

**EVALUACIÓN DE LAS ZONAS DE  
RECUPERACIÓN DEL SISTEMA ARRECIFAL  
MESOAMÉRICANO EN MÉXICO  
(SAM-MÉXICO)  
CON BASE EN LOS PRINCIPIOS BIOFÍSICOS  
DE DISEÑO**

**Agosto 2018**

## RESUMEN EJECUTIVO

Las Zonas de Recuperación (ZR), o zonas donde cualquier actividad extractiva está totalmente prohibida, han sido ampliamente utilizadas para proteger especies focales marinas con fines de beneficio pesquero y de conservación. Para cumplir con estas metas de una manera eficaz, es necesario que el establecimiento de redes de ZR se encuentren bajo determinados principios de diseño biofísico que permitan maximizar la conectividad entre las poblaciones de especies, sean capaces de mantenerse ante disturbios locales y, adaptarse a los cambios del clima y la química del océano. En éste reporte, se presenta una evaluación de la red de las ZR del Sistema Arrecifal Mesoamericano en México (SAM-México) tomando como base los principios biofísicos de diseño adaptados para el SAM: representación del hábitat; protección de áreas críticas, especiales y únicas; tiempo de recuperación; dispersión del riesgo; conectividad con base al tamaño, compactación y espaciamiento; protección de áreas resilientes al clima; y, minimizar y prevenir amenazas terrestres y marinas. Como resultado general de esta evaluación se elaboró una tabla de puntuación (Tabla 1) donde cada uno de los principios, a escala de red de ZR SAM-México, fueron calificados sobre una escala de 0 (malo) a 3 (muy bueno), según la condición del principio del diseño biofísico. Como resultados, se identificó que la red de ZR protege el 14.3% de arrecife de coral y el 13.3% de pasto marino, porcentajes inferiores al 20% sugerido como una protección eficaz mínima. Áreas con grandes superficies de pasto marino sin protección se ubican en la parte norte de Cancún, norte de la Isla de Cozumel y en Sian Ka'an (Bahías de la Ascensión y Espíritu Santo). En cuanto al manglar, la parte sur del SAM-México (a partir de Punta Herrero, Sian Ka'an) presenta grandes porciones de hábitat no siendo protegidas por ZR. El 85% de las ZR cuenta con un espaciamiento menor a 15 km, sugiriendo un mantenimiento de una adecuada conexión larval. Estimaciones considerando las ZR a escala individual, identificaron que el 54% de las ZR cuenta con un tiempo de establecimiento mayor a 20 (20-32) años; el 57% de las ZR no cuenta con el tamaño suficiente que le permita proteger el patrón de desplazamiento reportado para las especies focales; y, el 74% de las ZR tiene un nivel insuficiente en la compactación de su forma. A partir de estas observaciones, resalta la necesidad de considerar el grado de recuperación de las especies focales bajo diferentes escenarios de presión pesquera y ambientales. Así mismo, es necesario el desarrollo e incorporación de estudios que validen el grado de conectividad del hábitat manglar entre los ambientes marino y terrestre, estudios sobre la química del océano, el transporte larval y la dispersión; todos ellos combinados con la modificación de la física del océano y la biología de las especies. El presente ejercicio, como desarrollo de una línea base sobre el diseño de las reservas marinas del SAM-México, contribuye ser una guía para la creación de nuevas reservas marinas así como para la revisión de los programas de manejo, conduciendo a una mejora en su diseño para cumplir con sus fines establecidos.

**Tabla 1.** Resumen de la evaluación de los principios biofísicos de las Zonas de Recuperación (ZR) en el Sistema Arrecifal Mesoamericano en México (SAM-México).

Categoría del principio biofísico		Puntaje Escala ZR Corto plazo	Puntaje Escala ZR Largo plazo	Puntaje Escala ZR SAM-México
1. Representatividad de hábitats (arrecifes de coral y pastos marinos)		0	1	1
2. Proteger áreas críticas, especiales y únicas		DESCRIPTIVO		
3. Permitir tiempo de recuperación		2	2	2
4. Dispersión del riesgo		NA	NA	2
5. Minimizar y evitar amenazas locales terrestres y marinas		2	2	2
6. Incorporación de la conectividad	6.1 Tamaño: movimiento peces	2	1	1
	6.2 Forma: compactación	2	1	1
	6.4 Espaciamiento	NA	3	3
	6.4.2 Espaciamiento entre ZR			
6.5 Tamaño: superficie		DESCRIPTIVO		
7. Adaptación a los cambios en el clima y la química del océano		DESCRIPTIVO		

Este informe, subvencionado por Comunidad y Biodiversidad A. C., fue preparado por:

M. en C. Espinosa-Andrade, Noemi.

E-mail: [bm.noemiespinosa@gmail.com](mailto:bm.noemiespinosa@gmail.com)

## Contenido

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>2</b>
<b>ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1 PRINCIPIOS BIOFÍSICOS	8
<b>2. APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS BIOFÍSICOS PARA EL DISEÑO DE LAS ZONAS DE RECUPERACIÓN DEL SAM-MÉXICO</b>	<b>10</b>
2.1 ZONAS DE RECUPERACIÓN DEL SAM-MÉXICO	10
2.2 MÉTODOS	13
2.3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS BIOFÍSICOS	17
2.3.1 REPRESENTATIVIDAD DE HÁBITAT	18
2.3.2 PROTEGER ÁREAS CRÍTICAS, ESPECIALES Y ÚNICAS	24
2.3.3 PERMITIR TIEMPO DE RECUPERACIÓN	30
2.3.4 DISPERSIÓN DEL RIESGO	32
2.3.5 MINIMIZAR Y EVITAR AMENAZAS LOCALES TERRESTRES Y MARINAS	34
2.3.6 INCORPORACIÓN DE LA CONECTIVIDAD	36
2.3.7 ADAPTACIÓN A LOS CAMBIOS EN EL CLIMA Y LA QUÍMICA DEL OCEÁNO	42
<b>3. REFERENCIAS</b>	<b>44</b>

## ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>AMP</b>	Área Marina Protegida
<b>ANP</b>	Área Natural Protegida
<b>APFF</b>	Área de Protección de Flora y Fauna
<b>ARP</b>	Agregaciones Reproductivas de Peces
<b>COBI</b>	Comunidad y Biodiversidad
<b>CONABIO</b>	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua
<b>CONANP</b>	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
<b>CONAPESCA</b>	Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca
<b>DHW</b>	Degree Heating Weeks (semanas de calentamiento por grados, en español)
<b>DOF</b>	Diario Oficial de la Federación
<b>HRI</b>	Healthy Reefs Initiative (Iniciativa Arrecifes Saludables, en español)
<b>I.</b>	Isla
<b>ISA</b>	Índice de Salud Arrecifal
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, en español)
<b>Occ.</b>	Occidente
<b>OSC</b>	Organización de la Sociedad Civil
<b>PN</b>	Parque Nacional
<b>Pta.</b>	Punta
<b>RB</b>	Reserva de la Biósfera
<b>SAM</b>	Sistema Arrecifal Mesoamericano
<b>SEMAR</b>	Secretaría de Marina
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>ST</b>	Santuario
<b>TSM</b>	Temperatura Superficial del Mar
<b>ZR</b>	Zona de Recuperación
<b>ZRP</b>	Zona de Refugio Pesquero

# EVALUACIÓN DE LAS ZONAS DE RECUPERACIÓN DEL SISTEMA ARRECIFAL MESOAMERICANO EN MÉXICO (SAM-MÉXICO) CON BASE EN LOS PRINCIPIOS BIOFÍSICOS DE DISEÑO

## 1. INTRODUCCIÓN

La sobrepesca, la pérdida o degradación de hábitats importantes (arrecifes de coral, manglar, pastos marinos) debido a amenazas locales y globales están socavando la producción de los recursos pesqueros y la biodiversidad (Pandolfi *et al.*, 2011; Zupan *et al.*, 2018). No olvidando que la sostenibilidad de los recursos también contribuye a largo plazo a los medios de vida (cultural y económica) de las comunidades que dependen del mar (Burke *et al.*, 2003).

Ante esta problemática, a nivel mundial se han establecido Zonas de Recuperación (ZR) con el fin de mitigar los impactos humanos sobre los ecosistemas marinos. Las ZR (también llamadas reservas marinas, santuarios, parques marinos o “*no take zones*”<sup>1</sup>) es un término genérico utilizado para definir áreas donde la extracción o actividades destructivas no son permitidas (Roberts & Polunin, 1991; Green *et al.*, 2014a). En México, las ZR pueden encontrarse dentro de las AMPs como parte de su subzonificación o, dentro o fuera de las AMPs como Zonas de Refugio Pesquero (ZRP), las primeras administradas por la CONANP y las segundas por la CONAPESCA, ambas de competencia federal.

El presente informe, producto del proyecto “*Evaluación de reservas marinas con base en los principios biofísicos de diseño de zonas de recuperación*”, subvencionado por COBI A. C., comprende un análisis y una evaluación de los principios biofísicos para el diseño de una red de ZR en el Sistema Arrecifal Mesoamericano en México (SAM-México). Dicho análisis identifica, bajo un enfoque científico, el estado actual del diseño de las ZR de competencia federal, establecidas a lo largo del estado de Quintana Roo, México. La identificación de vacíos, como un resultado consecuente, permite contribuir en una mejora en el diseño de la red de ZR, manejo de los recursos marinos y ecosistemas asociados.

Aunque este producto es aplicado al SAM-México, cabe mencionar que también puede ser adaptado a otras regiones donde la protección y el uso sustentable del capital natural sean de prioridad.

---

<sup>1</sup> Zonas de veda o zonas cerradas a la pesca, en español.

## 1.1 PRINCIPIOS BIOFÍSICOS

El Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) es uno de los más grandes ecosistemas de arrecife de coral del mundo. México junto con Honduras, Belice y Guatemala son los cuatro países que tienen una jurisdicción sobre el SAM, sin embargo, cada uno de ellos ha utilizado enfoques y estrategias diferentes para diseñar e implementar sus redes de Áreas Marinas Protegidas (AMPs), incluyendo las ZR.

Dado que el SAM es un sistema ecológicamente conectado, es prescindible la existencia de un enfoque regional que esté coordinado entre los cuatro países, esto con el fin de diseñar una red de ZR que proteja de la manera más efectiva los diferentes hábitats importantes (arrecifes de coral, manglar y pastos marinos) que son utilizados por las especies focales<sup>2</sup>.

Para contribuir con este objetivo, como primer paso a este proceso, el presente trabajo analiza los diferentes principios biofísicos para el diseño de ZR adaptados al SAM (Tabla 2), los cuales fueron identificados y desarrollados con la participación de representantes de gobierno, academia y sociedad civil organizada de los cuatro países del SAM en el “Taller para la Adaptación de los principios biofísicos para el diseño de zonas de recuperación en el Sistema Arrecifal Mesoamericano”, realizado en julio del año 2016 en Cancún, México (Green *et al.*, 2017).

**Tabla 2.** Principios biofísicos para el diseño de las zonas de recuperación del Sistema Arrecifal Mesoamericano.

CATEGORÍA	PRINCIPIO DE DISEÑO BIOFÍSICO (ADAPTADO AL SAM)
Representatividad de hábitats	Representar 20-30% de cada hábitat importante (manglar, pastos marinos y arrecife coralino) dentro de ZR.
Proteger áreas críticas, especiales y únicas	Proteger áreas importantes durante el ciclo de vida de las especies focales (e.g. sitios de reproducción, desove, crianza), áreas con alto endemismo, gran abundancia de especies raras, especies amenazadas, alta productividad y con gran complejidad de hábitat dentro de ZR para el mantenimiento de sus poblaciones.
Permitir tiempo de recuperación	<b>Zonas de Recuperación de largo plazo.</b> Las ZR de largo plazo deben de establecerse de manera permanente (20-40 años) para fines de conservación y permitir la recuperación de la población de especies focales a fin de mejorar la producción pesquera a largo plazo.
	<b>Zonas de Recuperación de corto plazo.</b> Asegurar que las ZR de corto plazo sean una herramienta para la protección y recuperación de las especies focales en fases críticas de su ciclo de vida, considerando que éstas deben de ser complementarias a las de largo plazo y por lo tanto, no deben reemplazarlas.
Dispersión del riesgo	Replicar la protección de cada hábitat principal dentro de ZR en regiones ampliamente separadas permitirá reducir la posibilidad de que todas sean afectadas por la misma perturbación.

<sup>2</sup> Se consideran especies focales aquellas especies de importancia comercial, grupos funcionales importantes para mantener la resiliencia ecológica frente a amenazas locales y globales, y especies raras y amenazadas.



Minimizar y evitar amenazas locales terrestres y marinas	Priorizar la ubicación de las ZR donde actualmente y a futuro exista una mayor probabilidad de encontrar ecosistemas saludables con bajos niveles de amenazas locales considerando a su vez, su ubicación en: 1) áreas donde las amenazas puedan manejarse de manera efectiva; y 2) áreas dentro o adyacentes a otras áreas marinas o terrestres efectivamente manejadas para facilitar la recuperación de los ecosistemas y las poblaciones de peces.
Incorporación de la conectividad <sup>1</sup>	<p><b>Tamaño, con base al movimiento del ámbito hogareño de los peces.</b> Las ZR deben tener el doble del tamaño que el patrón de movimiento de los juveniles y adultos de las especies focales para su protección; y las ZR deben integrarse con otras herramientas de manejo a fin de manejar especies de extenso patrón de movimiento que no puedan ser protegidas dentro de las ZR.</p> <p><b>Forma: compactación.</b> Utilizar ZR de forma compacta, en vez de elongadas, excepto cuando el hábitat a proteger sea naturalmente elongado, minimizan el efecto de borde ayudando a mantener la integridad y por tanto, sostenibilidad de las ZR.</p> <p><b>Espaciamiento entre ZR.</b> Asegurar que las ZR estén lo suficientemente cerca (&lt;15 km) para permitir el movimiento de las especies focales entre los hábitats protegidos, utilizados a lo largo de su ciclo de vida.</p>
Adaptación a los cambios en el clima y la química del océano	Identificar y proteger áreas donde los hábitats y especies son más probables a ser resistentes o resilientes a efectos acumulativos de los cambios en el clima y la química en el océano, incluyendo: 1) áreas donde los hábitats y especies han resistido a cambios extremos del medio ambiente en el pasado, 2) áreas con una temperatura superficial del mar (TSM) y química del océano históricamente variables y, 3) hábitats costeros que tienen la mayor probabilidad de sobrevivir al aumento del nivel del mar.

<sup>1</sup> De acuerdo con Green *et al.* (2017), la categoría “incorporación de la conectividad” también contempla como principio biofísico la “distancia entre poblaciones o áreas espacialmente aisladas”, sin embargo, éste no fue analizado debido a la falta de información local para su desarrollo. Dentro de esta misma categoría, se muestra un análisis descriptivo de la frecuencia de tamaños de las ZR.

## 2. APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS BIOFÍSICOS PARA EL DISEÑO DE LAS ZONAS DE RECUPERACIÓN DEL SAM-MÉXICO

### 2.1 ZONAS DE RECUPERACIÓN DEL SAM-MÉXICO

Las ZR de la porción mexicana del SAM se encuentran en las aguas marinas de jurisdicción federal del estado de Quintana Roo, del cual, nueve de sus once municipios conforman los 865 kilómetros de litoral mexicano correspondiente al SAM (SAM-México; Ardisson *et al.*, 2011). De un total de 17 Áreas Naturales Protegidas (ANP) de competencia federal establecidas en Quintana Roo, son 12 las ANPs que cuentan con una total o parcial porción marina (de aquí en adelante llamadas Área Marina Protegida, AMP).

Particularmente, el ANP Manglares de Nichupté (adicional a las 12 AMP ya mencionadas), aunque no es propiamente marina, su protección es fundamental para el sistema de arrecifes ubicados en la zona de Cancún (Tabla 3, Figura 1), por lo que para fines de éste trabajo, el ANP Manglares de Nichupté será considerada como una AMP.

Las ZR del SAM-México han sido establecidas tanto de manera permanente, es decir, de largo plazo (Tabla 3), como de manera temporal, de corto plazo (cinco y seis años; Tabla 4); las primeras bajo un Decreto como parte de la subzonificación de las AMPs y administradas por la CONANP y, las segundas a través de un Acuerdo como ZRP y administradas por la CONAPESCA. A diferencia de las establecidas por Decreto, las establecidas por Acuerdo pueden ser renovadas al término de su vigencia y cuando esta condición estaba presente, las ZRP fueron consideradas como ZR de largo plazo (Tabla 4).

**Tabla 3.** Áreas protegidas de competencia federal. Las áreas con porción marina (AMP) contienen las Zonas de Recuperación de temporalidad de largo plazo. Datos tomados de los Decretos publicados en el DOF por el cual se establece cada Área Protegida.

Área Protegida			Superficie (km <sup>2</sup> )	
Categoría	Nombre	Año de Decreto	Terrestre y/o aguas continental	Marina
APFF	Otoch Ma'ax Yetel Kooh	2003	53.7	0
APFF	Uaymil	1994	891.2	0
PN	Tulum	1981	6.6	0
ST	Playa de la Isla Contoy	1998	0.1	0
APFF	Manglares de Nichupté <sup>1</sup>	2008	42.6	0
RB	Tiburón Ballena	2009	0	1,459.9
APFF	Yum Balam	1994	523.1	1,017.4
PN	Isla Contoy	1998	2.3	48.9
PN	Costa Occ. de I. Mujeres, Pta. Cancún y Pta. Nizuc	1996	0.006	86.7
PN	Arrecife de Puerto Morelos	1998	0.38	90.3
APFF	La porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la I. de Cozumel	2012	57.3	321.0
PN	Arrecifes de Cozumel	1996	0.8	119.1

RB	Sian Ka'an	1986	3,750.1	1,531.4
RB	Arrecifes de Sian Ka'an	1998	13.6	335.7
RB	Banco Chinchorro	1996	5.8	1,437.7
PN	Arrecifes de Xcalak	2000	45.2	134.3
RB	Caribe Mexicano <sup>2</sup>	2016	285.9	57,254.7

<sup>1</sup> Manglares de Nichupté no cuenta con porción marina, sin embargo, es considerada AMP por su alta conectividad con la AMP ubicada en la zona de Cancún.

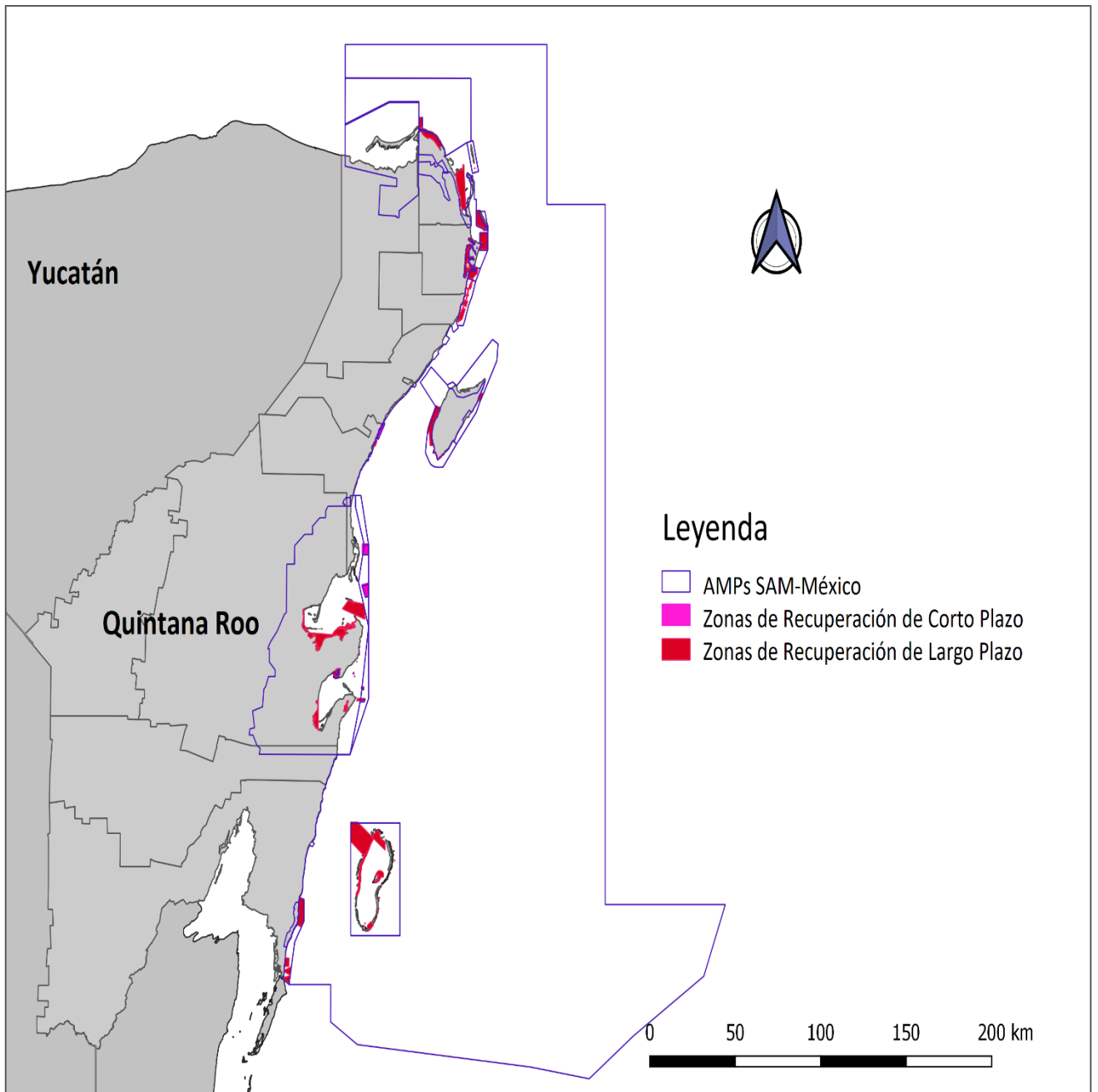
<sup>2</sup> Las ZR profundas designadas como parte de la RB Caribe mexicano no son incluidas en el presente análisis debido a que su protección no abarca toda la columna de agua, es decir, solamente desde los 100 metros de profundidad hasta el piso oceánico.

**Tabla 4.** Zonas de Recuperación designadas como Zonas de Refugio Pesquero. Datos tomados de los Acuerdos de establecimiento de ZRP publicados en el DOF.

Nombre	Fecha de Acuerdo	Fecha de renovación	Superficie (km <sup>2</sup> )
El Cabezo	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.09
Gallineros	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.09
La Poza	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.05
Punta Loria	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.07
San Román Norte	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.03
San Román Sur	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.02
Punta Niluc	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	0.16
Mimis	nov 2012 - nov 2017	nov 2017 - nov 2022	9.98
El Faro	sep 2013 - sep 2018		4.28
El Faro (Langosta) <sup>1</sup>	sep 2013 - sep 2018		0.39
Anegado Chal	sep 2013 - sep 2018		1.05
Laguna Canché Balam	sep 2013 - sep 2018		5.54
40 cañones	sep 2013 - sep 2018		122.57
Akumal <sup>2</sup>	mar 2015 - mar 2021		9.88
Niche Habin <sup>2</sup>	sep 2016 - sep 2021		15.82
Punta San Juan <sup>2</sup>	sep 2016 - sep 2021		16.28
Canal Nizuc <sup>2</sup>	abr 2018 - abr 2023		0.082

<sup>1</sup> ZR no tomada en cuenta en los análisis del presente trabajo debido a que en ella es permitido la pesca de langosta.

<sup>2</sup> ZR menores a cinco años de establecimiento, determinadas de corto plazo.



**Figura 1.** Zonas de Recuperación en la porción mexicana del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM-México).

## 2.2 MÉTODOS

La evaluación del diseño de las Zonas de Recuperación (ZR) en el SAM-México, fue basada en los principios de diseño desarrollados y revisados por Green et al. (2014a; Tabla 2). Su aplicación, adaptada al SAM, ofrece información sobre en qué grado las ZR de la región de estudio cumplen con los principios clave del diseño biofísico (Green et al. 2017).

La identificación de cada polígono de ZR se hizo a través de la revisión de actividades permitidas y no permitidas en los Decretos y Acuerdos por los cuales fueron establecidos cada uno de ellos. La obtención de la información espacial se hizo a través del portal SIG de la CONANP<sup>3</sup> para las ZR de largo plazo y, en el caso de las ZR establecidas por Acuerdo (ZRP), ésta fue obtenida del Diario Oficial de la Federación con el apoyo de COBI. Para fines del desarrollo de la presente evaluación, todas las ZR que se encuentran contiguas, fueron unificadas considerándolas como un único polígono.

Debido al alcance, propiedad y a las fuentes de información disponibles de cada principio biofísico, tres de ellos no cuentan con una evaluación final, sin embargo, se hace un análisis descriptivo de cada uno de ellos acorde a la información disponible de la región (Tablas 1 y 6). Así mismo, a pesar de que la evaluación de los principios puede ser aplicable tanto a escala individual como a escala de red, el presente informe muestra solamente la evaluación a escala de red de ZR del SAM-México, en el entendido de que, a diferencia de lo que ofrecen las reservas marinas individuales, una red de ZR puede aportar beneficios adicionales mediante una reposición mutua (Ballantine, 1997; Gaines *et al.*, 2010). La evaluación final presentó tres escalas de evaluación:

- 1) **Red de ZR de corto plazo**, ZR establecidas por Acuerdo de manera temporal pero con un establecimiento menor a cinco años (Tabla 4)
- 2) **Red de ZR de largo plazo**, ZR establecidas por Decreto y por lo tanto permanentes (Tablas 3 y 4)
- 3) **Red de ZR SAM-México**, todas las ZR tanto temporales como permanentes

Un criterio y puntaje de evaluación (Tabla 5), basados en valores óptimos reportados en la bibliografía y acordes a cada principio biofísico, fueron asignados para estandarizar la evaluación final en cualquier escala. En los casos en que no se contó con la información suficiente para desarrollar por completo el principio biofísico, se procedió a realizar una descripción de él. En la tabla 6, se hace una descripción de los indicadores y métodos para la obtención de los resultados de cada principio biofísico.

---

<sup>3</sup> <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/>

**Tabla 5.** Puntuación asignada para la evaluación de los principios biofísicos del diseño de la red de Zonas de Recuperación

Puntuación	Categoría	Descripción
0	Mal	La condición del principio biofísico o el nivel de protección brindado por las ZR es insuficiente para cumplir con los objetivos de la ZR
1	Regular	La condición del principio biofísico o el nivel de protección brindado por las ZR es mínimo, sin permitir el cumplimiento de los objetivos de la ZR
2	Bien	La condición del principio biofísico o el nivel de protección brindado por las ZR es moderado, pero hay oportunidades para mejora
3	Muy bien	La condición del principio biofísico o el nivel de protección brindado por las ZR es bueno, permitiendo el cumplimiento de los objetivos de la ZR

**Tabla 6.** Descripción de los indicadores y métodos para la obtención de los resultados de los principios biofísicos del diseño de la red de Zonas de Recuperación en el SAM-México, a escala individual como red.

CATEGORÍA		MÉTODO	
		NIVEL INDIVIDUAL	NIVEL SAM-MÉXICO
Representatividad de hábitats <sup>1</sup>		Porcentaje de cada hábitat principal que está siendo protegido por cada ZR	Porcentaje de cada hábitat principal que está siendo protegido por las ZR
Proteger áreas críticas, especiales y únicas <sup>2</sup>		No aplica	Desarrollo del principio de manera descriptiva con base en la bibliografía y aplicación de encuestas a expertos (académicos, OSC, manejadores)*
Permitir tiempo de recuperación <sup>3</sup>	Zonas de recuperación de largo plazo	A partir de los años de establecimiento de las ZR, calcular los percentiles 33 y 66 con el fin de obtener un criterio de puntaje ajustado al conjunto de años de establecimiento de las ZR propias de la región de estudio	Promedio del puntaje asignado a cada ZR
	Zonas de recuperación de corto plazo	Mismo que para el de ZR de largo plazo pero aplicado solamente a las ZR de corto plazo	
Dispersión del riesgo <sup>1</sup>		No aplica	Identificar las ZR que protegen $\geq 5\%$ de cada uno de los hábitats importantes, con relación al área de la ZR. Una vez identificadas, calcular la distancia promedio que hay entre el centroide de cada ZR más adyacente, previamente identificada. Los análisis fueron realizados de manera separada para cada hábitat. Para obtener la evaluación final, los puntajes obtenidos por hábitat fueron promediados

<b>Minimizar y evitar amenazas locales terrestres y marinas</b>		Nivel de amenaza presente en la ZR ante el desarrollo costero, la contaminación basada en cuencas, el daño y contaminación marina y, la sobrepesca.	Promedio del puntaje asignado a cada ZR
<b>Incorporación de la conectividad**</b>	<b>Tamaño, con base al movimiento del ámbito hogareño de los peces<sup>1,3</sup></b>	Relación del tamaño de la ZR (km <sup>2</sup> ) con el patrón de desplazamiento (km <sup>2</sup> ) de las especies focales en todas sus direcciones	Promedio del puntaje asignado a cada ZR
	<b>Compactación<sup>1,3</sup></b>	Valor del índice de compactación (IC) de cada ZR. IC= área de ZR/perímetro de ZR	Promedio del IC de todas las ZR
	<b>Espaciamiento entre ZR<sup>1,3</sup></b>	No aplica	Porcentaje de la distribución de las frecuencias del rango de espaciamiento entre las ZR con su ZR más próxima
<b>Adaptación a los cambios en el clima y la química del océano<sup>2</sup></b>		No aplica	Desarrollo del principio de manera descriptiva con base en la bibliografía

<sup>1</sup> Análisis realizados con sistema de información geográfica (SIG). Proyección utilizada WGS84/UTM-16N

<sup>2</sup> Análisis descriptivo

<sup>3</sup> Análisis realizado con base en información bibliográfica

\* Para ver encuesta aplicada a expertos, dirigirse al material suplementario "Cuestionario\_habitats criticos\_SAM México"

\*\* Como información complementaria a este principio, se muestra un análisis descriptivo sobre la distribución de las superficies (km<sup>2</sup>) de las ZR



## 2.3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS BIOFÍSICOS

Un total de 72 polígonos son los que conforman la red de ZR del SAM-México, de los cuales 15 corresponden a Zonas de Refugio Pesquero (ZRP) y las restantes a ZR decretadas como parte de la subzonificación de las AMPs (Tabla 7).

**Table 7.** Polígonos de las Zonas de Recuperación categorizadas de acuerdo con su temporalidad y competencia administrativa.

Escala de Evaluación	Polígonos de Zonas de Recuperación	
	Número	Administración (núm. de polígonos)
Zonas de recuperación de corto plazo	4	CONAPESCA - ZRP (4)
Zonas de recuperación de largo plazo	68	CONANP - AMP (57) CONAPESCA - ZRP(11)
Zonas de recuperación SAM-México	72	CONANP - AMP (57) CONAPESCA - ZRP (15)

### 2.3.1 REPRESENTATIVIDAD DE HÁBITAT

Diversas especies, incluidas las focales, utilizan diferentes hábitats, por lo que la protección de todas las especies así como el mantenimiento de la salud e integridad del ecosistema puede ser logrado si porciones adecuadas de cada uno de los hábitats importantes se encuentran protegidos dentro de ZR (Green *et al.*, 2014a). Para determinar la cantidad de hábitat a proteger, es importante tener en cuenta que una población puede ser sólo mantenida si ésta produce los suficientes huevos y larvas como para mantenerse a sí misma (Gaines *et al.*, 2001).

Poco es conocido sobre el umbral de hábitat a proteger, sin embargo, análisis sugieren que mantener aproximadamente el 35% de los niveles del stock sin explotar aseguraría un adecuado reemplazo de la población. Por lo tanto, se recomienda que el 35% de los hábitats utilizados por las especies focales estén siendo protegidos por ZR (Fogarty y Botsford, 2007), donde la protección del hábitat es un referente para la protección de los stocks pesqueros.

Con base en esta información, este principio biofísico adaptado al SAM recomienda proteger del 20 al 30% de cada uno de los hábitats importantes dentro de ZR, parámetro que fue utilizado para la elaboración del criterio del puntaje (Tabla 8). Las tablas 9 y 10 muestran los resultados y puntajes parciales de cada uno de los hábitats importantes utilizados para la evaluación final del principio biofísico (Tabla 12); en el caso del hábitat manglar, éste fue solo meramente descriptivo (Tabla 11).

**Tabla 8.** Criterio de puntaje para el principio “Representatividad de hábitat”

Criterio de evaluación <sup>1</sup>	Puntaje
<b>Individual:</b> <8.25 % del hábitat importante está representado dentro de la ZR. <b>SAM-México:</b> <8.25 % del hábitat importante está representado dentro de todas las ZR.	0 puntos
<b>Individual:</b> 8.25 - <15.5 % del hábitat importante está representado dentro de la ZR. <b>SAM-México:</b> 8.25 - <15.5 % del hábitat importante está protegido dentro de todas las ZR.	1 punto
<b>Individual:</b> 15.5 - <22.75 % del hábitat importante está representado dentro de la ZR. <b>SAM-México:</b> 15.5 - <22.75 % del hábitat importante está representado dentro de todas las ZR.	2 puntos
<b>Individual:</b> ≥22.75 % del hábitat importante está representado dentro de la ZR. <b>SAM-México:</b> ≥22.75 % del hábitat importante está representado dentro de todas las ZR.	3 puntos

<sup>1</sup> El criterio de evaluación señalado para el SAM-México es aplicado a las tres diferentes escalas de evaluación, acorde a la temporalidad de las ZR.

## I. ARRECIFES DE CORAL

De los 521.34 km<sup>2</sup> de arrecife de coral que hay en el SAM-México, el 14.33% se encuentra protegido dentro de las ZR (Figura 2, Tabla 8).

### Insumo:

Capa de arrecifes de coral que representa la distribución mundial de los arrecifes de coral de aguas cálidas, compilada a partir de múltiples fuentes, incluido el Proyecto de Cartografía de los Arrecifes de Coral del Milenio (UNEP-WCMC *et al.*, 2010).

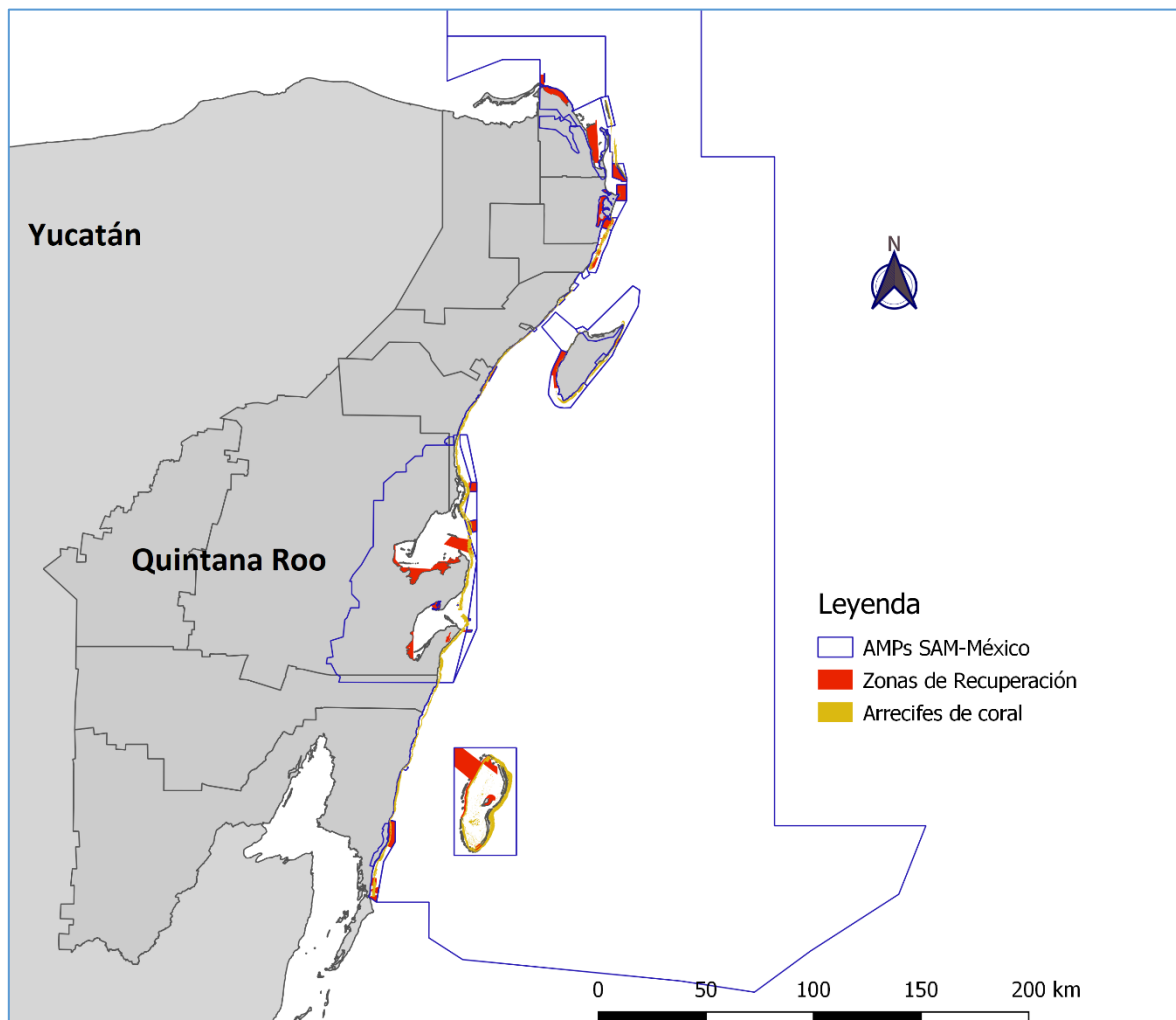


Figura 2. Hábitat de arrecifes de coral en el SAM-México.

**Tabla 9.** Resultados y puntaje parcial del principio biofísico “Representatividad de hábitat de arrecifes de coral”

Hábitat de arrecife coralino	Área (km <sup>2</sup> )	% Área (km <sup>2</sup> )	Puntaje
SAM-México	521.34	100	
Dentro de ZR de corto plazo	7.73	1.48	0
Dentro de ZR de largo plazo	67.00	12.85	1
Dentro de ZR del SAM-México	74.73	14.33	1

## II. PASTOS MARINOS

De los 573.08 km<sup>2</sup> del hábitat pasto marino que hay en el SAM-México, el 13.31% se encuentra protegido dentro de las ZR (Figura 3, Tabla 9).

### Insumo:

Capa de pastos marinos tomada del catálogo de metadatos geográficos proporcionados por CONABIO en (Gallegos-Martínez *et al.*, 2017).

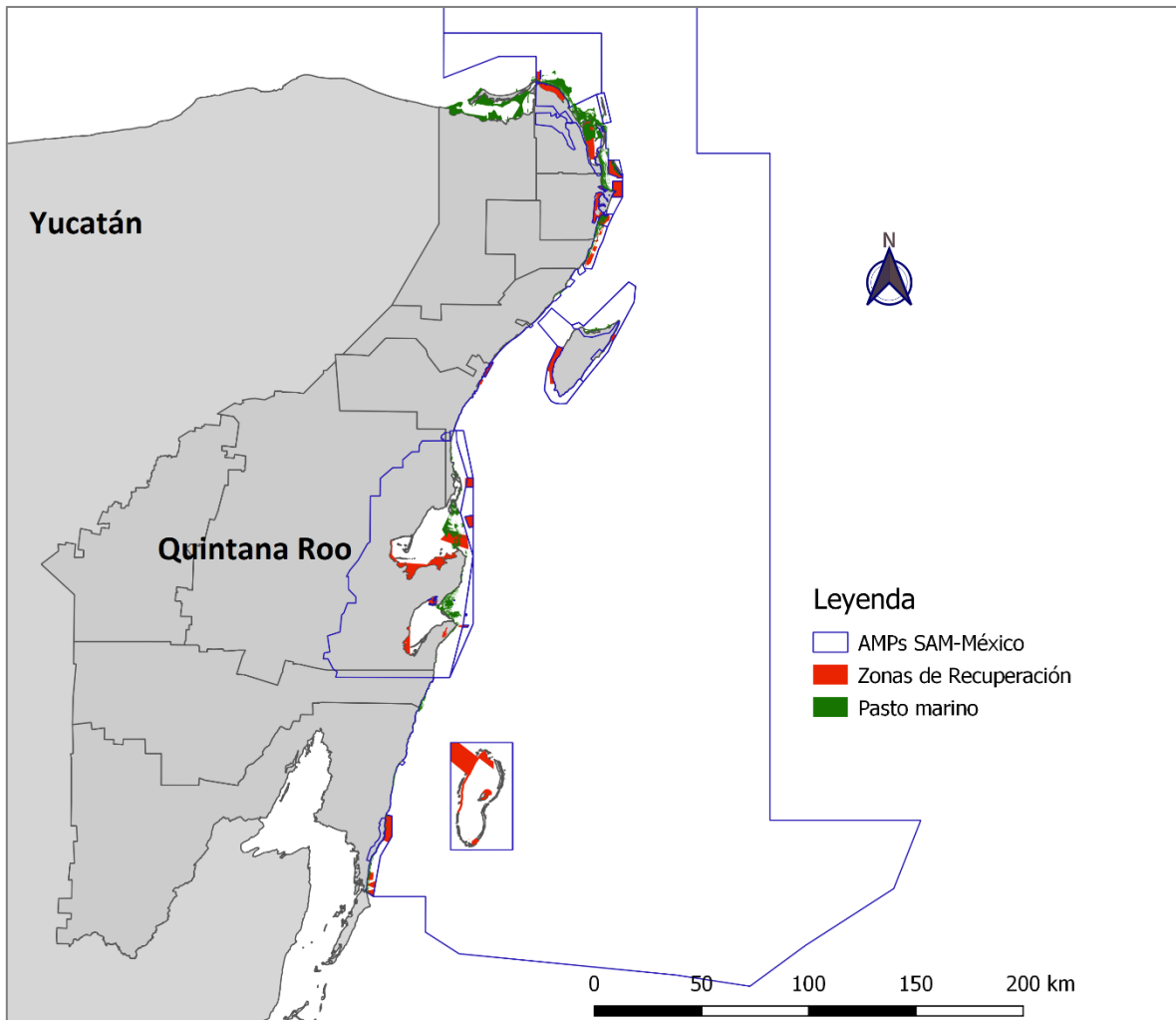


Figura 3. Hábitat de pasto marino en el SAM-México.

Tabla 10. Resultados y puntaje parcial del principio biofísico “Representatividad de hábitat de pastos marinos”

Hábitat de pastos marinos	Área (km <sup>2</sup> )	% Área (km <sup>2</sup> )	Puntaje
SAM-México	573.08	100	
Dentro de ZR de corto plazo (0-5 años)	0.02	0.00	0
Dentro de ZR de largo plazo (> 5 años)	76.28	13.31	1
Dentro de ZR del SAM-México	76.29	13.31	1

### III. MANGLAR

A diferencia de los hábitats de arrecife de coral y pasto marino, el de manglar puede encontrarse en bahías, lagunas costeras y en sitios de baja energía expuestos a mar abierto (Lugo y Snedaker, 1993). La naturaleza de los límites del manglar de ubicarse en porciones costeras y no propiamente en marinas, sumado a una información limitada sobre su conectividad terrestre-marina, harían una evaluación imprecisa de este hábitat. Por lo tanto, la evaluación del hábitat manglar bajo el principio biofísico de representatividad se muestra de manera descriptiva cuantitativa sobre la superficie tanto de la porción terrestre como marina del estado de Quintana Roo y del SAM-México (Figura 4, Tabla 10).

#### Insumo:

Capa de manglar que representa la distribución de los manglares en México en 2015, desarrollada por CONABIO (2016).

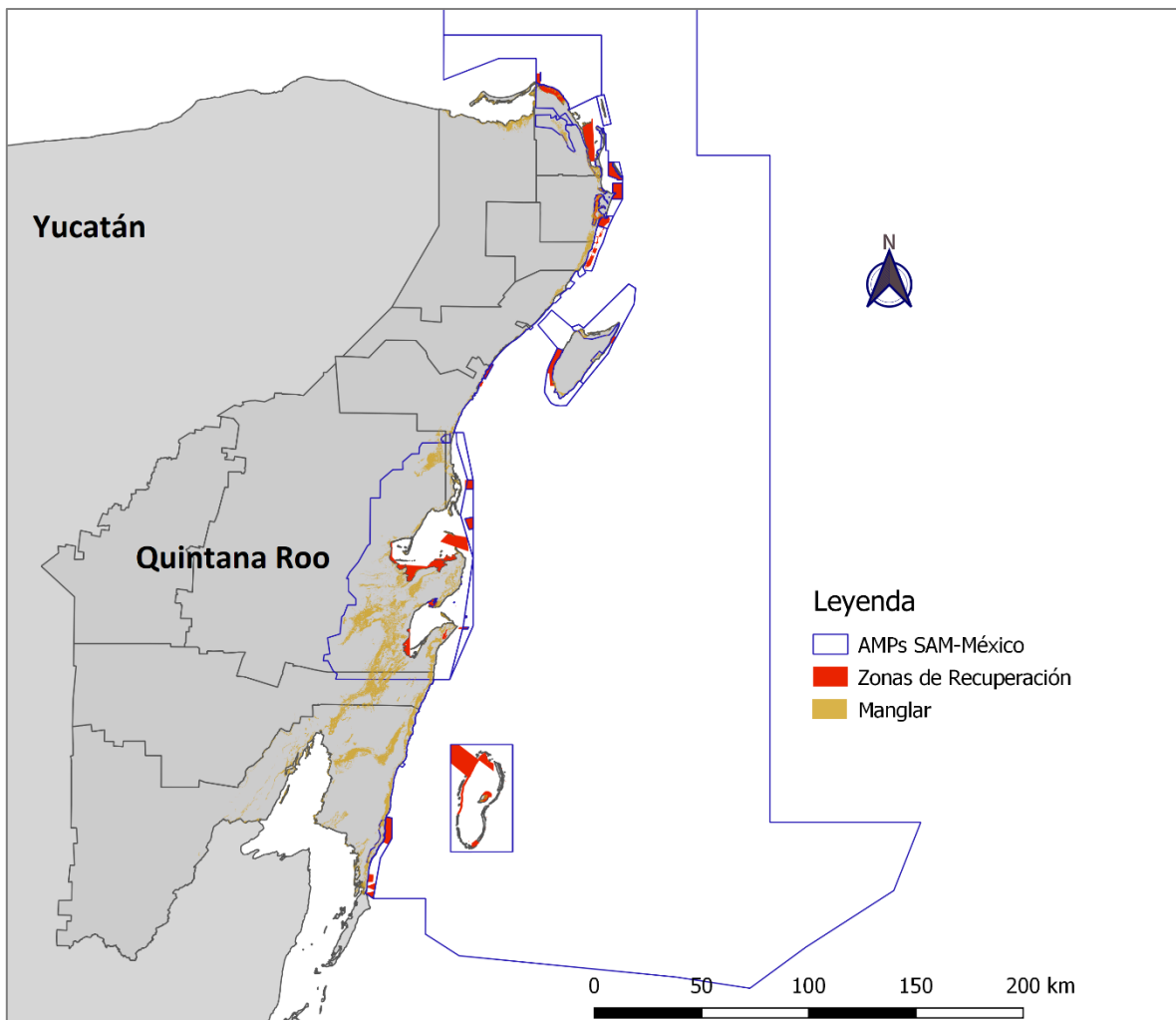


Figura 4. Hábitat de manglar en el SAM-México.

**Tabla 11.** Descripción cuantitativa del hábitat de manglar en el estado de Quintana Roo y SAM-México.

Hábitat de manglar	Área (km <sup>2</sup> )	% Área (km <sup>2</sup> )
Quintana Roo (terrestre y marino)	1,319.21	100
SAM-México (solo parte marina)	12.09	0.92
Dentro de ZR del SAM-México <sup>1</sup>	32.14	2.44

<sup>1</sup>La diferencia de área entre la superficie de manglar estrictamente marino y la superficie dentro de ZR se debe al manglar que está siendo protegido por las ZR ubicadas en la parte costera (e .g. la ZR Manglares de Nichupté y canal Nizuc en Cancún y, Laguna Canche Balam en Sian Ka'an).

**Tabla 12.** Evaluación final del principio biofísico “Representatividad de hábitat”. La evaluación corresponde al promedio del puntaje resultante de los hábitats arrecife de coral y pasto marino.

Escala de evaluación	Puntaje
Corto plazo	0
Largo plazo	1
SAM-México	1

### 2.3.2 PROTEGER ÁREAS CRÍTICAS, ESPECIALES Y ÚNICAS

Sitios de agregaciones reproductivas, áreas de alimentación, áreas con características geológicas únicas, áreas con ensamblajes y poblaciones únicas, con alta diversidad de hábitats o especies o, particularmente resilientes, son áreas de suma importancia que deben de ser protegidas dentro de ZR. Éste tipo de áreas, por lo general, son espacialmente y temporalmente predecibles concentrando a las poblaciones activas o en buen estado, conduciéndolas a una mayor probabilidad de ser sobreexplotadas (Green *et al.*, 2014a).

A continuación se hace referencia a las áreas críticas, especiales y únicas identificadas en el SAM-México, a través de búsqueda bibliográfica y cuestionarios realizados a académicos y a manejadores de AMPs.

#### I. Sitios de agregaciones de peces (ARP)

Muchas especies realizan grandes migraciones para agregarse en sitios y tiempos específicos, siendo esto parte de procesos críticos del ciclo de vida de las especies. En la literatura se ha reportado la identificación de 63 potenciales sitios de ARPs en el SAM-México. En los años 2015 y 2016, COBI se enfocó en una reevaluación y verificación de algunos de estos sitios de ARP en la RB de Sian Ka'an, la RB de Banco Chinchorro, el PN Arrecifes de Xcalak y la zona de Mahahual. En este esfuerzo, de 32 potenciales sitios de ARP, sólo ocho fueron verificados visualmente en los cuales se reproducen nueve especies (cuatro especies de mero, dos de pargo, y otras especies). De estos ocho sitios, cuatro están dentro de ZR establecidas como ZRP (Tablas 13 y 14; Fulton *et al.*, 2016).

**Tabla 13.** Sitios potenciales y verificados de agregaciones reproductivas de peces. El número entre paréntesis corresponde al número de sitios dentro de Zonas de Recuperación.

Estado	Número de sitios (ZR)
Sin datos	5
Poco probable	31 (4)
Probable	5 (1)
Verificado extinto	1
Verificado	8 (4)



**Tabla 14.** Sitios de Agregaciones Reproductivas de Peces visualmente verificados.

Sitio de ARP (año de establecimiento)	AMP	Zona de Recuperación
Pargos	Arrecifes de Sian Ka'an	No
Niche Habin (2016)	Arrecifes de Sian Ka'an	Si (ZRP)
El Faro (2013)	Sian Ka'an y Arrecifes de Sian Ka'an	Si (ZRP)
Anegado de Chal (2013)	Sian Ka'an y Arrecifes de Sian Ka'an	Si (ZRP)
San Juan (2016)	Sian Ka'an y Arrecifes de Sian Ka'an	Si (ZRP)
Blanquizal	Xcalak	No
Cayo Lobos	Banco Chinchorro	No
Herradura	Caribe Mexicano	No

## II. Otros hábitats críticos, únicos y especiales

Hábitats críticos, únicos y especiales, adicionales a las ARP, fueron recopilados a través de un cuestionario solicitado a manejadores, académicos y OSC's expertos de la región del SAM-México. No obstante, los siguientes hábitats corresponden a las respuestas obtenidas de académicos y manejadores de la AMP I. Mujeres, Pta. Cancún y Pta. Nizuc y, de las dos AMPs ubicadas en la I. de Cozumel<sup>4</sup>. Los sitios prioritarios marinos fueron obtenidos del geportal de la CONABIO (CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA. 2007).

### a) Sitios de crianza

- Canal Nizuc (Cancún)
- Río Inglés (Cancún)
- Sitios de manglar

### b) Sitios de alta complejidad estructural

- Cuevones (Cancún)
- La Cadenita (Cancún)
- El Bajito (Cancún)
- Microatolones (I. de Cozumel)
- >7 sitios (arrecifes del sur del PN Arrecifes de Cozumel)
- La Poza (Xcalak)

### c) Sitios altamente diversos

- >7 sitios (arrecifes del sur del PN Arrecifes de Cozumel)

### d) Sitios saludables y resilientes

- Cuevones (Cancún)
- La Cadenita (Cancún)
- Arrecife Colombia (I. de Cozumel)
- Arrecife Limones (Puerto Morelos)

<sup>4</sup> Para visualizar el formato del cuestionario aplicado, ver el material suplementario "Cuestionario\_habitats criticos\_SAM México"

**e) Sitios de restauración coralina**

- Cuevones (Cancún)
- Manchones (Cancún)
- Chitales (Cancún)
- Chankanaab (I. Cozumel)
- Dzul-Há (I. Cozumel)

**f) Sitios marinos prioritarios**

- Cordillera Cozumel y Arrowsmith.  
Comunidades de arrecifes profundos.
- Montes Submarinos del noroeste del Caribe.
- Humedales Costeros y Plataforma Continental de Cabo Catoche.  
Presencia de hábitats de manglar, petenes, praderas de pastos marinos, refugio de mamíferos marinos, aves y peces, zona de crecimiento de peces e invertebrados marinos.
- Laguna Chacmochuk - Arrecife de La Cadena.  
Hábitats de manglar, praderas de pastos marinos y algas, comunidades arrecifales, refugio de aves migratorias, zona de crecimiento y reproducción de peces e invertebrados marinos.
- Ríos Subterráneos y Caletas de Akumal - Tulum.  
Hábitats de manglares, marismas, vegetación de dunas costeras, praderas de pastos marinos y algas, comunidades arrecifales, zona de crecimiento y reproducción del manatí, aves, tortugas, peces e invertebrados marinos.
- Banco Chinchorro Profundo.  
Comunidades de arrecifes profundos, agregaciones de elasmobranquios de 5 branquias.

**g) Otros**

- Área de refugio Bahía Akumal.  
Sitio de alimentación, descanso y tránsito de tortugas marinas que salen a anidar a playas adyacentes.
- Galería del Museo Subacuático de Arte (MUSA). Situada en la zona de Cancún.  
Sitios con esculturas sumergidas de manera permanente que permiten la generación de arrecifes artificiales.

### III. Índice de Salud Arrecifal dentro y fuera de ZR

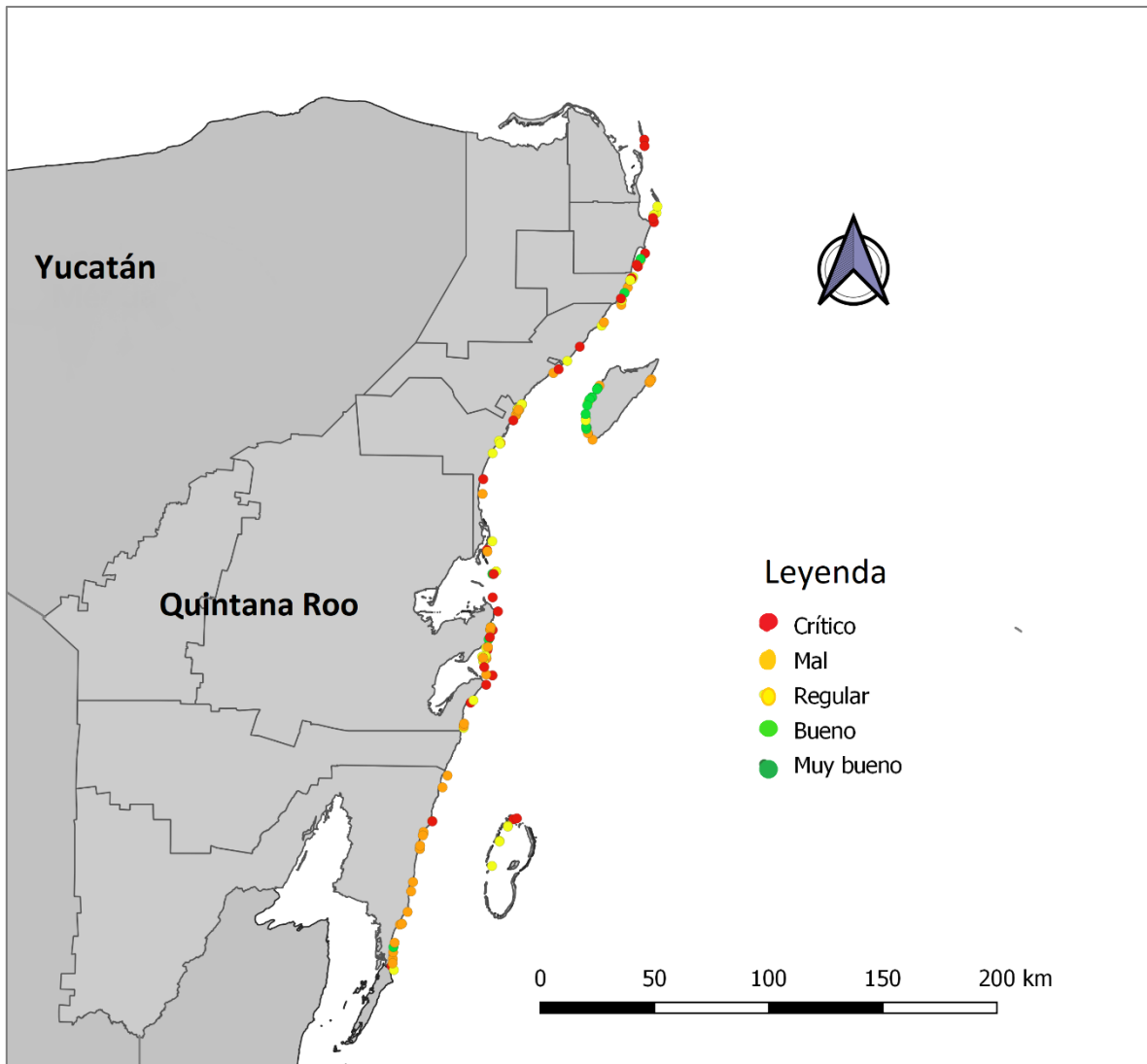
La Iniciativa Arrecifes Saludables (HRI, por sus siglas en inglés), con diez años de esfuerzo continuo, se ha enfocado en monitorear y evaluar la salud de un poco más de 100 sitios arrecifales a lo largo del SAM. Esta evaluación está basada en el índice de salud arrecifal (ISA), el cual contempla cuatro criterios: cobertura de coral, cobertura de macroalgas carnosas, biomasa de peces herbívoros y de peces comerciales (Tabla 15).

**Tabla 15.** Valores de los indicadores utilizados para la valoración del Índice de Salud Arrecifal propuesto por HRI. Datos tomados de HRI (2008).

Calificación	Cobertura de coral (%)	Cobertura de macroalgas (%)	Biomasa de peces herbívoros (100g/m <sup>2</sup> )	Biomasa de peces comerciales (100g/m <sup>2</sup> )
Muy bien	≥ 40	< 10	≥ 4,800	≥ 2,800
Bien	20 - 39.9	10 - 19	3,600 - 4,799	2,100 - 2,799
Regular	10 - 19.9	20 - 39	2,400 - 3,599	1,400 - 2,099
Mal	5 - 9.9	40 - 59	1,200 - 2,399	700 - 1,399
Crítico	< 5	≥ 60	< 1,200	< 700

De un total de 128 sitios monitoreados en el año 2016 por HRI, 51 sitios (40%) se encuentran dentro de ZR, mientras que 77 (60%) fuera de ellas (Figura 5, Tabla 15). De acuerdo con el ISA, del 40% de los sitios dentro de ZR, el 2% se encuentra en una condición “muy buena”, el 18% en “buena”, 39% en “regular”, 27% “mal” y el 14% “crítico”. Cabe mencionar que la mayoría de los arrecifes ubicados dentro de ZR, fueron encontrados con una condición regular<sup>5</sup> (Tabla 16).

<sup>5</sup> Para mayor referencia, consultar el Reporte 2018 en línea: [www.arrecifessaludables.org](http://www.arrecifessaludables.org)



**Figura 5.** Sitios monitoreados y evaluados por HRI en los años 2016 y 2017, en el SAM-México. Cada color representa la condición de salud del sitio arrecifal<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Para mayor referencia, consultar el Reporte 2018 en línea: [www.arrecifessaludables.org](http://www.arrecifessaludables.org)

**Tabla 16.** Número de sitios arrecifales monitoreados en el SAM-México por HRI y evaluados mediante el Índice de Salud Arrecifal. Los números dentro de los paréntesis indican el número de sitios dentro de ZR.

AMP	Núm. de sitios	Muy bien	Bien	Regular	Mal	Crítico
PN I. Contoy	2 (0)					2 (0)
PN Cancún	6 (6)			3 (3)		3 (3)
PN Puerto Morelos	13 (3)	1 (1)	2 (0)	4 (1)	2 (0)	4 (1)
APFF Cozumel	3 (2)				3 (2)	
PN Cozumel	14 (9)	1 (0)	9 (7)	2 (2)	2 (0)	
RB Sian Ka'an	35 (7)		2 (1)	10 (3)	11 (1)	12 (2)
PN Sian Ka'an	3 (1)		1 (0)	1 (1)		1 (0)
PN Xcalak	8 (4)		1 (1)		7 (3)	
RB Banco Chinchorro	8 (5)			5 (3)	1 (1)	2 (1)
RB Caribe Mexicano	33 (14)			11 (7)	18 (7)	4 (0)
Fuera de AMP	3 (0)				3 (0)	
Total sitios	128 (51)	2 (1)	15 (9)	36 (20)	47 (14)	28 (7)

### 2.3.3 PERMITIR TIEMPO DE RECUPERACIÓN

Actualmente, no hay estudios precisos que detallen el tiempo exacto de recuperación de las especies focales registradas en el SAM ya que esta condición puede variar dependiendo diversos escenarios, según la intensidad de pesca y factores ambientales. Estudios realizados en otras regiones sostienen que algunos herbívoros (ej. peces pericos) se recuperan en un lapso de <5-10 años, siempre y cuando estén protegidos por la sobrepesca, mientras que los depredadores (ej. meros) toman mucho más tiempo para su recuperación (20-40 años; Stockwell *et al.* 2009; Russ y Alcalá 2010; MacNiel *et al.*, 2015).

Considerando lo anterior, este principio biofísico recomienda que las ZR cuenten con una protección de largo plazo (20-40 años) con el fin de que todas las especies crezcan hasta la madurez, aumenten en biomasa y contribuyan con más huevos y larvas siendo así, capaces de recuperar a las poblaciones, mejorar las pesquerías adyacentes y mantener la salud y resiliencia del ecosistema (Green *et al.*, 2017).

El cálculo para la evaluación de este principio se determinó a partir de los valores absolutos de los años de establecimiento de cada ZR, es decir, la diferencia de años entre el año actual (2018) y el año de Decreto o Acuerdo de establecimiento de la ZR. Por otro lado, los valores de corte para marcar los puntajes de evaluación fueron obtenidos a partir de los percentiles .33 y .66 de la lista de valores de los años de protección de las ZR de acuerdo a su temporalidad (Tabla 17).

Bajo este procedimiento, en el SAM-México, el 46% de las ZR cuenta con un tiempo de establecimiento menor a los 20 años, mientras que el 54% un tiempo mayor a éste (20-32). Por su parte, las ZR de corto plazo cuentan con un período de establecimiento de tres meses, dos y tres años, mientras las ZR de largo plazo se encuentran dentro de un rango de 2 a 32 años (Tabla 17).

El puntaje de la evaluación final del principio “Permitir tiempo de recuperación” se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 17.** Datos y valores de corte (percentiles) utilizados para la evaluación del principio biofísico “Permitir tiempo de recuperación”.

Zonas de recuperación de corto plazo		Zonas de recuperación de largo plazo		Zona de recuperación escala SAM-México	
Años de establecimiento	Criterio evaluación	Años de establecimiento	Criterio evaluación	Años de establecimiento	Criterio evaluación
0 años	Percentiles	2 años	Percentiles P	0 años	Percentiles
2 años	P <sub>.33</sub> = 1	5 años	.33 = 8	2 años	P <sub>.33</sub> = 5
3 años	P <sub>.66</sub> = 2	6 años	P <sub>.66</sub> = 19	3 años	P <sub>.66</sub> = 15
	0 pt:	9 años		5 años	0 pt:
	1 pt: <1	10 años		6 años	1 pt: <5
	2 pt: 1 - <2	18 años	0 pt:	9 años	1 pt: <5
	3 pt: ≥2	20 años	1 pt: <8	10 años	2 pt: 5 - <15
		22 años	2 pt: 8 - <19	18 años	3 pt: ≥15
		32 años	3 pt: ≥19	20 años	
				22 años	
				32 años	

**Tabla 18.** Evaluación del principio biofísico “Permitir tiempo de recuperación”.

Escala de evaluación	Puntaje
Corto plazo	2
Largo plazo	2
SAM-México	2

#### 2.3.4 DISPERSIÓN DEL RIESGO

Eventos de gran escala (huracanes, enfermedades, blanqueamiento de coral) pueden impactar a los hábitats principales. Ante la difícil predicción de áreas que sean más propensas a ser impactadas por este tipo de eventos, es recomendable proteger réplicas de los hábitats principales en ZR ampliamente separadas a fin de que se reduzca la posibilidad de que todas sean afectadas por la misma perturbación (Green *et al.*, 2007). Debido a que la dispersión larval promedio es de hasta 20 km, para minimizar la dispersión del riesgo se recomienda que el espaciamiento tome este valor como límite superior (Fernandes *et al.*, 2012). Así, si se perturba un ejemplo de un hábitat, otros pueden permanecer para proporcionar las larvas necesarias para reponer a los dañados. Con base en este valor óptimo (20 km) fue que se determinó el criterio de puntaje (Tabla 19).

En el SAM-México, los polígonos de ZR se encuentran protegiendo diversas cantidades de cada uno de los hábitats importantes. Sin embargo, debido a los inconvenientes con el manejo de las capas espaciales y límites naturales del hábitat de manglar mencionados en la sección 2.3.1, el análisis de este principio biofísico se limita a solo considerar a los arrecifes de coral y pastos marinos como hábitats importantes.

ZR con  $\geq 5\%$  de cada uno de los hábitats importantes (arrecifes de coral y pasto marino), en relación al área de la ZR, fueron las consideradas para este análisis. A continuación se detalla el porcentaje de ZR del SAM-México que cumplen con esta condición junto con su distancia de espaciamiento, resultados sometidos a un criterio de evaluación (Tabla 19) para obtener como último la evaluación final del principio (Tabla 20).

- a) **Arrecifes de coral:** 51 polígonos de ZR (el 70.8%) están protegiendo este hábitat, en una relación que va del 0.33% al 100% con respecto al área de la ZR. De estos 51 polígonos, sólo 46 (el 63.8%) están protegiendo una porción mayor al 5% de hábitat con respecto al área de la ZR. La distancia promedio entre los centroides de cada ZR, bajo esta característica de cobertura de protección, es de 16.3 km.
- b) **Pastos marinos:** 25 polígonos de ZR (el 34.7%) se encuentran protegiendo este hábitat, en una cantidad que va del 0.01% al 69.3% con respecto al área de la ZR. De estos 25 polígonos, 18 (el 25%) están protegiendo una porción mayor al 5% de hábitat con respecto al área de ZR. La distancia promedio entre los centroides de cada ZR es de 23.2 km.



**Tabla 19.** Criterio de puntaje para el principio “Dispersión del riesgo”

Criterio de evaluación	Puntaje
<20% de las ZR protegen de manera individual $\geq 5\%$ de cada uno de los hábitats importantes y/o el espaciamiento entre ZR bajo esta característica es $> 25$ km	0 puntos
20 - <40% de las ZR protegen de manera individual $\geq 5\%$ de cada uno de los hábitats importantes y/o el espaciamiento entre ZR bajo esta característica es $> 25$ km	1 punto
40 - <60% de las ZR protegen de manera individual $\geq 5\%$ de cada uno de los hábitats importantes, teniendo un espaciamiento entre ZR bajo esta característica de $> 25$ km	2 puntos
$\geq 60\%$ de las ZR protegen de manera individual $\geq 5\%$ de cada uno de los hábitats importantes, teniendo un espaciamiento entre ZR bajo esta característica $\leq 20$ km	3 puntos

**Tabla 20.** Evaluación del principio biofísico “Dispersión del riesgo”. Se muestra el puntaje parcial de dispersión de riesgo para cada uno de los hábitats analizados. La evaluación final comprende el promedio del puntaje obtenido de éstos hábitats.

Dispersión del riesgo (hábitat)	Puntaje
Arrecifes de coral	3
Pasto marino	1
Evaluación final	2

### 2.3.5 MINIMIZAR Y EVITAR AMENAZAS LOCALES TERRESTRES Y MARINAS

Desafortunadamente los hábitats marinos del Caribe están siendo afectados por numerosas amenazas locales siendo las más principales el crecimiento poblacional, el desarrollo costero, sedimentación, contaminación desde la costa, escorrentía de nutrientes y, en el caso específico de los arrecifes de coral, la sobrepesca, daños por embarcaciones y enfermedades de coral (Burke *et al.*, 2011). Ante esta problemática, es importante minimizar o evitar estas amenazas en las ZR, y dar prioridad de protección a las zonas más propensas a contribuir a la salud del ecosistema, la productividad de las pesquerías y la resiliencia ante el cambio climático (Green *et al.* 2014a).

La caracterización y evaluación de este principio en las ZR del SAM-México se basó tomando en cuenta el desarrollo costero, la contaminación basada en cuencas, el daño y contaminación marina y, la sobrepesca; todos ellos integrados en el índice de amenaza local para el tiempo presente, analizado por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, 2011). Así mismo, se consideró el número de puntos de descarga de aguas residuales (validados por la CONAGUA) con influencia directa y dentro de un área de 500 metros cercanos a las ZR.

A partir de los datos analizados, se obtuvo que las zonas de Sian Ka'an, Xcalak y Banco Chinchorro son las que cuentan con el menor número de amenazas locales. Por otro lado, las ZR ubicadas en la zona de Cancún, Puerto Morelos e I. Cozumel (en la parte sur) son las mayormente amenazadas.

A continuación se muestran los criterios de evaluación (Tabla 21) con base en los cuales se designó la evaluación final de este principio biofísico (Tabla 22).

**Tabla 21.** Criterios de puntuación para el principio biofísico “Minimizar y evitar amenazas locales terrestres y marinas”.

Criterio de evaluación	Puntaje
La ZR está ubicada en un área con una alta exposición a amenazas locales terrestres y marinas.	0 puntos
La ZR está ubicada en un área con una mediana exposición a amenazas locales terrestres y marinas.	1 punto
La ZR está ubicada en un área con una baja exposición a amenazas locales terrestres y marinas.	2 puntos
La ZR está ubicada en un área con una mínima o ninguna exposición a amenazas locales terrestres y marinas.	3 puntos

**Tabla 22.** Evaluación del principio biofísico “Minimizar y evitar amenazas locales terrestres y marinas”.

Escala de evaluación	Puntaje
Corto plazo	2
Largo plazo	2
SAM-México	2

**Comentarios:**

Debido a que la sedimentación es considerada una de las amenazas principales hacia los ecosistemas marinos, es preciso tener en cuenta la existencia de puntos de vertimientos al mar que están bajo la regulación de la Secretaría de Marina (SEMAR), mediante la Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas que, aunque se tiene un control y prevención de la contaminación por vertimiento de desechos y otras materiales, es necesaria una evaluación sobre su posible efecto en los ecosistemas marinos.

Las áreas donde hay puntos de vertimientos con permiso de la SEMAR son en Cancún (en su mayoría), Puerto Morelos y Playa del Carmen (SEMAR, 2018).

## 2.3.6 INCORPORACIÓN DE LA CONECTIVIDAD

### I. TAMAÑO: MOVIMIENTO DE PECES

Debido a que las especies de arrecife de coral y pelágicas tienen un ciclo de vida bipartito, su distancia de desplazamiento durante cada fase de su ciclo de vida es muy variable. Por ejemplo, las larvas de la mayoría de las especies tienden a moverse decenas o cientos de kilómetros mientras que los juveniles y adultos tienden a ser más sedentarios, excepto ante los grandes cambios ontogénicos de hábitat o migraciones de desove, llegando a moverse distancias de cientos a miles de kilómetros (Shanks, 2009).

Para determinar el nivel de protección que las ZR brindan hacia las especies focales con base en el patrón de su movimiento, se utilizó como referencia las distancias del ámbito hogareño diario recopiladas por Green *et al.* (2015, 2017), quienes proporcionan una revisión bibliográfica que incluye el ámbito hogareño en distancia lineal reportadas para el SAM (km, equivalente al radio de un círculo) de algunas especies de peces, del caracol rosado (*Lobatus gigas*) y de la langosta espinosa (*Panulirus argus*) (Tabla 23).

A partir de las distancias reportadas para las especies focales del SAM se tiene que la mayoría de las especies juveniles de peces de las familias scaridae, lutjanidae y serranidae (herbívoros, pargos y meros, respectivamente) presentan un ámbito hogareño menor a 1 km, equivalente a un área de movimiento en todas las direcciones (área circular) de 3.14 km<sup>2</sup>. Extrapolando esta área a dos veces el doble del ámbito hogareño de dichas especies focales, se tiene que el área mínima recomendada de la ZR debería de ser aproximadamente 12.6 km<sup>2</sup>. Este valor fue el utilizado como base para los valores de corte del criterio de evaluación (Tabla 24).

**Tabla 23.** Ámbito hogareño de las especies focales y tamaño mínimo recomendado de las zonas de recuperación para el SAM-México. Datos basados en Green *et al.* (2014b, 2017).

Familia	Ámbito hogareño reportado (km)	Área circular del ámbito hogareño reportado (km <sup>2</sup> )	Tamaño mínimo recomendado de ZR (km <sup>2</sup> )
Mayoría Scaridae (6 spp.)	< 0.5	< 0.8	3.1
Scaridae (2 spp.)	< 1	< 3.14	12.6
Lutjanidae	< 1	< 3.14	12.6
Serranidae	< 1	< 3.14	12.6
Otros (pelágicos)	> 1	> 3.14	> 12.6
Caracol rosado	< 0.25	< .20	0.8
Langosta espinosa	> 1	> 3.14	> 12.6

**Tabla 24.** Criterios de puntuación para el principio biofísico “tamaño de las zonas de recuperación con base al movimiento de las especies focales de peces”

Criterio de evaluación	Puntaje
La ZR no cuenta con el tamaño que le permita proteger el patrón de desplazamiento reportado para las especies focales, es decir, el área de la ZR es <3.14 km <sup>2</sup>	0 puntos
La ZR protege el patrón de desplazamiento reportado para las especies focales pero no es mayor al doble de su patrón, es decir, el área de la ZR tiene 3.14 - <12.6 km <sup>2</sup>	1 punto
La ZR cuenta hasta con 0.5 km <sup>2</sup> más de área que el doble de tamaño del patrón de desplazamiento reportado para las especies focales, es decir, el área de la ZR tiene 12.6 - <13 km <sup>2</sup>	2 puntos
La ZR cuenta con más del doble de tamaño del patrón de desplazamiento reportado para las especies focales, es decir, el área de la ZR es ≥ 13 km <sup>2</sup>	3 puntos

La mayoría de las ZR (57%) no cuenta con el tamaño que le permita proteger el patrón de desplazamiento reportado para las especies focales. El 19% de las ZR sí protege el patrón de desplazamiento de la mayoría de las especies focales, sin embargo, no es lo suficiente grande como para ser mayor al doble del desplazamiento. Sólo el 24% de las ZR cumplen con un área adecuada, es decir, mayores a 12.6 km<sup>2</sup>.

A pesar de que el 57% de las ZR cuenta con un tamaño insuficiente, al aplicar la evaluación final (promedio de los puntajes asignados a todas las ZR), el resultado final es un puntaje de 1 para el conjunto de ZR en el SAM-México (Tabla 25).

**Tabla 25.** Evaluación del principio biofísico “Tamaño de las zonas de recuperación con base al movimiento de las especies focales de peces”

Escala de evaluación	Puntaje
Corto plazo	2
Largo plazo	1
SAM-México	1

## II. FORMA: COMPACTACIÓN

Las formas compactas, a diferencia de otras formas (*e. g.* alargadas) minimizan el efecto de borde ayudando así a mantener la integridad de las ZR (Green *et al.*, 2014b). Una medida para representar la compactación de la forma está basada en la relación entre el perímetro y el área de ésta, es decir, el Índice de compactación (IC; Ec. 1). Sin embargo, un inconveniente con esta relación es que varía con el tamaño (MacEachren, 1985). El valor resultante de este índice va de un rango de 0 a 1, donde los valores más cercanos a 1 indican una ZR con una forma más compacta (ver criterio de evaluación, Tabla 26).

$$\text{Índice de Compactación (IC)} = \frac{\text{área de zona de recuperación}}{\text{perímetro de zona de recuperación}} \quad \text{Ec. 1}$$

**Tabla 26.** Criterios de puntuación para el principio biofísico “Compactación” de las zonas de recuperación

Criterio	Puntaje
La ZR o la red de las ZR tiene un valor del IC de $0 - <0.25$	0 puntos
La ZR o la red de las ZR tiene un valor del IC de $\geq .25 - <.50$	1 punto
La ZR o la red de las ZR tiene un valor del IC de $\geq .50 - <.75$	2 puntos
La ZR o la red de las ZR tiene un valor del IC de $\geq .75 - \leq 1.0$	3 puntos

Poco más de la mitad de las ZR (54%) tiene un grado de compactación insuficiente ( $0 < 0.25$ ), mientras que el 15% de ZR tiene un IC por encima de 0.75. A pesar de que el 54% de las ZR cuenta con un IC insuficiente, al aplicar la evaluación final (promedio de los puntajes asignados a todas las ZR), el resultado final es un puntaje de 1 para el conjunto de ZR en el SAM-México (Tabla 27).

**Tabla 27.** Evaluación final del principio biofísico “Compactación” de las zonas de recuperación

Escala de evaluación	Puntaje
Corto plazo	2
Largo plazo	1
SAM-México	1

#### IV. ESPACIAMIENTO ENTRE ZR

Para evaluar de una manera más precisa la conectividad de las poblaciones entre ZR, se necesita de la aplicación de un modelo espacial para la estimación de los movimientos de las larvas y de los adultos de las especies focales reportadas en el SAM-México. Debido a la ausencia de estos datos, la evaluación de este principio fue a partir de la distribución de las frecuencias de las distancias entre las ZR que conforman la red en el SAM-México.

Teniendo en cuenta que la conexión larval entre ZR es considerada de gran importancia a escalas menores de 15 km, éste fue el valor umbral para asignar los criterios de puntuación (Tabla 28). La tabla 28 y figura 5 muestran los resultados de las frecuencias de las distancias entre ZR adyacentes utilizadas para la elaboración de la evaluación final (Tabla 29).

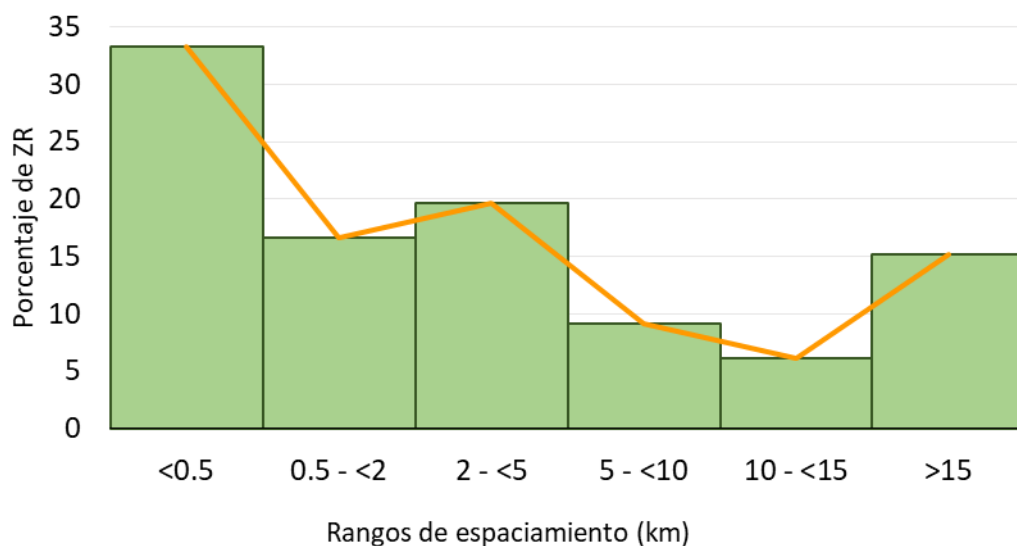
**Tabla 28.** Criterios de puntuación para el principio biofísico “Espaciamento entre zonas de recuperación”

Criterio	Puntaje
La frecuencia de distribución del espaciamento entre las ZR con $<15$ km abarca $< 10\%$ de toda la red de ZR	0 puntos
La frecuencia de distribución del espaciamento entre las ZR con $<15$ km abarca del $10 - <40\%$ de toda la red de ZR	1 punto
La frecuencia de distribución del espaciamento entre las ZR con $<15$ km abarca del $40 - <70\%$ de toda la red de ZR	2 puntos
La frecuencia de distribución del espaciamento entre las ZR con $<15$ km abarca del $70 - 100\%$ de toda la red de ZR	3 puntos

**Tabla 29.** Datos utilizados para la evaluación del principio biofísico “Espaciamiento entre zonas de recuperación”

Intervalos (Distancia en km)	Frecuencia absoluta	Frecuencia absoluta (%)	Frecuencia acumulada (%)
<0.5	22	33	33
0.5 - <2	11	17	50
2 - <5	13	20	70
5 - <10	6	9	79
10 - <15	4	6	85
>15	10	15	100

El rango de distancia del espaciamiento entre las ZR adyacentes es de 0.01 a 53.96 km, dominando ZR con una distancia de espaciamiento menor a 0.5 km<sup>7</sup> (Figura 6). La evaluación final basada en criterios de puntuación es mostrada en la Tabla 30.



**Figura 6.** Histograma de frecuencias de espaciamiento entre las Zonas de Recuperación y su vecina más próxima a lo largo de la red del SAM-México.

**Tabla 30.** Evaluación final del principio biofísico “Espaciamiento entre zonas de recuperación”

Escala de evaluación	Puntaje
Largo plazo	3
SAM-México	3

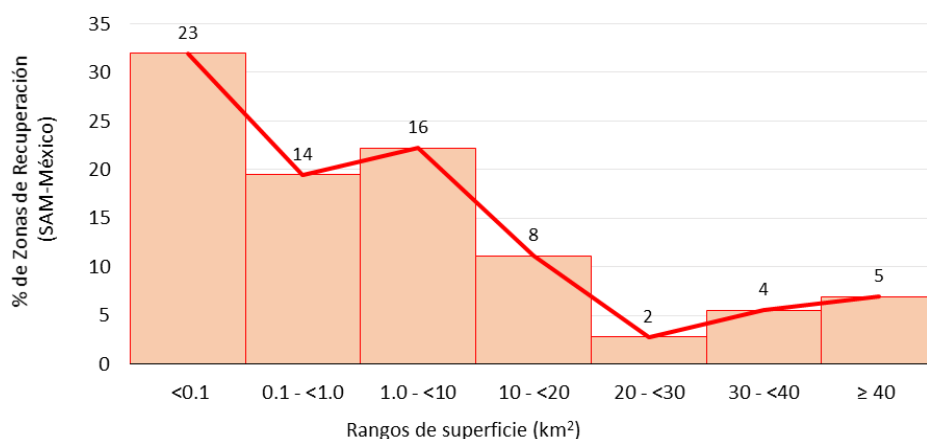
<sup>7</sup> Para ver el listado de distancias de espaciamiento entre las ZR, dirigirse al documento Excel “Tabla de cercanía\_ZR”.

## V. TAMAÑO: SUPERFICIE

Este apartado referente al tamaño (superficie en km<sup>2</sup>) de las ZR es mostrado como información complementaria del principio biofísico “Incorporación de la conectividad”. Por lo tanto, al ser información meramente descriptiva, no es considerado algún tipo de evaluación.

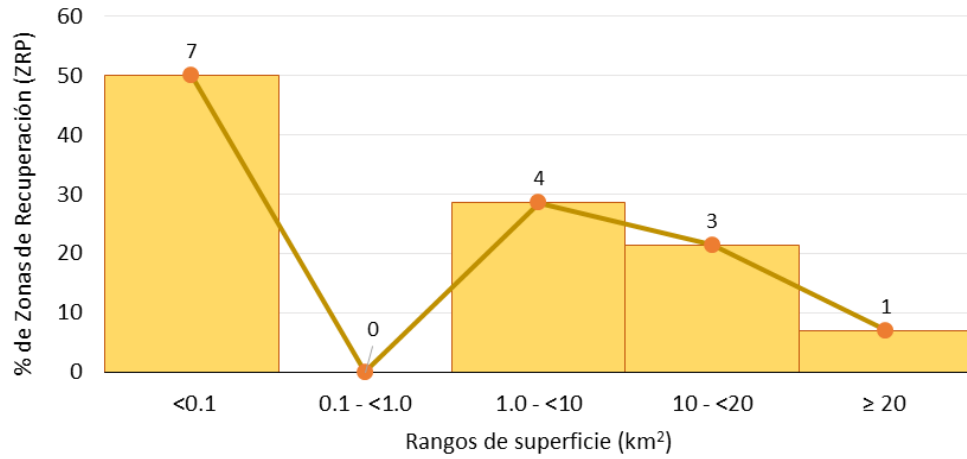
El tamaño de las ZR debería ser determinado por los objetivos específicos de su manejo y, de las especies y hábitats objetivos para proteger. Aunque no hay un límite ecológico superior o inferior para su tamaño, consideraciones como el costo o conflictos por los usuarios generalmente son los que imponen estos límites (Roberts *et al.*, 2003). ZR de gran tamaño son eficientes para los fines de conservación o de protección a la biodiversidad ya que protege un conjunto de tipos de hábitats marinos y procesos ecológicos que tienen lugar dentro de sus límites. En cambio, ZR pequeñas (< 1 km<sup>2</sup>) pueden ser suficientes para proteger hábitats críticos como, por ejemplo, áreas de agregaciones de desove de peces o sitios de anidación de tortugas (McLeod *et al.*, 2009).

En el SAM-México, la distribución de frecuencias del tamaño de las ZR muestra que aproximadamente el 50% tiene una superficie menor a 1 km<sup>2</sup> mientras que el 15% tiene una superficie mayor a 20 km<sup>2</sup> (Figura 7). Particularmente, para el caso de la distribución de tamaños de las ZR establecidas como Zonas de Refugio Pesquero (ZRP), se tiene que la mitad de ellas tiene una superficie menor a 0.1 km<sup>2</sup> (Figura 8). La ZR de largo plazo llamada Cuarenta Cañones, establecida como ZRP, es la ZR que cuenta con la mayor superficie (123.98 km<sup>2</sup>) y está ubicada en el Banco Chinchorro.



**Figura 7.** Histograma de frecuencias de la superficie (km<sup>2</sup>) de todas las Zonas de Recuperación en el SAM-México. El número ubicado encima de cada barra indica el número de ZR dentro de cada rango de superficie.





**Figura 8.** Histograma de frecuencias de la superficie (km<sup>2</sup>) de las Zonas de Recuperación establecidas por Acuerdo como Zonas de Refugio Pesquero en el SAM-México. El número ubicado encima de cada barra indica la cantidad de polígonos de ZR.

### 2.3.7 ADAPTACIÓN A LOS CAMBIOS EN EL CLIMA Y LA QUÍMICA DEL OCEANO

En vías de mantener la biodiversidad frente al cambio climático, deben de ser priorizadas para proteger dentro de ZR: a) áreas donde los hábitats y especies han resistido a cambios extremos del medio ambiente en el pasado, b) áreas con una TSM y química del océano históricamente variables y, c) hábitats costeros con una mayor probabilidad de sobrevivir al aumento del nivel del mar.

#### I. Eventos de blanqueamiento de coral

Aunque muchos factores ambientales pueden conducir a eventos de blanqueamiento de coral, el factor más común que causa este evento han sido los períodos de temperaturas superficiales del mar elevados. Como respuesta, los corales pueden presentar diferentes expresiones fisiológicas como blanquearse y morir, blanquearse y recuperarse, o permanecer levemente blanqueados (Levas *et al.*, 2018). Ante esto, aún no se conoce a qué velocidad los corales del Caribe pueden recuperarse por un evento de este tipo.

La variación espacial en la extensión y severidad del blanqueamiento del coral puede predecirse al determinar si los umbrales de estrés térmico han sido excedidos (van Hooijdonk & Huber, 2009). La NOAA monitorea la TSM y da advertencias de blanqueamiento basadas en semanas de calentamiento por grados (DHW, Degree Heating Weeks en inglés), que es la acumulación de anomalías de temperatura que excede la TSM máxima mensual para una región determinada. Los valores de los umbrales de estrés térmico hacen referencia que  $DHW > 4.0^{\circ}\text{C}$  inducen el blanqueamiento, y que  $DHW > 8.0^{\circ}\text{C}$  producen blanqueamiento generalizado, a veces llegando a mortalidad (Hooijdonk & Huber, 2009).

Hasta el momento, estos monitoreos satelitales han sido aplicados a grandes escalas, por lo que resulta necesario el desarrollo de proyecciones de variaciones en la TSM a una escala local más precisa y de ser posible, bajo diferentes escenarios climáticos que puedan ser aplicados al SAM-México (Hooijdonk *et al.*, 2017), para de esta manera, en conjunto con datos de monitoreos, conocer las posibles áreas donde los hábitats y las especies han resistido a cambios ambientales (o extremos) en el pasado.

#### II. Química de carbonato en el océano

Los océanos funcionan como sumideros naturales para concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  el cual, al ser absorbido por el agua de mar reacciona causando una reducción en el pH (o acidificación) y además una disminución en el estado de saturación de carbonato ( $\Omega$ ), el cual juega un papel importante en la calcificación de muchos organismos marinos.

Los patrones de variabilidad en la química del océano también han sido descritos a grandes escalas. Modelado de parámetros ambientales para estimar la alcalinidad superficial del mar ( $A_T$ ) y la presión parcial del  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_{2,sw}$ ) son de utilidad para que junto con teledetección satelital puedan ser caracterizados los cambios de  $\Omega$  superficial del mar, evento que ha ocurrido en la última década a lo largo de la región del Caribe como consecuencia de la acidificación de los océanos. Los niveles de  $\Omega$  en el Caribe son variables espacial y temporalmente, sin embargo, de manera general se ha reportado un fuerte decremento en el estado de saturación de aragonita ( $\Omega_{arg}$ ) a una tasa aproximada de  $-0.012 \pm 0.001 \Omega_{arg}$  por año (Gledhill *et al.*, 2008).

Al no existir modelos en la región del SAM que proporcionen predicciones más certeras a una escala más fina, resulta ser necesario su desarrollo para la estimación de cambios en la variabilidad espacial y temporal en  $\Omega_{\text{arg}}$  superficial del mar y de ser posible, bajo diferentes escenarios climáticos.

### **III. Hábitats costeros con mayor probabilidad de sobrevivir al aumento de nivel del mar.**

Manglares, marismas y playas de anidación de tortugas pueden expandirse a medida que aumenta el nivel del mar, por lo que se ha sugerido priorizar su protección dentro de ZR. Modelos actuales que predican aumentos en el nivel del mar a grandes escalas, indican que durante el período 1901-2010 el nivel medio global del mar se elevó 0.19 (0.17 a 0.21) m, probablemente con una tasa media de elevación global del nivel del mar de 1.7 (1.5 a 1.9) mm/año entre 1901 y 2010 y, de 3.2 (2.8 a 3.6) mm/año entre 1993 y 2010; éste último período con la tasa más alta (IPCC, 2014).

Una evaluación reciente que estimó los daños en la costa de Quintana Roo debido a aumentos en el nivel del mar, tormentas y hundimientos, reporta que con un nivel mínimo de hundimiento (+1 m), el 4% del área total del estado sufriría de una inundación incluyendo: centros de población, manglares y playas. Por el contrario, niveles medio y máximo de hundimiento (+3 y +5 m, respectivamente) implicarían el 8.9 y 11.4 % de la costa bajo un riesgo directo de inundación, incluyendo las ciudades de Cancún, Chetumal y Cozumel, además de la mayoría de los manglares ubicados en la RB de Sian Ka'an (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2015).

La baja elevación y larga costa del estado, hacen de él que sea altamente vulnerable física y económicamente a la subida acelerada del nivel del mar, lo cual es de particular importancia en lugares como la zona costera de Quintana Roo, donde la actividad ciclónica tropical es la principal amenaza (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2015).

Las diferencias en el uso del suelo (desarrollo de infraestructura), la elevación y pendiente costera (topografía) también podrían ayudar a contribuir en la elaboración de mapas de hábitats costeros sensibles al incremento del nivel del mar (Green *et al.*, 2014a).

### 3. REFERENCIAS

- Ardisson P.-L., M. A. May-Kú, M. T. Herrera-Dorantes y A. Arellano-Guillermo. 2011. El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiológica* 21(3): 261-280. Burke, L., Reytar, K., Spalding, M. Perry, A. Reefs at risk revisited. Washington, D.C.: World Resources Institute; 2011. p. 114.
- Ballantine, B. 1997. Design principles for systems of “No-take” Marine Reserves. Workshop on: The Design and Monitoring of Marine Reserves, Fisheries Center, University of British Columbia, Vancouver.
- Cesar, H., Burke L. and Pet-Soede, L. 2003. The economics of worldwide coral reef degradation. *Beatherlands: Cesar Environmental Economics Consulting*.
- CONABIO. (29/02/2016). Distribución de los manglares en México en 2015, escala: 1:50000. Edición: 1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM). Ciudad de México, México.
- CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA. 2007. Sitios marinos prioritarios para la conservación de la biodiversidad. Escala 1: 1000 000 Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy - Programa México, Pronatura. México.
- Fernandes, L., Green, A., Tanzer, J., White, A., Alino, P.M., Jompa, J., Lokani, P., Soemodinoto, A., Knight, M., Pomeroy, B., Possingham, H., Pressey, B. 2012. Biophysical principles for designing resilient networks of marine protected areas to integrate fisheries, biodiversity and climate change objectives in the Coral Triangle. Report prepared by The Nature Conservancy for the Coral Triangle Support Partnership, 152 pp.
- Fogarty, M.J. and Botsford, L.W. 2007. Population connectivity and spatial management of marine fisheries. *Oceanography* 20: 112-123
- Fulton, S., Caamal, J., Marcos, S., y Nalesso, E. 2016. Reporte técnico de los resultados de validación y monitoreo de los sitios de agregación reproductiva de pargos y meros en el centro y sur de Quintana Roo. *Comunidad y Biodiversidad A.C.*, Guaymas, Sonora, México.
- Gaines, S. D., C.White, M. H. Carr, and S. R. Palumbi. 2010. Designing marine reserve networks for both conservation and fisheries management. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107:18286-18293.
- Gallegos-Martínez, M., Hernández-Cárdenas, G., Pérez-Espinosa I., Andreas-Ressl, R. (01/08/2017). *Comunidad de Pastos marinos del Caribe Mexicano, 2017*, edición: 1. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad y Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México, México.
- Gledhill, D. K., R. Wanninkhof, F. J. Millero, and M. Eakin. 2008. Ocean acidification of the Greater Caribbean Region 1996-2006, *J. Geophys. Res.*, 113, C10031, doi:10.1029/2007JC004629.
- Green, A., Chollett, I., Suárez, A., Dahlgren, C., Cruz, S., Zepeda, C., Andino, J., Robinson, J., McField, M., Fulton, S., Giro, A., Reyes, H. y Bezaury, J. 2017. Principios biofísicos para el diseño de una red de zonas de recuperación en el Sistema Arrecifal Mesoamericano. Informe técnico producido por The Nature Conservancy, Comunidad y Biodiversidad, A.C., Smithsonian Institution, Perry Institute for Marine Science, Centro de Estudios Marinos, Iniciativa Arrecifes Saludables y la Universidad Autónoma de Baja California Sur, 64 pp.
- Green, A.L., Fernandes, L., Almany, G., Abesamis, R., McLeod, E., Aliño, P.M., White, A.T., Salm, R., Tanzer, J., Pressey, R.L. 2014a. Designing marine reserves for fisheries

- management, biodiversity conservation and climate change adaptation. *Coastal Management* 42: 143-159.
- Green, A.L., Maypa, A.P., Almany, G.R., Rhodes, K.L., Weeks, R., Abesamis, R.A., Gleason, M.G., Mumby, P.J., White, A.T. 2014b. Larval dispersal and movement patterns of coral reef fishes, and implications for marine reserve network design. *Biological Reviews* 90: 1215-1247.
- Green, A., Lokani, P., Sheppard, S., et al. 2007. Scientific design of a resilient network of marine protected areas. Kimbe Bay, Papua New Guinea: The Nature Conservancy. Pacific Island Countries Rep No 2/07.
- Healthy Reefs Initiative. 2008. Eco-health Report Card for the Mesoamerican Reef: An Evaluation of Ecosystem Health. [www.healthyreefs.org](http://www.healthyreefs.org)
- van Hooijdonk, R., Huber, M. 2009. Quantifying the quality of coral bleaching predictions. *Coral Reefs*, 28, 579-587.
- van Hooijdonk, R., Maynard, J.A., Liu, Y., Lee, S-K. 2015. Downscaled projections of Caribbean coral bleaching that can inform conservation planning. *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/gcb.12901.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, RK Pachauri and LA Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Suiza. 151 pp.
- Levas, S., Schoepf, V., Warner, M. E., Aschaffenburg, M., Baumann, J., & Grottoli, A. G. 2018. Long-term recovery of Caribbean corals from bleaching. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 506, 124-134. DOI: 10.1016/j.jembe.2018.06.003
- Lugo, E. A. and Snedaker, C. S. 1974. The ecology of mangroves. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 5: 39-64.
- MacEachren, A. M. 1985. Compactness of Geographic Shape: Comparison and Evaluation of Measures. *Geografiku Annaler* 67B, 53-67.
- MacNeil, M., Graham, N.A., Cinner, J.E., Wilson, S.K., Williams, I.D., Maina, J. et al. 2015. Recovery potential of the world's coral reef fishes. *Nature*, 520, 341.
- McLeod, E. Salm, R., Green, A., and Almany, J. 2009. Designing marine protected area networks to address the impacts of climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7 (7), pp. 362-370.
- Pandolfi, J. M., S. Connolly, D. Marshall, and A. Cohen. 2011. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *Science* 333:418-422.
- Pedrozo-Acuña, A., Damania, R., Laverde-Barajas, M. A. and Mira-Salama, D. 2015. Assessing the consequences of sea-level rise in the coastal zone of Quintana Roo, México: the costs of inaction. *Journal of Coastal Conservation* 19:2, 227-240.
- Roberts, C.M., Branch, G., Bustamante, R.H., et al. 2003. Application of ecological criteria in selecting marine reserves and developing reserve networks. *Ecol Appl* 13: S215-28.
- Russ, G., and A. Alcala. 2010. Decadal-scale rebuilding of predator biomass in Philippine marine reserves. *Oecología* 163:1103-1106.
- Secretaría de Marina (SEMAR). 2018. Vertimiento de Desechos. Archivo .kmz disponible en línea. [www.digaohm.semar.gob.mx/promam/vertimientos.html](http://www.digaohm.semar.gob.mx/promam/vertimientos.html)
- Shanks, A. L. 2009. Pelagic Larval Duration and Dispersal Distance Revisited. *Biological Bulletin* 216:373-385.
- Stockwell, B., C. R. L. Jadloc, R. A. Abesamis, A. C. Alcala, and G. R. Russ. 2009. Trophic and benthic responses to no-take marine reserve protection in the Philippines. *Marine Ecology Progress Series* 389:1-15.
- UNEP-WCMC, WorldFish Centre, WRI, TNC. 2010. Global distribution of warm-water coral reefs, compiled from multiple sources including the Millennium Coral Reef Mapping

Project. Version 3.0. Includes contributions from IMaRS-USF and IRD (2005), IMaRS-USF (2005) and Spalding et al. (2001). Cambridge (UK): UN Environment World Conservation Monitoring Centre. URL: <http://data.unep-wcmc.org/datasets/1>

World Resources Institute (WRI), Reefs at Risk Revisited. 2011. ([www.datasets.wri.org/dataset/reefs-at-risk-revisited-local-threats-data](http://www.datasets.wri.org/dataset/reefs-at-risk-revisited-local-threats-data)).

Zupan, M., Bulleri, F., Evans, J., Fraschetti, S., Guidetti, P., Garcia-Rubies, A., Sostres, M., Asnaghi, V., Caro, A., Deudero S, Goñi R, Guarnieri G, Guilhaumon F, Kerstin D, Kokkali A, Kruschel C, Macic V, Mangia, Iajo L., Mallol, S., Macpherson, E., Panucci, A., Radolovic, M., Ramdani, M., Schembri, P.J., Terlizzi, A., Villa, E., Claudet, J. 2018. How good is your marine protected area at curbing threats? Operationalizing a local threat assessment framework. *Biological Conservation* 221: 237-245.