, fenómenos que ya se han registrado en el área (McField *et al.*, 2018).

La vulnerabilidad de los corales, así como la constante exposición a presiones más intensas y frecuentes sobrepasan la capacidad de amortiguación y recuperación del arrecife. Esto conlleva alteraciones en la estructura y funcionamiento del mismo, que afectan los servicios ambientales que provee para la biodiversidad, los ecosistemas asociados y la población de Puerto Morelos.

Pregunta de investigación

¿Cuál es el estado de conservación del arrecife del PNAPM? ¿Cómo ha cambiado su estructura y funcionamiento ante las amenazas antropogénicas locales y globales?

Objetivos

Objetivo general

Describir el estado de conservación del PNAPM y los cambios en su estructura y funcionamiento como respuesta a los factores de estrés locales y globales.

Objetivos específicos

1. Describir el estado de conservación del arrecife.
2. Identificar los principales factores de presión que amenazan la sostenibilidad del ecosistema.
3. Explicar cómo los factores de presión afectan la estructura y funcionamiento del arrecife del arrecife.

Estado del arte

Las primeras investigaciones sobre los cambios producidos en los arrecifes por perturbaciones antropogénicas, datan de finales de la década de 1990 y principios del 2000. Muchos trabajos muestran de manera muy puntual el impacto de alguna actividad humana sobre una o varias especies de coral. Sin embargo, predominan aquellos que tratan los efectos del cambio climático sobre los arrecifes en general.

Estos trabajos siguen principalmente las líneas de aumento de temperatura del mar (Chollett, *et al.*, 2014; Lesser *et al.*, 1996), acidificación del océano (Anthony *et al.*, 2011; Christine *et al.*, 2017; Gledhill *et al.*, 2008; Doney *et al.*, 2009; Schönberg *et al.*, 2017), manejo adaptativo (Anthony *et al.*, 2015; Mumby, *et al.*, 2011) adaptación y mitigación al cambio climático (CEPAL, 2012).

Existen también investigaciones sobre el efecto de los cambios en la salinidad (Ferrier-Pagès *et al.*, 1999) y la variación en los niveles de radiación solar (Lesser, 1996, Enríquez *et al.*, 2017; Skirving *et al.*, 2018). Sin embargo, predominan los trabajos sobre cambios en la temperatura y la acidificación del océano, puesto que se relacionan directamente con el blanqueamiento de corales.

Uno de los trabajos pioneros en la integración de múltiples factores de estrés es el de Maina *et al.*, (2008) que analiza el efecto de los vientos superficiales, la velocidad del viento, la temperatura del mar, la radiación UV y la radiación fotosintéticamente activa (PAR). En esta publicación se menciona que los efectos de estos elementos no son aislados sino que también se potencializan entre sí. Por ello es importante integrarlos para hacer un análisis más certero del estado de un arrecife.

Sin embargo, esto se ve obstaculizado por la falta de información, como es el caso de esta área de estudio. Existen muchas investigaciones sobre los arrecifes de coral en general, sin embargo, conforme se fue bajando en la escala geográfica, es decir, de los arrecifes globales, a los regionales al local, la información también empezó a disminuir.

La región donde se encuentra el PNAPM es el Caribe. En este mar se encuentra la segunda barrera arrecifal más grande del mundo: el Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental; además, como señalan algunos autores (Jackson *et al.*, 2014; Reyna-Fabián, *et al.*; 2018) los arrecifes del Caribe se encuentran entre los ecosistemas marinos más impactados y vulnerables. Por ende, hay muchos trabajos situados en esta zona; gran parte de ellos estudian los arrecifes del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).

Entre los estudios publicados destacan los que correlacionan los fenómenos de blanqueamiento y degradación arrecifal con cambios en el medio ambiente, principalmente con cambios en la temperatura (McField y Kramer 2007; Eakin *et al.*, 2010; Jackson *et al.*, 2014; Pérez-Cervantes *et al.*, 2017; McField *et al.* 2018). Este tipo de publicaciones, si bien no corresponden a la zona de estudio, son bastante explicativos en cuanto a los cambios en el funcionamiento del coral ante estrés térmico, el cual es inducido por altas temperaturas.

. El estado de conservación de los arrecifes y otros ecosistemas ha sido evaluado a nivel de regional, en su mayoría por la articulación de distintas organizaciones, instituciones gubernamentales o educativas, como es el caso de la *Evaluación Ecorregional del Arrecife Mesoamericano: Plan de Conservación Marina*, en la que más de 20 instituciones participaron. Pérez-Cervantes *et al.*, (2017) en la publicación *Evaluación del estado de conservación de los arrecifes de la Península de Yucatán* elaborada en conjunto con Greenpeace evalúa el estado de algunos arrecifes aledaños al PNAPM y señalan algunas de las principales amenazas sobre los arrecifes coralinos.

La situación con estos trabajos es que estudian, como se mencionó previamente, al Caribe como región o al SAM en conjunto, por lo cual la información que presentan sobre los distintos arrecifes en particular que se encuentran en este mar es mínima; sin embargo, es un buen insumo para entender la vulnerabilidad y exposición de los arrecifes ubicados en esta región, su importancia y las características del medio marino.

El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos ha sido estudiado numerosas veces como parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (Arrivillaga y Windevoxhel, 2008; McField *et al.*, 2018, McField *et al.*, 2020) sin embargo, pocos trabajos toman el Parque como área de estudio. Esto no significa que no se hayan realizado investigaciones dentro del Parque, al contrario, hay múltiples trabajos realizados sobre especies que habitan en el PNAPM, sin embargo, las investigaciones sobre el Parque en sí son escasas.

Una de las primeras publicaciones completas sobre el área es el *Atlas Ambiental Costero de Puerto Morelos, Quintana Roo*, elaborado por Merino-Ibarra y Otero en 1991. Este libro fue publicado 10 años antes de la creación del Parque, por ello este documento provee la posibilidad de hacer un contraste entre la situación actual de la zona (específicamente las características del medio marino y terrestre) con las reportadas hace 30 años, es decir, la posibilidad de hacer un análisis diacrónico de la zona inclusive antes del decreto del Parque para así poder identificar cuáles son los parámetros físico - químicos del medio marino que se han modificado.

El Plan de Manejo y Conservación del Parque, publicado en el año 2000, es otro documento clave para conocer las características ecológicas de la zona. En este se puede revisar información sobre Puerto Morelos previo al crecimiento del turismo y urbano que también sirve como punto de comparación con la situación actual. Entre lo más relevante de este, al menos para este trabajo, está la zonificación del Parque, la mención de la capacidad de carga del ecosistema para las actividades turísticas y los primeros registros de actividades humanas que impactan negativamente en los arrecifes. Sin embargo, debido a su antigüedad la información presentada en este documento no concuerda con la que investigaciones más recientes presentan.

Por ejemplo, en el Plan de Manejo se establece que existen 3 zonas estructurales en el arrecife: la laguna arrecifal, la cresta arrecifal y el arrecife frontal. Mientras que Winfield *et*

al. (2017) señalan la existencia de 6 zonas estructurales: línea de costa, laguna arrecifal, arrecife posterior, cresta arrecifal, arrecife frontal y plataforma arenosa.

Además de los trabajos que describen el área, para esta investigación es necesario contar con información sobre los efectos de las actividades humanas en el Parque para así poder identificar los factores de presión y los cambios que suscitan. La mayoría aborda el tema de las malas prácticas turísticas relacionadas con las inmersiones, como es el caso de Santander Botello *et al.* (2009); Reyes-Bonilla *et al.* (2012); Rivera Planter *et al.* (2005) y López- Ercilla (2017).

Se observa que las investigaciones en las que el PNAPM es el área de estudio, como las enlistadas previamente, son recientes, lo cual puede ser beneficioso en cuanto que los datos que se presentan en este trabajo son lo más cercanos posibles a la realidad y los primeros en su tipo. Por ejemplo, Navarro (2015) aborda por primera vez de manera extensa el aporte de nutrientes por las aguas residuales derivadas del desarrollo costero.

Los trabajos más recientes que retoman la caracterización ambiental del Parque muestran diferencias con los datos publicados en el Plan de Manejo del Parque, que data de hace 20 años, lo que confirma una alteración en el medio marino y en las dinámicas del arrecife. Entre estos cabe destacar lo publicado por Rodríguez-Martínez *et al.* (2010), que realizó un monitoreo desde 1993 hasta el 2005 del Parque. Igual durante el 2010 se publica la investigación de Carriquiry, que por primera vez mide la salud arrecifal del PNAPM, y proporciona información vital para poder describir el estado de conservación del arrecife del Parque, uno de los objetivos de este trabajo.

Justificación

Los arrecifes se encuentran amenazados a nivel global. Se estima que para el 2050 entre el 70 y 90% de este ecosistema desaparezca (ONU, 2019) como consecuencia del aumento en la intensidad y frecuencia de perturbaciones de origen antropogénico, como el cambio climático.

Sin embargo, los cambios en un arrecife no son producto de una sola causa, sino del efecto sinérgico entre los distintos factores de presión (Santander 2009) por lo que es necesario identificarlos, especialmente a escala local para tener un panorama más completo sobre las alteraciones que un sistema arrecifal en particular está experimentando.

La literatura revisada demuestra que hay información amplia sobre los efectos del cambio climático sobre los corales a nivel mundial. Sin embargo, la revisión bibliográfica realizada arroja que las investigaciones sobre el PNAPM, la zona de estudio, son escasas, aisladas y de carácter disciplinario, por lo cual es importante conjuntar toda la información disponible para de ahí partir hacia un análisis más completo.

Realizar una investigación que integre todos los factores que inciden en el PNAPM, se plantea como una tarea compleja pero necesaria dada su importancia ecológica y económica para la zona, del cual dependen muchas especies marinas y ecosistemas, como el manglar.

Por ello, la información sobre el estado de conservación del arrecife del PNAPM, así como de las presiones directas e indirectas a las que está expuesto este arrecife es un insumo importante para comprender mejor el origen y los efectos de la multiplicidad las amenazas a los arrecifes de coral del PNAPM y así establecer los mecanismos más adecuados para la conservación de este arrecife en concreto.

Marco metodológico

La presente investigación es del tipo descriptiva, con carácter cualitativo. Debido a que evalúa varias dimensiones e interrelaciones del objeto de estudio, que es el arrecife del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, se trabaja bajo el enfoque de sistemas complejos. Para responder la pregunta de investigación y cumplir el objetivo general, usando los objetivos particulares como guía y el enfoque de sistemas complejos como base, se considera necesario responder, en ese mismo orden, las siguientes preguntas:

1. ¿Qué se estudia y cuál es su estado actual?
2. ¿Qué factores lo han llevado a ese punto o han causado esos cambios?
3. ¿Cómo se ha visto transformado el sistema?

Con ese fin se realizó una investigación documental. Se priorizaron los artículos científicos, los documentos de instancias gubernamentales, como la CONABIO, CONANP y SEMARNAT, los libros, las páginas web y por último, los artículos periodísticos, por el tipo de información que se requería. Se revisaron más de 80 fuentes, principalmente artículos científicos, que se organizaron en base a la fecha de elaboración y el área de estudio. Si dos artículos trataban el mismo tema, se le daba prioridad al más reciente puesto que probablemente presentaba más avances, o se seleccionaba el artículo cuya área de estudio fuese lo más cercana posible al PNAPM. Sin embargo, no se descartó ningún documento sin revisarlo.

Como resultado de esta primera revisión se descartaron 15 artículos. Una vez divididas las fuentes de información en torno a la fecha y el área de estudio, se organizaron de acuerdo al tema y a la manera en la que se aborda dicho tema, la perspectiva y el aporte que realiza a dicha área. Los documentos restantes después de esta revisión son los 57 citados en este trabajo.

Para la elaboración del presente se partió de lo más general, que es la definición del ecosistema arrecifal y los corales, las características del medio en donde se desarrollan y su

distribución. Posteriormente se redujo la escala geográfica hasta el Caribe y el Sistema Arrecifal Mesoamericano, hasta llegar a caracterización del área de estudio.

Con el fin de describir su estado actual de conservación se realizó una comparación entre los datos más antiguos y los más recientes (de estar disponibles) sobre los parámetros del medio marino: temperatura, pH, salinidad, nutrientes, entre otros. Asimismo, se profundizó en la búsqueda de indicadores e índices que en conjunto describen el estado del arrecife: las dinámicas entre comunidades, la biodiversidad, la salud del ecosistema.

Posteriormente, para identificar las principales amenazas se revisaron todos los documentos que mencionan alguna actividad antropogénica que impacte el arrecife. Estos se dividieron en amenazas por el cambio climático y amenazas locales; los elementos que aparecieron en el mayor número de documentos o que eran resaltados por los autores debido a la magnitud de su impacto fueron los que se consideraron como los principales factores de estrés.

Finalmente, para explicar los cambios en la estructura y funcionamiento en el arrecife ocasionados por los factores de presión ya identificados, se revisaron, por una parte, los trabajos que explican qué alteraciones se generan sobre los corales como organismos y sobre el medio marino. Es decir, los que presentan información general acerca de estos cambios. Por otra parte, se revisaron los trabajos que describieran los cambios ya ocurridos en el PNAPM en concreto. Se procedió a conjuntar y analizar la información recopilada para así poder integrarla y cumplir con el tercer y último objetivo.

LOS ARRECIFES DE CORAL

El arrecife de coral es un ecosistema marino de aguas poco profundas y cercanas a las costas, altamente diverso y cuya base estructural son las comunidades coralinas del orden Scleractinia. Los corales son animales coloniales conformados por zooides o pólipos, que pertenecen al filo de los cnidarios (ONU, 2019).

Sin embargo, no todos los corales son capaces de proveer la estructura necesaria para el mantenimiento y crecimiento del arrecife. Esto está en función de sus rasgos funcionales, como la morfología o tasa de crecimiento (Pérez-Cervantes et al., 2017).

Las especies que construyen el arrecife son los corales duros o *hermatípicos*. Estos generalmente desarrollan una simbiosis con zooxantelas, microalgas unicelulares dinoflageladas (*Symbiodinium*) que le proporcionan energía al organismo por medio de fotosíntesis. En este proceso le transfieren más del 90% de nutrientes al coral (Karleskint, 2010). Estas algas utilizan el dióxido de carbono de la respiración de los pólipos para realizar la fotosíntesis. En este proceso disminuyen la acidez al interior del tejido del coral y aceleran la acumulación de carbonato de calcio que forma el exoesqueleto de los corales. Por ello la relación simbiótica entre estos organismos es crucial para la supervivencia de los corales duros. Debido a que estas especies acumulan carbonato de calcio en mayores cantidades, son las que contribuyen a la formación del arrecife; de igual manera, si su forma es muy ramificada o masiva contribuirán a una mayor complejidad del arrecife (Pérez-Cervantes et al., 2017). En México se encuentran entre 63 y 81 especies de corales hermatípicos, lo que representa entre el 8 y 10% de todas las especies a nivel mundial (SEMARNAT, 2008).

Los corales que no construyen arrecifes, se denominan *ahermatípicos* o blandos. Tienen un esqueleto interno y no tienen relaciones simbióticas con las microalgas, sino que se alimentan de materia orgánica presente en el agua, así como de zooplancton y

fitoplancton para obtener energía. Estos se pueden encontrar en aguas mucho más profundas y lejanas de las costas (Karleskint *et al*, 2010).

Se estima que los arrecifes albergan a más de 8,000 especies de peces, es decir, que casi el 25% de todas las especies de peces habitan en estos ecosistemas; asimismo, cuentan con una gran diversidad de esponjas, crustáceos, moluscos, equinodermos, tunicados, cnidarios, macroalgas y tortugas (Pérez-Cervantes *et al*, 2017).

Los arrecifes de coral además facilitan el establecimiento de otros ecosistemas costeros como manglares, comunidades de pastos marinos y dunas costeras, existiendo entre éstos relaciones ecológicas muy importantes, especialmente de intercambio de nutrientes e individuos (Mumby *et al.*, 2004 en Padilla *et al.*, 2009) como se observa en el PNAPM. Muchas especies de peces se desarrollan y crecen en los manglares y pastos marinos, y al llegar a la etapa subadulta se mueven a los parches arrecifales donde habitan hasta volver a desovar al mangle o los pastos (McField *et al.*, 2020). A su vez, los arrecifes se ven beneficiados por la presencia de estos ecosistemas, por ejemplo, los manglares filtran el agua y así retienen sedimentos y materia que podrían disminuir la claridad del agua en el arrecife.

Condiciones ambientales

Los corales se desarrollan en aguas claras y poco profundas que permitan el paso de la luz para que las algas simbiotas puedan llevar a cabo fotosíntesis (Enríquez *et al*, 2017), por lo que la turbidez debe ser mínima. Asimismo, la concentración de nutrientes debe ser baja para equilibrar el crecimiento de las macroalgas que compiten con los corales (McField *et al.*, 2018).

Las aguas deben ser cálidas y mantener una temperatura estable entre los 22°C y 28°C en promedio, aunque algunas especies pueden tolerar rangos mayores de temperatura (CONABIO, 2019). Los corales también requieren que el pH en su entorno

tienda la basicidad o por lo menos a la neutralidad puesto que esto facilita la construcción de los esqueletos calcáreos externos de los corales pétreos (Gledhill et al, 2008).

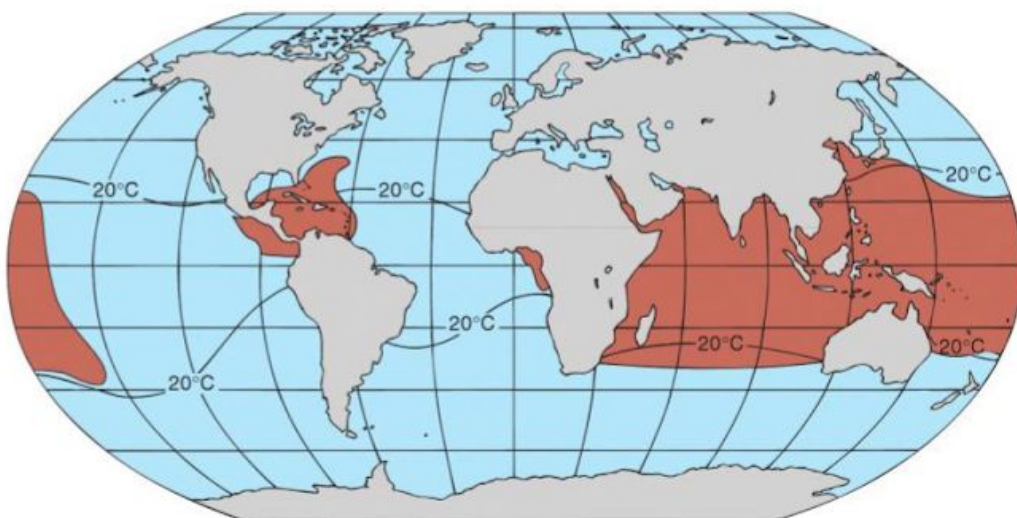
La salinidad también es un parámetro importante puesto que los corales son incapaces de llevar a cabo procesos de osmorregulación (Ferrier- Páges *et al.*, 1999). Esto significa que no pueden regular la entrada y salida del agua ni de los elementos presentes en ella, como la sal. Un cambio en la salinidad puede alterar los procesos metabólicos entre el coral y las algas simbiotas (Romero-Rodríguez *et al.*, 2014).

Por ello, las aguas en donde se distribuyen los corales deben presentar las mínimas fluctuaciones de los factores previamente mencionados ya que los arrecifes son ecosistemas altamente especializados con rangos de tolerancia fisiológica muy estrechos.

Distribución

Los arrecifes de coral ocupan 284,300 kilómetros cuadrados de la superficie terrestre, lo que representa el 0.2% de ésta (Santander et al, 2009). Se encuentran, en su mayoría, entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, puesto que son aguas tropicales con las características óptimas para su desarrollo (EPA, 2018).

Figura 1. Distribución de los Arrecifes de coral



Fuente: Karleskint *et al.*, 2010.

En México, los arrecifes ocupan una superficie aproximada de 1,780 kilómetros cuadrados. Se distribuyen en tres grandes regiones: la costa del Pacífico (desde Baja California hasta Oaxaca), en las costas de Veracruz y Campeche en el Golfo de México, y en la costa oriental de la Península de Yucatán, en el Mar Caribe. En esta última zona, se encuentra una parte de la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, el Sistema Arrecifal Mesoamericano (CONABIO, 2019).

Sistema Arrecifal Mesoamericano

El Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) forma parte del “Gran cinturón de arrecifes del Atlántico Occidental”. Es el segundo arrecife de coral más extenso después de la Gran Barrera de Coral Australiana y el arrecife transfronterizo más grande del mundo con una longitud de aproximadamente mil kilómetros (WWF, s/f). Se ubica a lo largo de cuatro países mesoamericanos: México, Belice, Guatemala y Honduras y comprende más de 50 áreas naturales protegidas. En México se extiende a lo largo de 300 kilómetros frente a las costas de Quintana Roo (Ardisson et al, 2011).

Figura 2. Ubicación del Arrecife Mesoamericano.



Fuente: WWF, s/f.

Más de 3,330 especies marinas han sido reportadas en el SAM. En cuanto a corales, se tiene registro de más de 90 especies de corales tan sólo para la porción mexicana del SAM, que es Quintana Roo. De estos, el 36.7% son gorgonáceos, y solamente el .6% son corales escleractinios (Ardisson et al., 2011).

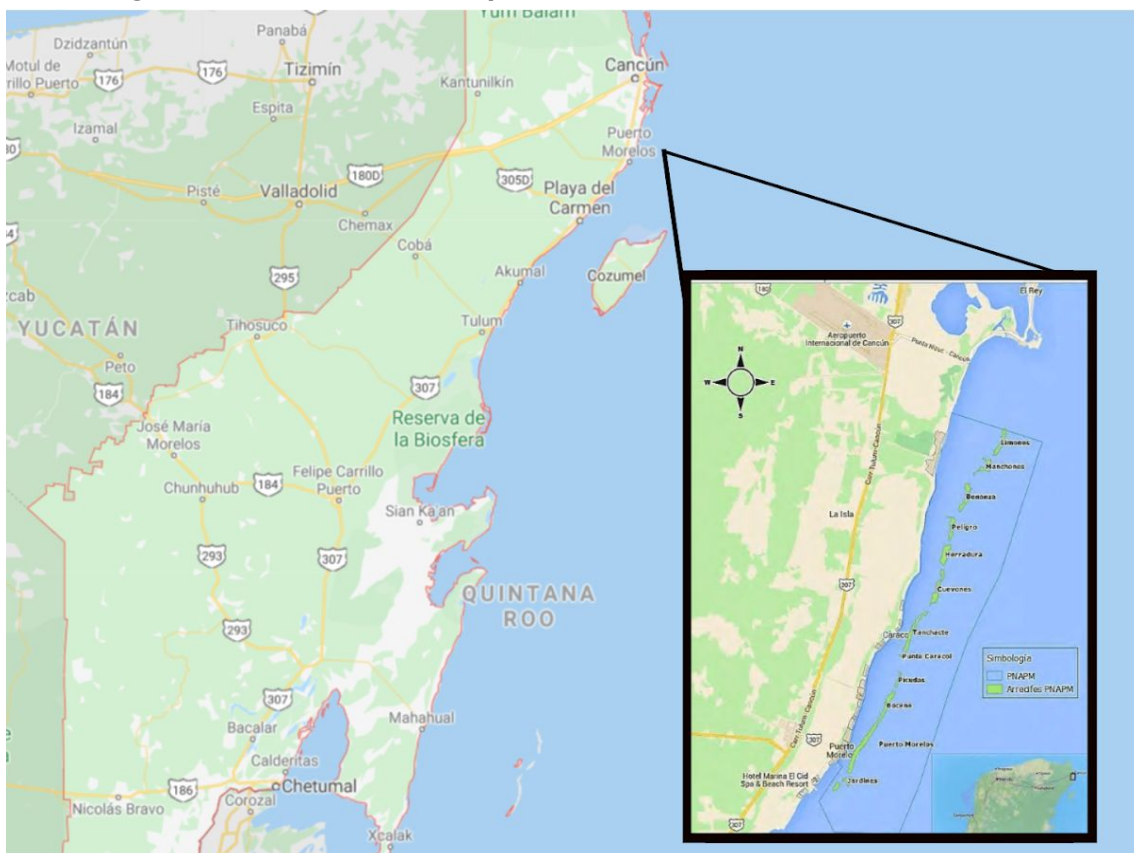
Asimismo alberga muchas especies que están en peligro de extinción, como las tortugas marinas (*Caretta caretta*, *Eretmochelys imbricata*, *Dermochelys coriacea* y *Chelonia mydas*), o sujetas a protección especial, como los corales *Acropora palmata* y *A.cervicornis* o que lo vuelve uno de los arrecifes de coral más importantes del hemisferio occidental (Arrivillaga, y Windevoxhel, 2008).

PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS

Área de estudio

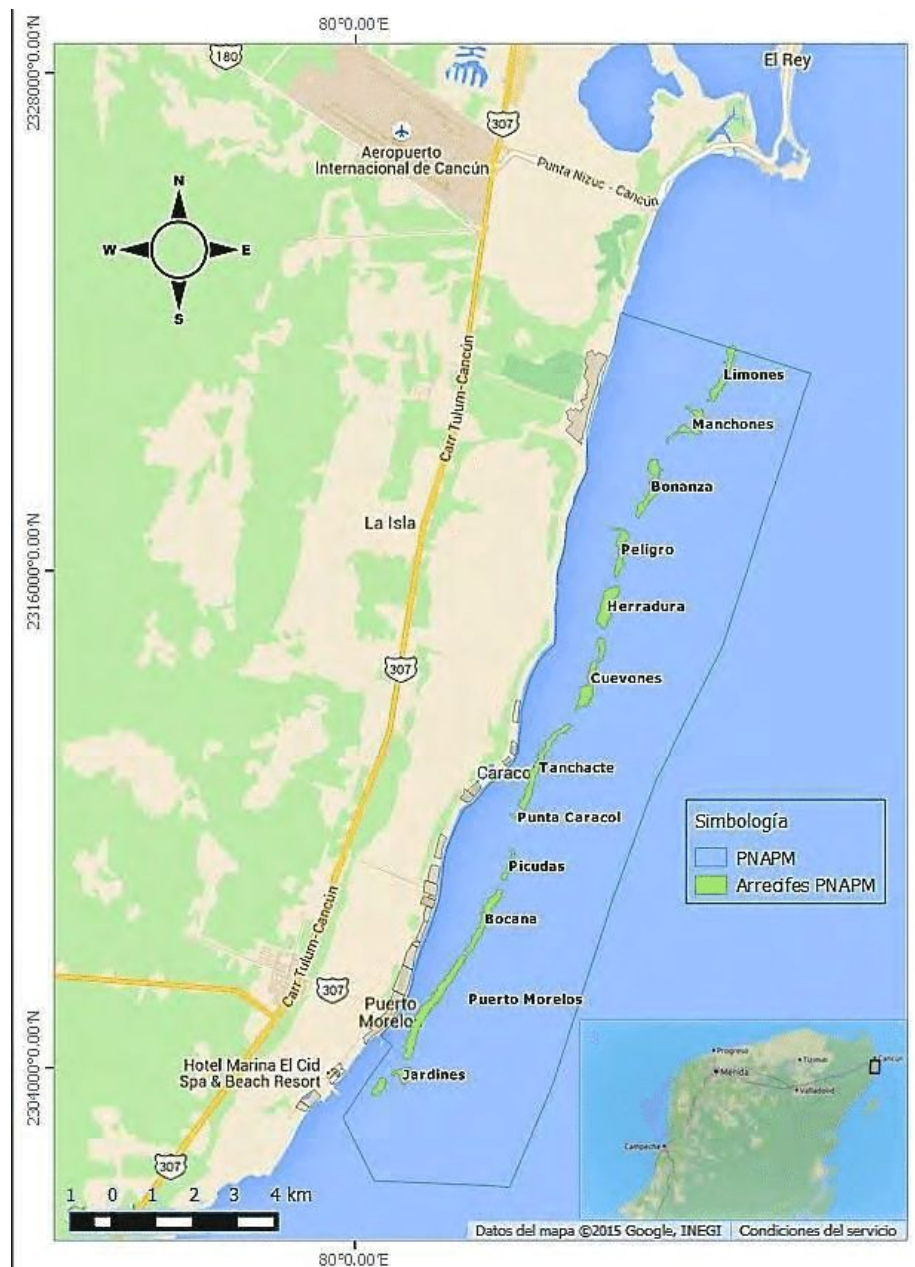
El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos fue establecido por Decreto Presidencial el 2 de febrero de 1998 y está registrado en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP) desde el 2002 (CONANP, 2019). Está ubicado en la costa caribe del municipio de Puerto Morelos en Quintana Roo, México (figura 1). El Parque abarca 9,066.63 hectáreas, de las cuales 9,028.89 son marinas y 37.74 son terrestres. Sus coordenadas geográficas extremas son: 21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.94" y 86°46'38.94" longitud oeste (INE, 2000), por lo que se encuentra dentro del Sitio prioritario para la conservación Punta Cancún-Puerto Morelos (Arrivillaga y Windevoxhel, 2008).

Figura 3. Ubicación del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Sitios arrecifales dentro del Parque



Fuente: Navarro, 2015.

Los 11 sitios arrecifales que integran el Parque tienen extensión total de 21 kilómetros, con profundidades que varían entre los 0.5 y los 20 metros (Navarro, 2015). Las 6 zonas estructurales del Parque en su conjunto son: línea de costa, laguna arrecifal, arrecife posterior, cresta arrecifal, arrecife frontal y plataforma arenosa (Winfield *et al.*, 2017). La laguna arrecifal, compuesta por praderas marinas y arrecifes coralinos someros,

fue declarada humedal de importancia internacional RAMSAR (No. 1343) (Diario Oficial, 2000).

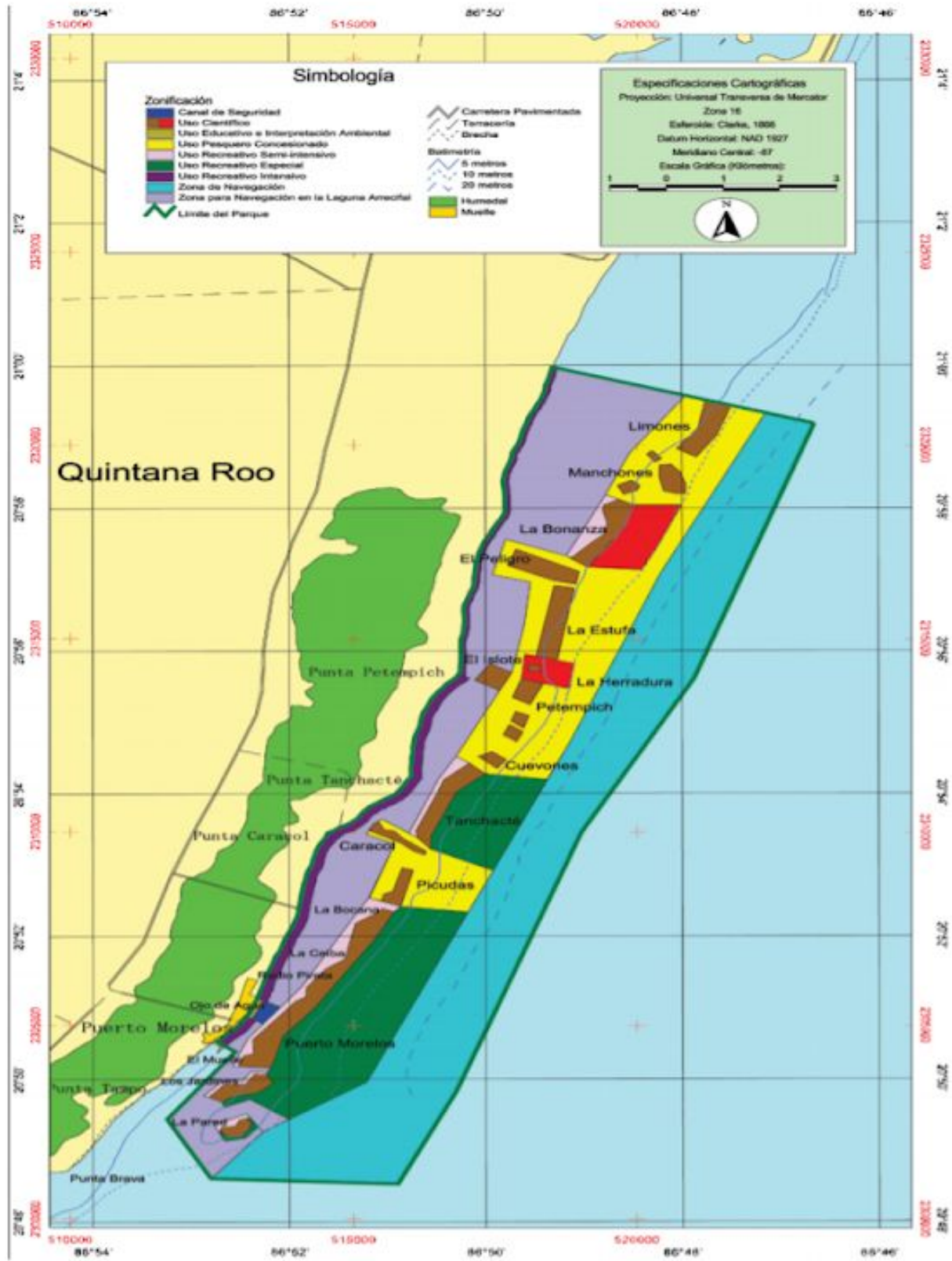
El clima es cálido subhúmedo en la región, cuya temperatura promedio de 24 grados centígrados (CONABIO, 2019) y lluvias durante todo el año, más intensas y frecuentes durante el verano.

Las aguas marinas son someras permanentes, con una profundidad media de 2.5 metros, temperatura de 27 grados centígrados, y salinidad promedio de 35.71‰. El valor promedio de oxígeno disuelto es de 4.99 ml/L, mientras que el de carbón particulado es de 99.05 mg/L.(Merino y Otelo, 1991). El pH es de 7.0 (CONABIO, 2005). La concentración de nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos es baja para los cuatro parámetros (CONABIO, 2005), aunque los nitratos se presentan en mayor cantidad (Merino y Otelo, 1991).

En la zona terrestre correspondiente se encuentran cuatro tipos de vegetación: Duna Costera, dos tipos de Matorral costero y el Manglar. Todos estos tienen intercambio de nutrientes, energía y especies con el arrecife (CONANP, 2000).

El Parque se divide en once zonas de acuerdo a las actividades que se permiten en cada una de acuerdo con el Plan de Manejo (2000): La Zona I de Uso Recreativo intensivo; Zona II de Uso educativo e interpretación ambiental; Zona III Canal de seguridad; Zona IV Zona para navegación en la laguna arrecifal; Zona V de Navegación; Zona VI de Uso recreativo semi-intensivo; Zona VII de Uso recreativo especial; Zona VIII de Uso pesquero concesionado, y Zona IX de Uso científico. Esta lógica obedece a la definición legal de un Parque Nacional, de acuerdo con la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) que en su artículo 50 establece que un Parque Nacional debe permitir el desarrollo de actividades turísticas, facilitar la recreación y favorecer el desarrollo de actividades productivas (Reyes, et al., 2008).

Figura 5. Zonificación del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.



Fuente: López (2017).

Estado de conservación

El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos fue caracterizado por primera vez en el año 2000 con la publicación del Plan de Manejo y Conservación de esta ANP. Trabajos previos, como el de Merino y Otero (1991) aportaron información base para la elaboración de dicho documento. Sin embargo, publicaciones más recientes muestran que los valores y parámetros registrados en el Plan de Manejo no corresponden a los actuales, puesto que las condiciones físico-químicas del medio marino y las dinámicas poblaciones han cambiado, lo que se describe en este capítulo.

La temperatura promedio del mar ha mostrado un aumento de hasta 3 grados centígrados respecto a los 27 grados centígrados registrados en el Plan de Manejo. Asimismo, el monitoreo realizado por Rodríguez Martínez *et al.* (2010) entre 1993 y 2005 señala que la temperatura de la superficie del mar en el PNAPM mostró un tendencia hacia el aumento en el valor máximo de temperatura.

Otro de los cambios en el medio marino es en pH. En 1991, el pH era de 8.34 (Merino y Otero, 1991 en INE, 2000). Actualmente, de acuerdo con la *Ficha Técnica para la evaluación de los sitios prioritario para la conservación de los ambientes costeros y oceánicos de México* elaborada por la CONABIO (2005) el pH es de 7.0, lo cual indica una tendencia hacia la acidificación.

A diferencia de otras zonas del Caribe Mexicano, la costa de Puerto Morelos no se ha visto afectada por obras turísticas de gran escala, a pesar de la construcción de infraestructura para satisfacer la demanda turística, por lo que las características fisiográficas se han mantenido, excepto por un notorio aumento del nivel del mar (INE, 2000).

Asimismo, se planteaba en el Plan de Manejo que concentración de nutrientes en la laguna arrecifal era baja, sin embargo, la descarga de aguas residuales no tratadas al mar ha aumentado la concentración de estos, favoreciendo la proliferación de algas.

De acuerdo con Rodríguez Martínez *et al.*, (2010) las macroalgas carnosas dominaban el sustrato con una cobertura de 47% y las algas tipo tapete con 36%, mientras que la cobertura de corales fue de 2%. Sin embargo, la investigación realizada por Carriquiri (2010), aunque concuerda con que la cobertura de coral es relativamente baja, menciona que la cifra de cobertura coralina promedio en el PNAPM es del 19.3%, Siendo el sitio Manchones el que presenta la mayor cobertura coralina con un 27% y Bonanza la de menor cobertura con un 12.4%. Sin embargo, no se especifica si son corales vivos, aunque se menciona que la mortalidad parcial en el arrecife es del 23.66%.

En el norte de Quintana Roo, donde se ubica el PNAPM, la cobertura de macroalgas es del 19%, mientras que la de corales vivos es del 14%, de acuerdo al 2020 *Mesoamerican Reef Report Card*, que evaluó la salud arrecifal de 286 sitios del SAM.

El Índice de Salud Arrecifal (ISA) empleado por *Healthy Reefs for Healthy People* determina, mediante la integración de diversos datos cuantitativos, el estado de un arrecife. El ISA se compone de 58 indicadores y los 4 componentes principales de la salud ecológica de un arrecife: cobertura de corales vivos, cobertura de macroalgas, masa de peces comerciales y masa de peces herbívoros. De los sitios evaluados en el año 2020, 46% se clasifican como “malos”, un aumento del 9% respecto al 2018. Los sitios “buenos” disminuyeron un 5% entre el 2016 y el 2020, del 13% al 8%. La salud de los arrecifes del norte de Quintana Roo, donde se encuentra el PNAPM, se clasifica como “regular” (McField *et al.*, 2020).

Tabla 1. Parámetros de evaluación del Índice de salud arrecifal para el norte de Quintana Roo y México.

Año	Región	Índice de salud arrecifal	Sitios evaluados	Cobertura de corales vivos	Cobertura de macroalgas	Peces comerciales (g/100m ²)	Peces herbívoros (g/100m ²)
2018	Norte de Quintana Roo	2.5	47	17%	22%	665	2521
	México	2.8	134	15%	23%	1,139	2,092
2020	Norte de Quintana Roo	2.8	39	14%	19%	534	2773
	México	2.8	99	16%	18%	939	2470

Fuente: Elaboración propia con datos de McField *et al.*, 2018 y McField *et al.*, 2020.

Otros índices que permiten el estado de conservación del PNAPM son los realizados por Carriquiry (2010). El *Índice de Condición de Salud del Bentos Arrecifal*, obtenido a partir de la proporción de cobertura de los principales constituyentes del fondo marino respecto a las algas, muestra que el sitio “Bonanza” tiene la peor salud en este sentido. Este sitio registró también el peor valor en el *Índice de Condición de Salud de los Corales* y por lo tanto, es el sitio con las colonias coralinas en peores condiciones, con una mortalidad parcial del 31.26%. Este mismo trabajo halló que la mayoría de los arrecifes del PNAPM se encuentran en una condición de salud de alerta, lo cual es muy preocupante tomando en cuenta toda la biodiversidad que conforma y habita en este ecosistema.

El PNAPM alberga 41 especies de corales escleractíneos y 32 gorgonáceos (INE, 2000), siendo el segundo grupo el dominante entre 1993 y 2005. Estos mostraron cambios en su estructura comunitaria, primero con un aumento de especies en los primeros dos años, y después con un decrecimiento en su abundancia en 1995 por un huracán y que no se recuperó hasta el 2001. Otro huracán que modificó el arrecife fue el huracán mayor

Wilma (2005) que cambió la composición de la comunidad en tres sitios (Rodríguez Martínez *et al.*, 2010). Otro cambio de este tipo es el reemplazamiento de los corales tolerantes al estrés y competitivos (eficientes para usar los recursos del medio) por las especies coralinas oportunistas, cuyas características les permiten adaptarse mejor y competir aún con las condiciones actuales del ambiente a pesar de su perturbación (Pérez-Cervantes *et al.*, 2017).

De los corales en esta zona destacan las especies *Acropora palmata* y *A. cervicorni*, formadoras de arrecife y sujetos a protección especial a nivel nacional. Ambas especies se encuentran también en la Lista Roja como críticamente amenazadas (IUCN, 2017 en López, 2017). En los sitios dominados por *A. palmata*, los individuos se encuentran en pobres condiciones de conservación, y conforman colonias de tallas pequeñas (de 10,000 a 20,000 cm³) en todos los sitios, aunque también se encuentran algunas de tallas superiores, destacando una presente en el sitio "La Pared" de 12 m³ (Navarro, 2015).

En cuanto a vegetación se han reportado tres especies de pastos marinos, que cubren el fondo de la laguna arrecifal, principalmente *Thalassia testudinum* (Winfield *et al.*, 2017). Se han registrado 264 especies de algas, siendo el grupo con mayor riqueza específica y 7 especies de dinoflagelados simbiotes (Merendiz, 2012).

Asimismo, se han identificado más de 600 especies de fauna marina, tanto invertebrados como vertebrados, de 75 órdenes (INE, 2000). Los grupos taxonómicos más ricos en la zona son los corales, moluscos, poliquetos, equinodermos, crustáceos y peces. La mayoría de los peces presenta las tallas medias-bajas (6-10 y 11-20 cm) y en todos los sitios su densidad es extremadamente baja en comparación con lo esperado para el Caribe mesoamericano (Merendiz, 2012).

De acuerdo con el Plan de Conservación y Manejo del PNAPM (2000) hay 226 especies de peces; 64 hidrozoarios; 20 esponjas; 10 anélidos; 172 crustáceos; 31

equinodermos; 33 moluscos; 3 reptiles y 21 mamíferos en la zona. Sin embargo, existen investigaciones que sugieren que hay más biodiversidad de la registrada.

Winfield *et al.* (2017) encontraron 13 nuevas especies de tanaidáceos en el parque arrecifal, aumentando la cantidad de 2 a 15 tanaidáceos. Asimismo, Hernández y Álvarez (2019) desarrollaron un estudio de la fauna asociada al arrecife de coral que resultó en el registro de 14 nuevas especies de moluscos en el área.

La diversidad biológica calculada a través del *Índice de Shannon- Wiener* mostró valores entre 2 y 3.5 de acuerdo con el trabajo de Navarro (2015), quien señala que los valores obtenidos son similares para todos los grupos, pero que en los sitios “Muelle de Pescadores” y “La Bocana” son mayores para las algas y para los peces respectivamente.

El índice de equidad de Pielou, muestra que Radio Pirata es la localidad con mayor índice de equidad 0.93, es decir que en este sitio casi todas las especies tienen la misma abundancia, mientras que en Manchones tiene el menor índice con 0.7, lo que significa que en estas localidades hay una alta dominancia de una especie (Carriquiry, 2010).

PRINCIPALES AMENAZAS AL ARRECIFE

En la *Evaluación Ecorregional del Arrecife Mesoamericano: Plan de Conservación Marina*. (2008) se describen el nivel de amenaza a los que elementos de conservación de la Ecorregión Mesoamericana están expuestos. Uno de esos elementos son los arrecifes. Este documento, junto con la *Ficha técnica para la evaluación de los sitios prioritario para la conservación de los ambientes costeros y oceánicos de México* elaborada por la CONABIO permitió identificar los mayores factores de estrés para los corales y el arrecife en general, tema que se aborda en este apartado. Se inicia con una descripción de los estresores locales para posteriormente describir los ocasionados por el cambio climático global.

Tabla 2. Amenazas al arrecife de la Ecorregión Mesoamericana

Amenaza	Nivel
Cambio climático	Muy alto
Actividades inadecuadas de turismo acuático	Muy alto
Descarga de aguas residuales	Alto
Desarrollo de infraestructura turística	Medio
Sedimentación	Alto
Sobrepesca y prácticas inadecuadas de pesca	Alto
Navegación	Alto
Especies invasoras	Alto

Fuente: Elaboración propia a partir de The Nature Conservancy, 2008

Amenazas locales

Crecimiento urbano

El crecimiento urbano como consecuencia de una explosión demográfica en Puerto Morelos del 1,703% en 16 años (INAFED, 2018), así como de la necesidad de construir infraestructura para satisfacer las demandas del turismo es la mayor amenaza para el arrecife por todas las actividades que implica.

La disminución de la cobertura de mangle en 20% entre 2010 y 2018 en la zona (McField *et al.*, 2018), una mayor generación de desechos, la remoción de pastos marinos y la construcción de caminos transversales que restringen el flujo de las aguas entre los ecosistemas (CONABIO, 2007), ha resultado la pérdida de hábitat de las especies que tienen sus etapas de vida entre estos ecosistemas, así como en el incremento de nutrientes y sedimentos en el arrecife.

Descargas de aguas residuales

De los cuatro países que conforman el SAM, ninguno tiene un saneamiento de aguas adecuado para proteger a los humanos ni al medio ambiente. El saneamiento de aguas residuales ha sido el más bajo de los indicadores del Índice de Salud Arrecifal consistentemente, sin ningún avance desde 2011. México es el país más rezagado en cuanto a mejoras en este sector (Melanie McField *et al.*, 2020), lo cual afecta a los ecosistemas marinos que reciben las descargas de aguas residuales.

Puerto Morelos carecía hasta hace un par de años de un sistema colector de aguas residuales, además de un tratamiento de aguas residuales insuficientes para la creciente población. El problema aumenta con el crecimiento turística, puesto que se vierten descargas en mayor volumen y con contaminantes diversos. Las descargas de aguas

residuales al mar podrían funcionar como una fuente de patógenos al sistema (Navarro, 2015).

La descarga de aguas al arrecife también se da de manera natural en la región puesto que los cenotes, cuerpos de agua subterráneos característicos de la zona, conectan directamente con el mar y depositan en este todos los lixiviados del suelo.

Figura 6. Descarga de aguas subterráneas.



Fuente: McField et al. (2020)

Aumento de inmersiones

Una de las prácticas turísticas que más impacta al ecosistema son las inmersiones recreativas. El PNAPM recibe aproximadamente 200,000 turistas anualmente (López-Ercilla, 2017). En 2008 se realizaron alrededor de 234,996, lo que significa un 68% del de la capacidad de carga total del ecosistema (Reyes et al, 2012) y un aumento del 53% de en la carga de visitantes que realizan buceo libre en el PNAPM, en comparación con 2004. A la par, ha aumentado el número de operadores de servicio y los permisionarios (Rivera y

Muñoz, 2005), quienes han incrementado en más del 100% en 15 años, pasando de ser 131 permisionarios en el año 2000, a 365 en el 2015, para satisfacer la demanda del turismo (López-Ercilla, 2017).

Con el aumento de turistas, disminuye el control de los guías sobre los mismos (Santander, 2009) .y aumentan los daños a los corales por malas prácticas turísticas.

El Programa de Manejo del PNAPM, específicamente prohíbe dañar el arrecife (fracción V, regla 76) por impactos antropogénicos como “tocar, pararse, dañar, pisar, sujetarse, arrastrar equipo, remover el fondo marino o provocar sedimentación sobre las formaciones y organismos arrecifales” (INE, 2000 en López-Ercilla, 2017). Es decir que cada una de estas actividades es un impacto al arrecife.

Cambio climático

El factor de riesgo más importante a escala global para los arrecifes es el cambio climático, que ejerce una fuerte presión ocasionando diversas alteraciones y cambios en el medio marino (Padilla *et al.*, 2009). El efecto del cambio climático sobre los océanos es muy amplio e incide en prácticamente todos los parámetros que condicionan la supervivencia de los corales, y por ende, de los arrecifes. Por lo tanto, en este trabajo se tomarán en cuenta las amenazas derivadas de este fenómeno que ya hayan sido registradas en el área de estudio, de acuerdo con la bibliografía revisada.

Aumento de la temperatura del mar

El calentamiento de la Tierra implica un aumento correspondiente en las temperaturas del océano. Los arrecifes de coral están experimentando las temperaturas más altas que nunca en los últimos 400,000 años (Reef resilience network, 2020), lo cual es perjudicial para los corales ya que, como se mencionó previamente, requieren de temperaturas estables que se mantengan dentro de su umbral de tolerancia. De lo contrario,

se induce estrés termal en estos organismos, lo que puede afectar la simbiosis con las zooxantelas (Anthony *et al.*, 2011).

Acidificación del océano

En los últimos 250 años, el dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera terrestre aumentó más del 35% (Doney *et al.*, 2009). Los océanos, que son sumideros naturales de dióxido de carbono cada vez lo absorben en mayores cantidades. Esto modifica la química oceánica: se forma ácido carbónico y se liberan iones de hidrógeno, lo cual disminuye el pH de los océanos, es decir, que se acidifican (Gledhill *et al.*, 2008).

También disminuye la concentración de carbonatos, como la aragonita, elemento necesario para construir la construcción de conchas y esqueletos calcáreos, como el de los corales. Se prevé que en el 2050 sólo 15% de los arrecifes de coral están en áreas donde los niveles de aragonita son adecuados para el crecimiento del coral (Reef resilience network, 2020). Asimismo, los cambios en el pH también generan cambios en la salinidad.

Aumento del nivel del mar

El aumento global del nivel del mar es causado por dos factores principales: la expansión térmica (el agua del océano se calienta y se expande) y el derretimiento de las capas de hielo (glaciares y hielo marino) por el aumento de la temperatura (Reef resilience network, 2020).

Arribazones de sargazo

El sargazo es un macroalga de zonas tropicales y subtropicales. Su arribo a las costas del Caribe Mexicano es un fenómeno natural periódico, sin embargo en el 2015 se consideró atípico por las cantidades excesivas que arribaron, cuantificando 2 m³ de sargazo por cada metro lineal de playa. Esta alga forma islas flotantes que cubren la superficie del

mar, lo cual ejerce ciertas presiones sobre los corales, ya que evita que la luz solar llegue a los organismos, por ejemplo. Este fenómeno se presenta por diversas causas, entre ellas, el aumento de los nutrientes en el mar, el cambio climático y las variaciones meteorológicas y oceanográficas (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020).

Mayor radiación

La radiación fotosintéticamente activa (PAR), es aquella que es parte del flujo de energía electromagnética del Sol que se encuentra dentro del rango espectral de 400 a 700 nm, es decir, dentro del rango de longitud de onda visible (Maina, 2007). Con el cambio climático y el efecto invernadero aumentan la irradiación incidente en los corales, Tanto PAR como UV, generando estrés sobre ellos. La energía excedente, es decir, la que se encuentra por encima de los niveles de saturación, absorbida por las zooxantelas no se incorpora al proceso fotosintético y es disipada como calor (Skirving, *et al.*, 2017).

CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL ARRECIFE

En este apartado se explican los cambios producidos en el arrecife del PNAPM como producto de las alteraciones en el medio marino. El medio se refiere a las condiciones abióticas y bióticas que influyen en un organismo. La temperatura, salinidad, pH, irradiación solar, oleaje, los nutrientes y los sedimentos son algunos de los componentes abióticos del ambiente marino (Karleskint *et al.*, 2010) que al presentar fluctuaciones pueden modificar la estructura y el funcionamiento del arrecife.

Los arrecifes de coral son ecosistemas complejos tanto en su estructura como en su funcionamiento (Padilla, 2009). La estructura alude a la composición física y poblacional del ecosistema. Cuanto más compleja es la estructura, mayor es la variedad de las especies. La complejidad estructural se refiere al arreglo físico tridimensional de un ecosistema (Montes, 2018).

La estructura es provista por diversos elementos; uno de ellos son las “especies fundadoras” que en el caso de los arrecifes son los corales escleractinios (Padilla *et al.*, 2009) cuyo arreglo ramificado crea microhábitats para varias especies. Por ello, la estructura relacionada con la densidad y biomasa de peces y la interacción entre especies (Montes, 2018), lo cual es parte del funcionamiento.

El funcionamiento se refiere a los procesos que le permiten al ecosistema funcionar óptimamente. El flujo de energía, el ciclo de los materiales y nutrientes a través de los componentes estructurales del ecosistema, las dinámicas entre poblaciones y comunidades (como la simbiosis), y los procesos fisiológicos (como la fotosíntesis) son algunos de los procesos clave en el funcionamiento de un ecosistema (Karleskint *et al.*, 2010)

Alteraciones por factores locales

La cercanía del arrecife a la costa, la particular conexión subterránea entre los acuíferos y el arrecife, la construcción de infraestructura, el crecimiento poblacional y turístico ocasionan que la influencia de las actividades terrestres se extienda hasta el medio marino y altere la estructura de la comunidad coralina y el funcionamiento del arrecife. A continuación se describen dichos cambios generados por los factores de presión identificados en el apartado anterior.

Eutrofización

Las aguas residuales contienen nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio) y sólidos suspendidos que enturbian y eutrofizan el arrecife. La eutrofización es el enriquecimiento de las aguas debido al aporte excesivo de nutrientes. En los ambientes eutrofizados disminuye el oxígeno disuelto debido a que el excedente de nutrientes favorece la proliferación de organismos fotosintéticos, como el fitoplancton y las algas, que durante su crecimiento y descomposición consumen gran cantidad de este elemento, lo que afecta a todas las especies que lo necesitan para respirar, como los pólipos coralinos, y que al no estar disponible en las cantidades necesarias puede generar asfixia y mortalidad (McField *et al.*, 2020)

A su vez, la proliferación de las algas modifica las dinámicas entre los organismos bentónicos, los que habitan en el fondo, porque genera cambios en la cobertura del sustrato marino. Esto se debe a que las macroalgas son organismos menos especializados cuya velocidad de crecimiento es mucho mayor que la de los corales, especialmente bajo las condiciones de eutrofización. Cuando las algas ocupan la mayor parte del fondo bentónico, limitan el asentamiento larval y el reclutamiento coralino. El reclutamiento coralino consiste en la integración de las larvas de coral a la colonias ya formadas. Actualmente Quintana

Roo presenta la cifra más baja de reclutamiento del Sistema Arrecifal Mesoamericano (McField *et al.*, 2020).

Aunado al bajo reclutamiento las probabilidades de supervivencia disminuyen a tamaños más grandes, lo que podrá explicar que a pesar de la alta densidad de las colonias, más del 75% de las estas tenían diámetros inferiores a 10 cm (Rodríguez Martínez *et al.*, 2010).

La eutrofización también influye en las tasas de fotosíntesis. Por una parte, la proliferación de las algas es tal que inclusive llegan a crecer sobre los corales, impidiendo que las zooxantelas realicen fotosíntesis y le proporcionen nutrientes al pólipo. Por otra parte, la turbidez generada por las partículas suspendidas que acompañan la eutrofización dificulta la penetración de la luz y su aprovechamiento por organismos fotosintéticos bentónicos (McField *et al.*, 2020)

Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual la materia suspendida en un fluido se precipita al fondo, que en el caso del arrecife está cubierto por diferentes especies bentónicas, como erizos, corales y pastos marinos, por lo que es uno de los principales factores de estrés (EPA, 2018). Las descargas de aguas residuales y subterráneas, aunado a la deforestación del mangle que filtra naturalmente el agua son las principales causas detrás del aumento de este proceso en el PNAPM (McField *et al.*, 2020).

De acuerdo con los trabajos revisados por Granja y López (2008) la sedimentación sobre la colonia coralina reduce la capacidad de respiración, captura de alimento y fotosíntesis, genera daños en los pólipos, inhibe el reclutamiento larval, bloquea el intercambio agua-tejido del coral y en general interfiere con estructura de la comunidad. Asimismo, reduce el espacio disponible para el forrajeo y el movimiento de otras especies y altera la topografía del sustrato.

Las actividades turísticas también juegan un papel importante en la sedimentación, específicamente en la remoción y levantamiento. De acuerdo con López-Ercilla (2017) el mayor impacto que las actividades turísticas generan dentro del PNAPM, después del contacto con el coral, es el levantamiento de sedimentos con una incidencia del 40,2 %, un total de 148 nubes de sedimentos en los arrecifes del Parque. Éstas fueron originadas en un 93% de los casos por los clientes (turistas y buzos) con las aletas. Alrededor del 67% de las ocasiones que ocurre el impacto identificado como “levantando sedimento” es generado por parte de los turistas, mientras que el 33% restante, la nube de sedimento fue generada por los guías.

Contaminación por plásticos

El aumento del flujo turístico conlleva una mayor generación de desechos, entre los que destacan los plásticos. Tan sólo las 4 ciudades principales de Quintana Roo liberan 2,004 toneladas por año en el océano. Estos y las redes abandonadas dañan las estructuras coralinas al atorarse en ellas, además de alterar las cadenas tróficas y las dinámicas comunitarias al ser ingeridas por peces, tortugas y aves. McField *et al.* (2020) hallaron que los meros capturados en Puerto Morelos tenían hasta 7.5 piezas de plástico en el estómago.

Ruptura de estructuras coralinas

La ruptura de estructuras consiste en la fragmentación y desprendimiento de partes del coral. Las principales causas de ruptura en el PNAPM son las inmersiones recreativas debido a su gran cantidad, el anclaje, la construcción de muelles y prácticas inadecuadas de turismo y pesca (CONABIO, 2007).

Hawkins *et al.* (2002) en Rivera *et al.*, (2005) hallaron que la cantidad de fragmentos sueltos de coral vivo es mayor en los sitios de buceo y que hay más coral desgastado en áreas de alto uso que de bajo uso en el Caribe. Asimismo, López (2017) señala que

mayoría de los impactos generados por las inmersiones (buceo autónomo y libre) en el PNAPM son originadas por el contacto entre el buzo y el coral. Tocar corales no sólo puede generar daños estructurales, sino que también al tocar individuos durante las inmersiones se pueden esparcir de manera accidental enfermedades de coral.

El impacto derivado de tocar el coral representó más del doble de los registros que los impactos producidos por el siguiente impacto más común en el caso del buceo autónomo, que es el levantamiento de sedimentos. En esta modalidad 75% de los casos provienen de los buzos y 24% del guía. Es decir que una cuarta parte del daño es provocado por los guías. En ambos casos, las aletas fueron identificadas como el principal medio de contacto con el coral, por lo que se considera un impacto accidental al ocurrir con una parte del equipo de buceo y no con la mano (López, 2017).

Alteraciones por el cambio climático

Arribazones de sargazo

Las arribazones de sargazo son fenómenos en los que grandes islas flotantes de algas de color marrón (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, principalmente) arriban a las costas. En los últimos años, posiblemente por el cambio climático, la cantidad depositada en las costas del sureste mexicano ha aumentado considerablemente, lo que afecta a los arrecifes y a las actividades económicas que dependen de estos, como la pesca y el turismo (Pérez *et al.*, 2019).

El sargazo contribuye a la eutrofización del arrecife porque aporta potasio, calcio, magnesio y fósforo. Además de los nutrientes, en el sargazo muestreado en el PNAPM por Rodríguez *et al.*, (2020) se hallaron trazas de arsénico, cloro, manganeso, rubidio, azufre, silicio, estroncio, torio y uranio. Se que los metales y los productos químicos orgánicos lixiviados por el sargazo afectan en la reproducción, la tasa de crecimiento, la alimentación y las respuestas defensivas de los corales (EPA, 2018).

Los lixiviados de *Sargassum* también influyen en el comportamiento de las larvas de coral. Antonio-Martínez *et al.*, (2020) condujeron una investigación sobre su efecto en las larvas de *A. palmata*, un importante constructor del arrecife que está protegido en el PNAPM. Dicho trabajo reveló que la velocidad de nado disminuyó, aumentó el porcentaje de individuos que nadaban en un patrón en espiral, y que la mayoría de las larvas con lixiviados estaban inmóviles. Esto podría reducir la dispersión larval y la diversidad genética de los corales.

Asimismo, cuando el sargazo se descompone emite amonio y ácido sulfhídrico los cuales pueden aumentar la temperatura de las aguas hasta en 4 grados centígrados. Este proceso además reduce el pH de las aguas y genera condiciones anaerobias, es decir, de poco o nulo oxígeno (Ortega, 2019), se enturbia el agua impidiendo el paso de la luz solar e intensifica la erosión costera (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020).

Estos cambios en el medio acuático han resultado en la mortalidad de los corales de la zona. Individuos entre los 100 y 700 años de edad, comenzaron a morir alcanzando una tasa de mortalidad del 50% debido a la enfermedad conocida como el “Síndrome blanco”, fuertemente vinculada a estas arribazones (Pérez *et al.*, 2019). Esta enfermedad resulta en la pérdida de la estructura tridimensional de los corales ya que ocasiona un desprendimiento del tejido vivo del organismo (Varillas, 2019).

Asimismo, otras especies del arrecife se ven afectadas. En 2018 se reportó en el PNAPM la muerte de individuos de más de 70 especies marinas a causa de estas inusuales arribazones, entre ellos langostas, pulpos y erizos, de acuerdo con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Las arribazones también interfirieron con la anidación de tortugas marinas y los viajes hacia el mar de las tortugas juveniles y alteraron la estructura trófica del erizo diadema de mar. De igual manera, la estructura poblacional se modificó en tanto que los prados de pastos marinos cercanos a la costa dominados por *Thalassia testudinum*

fueron reemplazados por distintos tipos de algas, lo que resultó en una pérdida hasta del 99.5% de biomasa subterránea (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020).

Estrés térmico

El incremento de la temperatura del mar asociado con el cambio climático es uno de los mayores factores de estrés para los corales. El estrés térmico es una condición en la que la temperatura excede el umbral de tolerancia de los corales. Cuando es muy prolongado o intenso puede alterar la distribución, los patrones de reproducción sexual y las tasas de crecimiento de los arrecifes. Asimismo, aumenta la incidencia de enfermedades de coral, puesto que genera mayor susceptibilidad hacia los patógenos y favorece la propagación de enfermedades, lo que ha llevado a la disminución regional de especies constructoras de arrecifes (Rodríguez, 2016).

Por otra parte las altas temperaturas aceleran el crecimiento de las algas lo que reduce la luz solar disponible para otros organismos arrecifales. Esto no implica que la radiación solar disminuya, sino que no esté disponible para los corales. La alta irradiación solar combinada con las elevadas temperaturas marinas y otros factores de estrés, induce blanqueamiento de coral.

El blanqueamiento es un fenómeno en el que los pólipos expulsan a las zooxantelas que habitan en sus tejidos, dejando transparente (o “blanqueados”) la estructura, haciendo visible el color blanco del esqueleto de carbonato de calcio. La ruptura de la simbiosis desestabiliza los procesos metabólicos y fisiológicos de los organismos (Skirving, *et al.*, 2017) lo que puede conducir a la mortalidad del coral.

El primer registro de blanqueamiento se en el PNAPM data de 1995. Desde entonces, el blanqueamiento ocurrió en todos los años cuando el temperatura máxima de la superficie del mar excedida 30 ° C en verano, excepto en el año de 1997 (Rodríguez-Martínez, *et al.*, 2010). Estos fenómenos fueron extensos y afectaron a corales

escleractíneos, gorgonáceos, zoantidos. Se considera que la mortalidad no fue alta y que la recuperación fue rápida (Diario Oficial, 2000) a excepción de 1995 y 2005 cuando se registraron los eventos más graves de este tipo, en los cuales más del 50% de las colonias de coral sufrieron blanqueamiento en diferentes intensidades. (Rodríguez-Martínez, *et al.*, 2010).

Estrés lumínico

Como resultado de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) como los fluorocarbonos, el flujo de la radiación solar, como la UV-B ha aumentado. Este tipo de radiación penetra fácilmente las aguas claras, como las del PNAPM. La exposición de las zooxantelas a temperaturas elevadas y radiación UV genera alteración en el proceso de fotosíntesis asociado con cambios en la fotoquímica primaria. Los corales entonces sobrepasan el umbral de tolerancia a los efectos de la radiación y cualquier aumento posterior en el flujo de ésta podría afectar la productividad y la salud de los arrecifes de aguas poco profundas (Lesser, 1996).

Por otro lado, la radiación fotosintéticamente activa (*PAR* por sus siglas en inglés) es aquella sujeta a ser aprovechada por los fotoreceptores de los organismos que realizan fotosíntesis. Altos niveles de radiación PAR pueden causar fotoinhibición y decoloración en los pigmentos fotosensibles, entre otras formas de fotodaño causadas por el estrés lumínico. El estrés lumínico se refiere a las condiciones de radiación bajo las cuales los organismos exceden sus capacidades fotoprotectoras, lo que a su vez aumenta la temperatura del mar ya que la radiación que no es aprovechada se disipa como calor (Skirving *et al.*, 2018).

Cuando estos dos factores se combinan, el estrés lumínico y el aumento de la temperatura, disminuye aún más el rendimiento fotosintético de las algas simbiotas y el

fotodaño es más intenso, lo cual aumenta la vulnerabilidad al blanqueamiento y a enfermedades (Skirving et al., 2018).

Acidificación del océano

El pH de la laguna arrecifal del PNAPM disminuyó de 8.1 a 7.0 en 16 años, lo que muestran una tendencia a la acidificación (Merino y Otero 1991; CONABIO, 2007). La acidificación se refiere al cambio en las características químicas de los mares por la captación de dióxido de carbono atmosférico. Ésta también puede generarse a nivel local con el enriquecimiento de nutrientes que aumentan la acidez de las aguas costeras y agravan los efectos de la acidificación oceánica (EPA, 2018).

La acidificación es una creciente amenaza a los arrecifes debido a que una vez que el CO₂ es absorbido por el mar además de disminuir el pH, también disminuye el estado de saturación de carbonato de calcio (CaCO₃) y de los minerales carbonatados como el aragonita, que emplean organismos como los corales para construir su esqueleto exterior (Chollett *et al.*, 2014; Gledhill *et al.*, 2008).

Por ende, la acidificación del océano limita el crecimiento y fortalecimiento de las estructuras coralinas, por lo tanto se vuelven más vulnerables a fenómenos adversos climáticos (Anthony *et al.*, 2011). Y, aunque los pólipos de coral se pueden mantener relativamente sanos a pesar de cambios en el pH, su integridad se ve comprometida por la pérdida del esqueleto exterior (Doney *et al.*, 2009).

Por otra parte, cuando las concentraciones de dióxido de carbono son superiores a las 600 ppm, transforma las dinámicas poblacionales entre los organismos coralinos y las algas, aumentando la cobertura de las segundas, y por lo tanto, alterando toda la estabilidad del ecosistema y sus procesos internos. (Díaz-Pulido *et al.*, 2010 en Anthony *et al.*, 2011).

Cambios en la salinidad

La salinidad es uno de los parámetros que influye en la calidad del agua, como lo demuestran estudios previos (Hoegh-Guldberg; 1999, True, 2012; Mcfield, 2007). Los cambios en la salinidad pueden ocurrir por el aporte de nutrientes o la acidificación del mar (Gledhill *et al.*, 2008).

De acuerdo con el Diario Oficial (2000) la salinidad en esta zona era de 35 a 36.3 ppm con una media de 36.0 ppm a finales de la década de 1990. Para el 2006 se estimó que la salinidad promedio anual fue de 34.2 ups, registrando la concentración más baja en junio (31.6 ups) y enero (32.4 ups) (Álvarez-Cadena *et al.*, 2006).

Cuando la concentración de salinidad varía, puede alterar los procesos metabólicos del coral, especialmente de las algas simbiotas ya que influye en las tasas de fotosíntesis, la respiración y en la concentración de proteínas. Los cambios en la salinidad también amenaza la capacidad de supervivencia de los corales. Condiciones hipo o hipersalinas, con variaciones de 10 psu o más tienen un efecto letal en la mayoría de las especies, que puede resultar en mortandad si es combinado con otros factores de estrés (Ferrier- Páges *et al.*, 1999), como es el caso del arrecife estudiado en este trabajo.

Aumento del nivel del mar

Uno de los cambios más notorios en el Parque es el aumento del nivel del mar (INE, 2000). Con éste aumentan también la erosión costera y los procesos sedimentarios que potencialmente interfieren con la fotosíntesis, la alimentación, el reclutamiento y otros procesos clave para el adecuado funcionamiento y desarrollo de los arrecife (Schonberg *et al.*, 2017).

Cuando el aumento del nivel del mar es muy alto la columna vertical de las aguas puede acrecentarse y se reduce la penetración de la luz, lo que potencialmente podría afectar a los organismos fotosintéticos, ya de por sí afectados por muchos otros factores (Reef resilience network, 2020) como la turbidez y los bajos niveles de oxígeno generados por la sedimentación producto del aumento del nivel del mar.

La turbidez se presenta en los arrecifes tipo borde, como es el que se presenta en este trabajo, por el aumento de la suspensión de sedimento fino en las planicies de arrecife (la parte interior de los arrecifes de borde más cerca de las fuentes de sedimento, entre la costa y el arrecife) y por la erosión costera y transporte de sedimentos finos a arrecifes adyacentes (EPA, 2018).

Aumento de las enfermedades de coral

Las enfermedades de coral son condiciones anormales causadas por agentes externos asociadas a síntomas específicos que ocasionan disfunciones fisiológicas en los corales (huésped). Estas pueden resultar en grandes tasas de mortalidad, reducción de la fecundidad y tamaño si la calidad del agua es deficiente o si los corales se encuentran estresados por otros factores (Navarro, 2015).

A nivel mundial el Caribe es donde se registran la mayor cantidad de brotes de enfermedades, siendo la enfermedad de la banda blanca, la plaga blanca y la enfermedad de la banda negra las de mayor incidencia (Rodríguez-Martínez et al. 2001). Las numerosas enfermedades son uno de los factores responsables de la disminución en la cobertura de coral vivo, lo cual es especialmente preocupante en el caso de aquellos considerados formadores de arrecifes como los del género *Acropora* (Rodríguez, 2016).

El Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos tienen el primer registro (1998) de viruela blanca en México. A pesar de que se presentó en menos del 10% de las colonias

evaluadas, generó una pérdida de tejido coralino de hasta el 90% en el año 2000 (Rodríguez-Martínez et al. 2001). Merendiz (2012) menciona que es preocupante el porcentaje de colonias que presentaron algún tipo de enfermedad en el PNAPM, especialmente en el sitio de “La Pared”, especialmente porque entre las especies afectadas se encuentran *Montastraea faveolata* y *M. annularis*, importantes constructoras de arrecife y generadoras de hábitat.

En general, los corales ubicados en la parte norte de este arrecife son los más afectados por la prevalencia de enfermedades (Navarro, 2015) probablemente debido a que están sujetos a más agentes estresantes, así como a los efectos de la sobrepesca, la deforestación del mangle y el desarrollo costero y turístico, exacerbados en esta zona.

Actualmente la principal causa de mortalidad en los arrecifes del Caribe es el Síndrome Blanco (WS), un grupo de enfermedades que generan la pérdida de tejido en colonias masivas y ramificadas. El WS presenta la mayor incidencia (número de casos) y prevalencia (proporción de individuos enfermos) (Rodríguez, 2016) puesto que se propaga rápidamente mediante el contacto y el agua, matando a las comunidades afectadas en meses (McField *et al.*, 2020).

Dicha enfermedad se ha esparcido en más de 450 km de las costas del Caribe, afectado a más de 22 especies constructoras de arrecifes, matando miles de colonias e inclusive llevando al borde de la extinción local a los corales pilar, que han desaparecido en un 90% lo que ha acabado con el hábitat de muchas especies y degradado la calidad de los servicios ambientales que proveen los arrecifes (McField *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

En el monitoreo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos realizado entre 1993 y 2005 por Rodríguez-Martínez et al., (2010) no se registraron cambios significativos en la temperatura superficial del mar y la transparencia del agua. Sin embargo, investigaciones más recientes muestran el aumento de la temperatura del mar de 3 grados centígrados en 20 años, y una tendencia hacia la acidificación, como lo manifiesta la disminución del pH de 8.34 a 7.0 en menos de quince años.

Aunado a esto, el aumento en la concentración de nutrientes, la dominancia de la cobertura del bentos por las macroalgas, las pequeñas tallas de las colonias coralinas y de las poblaciones de peces, la disminución de peces comerciales, la aparición y colonización de especies oportunistas (que predominan en ambientes perturbados) son algunos de los elementos que indican el deterioro del estado del arrecife del PNAPM. Lo cual se reafirma con la clasificación de su estado como *Regular* de acuerdo al Índice de Salud Arrecifal de McField et al., (2020) y *Alarmante* de acuerdo a los índices de Carriquiry (2010), a pesar de que este último evalúa únicamente a los corales, no al arrecife en sí, por lo que sería necesario evaluar al sitio en cuestión para conocer su estado como ecosistema.

El deterioro se debe a factores de presión locales y globales. Entre los locales se identificaron los cambios en el medio terrestre como consecuencia del crecimiento urbano y turístico, las descargas de aguas residuales al arrecife y el aumento de inmersiones acompañado de malas prácticas turísticas prohibidas en el PNAPM, como el contacto con los corales. En cuanto al cambio climático, el aumento de la temperatura del mar, la acidificación del océano, el aumento del nivel del mar, la mayor radiación y la ocurrencia de fenómenos atípicos como las arribazones de sargazo son los factores que amenazan al arrecife, aunque no son necesariamente los únicos, sino los en este trabajo se pudieron identificar con la investigación documental.

Los cambios estructurales que se identificaron en esta investigación, que no son necesariamente los únicos, fueron la reducción de la complejidad y tridimensionalidad estructural, la ruptura y el desprendimiento de estructuras, la disminución en el reclutamiento y en las tasas de calcificación, y, sin duda el cambio estructural más grande, el desplazamiento de la comunidad de pastos marinos y corales por las algas.

Por otra parte, los cambios en tanto al funcionamiento son la eutrofización por los aportes de nutrientes de distintas fuentes, mortalidad de las colonias por enfermedades y blanqueamiento, la disminución del oxígeno disuelto, pérdida de hábitat para las especies marinas, asfixia por el la remoción de sedimentos y el aumento de estos, cambios en la cobertura y dominancia del sustrato por el aporte de nutrientes, disminución en la salinidad, y la inhibición y fotodaño en cuanto a la fotosíntesis.

Este último es el proceso que se ve afectado por absolutamente todos los elementos identificados. Y, tomando en cuenta que es así como los corales que establecen la simbiosis con las zooxantelas obtienen hasta el 90% de sus nutrientes, es una problema muy grave para el arrecife.

El factor que más alteraciones genera es la arribazón de sargazo, ya que desencadena múltiples procesos que interfieren con el funcionamiento óptimo del arrecife. Reduce el oxígeno disuelto, imposibilita la fotosíntesis, aporta nutrientes, aumenta la temperatura, contamina con metales, causa mortalidad de fauna marina y se asocia con enfermedades de coral, entre otras.

Los arrecifes de coral son ecosistemas complejos tanto en su estructura como en su funcionamiento, por lo cual explicar los cambios que ocurren en estos también lo es. Pero, con base en la información disponible se pueden explicar los cambios que los factores de estrés inducen en la estructura y funcionamiento de los corales y los arrecifes que conforman. Mas, las investigaciones que tienen lugar en esta zona son muy especializadas, lo cual no permite tener un panorama general de la situación del arrecife, pero sí construir

uno a través de la revisión y análisis de los trabajos publicados sobre esta zona, como es el caso del presente trabajo.

Sin embargo, con eventos que se presentan de manera novedosa, como las arribazones de sargazo, hay aún mucha información por recolectar y generar para poder realizar un análisis más certero y completo de la situación del PNAPM. Muchos de los cambios pueden ser explicados de manera general, es decir que se puede comprender cómo afectan al arrecife como ecosistema, pero por la falta de estudios en esta zona es difícil explicar cómo afectan al arrecife del PNAPM en concreto, mas se puede inferir con base en los múltiples trabajos que existen sobre los corales.

Por ello se consideró necesario hacer una revisión bibliográfica tan extensa, ya que no se puede asumir que el caso de cualquier arrecife va a ser similar al del PNAPM. Especialmente tomando en cuenta que una de las características que diferencia a este arrecife es su exitoso manejo comunitario, que se ha logrado por el alto grado de participación de la comunidad que depende prácticamente por completo de este ecosistema y sus servicios ambientales, comprometidos por las amenazas locales y globales.

REFERENCIAS

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (2018). *Información básica sobre los arrecifes de coral*. Recuperado el 20 de febrero del 2020 de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-los-arrecifes-de-coral>

Álvarez-Cadena, J.N., Almaral-Mendivil, A.R., Ordóñez-López, U. y Uicab-Sabido, A. (2008). Composición, abundancia y distribución de las especies de quetognatos del litoral norte del Caribe de México. *Hidrobiológica*, 18 (1), 37-48. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972008000400007&lng=es&tlng=es

Anthony, K. R., Marshall, P. A., Abdulla, A. , Beeden, R. , Bergh, C. , Black, R. , Eakin, C. M., Game, E. T., Gooch, M. , Graham, N. A., Green, A. , Heron, S. F., Hoodonk, R. , Knowland, C. , Mangubhai, S. , Marshall, N. , Maynard, J. A., McGinnity, P. , McLeod, E. , Mumby, P. J., Nyström, M. , Obura, D. , Oliver, J. , Possingham, H. P., Pressey, R. L., Rowlands, G. P., Tamelander, J. , Wachenfeld, D. y Wear, S. (2015), Operationalizing resilience for adaptive coral reef management under global environmental change. *Global Change Biology*, 21: 48-61. doi:[10.1111/gcb.12700](https://doi.org/10.1111/gcb.12700)

Anthony, K. R. N., Maynard, J. A., Diaz-Pulido, G., Mumby, P. J., Marshall, P. A., Cao, L., y Hoegh-Guldberg, O. (2011). Ocean acidification and warming will lower coral reef resilience. *Global Change Biology*, 17(5), 1798–1808. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02364.x>

Antonio-Martínez, F., Henaut, Y., Vega-Zepeda, A. Cerón-Flores, A., Raigoza-Figueras, R.,Cetz-Navarro, N.P., Espinoza-Avalos, J. (2020). Leachate effects of pelagic *Sargassum* spp. on larval swimming behavior of the coral *Acropora palmata*. *Scientific Reports*. 10, 3910. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60864-z>

Ardisson, P., May-Kú, M. A., Herrera-Dorantes, M. T., y Arellano-Guillermo, A. (2011). El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiológica*, 21(3), 261-280. Recuperado en 12 de septiembre de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972011000300005&lng=es&tlng=es.

Arrivillaga, A., y Windevoxhel, N., (2008). *Evaluación Ecorregional del Arrecife Mesoamericano: Plan de Conservación Marina*. The Nature Conservancy. Guatemala. <https://www.cbd.int/doc/meetings/mar/rwebsa-wcar-01/other/rwebsa-wcar-01-guatemala-02-es.pdf>

Astorga Moar, A.(2017). Variación en la dinámica litoral bajo escenarios predictivos de degradación de arrecifes. (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México. México. https://www.researchgate.net/publication/320960998_Variacion_en_la_dinamica_litoral_bajo_escenarios_predictivos_de_degradacion_de_arrecifes

Ayuntamiento de Puerto Morelos (1 de enero de 2019) *Rompe Puerto Morelos Llegada de turistas en 2018*. Boletín municipal. Recuperado el 20 de enero de 2020 de <https://puertomorelos.gob.mx/comunicacionsocial/boletines/rompe-puerto-morelos-record-en-llegada-de-turistas-en-2018/>

Bozec, Y.M., Álvarez-Filip, L., y Mumby, P. (2015). The dynamics of architectural complexity on coral reefs under climate change. *Global Change Biology* 21(1): 223-235. doi: 10.1111/gcb.12698.

Carrquiry, J. D., (2010). Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Primera Etapa. Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM012. México, D.F.

Chollett, I., Enríquez, S. y Mumby, P.J. (2014) Redefining Thermal Regimes to Design Reserves for Coral Reefs in the Face of Climate Change. *PLOS ONE* 9(10): e110634 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110634>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (25 de abril del 2019) *Fichas ANP: Arrecife de Puerto Morelos*. Recuperada el 10 de febrero del 2020 de <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=83®=9>

CONANP (26 de abril del 2019) Caribe Mexicano. Fichas ANP: Caribe Mexicano. Recuperado el 10 de febrero de <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=191®=9>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2007). *Ficha Técnica para la evaluación de los sitios prioritario para la conservación de los ambientes costeros y oceánicos de México*. pp. 153- 164. http://www.conabio.gob.mx/gap/images/4/44/73_Humedales_Costeros_Arrecife_PuertoMorelos.pdf

CONABIO (2019) *Biodiversidad Mexicana: Arrecifes*. Recuperado el 17 de enero del 2020 de <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/arrecifes>

Diario Oficial. (18 de septiembre de 2000). *Resumen del Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos*. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_pcym/83_DOE.pdf

Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A. y Kleypas, J.A. (2009) Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science* 1: 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>

Eakin C.M., Morgan J.A., Heron S.F., Smith T.B., Liu G., Alvarez-Filip L., Baca, B., Bartels, E., Bastidas, C., Bouchon, C., Brandt, M., Bruckner, A. W., Bunkley-Williams, L., Cameron, A., Causey, B.D., Chiappone, M., Christensen, T.R., Crabbe, M.J., Day, O., *et al.* (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *PLOS ONE*- 5: e13969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>

EPA (20 de junio de 2018) *Amenazas para los arrecifes de coral*. Recuperado el 29 de abril del 2020 de <https://espanol.epa.gov/espanol/amenazas-para-los-arrecifes-de-coral>

Enríquez, S., Méndez. E.R., Hoegh-Guldberg. O., e Iglesias-Prieto, R. (2017) Key functional role of the optical properties of coral skeletons in coral ecology and evolution. *Proc. R. Soc. B* 284: 20161667. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.1667>

Ferrier-Pagès, C., Gattuso J-P, Jaubert, J. (1999) Effect of small variations in salinity on the rates of photosynthesis and respiration of the zooxanthellate coral *Stylophora pistillata*. *Marine Ecology Progress Series*. (181) 309-314. <https://www.int-res.com/articles/meps/181/m181p309.pdf>

Fondo Mundial para la Naturaleza (sin fecha). Arrecife Mesoamericano. *Programa Arrecife Mesoamericano*. Recuperado 20 de febrero del 2019 de https://www.wwf.org.mx/que_hacemos/programas/arrecife_mesoamericano/

Gledhill, D. K., Wanninkhof, R., Millero, F.J. y Eakin, M. (2008). Ocean acidification of the Greater Caribbean Region 1996–2006. *Journal of Geophysical Research*. 113, C10031, doi: 10.1029/2007JC004629.

Granja, M. R., y López, R.A. (2008). Sedimentación en comunidades arrecifales de Bahías de Huatulco, Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical*. 56(3), 1179-1187. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442008000300017&lng=en&tlng=es

Hernández, R., y Álvarez, F. (2019). Molluscs from the Puerto Morelos Reef National Park, Quintana Roo, Mexico; new records for the Mexican Caribbean. *Revista mexicana de biodiversidad*, 90, e902712. <https://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2712>

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (22 de enero de 2018) *Puerto Morelos es el municipio de más reciente creación en el estado de Quintana Roo*. Recuperado el 23 de febrero del 2019 de <https://www.gob.mx/inafed/articulos/puerto-morelos-es-el-municipio-de-mas-reciente-creacion-del-estado-de-quintana-roo?idiom=es>

Junta de Control de Recursos Hídricos del Estado de California (sin fecha). *Oxígeno Disuelto (OD)*. *Folleto Informativo 3.1.1.0*. Recuperado el 22 de enero de 2020 de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3110sp.pdf

Karleskint, G., Turner, R., y Small, J. (2010) Coral Reef Communities. *Introduction to Marine Biology*. Brooks/Cole. 4ta ed. California. (págs. 395 - 420).

Lesser, M.P. (1996) Elevated temperatures and ultraviolet radiation cause oxidative stress and inhibit photosynthesis in symbiotic dinoflagellates. *Limnology and Oceanography* 41: 271–283. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.2.0271>

López-Ercilla, I. (2017) Evaluación del impacto del buceo en comunidades arrecifales del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (México). (Tesis de Maestría). Universidad Para La Cooperación Internacional. DOI: 10.13140/RG.2.2.10180.12166

Maina, J., Venus, V., Mcclanahan, T., y Ateweberhan, M. (2008). Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecological Modelling*. 212. 180-199. 10.1016/j.ecolmodel.2007.10.033.

Mcfield, M., Kramer, P., Alvarez-Filip, L., Drysdale, I., Flores, M., Petersen, A. y Soto, M (2018). 2018 Mesoamerican Reef Report Card. 10.13140/RG.2.2.19679.36005.

McField, M., Kramer, P., Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N., y Rueda, M. (2020). 2020 Mesoamerican Reef Report Card.

Mcfield, M., Kramer, P., Gorrez, M., y McPherson, M. (2007). Healthy Reefs for Healthy People: A Guide to Indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region. https://www.researchgate.net/publication/228627962_Healthy_Reefs_for_Healthy_People_A_Guide_to_Indicators_of_Reef_Health_and_Social_Well-being_in_the_Mesoamerican_Reef_Region

Merediz Alonso, G. (2012). Caracterización y monitoreo de la condición arrecifal en cinco áreas naturales protegidas y un área de influencia de Quintana Roo, México: Primera etapa. Amigos de Sian Ka'an A.C. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. DM011 México D. F.

Merino-Ibarra, M. y Otero, L. (1990). Atlas Ambiental Costero, Puerto Morelos, Quintana Roo. Quintana Roo, México: Centro de Investigaciones de Quintana Roo. 1ed. 80 pp. https://www.researchgate.net/publication/281228168_Atlas_Ambiental_Costero_Puerto_Morelos_-_Quintana_Roo

Mumby, P. J., Elliott, I. A., Eakin, C. M., Skirving, W. , Paris, C. B., Edwards, H. J., Enríquez, S. , Iglesias-Prieto, R. , Cherubin, L. M. and Stevens, J. R. (2011), Reserve design for uncertain responses of coral reefs to climate change. *Ecology Letters*. (14) 132-140. doi:10.1111/j.1461-0248.2010.01562.x

Navarro Espinoza, E. (2015). Prevalencia de enfermedades de *Acropora palmata* en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos y su relación con las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero. (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. 10.13140/RG.2.2.20156.95369.

Organización de las Naciones Unidas (ONU) (15 de enero de 2019) *Estamos hirviendo vivos los arrecifes de coral*. Recuperado el 20 de marzo de 2019 de <https://news.un.org/es/story/2019/01/1449332>

Padilla, C., Alafita-Vázquez, H., y Andreu-Montalvo, E. (2009). "Factores de riesgo para los arrecifes coralinos y sus mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático global". En Evelia Rivera-Arriaga; Isaac Azuz-Adeath; Leticia Alpuche Gual, y Guillermo Jorge Villalobos-Zapata (eds.), *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche, Gobierno del Estado de Campeche, pp. 181-204.

Pérez, R., Toche, N., Vidal, M. (16 de agosto de 2019). "Es un desastre ecológico": la crisis del sargazo en México. *The New York Times*. Recuperado el 20 de abril del 2020 de: <https://www.nytimes.com/es/2019/08/16/espanol/america-latina/sargazo-playas-mexico.html>

Pérez-Cervantes, E., Navarro-Espinoza, E., Estrada-Saldivar, N.E., Espinosa-Andrade, N., Melo-Merino, S.M., Rivas-Soto, M. y Álvarez-Filip, L. (2017). Estado de conservación de los arrecifes de coral de la Península de Yucatán. Greenpeace México. Ciudad de México.

Reef resilience network (2020). *Los arrecifes están en riesgo*. Recuperado el 02 de febrero de 2020 de <https://reefresilience.org/es/reefs-are-at-risk/>

Reyna-Fabian, M. Espinoza, A., Seingier, G., Ortiz-Lozano, L., y Espejel, I. (2018). De la evaluación ecológica a la socio-ecológica: la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático. *Sociedad y Ambiente*, (17) p. 59-92. ISSN 2007-6576. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i17.1840>

Reyes-Bonilla, H., Cupul-Magaña, A., Loreto-Viruel, R., Cárdenas, P., Vazquez-Vera, L., Arellano, N., Espinoza, C. (2012). "Evaluación de la capacidad de carga para buceo en áreas naturales protegidas del mar Caribe y el golfo de California, México." *Medio ambiente y política turística en México Tomo I: Ecología, biodiversidad y desarrollo turístico*. pp.149-162. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 1 ed.

Rivera Planter, M., y Muñoz Piña, C. (2005). Tarifas y arrecifes: Instrumentos económicos para las áreas naturales protegidas marinas en México. *Gaceta Ecológica*, (75),19-34. ISSN: 1405-2849.

Rodríguez, J.C., (2016). Estado de salud de colonias de *Pocillopora* en el Pacífico mexicano. (Tesis de Doctorado) Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1503/1/244571.pdf>

Rodríguez-Martínez, R.E., Roy P.D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez ,M., van Tussenbroek, B.I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*. 8:e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>

Rodríguez-Martínez, R. E., Ruíz-Rentería, F., van Tussenbroek, B.I., Barba-Santos, G., Escalante-Mancera, E., Jordán-Garza, G., y Jordán-Dahlgren, E. (2010). Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 58(3),23-43. ISSN: 0034-7744. https://www.researchgate.net/publication/49815323_Environmental_state_and_tendencies_of_the_Puerto_Morelos_CARICOMP_site_Mexico

Romero-Rodríguez, D., Bernal, G., y Zea, S. (2014) Variables ambientales durante blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*. 38(149):347-55. Obtenido de: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v38n149/v38n149a01.pdf>

Santander Botello, Luis Carlos, & Propin Frejomil, Enrique (2009). Impacto ambiental del turismo de buceo en arrecifes de coral. *Cuadernos de Turismo*, (24),207-227. ISSN: 1139-7861. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=398/39812474010>

Schönberg, H.L., Fang, J., Carreiro-Silva, M., Tribollet, A., y Wisshak, M. (2017). Bioerosion: the other ocean acidification problem. *ICES Journal of Marine Science*. 74(4). 895–925, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw254>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2008). *Ecosistemas acuáticos*. Recuperado el 02 de febrero del 2020 de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008/06_agua/cap6_6.html

Skirving, W.; Enríquez, S.; Hedley, J.D.; Dove, S.; Eakin, C.M.; Mason, R.A.B.; De La Cour, J.L.; Liu, G.; Hoegh-Guldberg, O.; Strong, A.E.; Mumby, P.J.; Iglesias-Prieto, R. (2018) Remote Sensing of Coral Bleaching Using Temperature and Light: Progress towards an Operational Algorithm. *Remote Sens*. 10, 18. <https://doi.org/10.3390/rs10010018>

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2007) *Corales caribeños en peligro de extinción*. Recuperado el 20 de enero del 2019 de <https://www.iucn.org/es/content/corales-caribe%C3%B1os-en-peligro-de-extinci%C3%B3n>

Winfield, I., Abarca-Ávila, M., Ortiz, M.I, Cházaro-Olvera, S., y Lozano-Aburto, M.A (2017). Biodiversidad de los tanaidáceos (Crustacea: Peracarida: Tanaidacea) del Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(3), 572-578. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2017.07.006>

Zizumbo Villareal, L., & Cruz Coria, Erika, & Vilchis Onofre Alejandro, Adrian (2012). Acción Social y Áreas Naturales Protegidas: Refuncionalización de Recursos en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Rosa dos Ventos*, 4(2),192-207.