



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**INDICADORES PARA MONITOREAR LA
INTEGRIDAD ECOLÓGICA DE LOS ARRECIFES DE
CORAL: EL CASO DEL CARIBE MEXICANO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

P R E S E N T A:

**CARRILLO-GARCÍA DIANA
MARGARITA**

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MELANIE KOLB**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Carrillo

García

Diana Margarita

56 60 92 62

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra

310008600

2. Datos del tutor

Dra.

Kolb

Melanie

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Equihua

Zamora

Miguel Eduardo

4. Datos del sinodal 2

Dr.

López

Pérez

Ramón Andrés

5. Datos del sinodal 3

M. en C.

Lemus

Santana

Elia

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Ruiz

Angulo

Angel

7. Datos del trabajo escrito

Indicadores para monitorear la integridad ecológica de los arrecifes de coral: el caso del Caribe mexicano

114 p.

2018

Índice

Resumen

Agradecimientos

Índice de tablas

Índice de figuras

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivos	5
2. Área de estudio	6
3 El monitoreo de los arrecifes de coral	8
3.1 Marco teórico: monitoreo, parámetros e indicadores	8
3.2 Métodos: revisión bibliográfica de programas de monitoreo existentes	9
3.3 Resultados: parámetros utilizados en el monitoreo de los arrecifes de coral ..	19
4 Marco conceptual de integridad ecológica de arrecifes de coral	40
4.1 Marco teórico: el concepto de integridad ecológica	40
4.2 Métodos: Desarrollo del marco conceptual y clasificación de parámetros	41

4.3 Resultados: parámetros y su uso como indicadores en el marco de integridad ecológica	43
4.3.1 Parámetros de composición	43
4.3.2 Parámetros de estructura	44
4.3.3 Parámetros de función	44
5 Evaluación y selección de parámetros como indicadores de integridad ecológica	48
5.1 Marco teórico: características deseables de un indicador	48
5.2 Métodos: evaluación de la relevancia ecológica de los parámetros	48
5.3 Resultados: marco de indicadores de integridad ecológica de arrecifes de coral	60
5.3.1 Indicadores de composición	60
5.3.2 Indicadores de estructura	61
5.3.3 Indicadores de función	61
6 Evaluación de la integridad ecológica de los arrecifes del Caribe mexicano	64
6.1 Marco teórico: aplicación de los indicadores en la evaluación ecológica	64
6.2 Métodos: diseño de la base de datos, análisis estadístico y espacial.....	64
6.2.1 Proyecto de monitoreo del caso de estudio	64

6.2.2 Diseño de la base de datos y cálculo de indicadores	65
6.2.3 Análisis estadístico	66
6.2.4 Análisis espacial	66
6.3 Resultado: integridad ecológica de los arrecifes del caso de estudio	65
6.3.1 Indicadores de composición	67
6.3.2 Indicadores de estructura	68
6.3.3 Indicadores de función	73
7. Discusión	75
8. Referencias	80
9. Anexos	91
Anexo I Número de programas en los que aparece cada parámetro y número de parámetros por programa	91
Anexo II Clasificación de los parámetros utilizados en el monitoreo de los arrecifes de coral considerando elementos de integridad ecológica, atributos y procesos	96
Anexo III Especies y grupos morfo-funcionales de los de corales escleractíneos identificados en el área de estudio	97
Anexo IV Mapas de cobertura de octocorales, de algas rojas incrustantes y de algas filamentosas	99
Anexo V Glosario	102

Índice de tablas

Tabla 1 Descripción de los programas de monitoreo revisados	11
Tabla 2 Protocolo para recabar los parámetros por programa de monitoreo	14
Tabla 3 Parámetros por programa de monitoreo con especificaciones y detalle de los métodos	22
Tabla 4 Atributos y procesos que dan lugar a la integridad ecológica de los arrecifes de coral	46
Tabla 5 Relevancia ecológica de los parámetros y su prioridad de uso como indicadores	50
Tabla 6 Indicadores de integridad ecológica de arrecifes de coral	63
Tabla 7 Valores de referencia de cobertura de coral y cobertura de macroalgas	67
Tabla 8 Valores promedio del número de Hill de orden 1	67
Tabla 9 Eigen-valores de los factores	69
Tabla 10 Coordenadas de los factores	69
Tabla 11 Valores promedio de cobertura, de corales, algas por grupo funcional y octocorales por clase de relieve	73
Tabla 12 Valores promedio de la diversidad funcional de corales	75

Índice de figuras

Figura 1 Área de estudio	7
Figura 2 Ubicación de los programas de monitoreo revisados, escala global y regional	13
Figura 3 Ubicación de los programas de monitoreo revisados, escala regional (Caribe), subregional (Sistema Arrecifal Mesoamericano) y local (Caribe mexicano)	13
Figura 4 Número de parámetros identificados por programa de monitoreo	19
Figura 5 Número de parámetros identificados por componente del ecosistema ...	21
Figura 6 Niveles de organización biológica en los que se manifiestan los atributos y procesos del ecosistema	42
Figura 7 Marco conceptual de integridad ecológica de arrecifes de coral	44
Figura 8 Número de parámetros clasificados por elemento de integridad ecológica	45
Figura 9 Indicadores seleccionados de integridad ecológica de arrecifes de coral basado en su relevancia en el marco de integridad ecológica	62
Figura 10 Número de Hill de orden 1 de corales escleractíneos en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo.....	68
Figura 11 Proyección de las variables de cobertura en el plano de los factores 1 y 2	70
Figura 12 Cobertura de corales escleractíneos en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo	71

Figura 13 Cobertura de macroalgas en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo	72
Figura 14 Diversidad funcional de corales (número de grupos morfofuncionales) en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo	74

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a la Dra. Melanie Kolb por lo mucho que aprendí al realizar este trabajo bajo su dirección, por motivarme a ir más allá de lo que creía como mis límites, y por ser un ejemplo para mí como investigadora. Al Dr. Miguel Eduardo Equihua Zamora, al Dr. Andrés López Pérez, al Dr. Angel Ruiz Angulo, y a la M. en C. Elia Lemus Santana les agradezco sus valiosos comentarios que desde sus diferentes experiencias en la investigación enriquecieron este trabajo.

Así mismo, quiero agradecer al Instituto de Geografía, en especial al programa de Becas María Teresa Gutiérrez de MacGregor por el apoyo otorgado a este proyecto. Agradezco también a la Subcoordinación de Monitoreo Marino de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, en especial al Dr. Sergio Cerdeira Estrada y al M. en C. Mauricio Israel Martínez Clorio, por el apoyo y los permisos otorgados para trabajar con la base de datos.

A la M. en C. Diana Raquel Hernández Robles, le agradezco la enorme ayuda que con paciencia me brindó para diseñar la base de datos. Al Dr. Leopoldo Galicia le agradezco el haberme brindado un espacio en su equipo de trabajo y sus palabras de aliento. Agradezco al Dr. Lorenzo Álvarez Filip por las dudas que respondió en los correos sin siquiera conocerme. Al M. en C. Edgardo Manuel López Valerio por su gran ayuda en la parte estadística. Al M. en C. Ricardo Cruz Cano le agradezco sus valiosos comentarios que me ayudaron en la culminación de esta tesis.

Agradezco al programa DGPA-PAPIME, a través del proyecto PE103409 “Taller de Ciencia para Jóvenes, motivando a las futuras generaciones de investigadores” del Centro de Geociencias, Campus UNAM-Juquilla por haber incentivado mi interés en la ciencia. A la Sociedad Mexicana de Arrecifes Coralinos le agradezco la oportunidad de presentar mi trabajo en el Congreso Mexicano de Arrecifes Coralinos y haberme otorgado una beca.

Agradecimientos personales

Doy las gracias a mi familia, quienes han sido un pilar clave en mi formación académica. Las tardes que mi mamá paso haciendo las tareas conmigo y el apoyo de mi papá para siempre brindarme lo necesario en mis estudios tienen frutos en la culminación de esta tesis. Gracias a mi hermano por ser un compañero de juegos y tonterías y apoyar a mi familia cuando yo no pude. Gracias a mis tíos Victor, Margarita, Alberto y Suana por lo que he aprendido de ellos.

Y finalmente agradezco a mis amigos: Fer, Carol, Ami, Jess, Diana, y Rodrigo, por el tiempo que he compartido con ellos, por sus palabras de motivación que me impulsaron a siempre seguir adelante. A Lalo le agradezco su amabilidad conmigo durante la clase y el congreso.

Resumen

Los arrecifes del Caribe mexicano contribuyen de manera importante a la biodiversidad nacional y mundial, además proveen diversos servicios ecosistémicos a la sociedad. Sin embargo, estos ecosistemas se encuentran en un estado de deterioro crítico y el monitoreo resulta una tarea prioritaria para su conservación. El monitoreo de arrecifes requiere de una cantidad considerable de recursos y es necesario que esta tarea se lleve a cabo de tal forma que se minimicen los costos, al tiempo que se cumplan con los objetivos de manera eficiente. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es recomendar un conjunto de indicadores para el monitoreo de la integridad ecológica de los arrecifes de coral del Caribe mexicano y evaluar el estado de los arrecifes calculando estos indicadores para una base de datos existente (Base de datos Proyecto de la Subcoordinación de Monitoreo Marino, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad CONABIO). Se realizó una revisión bibliográfica de programas de monitoreo y literatura relacionada. Se desarrolló un marco conceptual de integridad ecológica para arrecifes de coral. Se identificaron 62 parámetros en la revisión bibliográfica, y se clasificaron acorde al marco conceptual, el cual proporcionó una base para evaluar su relevancia ecológica. El marco de indicadores propuesto incluye: números de Hill de peces y corales para la composición del ecosistema, cobertura de corales, octocorales, algas rojas incrustantes, macroalgas y filamentosas, índice de complejidad topográfica y el área del hábitat para la estructura, densidad de reclutas, incidencia de enfermedades y blanqueamiento de corales, biomasa de peces y altura de algas filamentosas y macroalgas para la función. Finalmente, se calcularon los indicadores para evaluar la integridad ecológica que contaban con parámetros del caso de estudio. Se encontraron 32 especies de corales; sin embargo, el número de especies efectivas fue de 3.31 ± 0.15 . La integridad ecológica de estos arrecifes fue baja, ya que se encontró una baja cobertura de corales (4.3 ± 0.44 %), menor a la de los demás organismos bentónicos. La cobertura de los octocorales fue de 7.22 ± 0.74 %. La cobertura de macroalgas fue de 23.74 ± 1.26 % superior a la cobertura de las algas rojas incrustantes (5.88 ± 1.09 %) y las algas filamentosas (6.69 ± 1.01). Además, se encontró que el número de grupos morfo-funcionales es menor (2.67 ± 0.99) al reportado para los años 1999-2000 (4), lo que puede indicar que ha ocurrido una pérdida del rol funcional de los corales en la provisión de hábitat.

1. Introducción

Los arrecifes de coral tropicales de aguas someras se encuentran en latitudes de los 30°N a los 30°S, en aguas con temperaturas óptimas para el desarrollo arrecifal (26-28°C) y en condiciones oligotróficas (Tunnell et al. 2007). Son ecosistemas constituidos por estructuras tridimensionales de carbonato de calcio. Los corales formadores de arrecifes son principalmente corales escleractíneos denominados hermatípicos que depositan esqueletos de carbonato de calcio. El arrecife se va formando a través de la acumulación de los organismos calcificadores (Dikou, 2010). En los arrecifes de coral habitan invertebrados sésiles como octocorales, esponjas, zoantidos, entre otros; algas rojas incrustantes, carnosas, articuladas y filamentosas; invertebrados móviles, y una gran diversidad de peces.

El valor ecológico y económico de los arrecifes de coral ha sido ampliamente reconocido, ya que estos ecosistemas albergan alrededor de un tercio de las especies marinas descritas actualmente (Spalding et al. 2001). Además, proveen múltiples servicios ecosistémicos, tales como aporte de nutrientes a las redes tróficas, fijación de carbono, protección de la costa, recursos pesqueros y turísticos, provisión de sustancias de uso farmacológico, y valores culturales para las comunidades (Reaka-Kudla, 1999, Hicks, 2011). En particular, los arrecifes de coral del Caribe mexicano poseen un gran valor ecológico al formar parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el segundo sistema arrecifal más grande del mundo, el cual es considerado una de las regiones con mayor biodiversidad en el Caribe (Arrivillaga y García, 2004). En los arrecifes del Caribe mexicano, se puede encontrar 54 especies de corales (Beltrán-Torres y Carricat-Ganivet, 1999), lo cual constituye 60 % de la riqueza de especies de coral a nivel nacional (Reyes-Bonilla et al. 2005), 80 % a nivel del Atlántico Occidental y 8 % a nivel mundial (Cairns, 1999), además de la gran diversidad de especies marinas asociadas a estos ecosistemas.

Sin embargo, los arrecifes del Caribe han sido considerados como una de las regiones oceánicas más degradadas, desde hace algunas décadas (Bryant et al. 1998), debido a eventos críticos como la mortalidad masiva del erizo de mar *Diadema antillarum*, el evento de blanqueamiento del 2005 (Eakin et al. 2010) y la invasión de pez león (Schofield, 2009), entre otros. Los principales forzamientos de cambio identificados incluyen el desarrollo costero, el cambio en el uso de suelo, la sobreexplotación pesquera y el cambio climático (Mora, 2008). En el estado de Quintana Roo el desarrollo turístico

desde los años 60, específicamente en la zona norte del estado, ha dado lugar a diversos impactos en estos ecosistemas.

1.1 Antecedentes

En el monitoreo ecológico se han utilizado diferentes marcos conceptuales para evaluar la condición de los ecosistemas (Houck y van Woesik, 2013). Dos ejemplos de estos son el marco conceptual de la salud del ecosistema y el marco conceptual de integridad ecológica. A menudo los términos de salud e integridad han sido utilizados indistintamente debido a que dichos términos fueron desarrollados paralelamente. La aplicación del marco “salud del ecosistema” en la evaluación ecológica surgió en la década de los 80 (Jorgensen, 2010). Rapport et al. (1998) han definido este término y han considerado que la salud del ecosistema es una propiedad operacional, es decir, que puede ser medida y evaluada. En el ámbito de los arrecifes de coral se han desarrollado índices de salud del ecosistema como el *Reef Health Index* (RHI por sus siglas en inglés), creado por *Healthy Reefs Initiative* (HRI). En este mismo sentido, McField y Kramer (2007) clasifican los indicadores en dos grupos: estructura del ecosistema y funcionamiento del ecosistema, cada uno con diferentes subgrupos. Sin embargo, Suter (1993) y Downs, et al. (2005) argumentan que la falta de una definición operacional de la salud del ecosistema da lugar a una evaluación sin objetivos claros. Por otra parte, el concepto de la integridad ecológica, comenzó a considerarse como una característica deseable de los ecosistemas en el programa del Hombre y la Biosfera (MAB-UNESCO) de 1968 (Manuel-Navarrete et al. 2001). Karr (1991) fue pionero en el desarrollo de índices multivariados de integridad biológica (IBI, *Index of Biotic Integrity*, por sus siglas en inglés) para ecosistemas acuáticos.

El término de integridad ecológica, por su parte, se incorporó en varios instrumentos regulatorios de los Estados Unidos y autores como Borja et al. (2008), Faber-Langendoen et al. (2012) contribuyeron al desarrollo del marco conceptual de integridad ecológica para estuarios. Para el caso de los arrecifes de coral, Jameson et al. (2001) proponen las mediciones que podrían tomarse para la construcción de un índice de integridad biológica. Dichas mediciones son agrupadas de la siguiente manera: estructura y ensamble de la comunidad, composición taxonómica, condición individual y procesos biológicos. Sin embargo, hasta la fecha no se ha creado dicho índice y el marco conceptual de integridad ecológica de arrecifes de coral atraviesa por un impase quedando pendiente su desarrollo. Para el caso de México, recientemente han surgido iniciativas que buscan desarrollar un

marco de indicadores para el monitoreo de la integridad ecológica de los ecosistemas a nivel nacional (Equihua et al. 2014).

La evaluación y monitoreo de los arrecifes de coral se ha llevado a cabo por parte de diversas instituciones y organizaciones internacionales (*Global Coral Reef Monitoring Network* GCRMN, *Reef Check* y *Australian Institute of Marine Science* AIMS) en diversas partes del mundo. Diversas organizaciones como *Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment* (AGRRA), *Caribbean Coastal Marine Productivity* (CARICOMP) y *South Florida Caribbean Network* (SFCN) han creado programas de monitoreo para el Caribe. Para el arrecife mesoamericano se ha creado el Programa de Monitoreo Sinóptico del Sistema Arrecifal Mesoamericano (PMS-SAM) y una guía de indicadores por la organización *Healthy Reefs Initiative* (HRI). En el periodo de 2013-2014, por ejemplo, la organización HRI muestreó 86 sitios dentro del Caribe mexicano (Kramer et al. 2015); así mismo las autoridades de las Áreas Naturales Protegidas (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, CONANP) realizan monitoreos de los arrecifes encontrados dentro de su área designada, y algunas organizaciones no gubernamentales como Comunidad y Biodiversidad A.C. (COBI) – Alianza Kanan Kay e instituciones académicas como el Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos (PIESACOM) también han elaborado programas de monitoreo o evaluación. Por su parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), ha elaborado mapas de la distribución de los arrecifes de coral del Caribe mexicano utilizando entre otros insumos, mapas de cobertura bentónica, con el objetivo de generar líneas base para el monitoreo a largo plazo de los arrecifes de coral del Caribe mexicano (CONABIO, s.f.).

1.2 Planteamiento del problema

Los arrecifes de coral del Caribe mexicano poseen un gran valor ecológico y proveen diversos servicios ecosistémicos, por lo cual, recientemente se ha decretado la creación de la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano (DOF, 2016). Por lo anterior, el monitoreo de estos ecosistemas resulta una actividad fundamental para su conservación. Si bien se han realizado esfuerzos por parte de diversas organizaciones para el monitoreo de los arrecifes del Caribe mexicano, los datos tomados difieren en tiempo, sitios y métodos de muestreo, y carecen de un marco conceptual adecuado.

Un programa de monitoreo debe estar basado en fundamentos ecológicos sintetizados en un marco conceptual. El marco conceptual articula y le da dirección a las distintas etapas que constituyen la creación de un programa de monitoreo, como lo son el establecimiento de los objetivos, la selección de los indicadores y los parámetros a medir, el almacenamiento de los datos y los métodos de análisis e interpretación de los mismos. El marco conceptual de la salud del ecosistema ha sido utilizado en el monitoreo de los arrecifes de coral, pero se considera que carece de un desarrollo conceptual adecuado que permita evaluar la condición de los arrecifes de coral (Suter, 1993; Downs, et al. 2005).

En este sentido, el marco de indicadores de un programa de monitoreo constituye un elemento fundamental. Si éste considera pocos indicadores, no capturará la complejidad del ecosistema (Dale y Beyeler, 2001), mientras que un programa de monitoreo con un número excesivo de indicadores será costoso y poco viable. Durante el desarrollo del marco conceptual se identifican los atributos y procesos relevantes del ecosistema y se determina el uso de cada indicador con base en literatura científica, por lo que se estos tendrán una relación empíricamente comprobada con un atributo o proceso del ecosistema (Bubb et al. 2010). De esta forma, el monitoreo ecológico cumplirá con el objetivo de informar a los tomadores de decisiones sobre el estado y dinámica de los arrecifes de coral para encaminar las acciones de conservación.

El monitoreo bajo el marco conceptual de integridad ecológica tiene como objetivo evaluar los cambios en la composición, estructura y función de los ecosistemas en comparación con los límites de referencia de un ecosistema natural (Dale y Polasky, 2007, Equihua et al. 2014). En este estudio se propone la integridad ecológica como un marco conceptual adecuado para el monitoreo de los arrecifes de coral debido a que:

- 1) El concepto de integridad ecológica se basa en la teoría de sistemas complejos, donde los ecosistemas presentan una capacidad de auto-organización que da lugar a una determinada composición y estructura.
- 2) Al medir los procesos del ecosistema se busca inferir relaciones causales con los factores de degradación del ecosistema.
- 3) El mantenimiento de la integridad ecológica implica también el mantenimiento de otras propiedades consideradas de interés para la conservación, como lo son la biodiversidad y la resiliencia. La integridad ecológica se refleja en la biota presente y por tanto en la

biodiversidad del ecosistema. Así mismo, se relaciona con la resiliencia ya que los procesos de un ecosistema subyacen su capacidad de recuperación y resistencia ante las perturbaciones.

Esta tesis contribuirá a solucionar dicha problemática, recomendando indicadores para el monitoreo de los arrecifes de coral bajo la propuesta conceptual de integridad ecológica. Dichos indicadores serán seleccionados con base en el criterio de relevancia ecológica y se ejemplificará la interpretación del marco conceptual de integridad ecológica, teniendo como caso de estudio sitios de arrecifes de coral del Caribe mexicano.

1.3 Hipótesis

La falta de un marco conceptual adecuado para la evaluación de la condición de los arrecifes de coral del Caribe mexicano influye en la forma en que se lleva a cabo su monitoreo. La integridad ecológica es un marco conceptual adecuado para evaluar la condición de los arrecifes de coral y que permitirá seleccionar los indicadores con mayor relevancia ecológica.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Recomendar un marco de indicadores para el monitoreo de la condición de los ecosistemas de arrecifes de coral del Caribe mexicano con base en el concepto de integridad ecológica.

Objetivos particulares

1. Identificar los parámetros biológicos utilizados en el monitoreo de arrecifes de coral, con un enfoque en el Caribe.
2. Desarrollar un marco conceptual de integridad ecológica para arrecifes de coral.
3. Seleccionar un conjunto de parámetros como indicadores de integridad ecológica de arrecifes de coral con base en el criterio de relevancia ecológica.
4. Analizar el estado de integridad ecológica de los arrecifes de coral para un caso de estudio, discutiendo la utilidad de los indicadores seleccionados y los indicadores calculados para el monitoreo de la integridad ecológica de los arrecifes de coral.

2 Área de estudio

Los arrecifes del caso del estudio se encuentran en las costas del sector norte del estado de Quintana Roo, en la península de Yucatán, frente al mar del Caribe mexicano. (Figura 1). Los arrecifes del sector norte de Quintana Roo comprenden de Isla Contoy a Tulum (Jordán-Dahlgren y Rodríguez Martínez, 2003). La plataforma de la península de Yucatán está compuesta por sedimentos de carbonatos del Cretácico tardío (Liddell, 2007), así como por evaporitas. El clima en el estado de Quintana Roo es del tipo cálido subhúmedo. Las mayores precipitaciones ocurren en el verano; así como la llegada de la mayoría de los huracanes procedentes del Atlántico. La temperatura media de la superficie marina es de 25.5 °C en invierno y 28 °C en verano (Wilkinson et al. 2009). La salinidad varía de las 35 a las 36.2 ppt en verano y de 35.6 a 36 ppt en invierno (Yañez-Arancibia y Day, 2004). El Mar Caribe está dominado por la Corriente del Caribe que corre de S-N, en forma paralela a la línea de costa, frente al estado de Quintana Roo (Zavala et al. 2006). En el Caribe mexicano además de los arrecifes de coral, pueden encontrarse manglares y pastos marinos (Yañez-Arancibia y Day, 2004).

En la ecorregión del Caribe (ecorregiones marinas de Norteamérica de Wilkinson et al. 2009) se encuentran las ecorregiones del nivel III: zona nerítica de Cancún y zona nerítica de Sian ka'an, las cuales han sido definidas por las características de las masas de agua y las características de las comunidades biológicas.

La CONABIO ha generado un mapa de cobertura del fondo marino (28/04/2017a) y un mapa de relieve (28/04/2017b) para el Caribe mexicano, que en su conjunto proporcionan una primera aproximación a los hábitats bentónicos de los arrecifes de esta región.

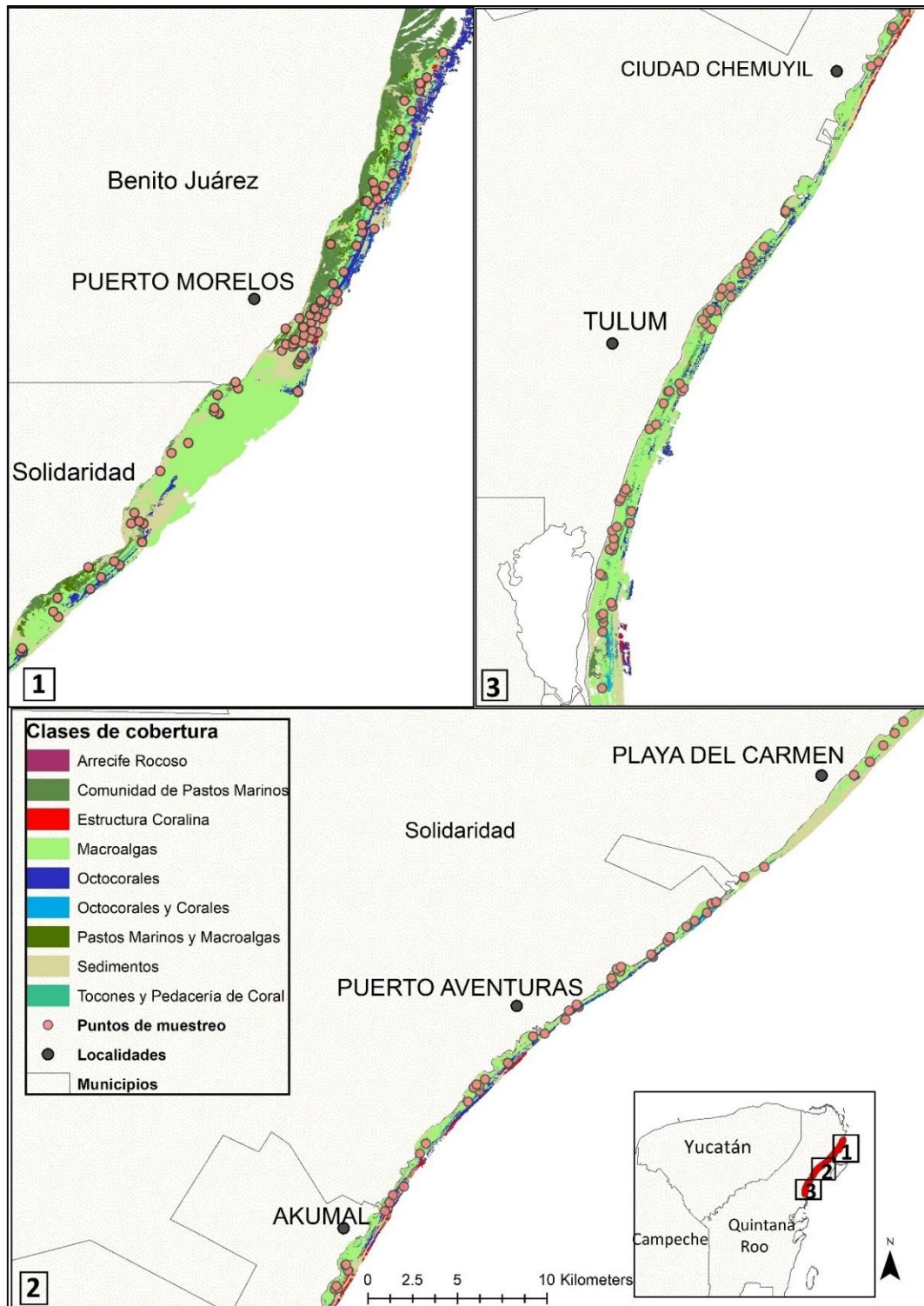


Figura 1. Área de estudio. Las 184 estaciones muestreadas se distribuyen en los arrecifes de la sección norte del estado de Quintana Roo. El área de estudio fue dividida en tres subsecciones para su presentación en el mapa: 1) Puerto Morelos, 2) Playa del Carmen-Akumal y 3) Tulum. Las clases de cobertura (CONABIO, 28/04/2017a) indican el tipo de hábitat según la cobertura bentónica.

Los arrecifes de Caribe mexicano forman parte del sistema arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual es de especial importancia debido a su longitud, tipos de arrecifes; y

constituye una de las regiones con mayor biodiversidad en el Caribe. Los arrecifes en la parte Norte de Quintana Roo son arrecifes de borde (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003). Presentan una menor extensión en comparación a los arrecifes del centro y sur y poseen una laguna arrecifal, arrecife posterior y arrecife frontal (Arias-González et al. 2008). La laguna arrecifal está compuesta por un fondo arenoso con praderas de pastos marinos, en la cresta arrecifal y en el arrecife posterior se encuentra una alta diversidad de corales; así como una alta cobertura de coral, y en el arrecife frontal se encuentran “jardines coralinos” colonizados por corales escleractíneos, hidrocorales, esponjas y octocorales abundantes (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003).

3. El monitoreo de los arrecifes de coral

3.1 Marco teórico: monitoreo ecológico, parámetros e indicadores

La evaluación ecológica puede definirse como la obtención de parámetros biogeofísicos de un ecosistema, con el objetivo de interpretarlos en términos de la condición del ecosistema. El monitoreo ecológico, por su parte revisa periódicamente el estado y desarrollo del ecosistema para detectar cambios en los procesos o atributos medidos (Hill y Wilkinson, 2004; Weil, et al. 2008). La evaluación ecológica se ha llevado a cabo por medio de parámetros e indicadores, los cuales deben estar basados en un marco conceptual que permita su interpretación (Houck y van Woesik, 2013). Los ecosistemas pueden describirse en términos de su estructura y de los procesos que en ellos ocurren. Ambos tienen propiedades que pueden ser medidas para describir los ecosistemas. Cuando la estructura y procesos son medidos, se suele hablar de variables o parámetros, es decir, de valores cuantificados en un punto y tiempo dados y que al seguir estándares de medición pueden compararse con un valor de referencia.

El uso que se le dé a los parámetros define si estos son tomados como indicadores. El término indicador hace referencia a un parámetro que estima el valor de un atributo o proceso y que guarda una relación relevante en la estructura causal del proceso ecológico. Un parámetro por sí mismo puede ser un indicador, o pueden realizarse cálculos a partir del parámetro colectado en campo para obtener un índice. El uso de los indicadores busca simplificar y comunicar información compleja obtenida para evaluar la condición de un ecosistema (Modificado a partir de Jameson et al. 2001, Johnson et al. 2013).

Para poder llevar a cabo un monitoreo sistemático y producir resultados fiables, se han creado programas y protocolos de monitoreo. En los programas de monitoreo deben establecerse los objetivos, los parámetros a medir, el almacenamiento de los datos y los métodos de análisis e interpretación de los mismos (Spellerberg, 1991). Los protocolos, describen los métodos seleccionados en los programas de monitoreo para obtener información del sitio estudiado. En ellos se especifican detalles como el número de réplicas y otras características de los parámetros que se recabarán (Hill y Wilkinson, 2004).

3.2 Métodos: revisión bibliográfica de programas de monitoreo existentes

Para identificar los parámetros biológicos colectados y utilizados en el monitoreo de los arrecifes de coral se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los programas de monitoreo existentes. Los programas revisados han sido creados por organizaciones establecidas y con métodos aceptados, que operan de la escala global a local y que tienen distintos objetivos de monitoreo (Tabla 1). Con el fin de contar con información de las nuevas tendencias en el monitoreo de los arrecifes de coral, se tomaron en cuenta dos artículos recientes (Díaz-Pérez et al. 2016, Flower et al. 2017).

Para cada parámetro se obtuvieron las especificaciones y los métodos que los diferentes programas revisados establecen para su medición. Dicha información fue obtenida al responder las preguntas de la Tabla 2. Las especificaciones corresponden a variables tales como nivel taxonómico, tamaño de los organismos considerados, entre otras. El detalle de los métodos describe el método e incluye características como las unidades de muestreo. La importancia de tomar en cuenta estas variables surge cuando se requiere comparar un mismo parámetro colectado por diferentes programas. Además, es importante considerar los diferentes métodos que pueden utilizarse para obtener un parámetro debido a las implicaciones en los costos del monitoreo.

La escala de operación global se refiere a programas que tienen sitios de muestreo en diferentes partes del mundo. Las escalas regional y subregional se distinguieron con base en las Ecorregiones marinas del Mundo (Spalding et al. 2007). Se tomó como escala regional a aquellos programas que cuentan con sitios de muestreo en al menos una de las ecorregiones marinas. Los programas de escala subregional se toman como aquellos que tienen sitios de muestreo en un área específica dentro de una ecorregión. Los programas de escala local se refieren a aquellos diseñados para muestrear un solo sitio o localidad.

De los diez programas de monitoreo y sus respectivos protocolos, así como de la guía de indicadores, los programas que corresponden a la escala global son: *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN) y *Reef Check*. Los programas diseñados para ciertas regiones y subregiones son: *Long Term Monitorig Programe-Australian Institute of Marine Science* (LTMP-AIMS), *Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment* (AGRRA), *South Florida Caribbean Network* (SFCN), Programa de Monitoreo Sinóptico del Sistema Arrecifal Mesoamericano (PMS-SAM), *Caribbean Coastal Marine Productivity* (CARICOMP), y la guía de indicadores elaborada por *Healthy Reefs Iniciative* (HRI). Los programas de la escala subregional y local en el Caribe mexicano son los diseñados por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), el Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos (PIESACOM) y la organización Comunidad y Biodiversidad A.C. (COBI) (Figuras 2 y 3).

Para caracterizar los programas de monitoreo, se recabó información de la institución que creó el programa, sus objetivos, cuando comenzó el monitoreo, la periodicidad y su continuidad, el objetivo del monitoreo, y el personal (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los programas de monitoreo revisados

Programa	Institución /objetivo	Año de comienzo/ Periodicidad/ Continuidad	Escala de operación del programa	Objetivo del monitoreo	Personal
Global Coral Reef Monitoring Network GCRMN, (2016)	Red global coordinada por nodos regionales de apoyo a ICRI ^a / proveer información científica del estado y las tendencias de los arrecifes	ICRI fundada en 1994/ no disponible ^b / sí	Global	Diseñado para ayudar al manejo	No disponible
Reef Check, (2006)	Fundación de monitoreo comunitario/ ayudar a la preservación de los océanos y arrecifes	1996/ no disponible/ sí	Global	Comunitario	Voluntarios
Australian Institute of Marine Science Long Term Monitoring Program AIMS – LTMP, (1994, 2004, 2008 y 2009)	Agencia de investigación del mar tropical / documentar la variabilidad natural, el efecto de disturbios, amenazas, y cualquier información que concierna al manejo de los arrecifes	1992/ anual/ sí	Regional (Gran Barrera de arrecifes de Coral de Australia)	Del sector académico	Científicos
Atlantic and Gulf Rapid Reef Assesment AGRRA, (2010)	Colaboración internacional de científicos y conservacionistas/ evaluar atributos estructurales y funcionales de los arrecifes para apoyar al manejo y la conservación	1988/ no disponible/ sí	Regional (Caribe)	Diseñado para ayudar al manejo	Científicos y personal entrenado
South Florida Caribbean Network SFCN, (2008)	Red de monitoreo del NPS/ determinar el estado y las tendencias y la dinámica natural de los ecosistemas, así como alertar sobre condiciones anormales	2003/ no disponible/ sí	Regional (Caribe)	Diseñado para ayudar al manejo	Científicos
Caribbean Coastal Marine Productivity CARICOMP (2001)	Red de laboratorios y reservas marinas / estudiar los procesos costeros, estructura, funcionamiento y productividad de ecosistemas arrecifales	1992/ anual/ no disponible	Regional (Caribe)	Diseñado para ayudar al manejo	No disponible

Tabla 1 (Continuación)

Programa	Institución/ objetivo	Año de comienzo/ Periodicidad/ Continuidad	Escala de operación del programa	Objetivo del monitoreo	Personal
Programa de Monitoreo Sinóptico del Sistema Arrecifal Mesoamericano PMS-SAM (2003)	Recopilar información acerca de la salud de los arrecifes del SAM, ecosistemas asociados y especies claves en la región, y proporcionar una base sólida para su manejo	2001/ anual o dos veces por año/ no disponible	Subregional (Sistema Arrecifal Mesoamericano)	Diseñado para ayudar al manejo	No disponible
Healthy Reefs Initiative HRI, (2007)	Asociación para la conservación de los arrecifes/ Promover la aplicación de los indicadores de HRI por parte de los tomadores de decisiones del SAM	No disponible/ bianual / sí	Subregional (Sistema Arrecifal Mesoamericano)	Diseñado para ayudar al manejo	No aplica ^c
Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos PIESACOM (2012)	Generar información espacialmente explícita y científicamente validada para la toma de decisiones	No disponible/ no disponible/ no disponible	Subregional (Sistema Arrecifal Mesoamericano)	Del sector académico	Personal académico
Programa de Monitoreo Biológico-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (PROMOBI-CONANP, 2014)	El protocolo de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, en el Estado de Quintana Roo PROMOBI,2014	2014/ no disponible/ no disponible	Local (Parque Nacional Arrecifes de Cozumel)	Diseñado para ayudar al manejo	No disponible
COBI-Alianza Kanan Kay	COBI: Asociación civil mexicana/ Revertir la degradación de los ecosistemas marinos. Alianza Kanan Kay: Iniciativa de colaboración intersectorial/ Conservación marina y manejo pesquero sustentable	COBI: 1999/ no disponible/ no disponible	Subregional (Caribe mexicano)	Comunitario	Miembros de la comunidad

a) ICRI: Internacional Coral Reef Initiative

b) Información no disponible en el programa revisado o en el sitio web consultado. Sitios web consultados el 19 de marzo del 2017.

c) Información que no aplica al documento revisado. La guía de indicadores de HRI no está dirigida establecer métodos de muestreo.

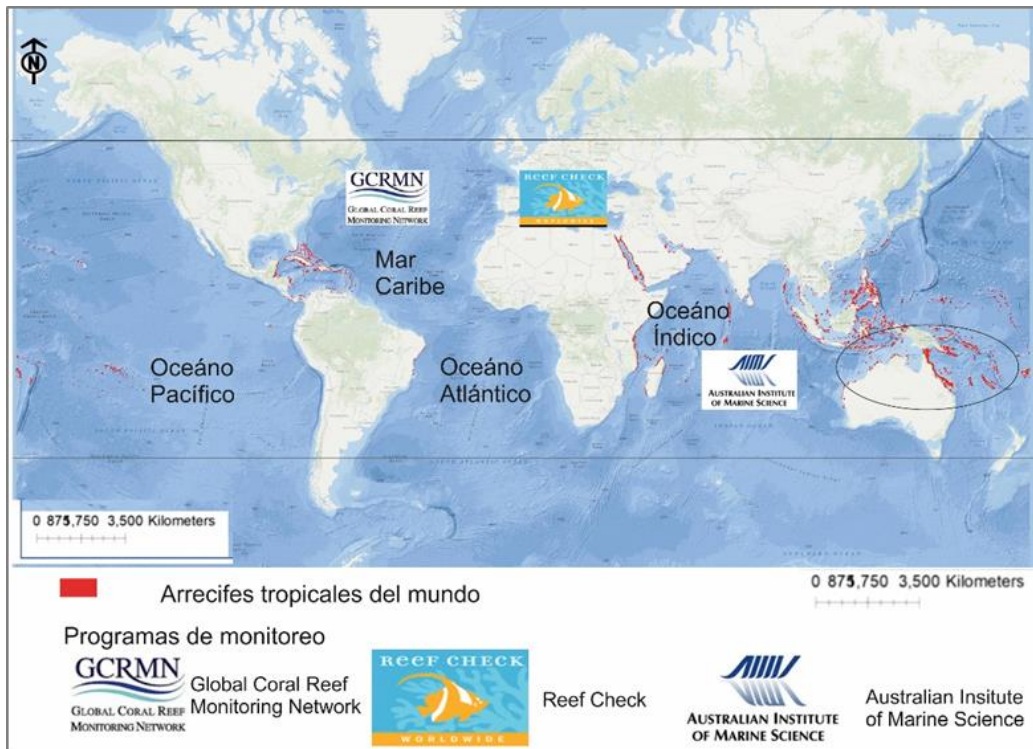


Figura 2. Ubicación de los programas de monitoreo revisados, escala global y regional. Arrecifes Tropicales del mundo (Burke et al. 2011)



Figura 3. Ubicación de los programas de monitoreo revisados, escala regional (Caribe), subregional (Sistema Arrecifal Mesoamericano) y local (Caribe mexicano). Arrecifes Tropicales del mundo (Burke et al. 2011)

Tabla 2. Protocolo para recabar los parámetros por programa de monitoreo

Programa			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Cobertura	1) ¿Se especifica coral escleractíneo, se específica incluir <i>Millepora</i> ? 2) ¿A qué nivel taxonómico? 3) ¿Se toman otras categorías dentro de esta cobertura como coral vivo, muerto, pálido o con blanqueamiento?	1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3) ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional?
		¿Se menciona medir o utilizar la información de otros parámetros para obtener la composición de especies de coral, riqueza específica, el índice de equidad de Pilon, o el índice de diversidad de Shannon?	¿La información se obtiene de otros parámetros o se utiliza otro método?
	Estructura de tamaño	1) ¿Se especifica coral escleractíneo, se específica incluir <i>Millepora</i> ? 2) ¿A qué nivel taxonómico? 3) ¿Qué dimensiones se miden (diámetro máximo, ancho perpendicular y altura)?	1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3) ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional?
		Densidad de colonias	1) ¿Se especifica coral escleractíneo, se específica incluir <i>Millepora</i> ? 2) ¿A qué nivel taxonómico?
	Densidad de reclutas	1) ¿Se especifica coral escleractíneo, se específica incluir <i>Millepora</i> ? 2) ¿A qué nivel taxonómico? 3) ¿Se especifica tamaño para considerarlo como recluta?	

Tabla 2. (Continuación)

Programa			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Tasa de crecimiento	1) ¿Se especifica coral escleractineo, se especifica incluir <i>Millepora</i> ? 2. ¿A qué nivel taxonómico?	1) ¿Qué método se utiliza?
	Prevalencia de enfermedades	1) ¿Se especifica coral escleractineo, se especifica incluir <i>Millepora</i> ? 2). ¿A qué nivel taxonómico?, 3) ¿Se especifican categorías de enfermedad/grado de blanqueamiento/otras lesiones? 4. ¿Se especifica la forma de medición (vista en plano, caras exteriores, toda la superficie etc.)?	1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3). ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional?
	Prevalencia de mortalidad		
	Porcentaje de mortalidad parcial		
	Porcentaje de la colonia afectada con enfermedades		
	Prevalencia de blanqueamiento		
	Porcentaje de la colonia afectada con blanqueamiento'		
Prevalencia de otras lesiones			
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) ¿Cuáles se incluyen? 2) ¿A qué nivel taxonómico? Cobertura de otros invertebrados sésiles	
	Cobertura de esponjas		
	Cobertura de <i>Millepora</i>		
	Cobertura de otros invertebrados sésiles		

Tabla 2. (Continuación)

Programa			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Otros invertebrados sésiles	Abundancia de octocorales		1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3). ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional
	Estructura de tamaño de octocorales	1) ¿Cuáles se incluyen? 2) ¿A qué nivel taxonómico? 3) ¿Qué dimensiones se miden (diámetro máximo, ancho perpendicular y altura)?	
	Prevalencia de mortalidad	1) ¿Cuáles se incluyen? 2). ¿A qué nivel taxonómico?, 3) ¿Se especifican categorías de mortalidad/enfermedad/grado de blanqueamiento/otras lesiones? 4. ¿Se especifica la forma de medición (vista en plano, caras exteriores, toda la superficie etc.)?	
	Prevalencia de enfermedades		
	Prevalencia de blanqueamiento		
	Prevalencia de otras lesiones		
Algas	Cobertura	1) ¿Qué grupos de algas se miden (filamentosas, césped, macroalgas, coralinas, etc.)? 2) A qué nivel taxonómico?	
	Altura	1) ¿Qué grupos de algas se miden?	¿Qué método se utiliza?
	Prevalencia de enfermedades		
Invertebrados móviles	¿Se menciona medir o utilizar la información de otros parámetros para obtener la composición de especies, riqueza específica o diversidad?	1) ¿Cuáles se incluyen?	¿La información se obtiene de otros parámetros o se utiliza otro método

Tabla 2. (Continuación)

Programa			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Invertebrados móviles	Densidad	1) ¿Cuáles se incluyen?	1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3). ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional?
	Densidad de reclutas	1) ¿Cuáles se incluyen? 2) ¿Se especifica tamaño para considerarlo como recluta?	
	Estructura de tamaño	1) ¿Cuáles se incluyen? 2) ¿Se mencionan clases de tamaño?	
	Densidad de invertebrados móviles de interés comercial	1) ¿Cuáles se incluyen?	
Peces	¿Se menciona medir o utilizar la información de otros parámetros para obtener la composición de especies, riqueza específica o diversidad?		¿La información se obtiene de otros parámetros o se utiliza otro método?
	Densidad o biomasa de peces de especies seleccionadas	1) ¿Cuáles se incluyen (familias, géneros, etc.)? 2) ¿A qué nivel taxonómico?	1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3). ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional?
	Estructura de tamaño de peces de especies seleccionadas	1) ¿Cuáles se incluyen (familias, géneros, etc.)? 2) ¿A qué nivel taxonómico? 3) ¿Se mencionan las clases de tamaño?	
	Estructura de tamaño de peces de todas las especies	1) ¿A qué nivel taxonómico? 2) ¿Se mencionan las clases de tamaño?	
	Densidad o biomasa total de peces		
	Tasa de mordidas de peces en algas	1) ¿Cuáles peces se incluyen? 2) ¿A qué nivel taxonómico?	

Tabla 2. (Continuación)

Programa			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Peces	Densidad de pez león		1) ¿Qué método se utiliza? 2) ¿Cuál es el número de repeticiones por sitio y cuáles son las dimensiones de las unidades de muestreo? 3). ¿Cuál es el tamaño de la unidad de muestreo total? 4) ¿Se menciona algún detalle adicional?
Otros organismos	Cobertura de pastos marinos		
	Abundancia de especies clave	1) ¿Cuáles se incluyen?	
Otros	Cobertura de sustrato inerte	1) ¿Qué categorías de sustrato se incluyen?	
	Rugosidad cualitativa		
	Complejidad topográfica	¿Cómo se calcula?	
	Máxima elevación del arrecife		1) ¿Qué método se utiliza?
	Área de extensión del hábitat		
	Abundancia de bioerosionadores	1) ¿Cuáles se incluyen?	
	Tasa de acreción del arrecife		

3.3 Resultados: parámetros utilizados en el monitoreo de los arrecifes de coral

Se identificaron un total de 62 parámetros (Anexo I). De estos, 58 fueron identificados en los programas de monitoreo y en la guía de indicadores consultados, y cuatro en los artículos revisados (Díaz-Pérez et al. 2016, Flower et al. 2017). A continuación, se da una breve descripción de los parámetros identificados y la frecuencia (número de programas que los consideran). El número de parámetros por programa varía de los 12 a los 28, siendo AGRRA el programa con un mayor número de parámetros.

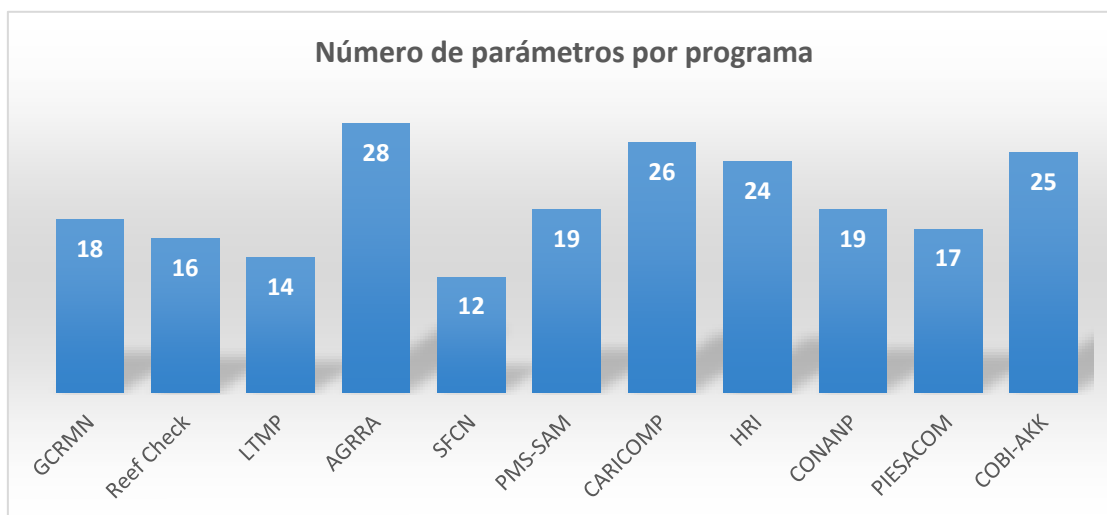


Figura 4. Número de parámetros identificados por programa de monitoreo

Específicamente sobre corales se identificaron un total de 22 parámetros (Figura 5). Como se muestra en la Tabla 3, algunos programas incluyen la medición de organismos del género *Millepora*. Los corales de este género contribuyen a la construcción del arrecife en el Caribe; por lo que puede sumarse su cobertura a la cobertura de los corales escleractíneos para la estimación de la cobertura de coral total. Todos los programas miden la cobertura de coral, pero algunos programas registran también otras categorías de cobertura. Por ejemplo, AGRRA toma la cobertura de coral vivo con blanqueamiento, y con muerte reciente; Reef Check también toma cobertura de coral con muerte reciente; SFCN es el único que considera la cobertura de coral juvenil. Pocos programas mencionan obtener el índice de diversidad de Shannon y el índice de equidad de Pielou de coral (5 y 3 programas respectivamente). Algunos programas consideran otros parámetros de los corales, la densidad de colonias de corales (AGRRA y PIESACOM), el crecimiento de corales (HRI), la estructura de tallas de las colonias (AGRRA, PMS-SAM, HRI, CONANP y COBI-AKK) y la densidad de reclutas (GCRMN, AIMS-LTMP, AGRRA, PMS-SAM, HRI, CONANP y COBI-AKK). La mayoría de los programas

registran la prevalencia de enfermedades y blanqueamiento, pero solo el programa de AGRRA mide el porcentaje de la colonia afectada con estos padecimientos y el número de parches aislados de tejido suave de coral. Alternativamente a los parámetros de prevalencia de enfermedades y de blanqueamiento, Flower et al. (2017) recomiendan medir la incidencia de estos padecimientos. Mientras que, Díaz-Pérez et al. (2016) recomiendan la medición de la diversidad funcional de corales, la cual puede expresarse como el número de grupos morfo-funcionales.

El parámetro más común para otros invertebrados sésiles es la cobertura. La mayoría de los programas evalúan la cobertura de octocorales, esponjas y otros invertebrados sésiles (zoántidos tunicados, anemonas y coralimorfos). Otra forma de medir a estos invertebrados sésiles es por medio de la abundancia o densidad; pero solo el programa de CARICOMP, incluye este parámetro, y la guía de HRI menciona la abundancia de bioerosionadores, dentro de la cual se registran esponjas y otros organismos. Solo 2 programas mencionan medir la condición de otros invertebrados sésiles, el programa de CARICOMP evalúa la condición de los octocorales, el de AGRRA menciona que, si una mala condición de otros invertebrados sésiles es predominante, debe registrarse su prevalencia.

Todos los programas miden la cobertura de algas. El programa LTMP-AIMS toma en cuenta la prevalencia de enfermedades en algas costrosas, las cuales se han presentado en la región del la Gran Barrera de Arrecifes de Australia. Solo los programas PMS-SAM y la guía de HRI mencionan la medición de la altura de algas.

Para los invertebrados móviles, la abundancia o densidad de erizos de mar es evaluada por 9 programas, mientras que parámetros como la densidad de reclutas (3 programas) y la estructura de talla (1 programa) son medidos por un reducido número de programas. La riqueza específica y la diversidad son mencionados únicamente por COBI-AKK.

Después de los corales, los peces son el grupo con mayor cantidad de parámetros (11), entre los que se encuentran la densidad o biomasa, la estructura de tallas y la densidad de reclutas. Estos pueden ser medidos para peces de especies o familias seleccionadas, o para todas las especies, pero la mayoría registra estos parámetros para especies seleccionadas. La biomasa de todas las especies solo se considera en 4 programas. La composición, riqueza específica y el índice de diversidad de Shannon de peces son medidos por pocos

programas. La densidad de reclutas es tomada por una menor cantidad de programas (2), tanto para especies seleccionadas como para todas las especies. La medición de mordidas de peces en algas solo es considerada por HRI. Díaz-Pérez et al. (2016) recomiendan la medir la diversidad funcional de peces como el número de grupos funcionales.

Entre los parámetros que miden otros organismos se encuentran la cobertura de pastos marinos, y la abundancia de especies clave. Ambos se incluyen solo en 2 programas. Otros parámetros son la cobertura de sustrato inerte, la rugosidad cualitativa, la complejidad topográfica, la máxima elevación del arrecife, el área de extensión de hábitats y la tasa de acreción del arrecife.

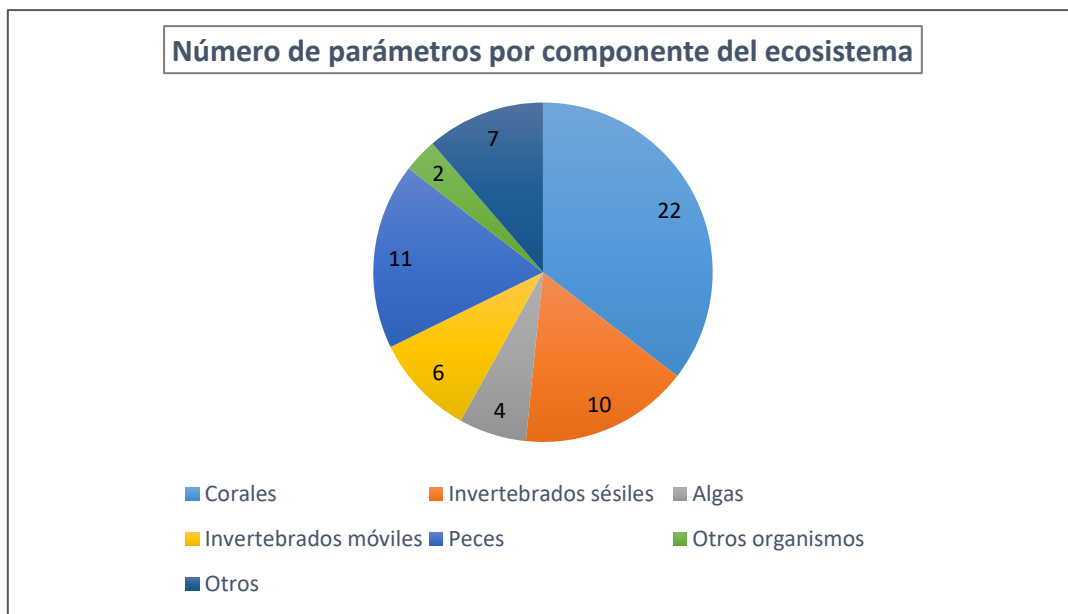


Figura 5. Número de parámetros identificados por componente del ecosistema. La categoría de invertebrados sésiles incluye hidrocorales, esponjas y octocorales. La categoría de otros incluye parámetros que no se atribuyen a algún organismo, como la cobertura de sustrato inerte.

Tabla 3. Parámetros por programa de monitoreo con especificaciones y detalle de los métodos

Programa GRCMN			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Cobertura	1) Escleractíneos, 2) si es posible a nivel de especie, 3) no se especifican otras categorías de cobertura	1) Fotocuadrantes. 2) Quince fotocuadrantes de 0.9 m x 0.6 m en cinco transectos de 30 m, 25 puntos por fotocadrante 3) un total de 375 puntos por transecto
	Densidad de reclutas	1) Escleractíneos, 2) a nivel de género, 3) tamaño de 0.5 a 4.0 cm	
	Prevalencia de enfermedades	1) Escleractíneos, 2) no se identifica un nivel taxonómico, 3) no se especifican categorías de enfermedad, 4) no se especifica superficie a medir	
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) a nivel de género o forma de crecimiento	1) Fotocuadrantes. 2) Quince fotocuadrantes de 0.9 m x 0.6 m en cinco transectos de 30 m, 25 puntos por fotocadrante 3) un total de 375 puntos por transecto
	Cobertura de esponjas	1) Género <i>Chondrilla</i> , género <i>Clionid</i> y otras esponjas incrustantes, vaso o tubo 2) a nivel de género	
	Cobertura de <i>Millepora</i>	1) <i>Millepora alcicornis</i> , <i>M. complanata</i> y <i>M. scuarrosa</i> 2) a nivel de especie	
	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Género <i>Stylaster</i> , tunicado (género <i>Trididemnum</i>), zoantidos (género <i>Palythoa</i>) y ascidias, 2) A nivel de género	
Algas	Cobertura	1) Especies clave de césped, macroalgas y coralinas, 2) a nivel de especie	

Tabla 3. (Continuación)

Programa GRCMN			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Invertebrados móviles	Densidad	1) Erizos de mar (<i>Diadema antillarum</i> y otras especies), pepinos de mar (clase Holothuroidea)	1) Transectos de banda. 2) Tres transectos de 10 m x 2 m, 3) área total de 60 m ² 4) también puede usarse el método de fotocuadrantes
	Densidad de reclutas	1) Erizos de mar del género <i>Diadema</i> , 2) tamaño de 2 cm	
Peces	Densidad/biomasa de especies seleccionadas	1) Especies de cuatro familias (Luquitinidae, Serranidae, Labridae y Acanthuridae), pez león, tiburón y raya 2. A nivel de especie	
	Estructura de tamaño de especies seleccionadas	1) Mismas especies medidas para densidad 2) no se especifican clases de tamaño	
	Estructura de tamaño de todas las especies	1) A nivel de especie, 2). no se especifican clases de tamaño	
	Densidad/biomasa total	1) A nivel de especie	
Otros	Cobertura de sustrato inerte	1) Arena, crecimiento libre de caliza, escombros	
Programa Reef Check			
Corales	Cobertura de coral duro	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor, 3) otras categorías de cobertura (muerte reciente)	1) Punto de intercepción. 2) Dos transectos a dos profundidades distintas, cada uno con cuatro segmentos de 20 m, situados cada 5 m a lo largo de una línea de 100 m, medición cada 50 cm, 3) 40 puntos por transecto, 160 puntos en total
	Prevalencia de enfermedades	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> , 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor, 3) Categorías del Reef ID Card 4) no se especifica la superficie a medir	1) Transecto de banda. 2) Dos transectos a dos profundidades distintas, cada uno con cuatro segmentos de 20 m x 5 m, situados cada 5 m a lo largo de una línea de 100 m, 3) área total de 800 m ²
	Porcentaje de la colonia afectada con enfermedades		
	Prevalencia de blanqueamiento	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor, 3). no se especifican categorías, 4) no se especifica la superficie a medir	
Porcentaje de la colonia afectada con blanqueamiento			

Tabla 3. (Continuación)

Programa Reef Check			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Prevalencia de otras lesiones	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> , 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor, 3) tres categorías de lesión (por botes, anclas o dinamita, tres categorías de prevalencia (ninguno, bajo y alto)	1) Transecto de banda. 2) Dos transectos a dos profundidades distintas, cada uno con cuatro segmentos de 20 m x 5 m, situados cada 5 m a lo largo de una línea de 100 m, 3) área total de 800 m
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de esponjas	2). No se identifica a un nivel taxonómico mayor	1) Punto de intercepción. 2) Dos transectos a dos profundidades distintas, cada uno con cuatro segmentos de 20 m, situados cada 5 m a lo largo de una línea de 100 m, medición cada 50 cm, 3) 40 puntos por transecto, 160 puntos en total
	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Zoantidos, tunicados, y anémonas de mar, 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor	
Algas	Cobertura	1) Algas indicadoras de nutrientes No incluye algas coralinas, calcáreas, ni césped	
Invertebrados móviles	Densidad	1) Erizos de mar (géneros <i>Diadema</i> , <i>Eucidaris</i> y <i>Tripneuste</i>) (erizo lápiz, huevo de mar o erizo blanco), camarones bandeados coralinos (<i>Stenopus hispidus</i>), la langosta espinosa, caracol lengua de flamingo (<i>Cyphoma gibbsom</i>) y tritón (<i>Charonia variegata</i>)	
Peces	Densidad/biomasa de especies seleccionadas	1) Seis familias y una especie: meros (<i>Epinephalus striatus</i> , Serranidae), pargos (Lutjanidae) > 30 cm, peces roncadores, peces labios duques y margates (Haemulidae), peces loro (Scorpaenidae) > 20 cm, morena (Muraenidae), peces mariposa (Chaetodontidae), se incluye tiburones y rayas 2) a nivel de familia (especie en el primer caso)	1) Transecto de banda. 2) Dos transectos a dos profundidades distintas, cada uno con cuatro segmentos de 20 m x 5 m, situados cada 5 m a lo largo de una línea de 100 m, 3) área total de 800 m ²
	Estructura de tamaño de especies seleccionadas	1) Meros (<i>Epinephalus striatus</i> y Serranidae), a nivel de familia (y especie en el primer caso) 2. cuatro clases de tamaño (30-40, 41-50, 51-60, >60 cm)	
Otros organismos	Abundancia de especies clave	1) Tortugas y otros organismos	
Otros	Cobertura de sustrato inerte	1) Roca, grava, arena, arcilla-limo	1) Punto de intercepción. 2) Dos transectos a dos profundidades distintas, cada uno con cuatro segmentos de 20 m, situados cada 5 m a lo largo de una línea de 100 m, medición cada 50 cm, 3) 40 puntos por transecto, 160 puntos en total

Tabla 3. (Continuación)

Programa AIMS-LTMP			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Cobertura	1) Escleractíneo, 2) a nivel de formas de crecimiento y especie si es posible 3) No incluye otras categorías dentro de la cobertura	a) Videotransecto resultante de 50 m x 0.25 m. Cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto, distancia de la cámara 20 cm, velocidad de nado 4 a 5 min/50 m b) Fotocuadrantes. Cuarenta fotocuadrantes de 0.25 m x 0.34 m, en transecto de 50 m a intervalos de 1 m, con cinco puntos de identificación, 200 puntos por transecto. c) Manta tow con seis categorías de cobertura
	Prevalencia de mortalidad reciente	1) No especifica si solo escleractinio, 2) a nivel de forma de crecimiento y género si es posible, 3) mortalidad reciente por las diferentes categorías de enfermedades y daño, 4) no especifica la superficie a medir	a) Scuba a lo largo de 5 transectos de 50 m x 2 m con evaluaciones cada 2 min.,
	Prevalencia de enfermedades	1) No especifica si solo escleractíneo, 2). a nivel de forma de crecimiento y género si es posible 3) la inclusión de categorías de enfermedades depende del método 4) no especifica la superficie a medir	a) Manta tow. 3. Tres categorías de prevalencia (Ausente = 0, Presente < 10 Común >10 colonias), dos categorías de enfermedad (banda negra y enfermedades de síndrome blanco) b) Scuba a lo largo de cinco transectos de 50 m x 2 m con evaluaciones cada 2 min, siete categorías de enfermedades (mismas que con el método 1 más:; erosionadora de esqueleto, necrótica, rosa de Porites, hiperplasia y neoplasia)
	Prevalencia de otras lesiones	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de forma de crecimiento, 3) cinco categorías (cicatrices por depredadores: estrellas corona de espinas y género <i>Drupella</i> , sobrecrecimiento de alga, esponjas y ascidias)	a) Scuba a lo largo de cinco transectos de 50 m x 2 m con evaluaciones cada 2 min
	Densidad de reclutas de coral	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de género o familia, 3. < 5cm de diámetro	1) Transecto de 5 m x 0.34 m. Se toma también cobertura de sustrato, pendiente del arrecife, pendiente del transecto
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Incluye gorgonias, 2) a nivel de familias y géneros	a) Videotransecto resultante de 50 x 0.25 m. Cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto
	Cobertura de esponjas	1) No identificadas a un nivel taxonómico mayor	a) Cuarenta fotocuadrantes de 0.25 x 0.34 m, en transecto de 50m a intervalos de 1 m y seleccionados al azar con cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto. b) Manta tow con seis categorías de cobertura

Tabla 3. (Continuación)

Programa AIMS-LTMP			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Algas	Cobertura	Césped, macroalgas, y coralinas	a) Videotransecto resultante de 50 x 0.25 m. Cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto. b) Cuarenta fotocuadrantes de 0.25x0.34 m, en transecto de 50m a intervalos de 1 m y seleccionados al azar con cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto.
	Prevalencia de enfermedades	1). Coralinas	a) Scuba a lo largo de 5 transectos de 50 m x 2 m con evaluaciones cada 2 min.
Invertebrados móviles	Densidad	1) Gasterópodos del género <i>Drupella</i> y estrella de mar especie <i>Acantasther planci</i>	
Peces	Densidad de especies seleccionadas	1) Especies de diez familias: Potamocentridae, Acanthuridae, Chaetodontidae, Labridae, Lethrinidae, Lutjanidae, Scaridae, Serranidae, Siganidae, Zanclidae	a) Transectos de banda. Cinco transectos de 50 m x 1 m para los peces de la familia Potamocentridae y de 50 m x 5 m para las demás especies en tres sitios b). Manta tow. Estimación visual con categorías de abundancia (baja, moderada alta y muy alta)
Otros	Cobertura de sustrato inerte	1) Coral, muerto, no colonizado, escombros y arena	a) Videotransecto resultante de 50 x 0.25 m. Cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto b) Cuarenta fotocuadrantes de 0.25x0.34 m, en transecto de 50m a intervalos de 1 m y seleccionados al azar con cinco puntos de identificación, total de 200 puntos por transecto.
	Rugosidad cualitativa	1) Tres categorías: baja, media y alta	a) Transecto de 5 m x 0.34 m.
Programa AGRRA			
Corales	Cobertura	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género o especie, 3. otras categorías (vivo, pálido, vivo con blanqueamiento y con muerte reciente)	1) Punto de intercepción. 2) Seis transectos de 10 m, medición cada 10 cm, 100 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total
	Estructura de tamaño	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie 3) Diámetro máximo, ancho perpendicular y altura	1) Transecto de banda. 2) Dos transectos de 10 m x 1 m, 3) área total = 20 m ²
	Densidad de colonias	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie	

Tabla 3. (Continuación)

Programa AGRA			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Porcentaje de mortalidad parcial	1) Es escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie, 3) tres categorías (nueva, transicional y vieja) 4) medición en la superficie de las caras exteriores	1) Transecto de banda. 2) Dos transectos de 10 m x 1 m, 3) área total = 20 m ²
	Prevalencia de enfermedades	1) Es escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie, 3) doce categorías (Banda negra, banda roja, infección de cilios del Caribe, síndromes blancos no de acropora: plaga blanca y síndromes blancos del Caribe, y síndromes blancos de Acropora: banda blanca, parche blanco, pérdida rápida de tejido, puntos negros, banda amarilla del Caribe, anomalías de crecimiento), 4) medición en toda la superficie de la colonia	
	Prevalencia de blanqueamiento	1) Es escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie, 3) tres categorías (pálido, parcial y blanqueado), 4) dos formas de medición en la superficie de las caras exteriores y medición en cualquier superficie de la colonia para el nivel detallado de monitoreo	
	Prevalencia de otras lesiones	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie, 3) lesiones por depredadores: mordidas de pez loro, pez damisela, gusanos coralívoros, sobrecrecimiento y otros tejidos dañados. 4) medición en toda la superficie.	
	Número de parches aislados de tejido suave	1) Escleractíneo y <i>Millepora</i> excepto <i>M. alcicornis</i> > 4 cm, 2) a nivel de género o especie	
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de esponjas	1) Esponjas epibénticas, esponjas agresivas (<i>Chondrilla caribensis</i> , <i>Cliona delitrix</i> , entre otras)	1) Punto de intercepción. 2) Seis transectos de 10 m, medición cada 10 cm, 100 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total
	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, (agresivos: <i>Briarsum asbestinum</i> , <i>Erythropodium caribaeorum</i> , entre otras), 2) a nivel de género	

Tabla 3. (Continuación)

Programa AGRRA			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Zonitidos (agresivos: <i>Palvina caribaeorum</i> , y tunicados como <i>Tridismunolidium</i> , entre otros), 2) a nivel de género	1) Punto de interceptación. 2) Seis transectos de 10 m, medición cada 10 cm, 100 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total
	Prevalencia de mortalidad	1) Cualquier grupo que presente esta condición de manera abundante, 2) No se especifican nivel taxonómico 3) No se especifican categorías de mortalidad/enfermedad/grado de blanqueamiento/otras lesiones 4) No se especifica la forma de medición	1) Transecto de banda. 2) Dos transectos de 10x1 m, 3) área total = 20
	Prevalencia de blanqueamiento		
	Prevalencia de otras lesiones		
Algas	Cobertura	1) Cianobacterias, céspe, macroalgas y coralinas, 2) a nivel de especie para algunas macroalgas clave como macroalgas carnosas del género <i>Dicryota</i> y <i>Lobophora variegata</i> , macroalgas calcáreas del género <i>Halimeda</i> como <i>H. goramii</i> v. <i>H. opuntia</i>	1) Punto de interceptación. 2) Seis transectos de 10 m, medición cada 10 cm, 100 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total
	Altura	1) Macroalgas, opcional cianobacterias y céspe	1) Dos transectos de 10 m, medición cada 10 cm
Invertebrados móviles	Densidad	1) Erizor de mar (<i>Diadema antillarum</i>), caracol rosado (<i>Srombiv gigante</i>) langosta (<i>Panulirus argus</i>), se incluye pez león género <i>Pterois</i> con estructura de tamaño	1) Transectos de banda. 2) Seis transectos de 10 m x 1 m, 3) área total = 60 m ²
	Densidad de especies seleccionadas	1) Especies de ocho familias: peces cirujano (Acanthuridae), pez tigre (Balistidae), peces mariposa (Chaetodontidae), Haemúlidae grunts (< 5 cm), pargo (Lutjanidae), mironas (Muraenidae), peces ángel (Pomacanthidae), peces loro (Scorpaenidae) (< 5 cm), meros (Serranidae), subfam. géneros <i>Epinephelinae</i> , <i>Epinephelus</i> , <i>Cephalopholis</i> , y <i>Micropogonias</i> , se incluye pez león. 2) a nivel de familia <i>Micropogonias</i> , se incluye pez león. 2) a nivel de familia	1) Transectos de banda 2) Diez transectos de 30 m x 2m 3) Área total = m ²
Peces	Es estructura de tamaño de especies seleccionadas	1) Misma especie medidas para densidad, 2) a nivel de familia 3) Cinco clases de tamaño (0-5 cm, 6-10 cm, 11-20 cm, 21-30 cm, 31-40 cm y >40 cm)	
	Cobertura de sustrato inerte	1) Arena, lodo, mexca arena-lodo	1) Punto de interceptación. 2) Seis transectos de 10 m, medición cada 10 cm, 100 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total
Otros	Máxima elevación del arrecife	1) Altura del coral más alto al punto más bajo del sustrato	1) Diez transectos de 30 m, medición cada 5 m, cuatro puntos por transecto

Tabla 3. (Continuación)

Programa SFCN			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Cobertura	1) Escleractineo, 2) a nivel de especie, 3) se incluyen categorías (con blanqueamiento, con enfermedad, coral juvenil)	1) Videotransecto. 2) El número de transectos es calculado con ecuación de potencia de 10 m x 0.4 m, 3) 250-300 puntos por transecto, distancia de la cámara 40 cm, velocidad de nado 30 s/m
	Índice de Diversidad de Sahnnon Wiener de coral duro	1) Escleractineo, 2) a nivel de especie	1) Transecto de banda. 2) Número de transectos calculado con ecuación de potencia de 10 m x 2 m
	Prevalencia de mortalidad reciente	1) No especifica si solo escleractineo, 2) a nivel de especie, 3) mortalidad reciente por enfermedad y blanqueamiento 4) No se especifica la superficie a medir	
	Prevalencia de enfermedades	1) No especifica si solo escleractineo, 2) a nivel de especie, 3) Categorías a partir de Woodly et al. 2003, Weil et al. 2006 y Southerland et al. 2004, características de la lesión (longitud y ancho), 4) no se especifica la superficie a medir	
	Prevalencia de blanqueamiento	1) No especifica si solo escleractineo, 2. a nivel de especie, 3) no especifica categorías 4) no especifica la superficie a medir	
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) a nivel de forma de crecimiento y gorgonias <i>Briareum asbestinum</i> y <i>Erythropodium caribaeorum</i> , 2) No se indentifica a un nivel taxonómico mayor	1) Videotransecto. 2) El número de transectos es calculado con ecuación de potencia de 10 m x 0.4 m, 3) 250-300 puntos por transecto.
	Cobertura de esponjas	1) A nivel de forma de crecimiento y esponjas <i>Cliona delitrix</i> , 2) No se indentifica a un nivel taxonómico mayor	
	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Zoántidos (<i>Palythoa caribaeorum</i> y <i>Zoanthus sociatus</i>), anemonas y coralimorfos, 2) No se indentifica a un nivel taxonómico mayor	
Algas	Cobertura	1) Césped, macroalgas y coralinas, 2). No se indentifica a un nivel taxonómico mayor	
Invertebrados móviles	Densidad	1. Erizos de mar <i>Diadema antillarum</i> ,	1) Transecto de banda. 2) Número de transectos calculado con ecuación de potencia de 10 m x 2 m

Tabla 3. (Continuación)

Programa SF CN			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Otros	Cobertura de sustrato inerte	1) Arena, escombros y pavimento	1) Videotransecto. 2) El número de transectos es calculado con ecuación de potencia de 10 m x 0.4 m, 3) 250-300 puntos por transecto.
	Complejidad topográfica	1) relación inversa entre la longitud alcanzada por la cadena sobre el sustrato y la longitud de la cadena	1) Método de cadena, de 10 m
Programa PMS-SAM			
Corales	Cobertura	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género, 3) no especifica otras categorías de cobertura	1) Punto de intersección. 2) Cinco transectos de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total
	Estructura de tamaño	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género o especie, 3) diámetro máximo proyectado (a vista de plano, perpendicular al eje de crecimiento) y altura de la colonia	1) Para 50 colonias diámetro > 10 cmbajo el transecto de 30 m,
	Densidad de reclutas	1) Escleractíneo, 2) al nivel taxonómico más detallado posible, 3) no se especifica el tamaño para los reclutas	1) Placas de asentamiento. Método (Mundy, 2000) modificado por (Steneck 2003). 2) Cinco entablados espaciados a 2 y 10 m en el arrecife frontal seis meses antes del desove principal. Observación con un microscopio de disección, 4) reclutas por área de asentamiento o metro cuadrado
	Prevalencia de mortalidad	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género o especie, 3) dos categorías (rectante y antigua), 4) superficie visto desde arriba en vista "en plano"	
	Porcentaje de mortalidad parcial	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género o especie, 3) nueve categorías (banda negra, plaza blanca, plaza blanca II, banda amarilla, círculos negros, I, círculos negros II, banda roja, aspergiosis y otras). Dentro de las categorías se reportan enfermedades para gorgonias, 4) toda la superficie de la colonia	1) Para 50 colonias diámetro > 10 cmbajo el transecto de 30 m,
	Prevalencia de enfermedades	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género, 3) tres categorías (pálido, parcial y blanqueado), 4) toda la superficie de la colonia	
	Prevalencia de blanqueamiento	1) Escleractíneo, 2. a nivel de género, 3) cinco categorías (mordidas de peces loro, damisela, por caracoles, sobrecrecimiento y por tormentas), 4) toda la superficie de la colonia	
	Prevalencia de otras lesiones		

Tabla 3 (Continuación)

Programa PMS-SAM				
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método	
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) No se identifica a un nivel taxonómico mayor	1) Punto de intercepción. 2) Cinco transectos de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total	
	Cobertura de esponjas	1) No se especifican cuales se incluyen. 2) No se identifica a un nivel taxonómico mayor		
Algas	Cobertura	1) Césped, macroalgas y coralinas 2) No se identifica a un nivel taxonómico mayor	1) Punto de intercepción. 2) Cinco transectos de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto, 3) 600 puntos en total	
	Crecimiento de alga (altura)	1) No especifican los grupos de algas que se incluyen.		1) No menciona como debe ser la medición
Invertebrados móviles	Densidad	1) Erizos de mar del género <i>Diadema</i>	1) Transectos de banda. 2) Ocho transectos de 30 m x 1 m, 3) área total = 240 m ² , 4) el tiempo empleado debe ser de 30 m en 6-8 minutos	
Peces	Composición	1) A nivel de especie	1) Buzo errante (REEF), se registran los peces, en un diámetro de 200 m alrededor de los sitios de los demás transectos 2) duración 30 minutos, densidad total estimada con categorías logarítmicas	
	Diversidad			
	Densidad total			
	Densidad/biomasa de especies seleccionadas	1) Especies de catorce familias: pez cirujano (<i>Acanthuridae</i>) pez mariposa (<i>Chaetodontidae</i>), roncadores (<i>Haemulidae</i>), > 5 cm de longitud, pargos (<i>Lutjanidae</i>), pez ángel (<i>Pomacanthidae</i>), pez loro (<i>Scorpaenidae</i>) y cinco especies "misceláneas": pez perro español (<i>Bodianus rufus</i>), cojinúa carbonera (<i>Caranx ruber</i>), pez perro (<i>Lachnolaimus maximus</i>), pez damisela de cola amarilla (<i>Microspathodon chrysurus</i>) y barracuda (<i>Sphyrna barracuda</i>), 2) a nivel de especie	1) Transectos de banda. 2) Ocho transectos de 30 m x 1 m, 3) área total = 240 m ² , 4) el tiempo empleado debe ser de 30 m en 6-8 minutos. La densidad de reclutas sólo se mide en verano	
	Estructura de tamaño de especies seleccionadas	1) Mismas que para densidad 2) A nivel de especie, 3). seis clases de tamaño (>5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, >40)		
Densidad de reclutas de especies seleccionadas	1) Especies de seis familias: pez cirujano (<i>Acanthuridae</i>), pez parche (<i>Caetodontidae</i>), Loreto (<i>Grammatidae</i>), pez perro español y doncella (<i>Labridae</i>), cromidos y pez chopita (<i>Pomacentridae</i>) y pez loro (<i>Scaridae</i>), 2. a nivel de especie, 3. tamaño para considerarlos como reclutas de acuerdo a la familia, de los 3.5 a los 5.0 cm			
Otros	Cobertura de sustrato inerte	Roca o arena, o coral muerto		1) Punto de intercepción, 2) Cinco transectos de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto. 3) 600 puntos en total

Tabla 3 (Continuación)

Programa CARICOMP			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Composición	1) Escleractíneo, incluye género <i>Millepora</i> , 2) a nivel de especie, género o forma de crecimiento, 3) No incluye otras categorías dentro de cobertura	1) Transectos de cadena. 2) Diez transectos de 10 m
	Riqueza específica		
	Cobertura		
	Prevalencia de enfermedades	1) Escleractíneo incluye género <i>Millepora</i> 2) a nivel de especie, género o forma de crecimiento, 3) nueve categorías de enfermedades: banda negra, banda blanca tipo I y banda blanca tipo II, plaga blanca, macha amarilla, puntos negros I, puntos negros II (presente en acropóridos), banda roja, aspergilliosis (presente en gorgonias), otras, 4) no se especifica cómo debe ser la medición	1) Transectos de banda. 2) Diez transectos de 10 m x 2 m o nueve transectos de 20 m x 2 m. 3) área total = 200 m ² ó 360 m ²
	Prevalencia de blanqueamiento	1) Escleractíneo incluye género <i>Millepora</i> , nivel de especie, género o forma de crecimiento, 3) no se especifican categorías de grado de blanqueamiento, 4) no se especifica cómo debe ser la medición	
Otras lesiones de coral	1) Escleractíneo incluye género <i>Millepora</i> , 2) a nivel de especie, género o forma de crecimiento, 3) Tres categorías (por depredadores, anclas y sobrecrecimiento)		
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) A nivel de forma de crecimiento, género o especie	1) Transectos de cadena. 2) Diez transectos de 10 m
	Cobertura de esponjas	1) Incrustantes y erectas. 2) A nivel de forma de crecimiento	
	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Zoantidos, anémonas coralimorfos, 2. a nivel de especie, género o forma de crecimiento	
	Abundancia de octocorales	1) Gorgonias, 2) a nivel de forma de crecimiento, género o especie	1) Transectos de banda. 2) Diez transectos de 10 m x 2 m o nueve transectos de 20 m x 2 m 3) área total = 200 m ² ó 360 m ²
	Estructura de tamaño de octocorales con daño	1) Gorgonias, 2) a nivel de forma de crecimiento, género o especie 3) diámetro máximo y ancho	

Tabla 3. (Continuación)

Programa CARICOMP			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Otros invertebrados sésiles	Prevalencia de enfermedades de octocorales	2) A nivel de forma de crecimiento, género o especie, 3). nueve categorías de enfermedades (banda negra, plaga blanca, plaga blanca II, banda amarilla, círculos negros, I, círculos negros II, banda roja, aspergiolisis y otras), 4) No se especifica la superficie a medir	1) Transectos de banda. 2) Diez transectos de 10 m x 2 m o nueve transectos de 20 m x 2m 3) área total = 200 m ² ó 360 m ²
	Prevalencia de blanqueamiento de octocorales	1) Gorgonias, 2) A nivel de forma de crecimiento, género o especie, 3) no se especifican categorías, 4). no se especifica la superficie a medir	
	Prevalencia de otras lesiones de octocorales	1) Gorgonias, 2. A nivel de forma de crecimiento, género o especie, 3). tres categorías (por depredadores, anclas y sobrecrecimiento)	
Algas	Cobertura	1) Césped, camosas, calcáreas, incrustantes calcáreas, 2). a nivel de grupo funcional, género o especie	1) Transectos de cadena. 2) Diez transectos de 10 m
Invertebrados móviles	Densidad	1) Erizos de mar <i>Diadema antillarum</i>	1) Transectos de banda. 2) Cinco transectos de 10 m x 2 m, 3) área total = 100 m ²
	Estructura de tamaño		
Peces	Densidad total	1) A nivel de especie	1) Buzo errante (REEF), 2) con duración de 30 minutos
	Estructura de tamaño de todas las especies	1) Categoría de abundancia de Uno (1), pocos (2-10), muchos (11-100), abundantes (> 100).	
	Densidad de especies seleccionadas	1) Especies de ocho familias: pez cirujano (Acanthuridae), pez loro (Scaridae), roncadores (Haemulidae), pez mariposa (Chaetodontidae), pargos (Lutjanidae) y pez tigre (Blaisidae), y seis especies: pez damisela de cola amarilla (<i>Microspathodon chrysurus</i>), cojinúa carbonera (<i>Caranx ruber</i>), barracuda (<i>Sphyraena barracuda</i>), y pez perro (<i>Lachnolaimus maximus</i>), 2) A nivel de especie	1) Transectos de banda (Basado en método AGRRRA). 2) Cinco transectos de banda de 30 m x 2 m para los intervalos de profundidad de 2-6 m y 9-13 m y para cada sitio, 3) área total = 300 m ²
Otros	Cobertura de sustrato inerte	1) Roca, sedimento, grava, cantos, oquedades, grietas, coral muerto	1) Transectos de cadena. 2) Diez transectos de 10 m
	Complejidad topografica	1) Proporción de la longitud de la cadena utilizada y la longitud total de la cadena	1) Método de la cadena (Rogers et. al., 1982)

Tabla 3. (Continuación)

Guía de indicadores de HRI			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Cobertura	1) Escleractíneo, 2) No se especifica nivel taxonómico, 3. No se especifican otras categorías de cobertura	Transecto de línea o videotransecto, se recomienda protocolos de AGRRA y PMS SAM
	Riqueza específica	1) Escleractíneo	Transectos de banda
	Índice de equidad de Pílou		
	Índice de diversidad de Shannon		
	Estructura de tamaño	1) Escleractíneo, 2) No se especifica nivel taxonómico, 3) diámetro máximo, ancho perpendicular y altura 4) no se especifica como debe ser la medición	Se recomiendan métodos de AGRRA y PMS SAM
	Tasa de crecimiento de corales (Acumulación de carbonato/cm ²)	1) Escleractíneo de colonias individuales	a) Conteo de anillos de crecimiento y la distancia entre los anillos. b) Visualmente con marcas de referencia de colorantes c) Aproximaciones a partir de mediciones de volumen d) Métodos geoquímicos y de isótopos e) Cuadrantes permanentes como lo sugieren (Van Woesik et al., 2009)
	Prevalencia enfermedades	1) Escleractíneo, 2) puede ser a nivel de especie, 3) ocho categorías (banda negra, banda blanca, punto blanco, plaga blanca, banda roja, banda amarilla, punto negro y desconocidas), 4) no especifica medición de superficie	Se recomienda métodos de Protocolos AGRRA y PMS-SAM
	Prevalencia de blanqueamiento	1) Escleractíneo, 2) puede ser a nivel de especie, 3) no se especifican categorías de grado de blanqueamiento	
Densidad de reclutas	1) Escleractíneo, 2) no se especifica nivel taxonómico, 3) tamaño < 2cm,	a) Se recomienda el método de AGRRA, pueden usarse cuadrantes más grandes para alcanzar el área mínima recomendada por sitio	
		b) Método de placas de asentamiento	
Algas	Cobertura	1) Macroalgas	Se recomienda método de AGRRA
	Altura		En transecto de línea o videotransecto, de protocolos de AGRRA y PMS SAM

Tabla 3. (Continuación)

Guía de indicadores de HRI			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Peces	Densidad	1) Erizos de mar del género <i>Diadema</i>	Transectos de banda se recomiendan protocolos de AGRAA y PMS SAM
	Riqueza específica	1) Especialmente herbívoros y especies de interés comercial, o dentro de grupos funcionales	Buzo errante (REEF)
	Índice de Diversidad de Shannon		
	Densidad total	1) Especialmente herbívoros y especies de interés comercial, o dentro de grupos funcionales	Se recomiendan métodos de AGRRA y PMS-SAM. (Transectos de banda).
	Densidad/biomasa de especies seleccionadas		
	Estructura de tamaño de especies seleccionadas		
	Densidad de reclutas		
Tasa de mordidas de peces en algas	1) A nivel de especies o familias con relación a su modo de pastoreo: pez loro (<i>Scaridae</i>) raspadores, pez cirujano (<i>Acanthuridae</i>) y pez damisela amarillo (<i>Microspathodon Chrysurus</i>), navegadores; y otros peces damisela (<i>Pomacentridae</i>)	a) Visual: número de mordidas contadas en un periodo y área específicos, p. ej. en 5 min en un área de 1m ² b) Con muestras de algas que incluyan especies de macroalga. No completamente estandarizado	
Otros organismos	Abundancia de especies clave	1) Especies de todos los grupos de organismos del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) que se encuentren dentro de la lista roja de especies amenazadas de la International Union for Conservation of Nature (IUCN)	Manatíes: observaciones aéreas y directas. Tortugas marinas: se aproxima con la cantidad de nidos en las playas. Tiburones: medición en los periodos de agregación o con sistemas acústicos o satelitales.
Otros	Rugosidad		Se recomienda método de AGRRA
	Abundancia de bioerosionadores	1) Esponjas, gusanos y otros organismos, 2) no se especifica nivel taxonómico en escombros de coral o en coral vivo	No estandarizados
	Tasa de acreción del arrecife		a) Núcleos del sustrato arrecifal b) Estimaciones a partir de la producción primaria bruta
	Área de extensión del hábitat	1) Arrecifes de coral, manglar y pastos marinos	

Tabla 3. (Continuación)

Programa PIESACOM			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Cobertura	1) Escleractíneo 2) a nivel de especie, 3) no especifica otras categorías de cobertura	1) Video transecto (Garza-Pérez et al., 2011). 2) No se especifica el número de transectos de 50 m x 0.6 m. Cuarenta imágenes con 13 puntos de identificación, 3) un total de 520 por transecto
	Riqueza específica	1) Escleractíneo	
	Diversidad		
	Índice de equidad de Pírou		
	Densidad de colonias		
	Prevalencia de enfermedades	1) Escleractíneo, 2) a nivel de especie 3) once categorías (banda negra, banda roja, banda amarilla, infección ciliada, aspergilosis, manchas moradas, manchas negras, banda blanca, plaga blanca, parches blancos, síndrome blanco del Caribe), 4) no se especifica superficie a medir	
Prevalencia de blanqueamiento	1) Escleractíneo, 2) a nivel de especie, 3) tres categorías (parcial, pálido, blanqueado), 4) No se especifica superficie a medir		
Prevalencia de otras lesiones	1) Escleractíneo, 2) a nivel de especie, 3) seis categorías (mordidas de peces, jardines de damiselas, mordidas de gusanos fuego, poliquetos, competencia coralina, por esponjas incrustantes), 4) No se especifica superficie a medir		
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de Millepora	1) Especies comunes: <i>M. alcicornis</i> , y <i>M. complanata</i> , especie rara: <i>M. squarrosa</i> , y coral encaje <i>Stylaster roseus</i>	
	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) a nivel de forma de crecimiento	
	Cobertura de esponjas	1) Incrustantes, columna, tubo, vaso y semiesféricas. 2) A nivel de forma de crecimiento	
	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Zoántidos y tunicatos, 2) a nivel de grupo taxonómico	

Tabla 3. (Continuación)

Programa PESACOM			
Componente del ecosistema	Parámetros	Específicaciones	Detalle del método
Algas	Cobertura	1) Macroalgas pardas y verdes, calcáreas articuladas, calcáreas rojas, filamentosas, coralinas/incrustantes, 2) a nivel de grupo funcional	1) Método de la cadena, debajo del transecto de 50 m. Y se calcula como la relación inversa entre la longitud alcanzada por la cadena sobre el sustrato y la longitud de la cadena.
	Cobertura de pastos marinos	1. Arena, sedimento, pavimento calcáreo, pedacera/cascajo, y coral muerto reciente	
	Cobertura de sustrato inerte		
Otros	Protocolo de Monitoreo de Arrecifes Corales en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, en el Estado de Quintana Roo, CONANP		
	Cobertura	1) No se especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de especie 3) no se especifican otras categorías de cobertura	1) Punto de intersección. 2) No se especifica el número de transectos, de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto
	Riqueza específica	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de especie	
	Índices de diversidad de Shannon-Wiener		
	Índices de equidad de Pielou		
	Estructura de tamaño	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de especie, 3) y 4) diámetro máximo proyectado (áreas vivas + áreas muertas) a vista de plano, perpendicular al eje de crecimiento, y altura	
	Prevalencia de mortalidad	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de especie, 3) dos categorías (reciente y antigua) con porcentaje, 4) superficie visuales de arriba en vista "en plano"	No especifica un número de colonias, > 10 cm de diámetro, bajo transecto de 30 m
	Porcentaje de mortalidad parcial	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de especie, 3) ocho categorías (banda negra, plaga blanca tipo I y II, plaga blanca II, banda amarilla, círculos negros I, círculos negros II, banda roja y aspergiosis), 4) en toda la superficie de la colonia	
	Prevalencia de enfermedades	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) a nivel de género, 3) tres categorías (pálido, parcial y blanqueado), 4) en toda la superficie de la colonia	
	Prevalencia de blanqueamiento		
Densidad de reclutas	1) No especifica si solo escleractíneo, 2) A nivel de especie, 3) <4 cm de diámetro	1) Se recomienda método AGRA. Cuadrantes. 2) Treinta cuadrantes de 0.25 mx 25 cm en seis transectos de 10 m, colocados cada 2m. 3) Área total = 1.875 m ² . 4) Se registra también cobertura del sustrato	

Tabla 3. (Continuación)

Protocolo de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, en el Estado de Quintana Roo, CONANP			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor	1) Punto de intercepción. 2) No se especifica el número de transectos, de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto
	Cobertura de esponjas	1) No se identifica a un nivel taxonómico mayor	
Algas	Cobertura	1) Césped, macroalgas (incluyendo camosas) y coralinas, 2) no se identifica a un nivel taxonómico mayor	
Invertebrados móviles	Densidad	1) Equinodermos (crinoideos, erizos y pepinos)	Transectos de banda. No especifica número de transectos de 30 m x 1 m,
Peces	Densidad/biomasa de todas las especies	1) A nivel de especie	Transectos de banda. No especifica número de transectos de 30 m x 2 m
	Estructura de tamaño de todas las especies	1) A nivel de especie, 2) seis clases de tamaño (0-5, 6-10, 11-20, 21-30, 31-40 y >40)	
	Densidad de reclutas de todas las especies	1) A nivel de especie, 2) tamaño de < 5 cm	Transectos de banda. No especifica número de transectos de 30 m x 1 m,
Otros	Cobertura de sustrato inerte	Roca o arena, o coral muerto	1) Punto de intercepción. 2) No se especifica el número de transectos, de 30 m, medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto
Programa COBI-Alianza Kanan Kay			
Corales	Cobertura	1) Escleractíneo, y familia Milleporide, 2) a nivel de especie, 3) no se especifican otras categorías de cobertura	1) Punto de intercepción. 2) Seis transectos de 30 m medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto, 3) 720 puntos en total
	Riqueza específica	1) Escleractíneo y familia Milleporide \geq a 4 cm de diámetro, 2) a nivel de especie	
	Diversidad	1) Escleractíneo y familia Milleporide \geq a 4 cm de diámetro, 2. No se especifica el nivel taxonómico, 3) no especifica cuales dimensiones	
	Estructura de tamaño	1) Escleractíneo y familia Milleporide \geq a 4 cm de diámetro, 2. No se especifica el nivel taxonómico, 3) no especifica cuales dimensiones	1) Seis transectos de 30 m
	Prevalencia de mortalidad parcial	1) Escleractíneo y familia Milleporide, 2) a nivel de especie, 3) no se especifican categorías, 4) no se especifica la superficie a medir	
	Prevalencia de enfermedades	1) Escleractíneo y familia Milleporide, 2) a nivel de especie 3) Siete categorías de enfermedad (Banda negra, manchas oscuras, banda amarilla, plaga blanca, banda blanca, manchas blancas o necrosis, banda roja) 4) no se especifica la superficie a medir	

Tabla 3. (Continuación)

Programa COBI-Alianza Kanan Kay			
Componente del ecosistema	Parámetros	Especificaciones	Detalle del método
Corales	Densidad de reclutas	1) Escleractíneo, 2) a nivel de género o especie, pero no es requisito	1) Cuadrantes. 2) Seis cuadrantes de 25 cm x 25 cm, no se especifica el número de transectos de 30 m colocados cada 5 m
Otros invertebrados sésiles	Cobertura de octocorales	1) Gorgonias, 2) no se especifica nivel taxonómico	1) Punto de intercepción. 2) Seis transectos de 30 m medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto, 3) 720 puntos en total
	Cobertura de esponjas	1) Erectas e incrustantes 2) A nivel de forma de crecimiento	
	Cobertura de otros invertebrados sésiles	1) Zoántidos y tunicados	
Algas	Cobertura	1) Cianobacterias, carnosas, duras, rojas, incrustantes, filamentosas, 2) a nivel de grupo funcional	
Invertebrados móviles	Riqueza específica	1) Eerizo de espinas largas (<i>Diadema antillarum</i>), camarón boxeador, (<i>Stenopus hispidus</i>), langosta pinta (<i>Panulirus guttatus</i>) y especies de importancia comercial: pepinos de mar (Clase Holothuroidea), langosta espinosa (<i>Panulirus argus</i>), pulpo (género <i>Octopus</i>) y caracol rosado (<i>Strombus gigas</i>). Se incluye pez león (género <i>Pterois</i>)	1) Transectos de banda. 2) Diez transectos de 30 m x 2 m, 3) área total = 600 m ²
	Diversidad		
Peces	Riqueza específica	1). A nivel de especie,	1) Transectos de túnel de. 2) Diez transectos de 30 m x 2 m x 2 m, 3) área total = 600 m ² 4) seis a ocho minutos por transecto
	Densidad/biomasa total		
	Estructura de tamaño de todas las especies	1). A nivel de especie, 2) seis clases de tamaño (0-5, 6-10, 11-20, 21-30, 31-40, y > 40 cm	
Otros organismos	Cobertura de pastos marinos		1) Punto de intercepción. 2) Seis transectos de 30 m medición cada 25 cm, 120 puntos por transecto, 3) 720 puntos en total

En cuanto a la interpretación de los indicadores y los valores de referencia, se encontró que algunos programas como AGRRA indican el efecto de las interacciones entre los organismos medidos y los corales. El programa PIESACOM menciona cuáles parámetros deben presentar valores bajos, y cuales deben presentar valores altos para que se considere que el arrecife se encuentra en una buena condición, pero la guía de indicadores de HRI es la única que proporciona valores de referencia. En esta misma guía se aporta información acerca de los estresores que pueden ser causa de la variación, sin embargo, en muchos casos no es posible distinguir el proceso que causa la variación.

4. Marco conceptual de integridad ecológica de arrecifes de coral

4.1 Marco teórico: el concepto de integridad ecológica

Un marco conceptual se desarrolla con base en un conjunto de teorías y conceptos que se consideran relevantes para un problema de investigación. Dichas teorías y conceptos se relacionan y se delimitan en el marco conceptual (Kaine, 2016). En la evaluación de la condición de los ecosistemas, el marco conceptual permite la interpretación y el reporte de los indicadores (Bubb, et al. 2010). Para los propósitos de esta tesis se refiere como un marco conceptual, en adelante llamado marco de indicadores, a aquel que además de reunir el conjunto de teorías y conceptos relevantes para el ecosistema, incluye un conjunto de indicadores que permiten evaluar el estado del ecosistema.

El concepto de integridad, por su parte, hace referencia a que un sistema esté completo y sin alteraciones, por lo tanto, la integridad de un ecosistema implica que sus componentes bióticos y abióticos, así como sus interacciones se mantengan. La integridad ecológica es una medida de la composición, estructura y función de un ecosistema con referencia a un sistema natural, así como de las perturbaciones causadas por el hombre (Tiernity et al. 2009 citados por Brown y Williams, 2016). De acuerdo con Equihua et al. (2015), se refiere a la capacidad de auto-organización que induce expresiones específicas de la biodiversidad a partir de la biota presente localmente y acorde con las existencias de materia y energía. Cuando un ecosistema pierde integridad, tanto su composición, estructura y función se ven afectados (Faber-Langendoen et al. 2012). El monitoreo bajo el marco conceptual de integridad ecológica tiene como objetivo evaluar los cambios en

estos elementos, en comparación con los límites de referencia de un ecosistema natural y permite el desarrollo de una base científica y sintetizada para la toma de decisiones.

4.2 Métodos: Desarrollo del marco conceptual y clasificación de parámetros

En el desarrollo del marco de indicadores se clasificaron los parámetros dentro de una categoría determinando el uso que se le dará a cada parámetro. En este aspecto es importante señalar que un parámetro puede tener diferentes usos de acuerdo a los objetivos del usuario (Bubb, et al. 2010). El marco conceptual se basó en la propuesta de Equihua et al. (2014, 2015), además de conceptos de integridad ecológica y de ecología de arrecifes de coral. De acuerdo con Equihua et al. (2014, 2015) el marco de integridad evalúa tres elementos de los ecosistemas: composición, estructura y función. Estas definiciones fueron elaboradas a partir de (MRAG y UNEP, 2007; Dukoi, 2010; Michigan State University Extension, s.f.).

El término composición se refiere a la identidad y variedad de los componentes bióticos presentes en el ecosistema que le confieren características específicas de estructura y función. Los ecosistemas adyacentes interactúan entre sí, por lo que puede hablarse del tipo de ecosistemas que constituyen un paisaje.

La estructura del ecosistema está determinada por atributos que describen su distribución espacial y su configuración física, y puede extenderse a nivel del paisaje. Se distingue la estructura como un elemento fundamental de los ecosistemas (que no debe confundirse con la estructura de las comunidades biológicas), ya que la presencia de los componentes bióticos genera una configuración física distintiva en el ecosistema que influye en su funcionamiento.

El funcionamiento está dado por una compleja red de interacciones cuyos procesos determinan y relacionan entre sí a los atributos de composición y estructura del ecosistema. Dichas interacciones actúan en una escala del paisaje, conectando a los diferentes ecosistemas presentes.

Para identificar los atributos y procesos que dan lugar a la integridad ecológica de los arrecifes de coral, dentro del elemento de composición, se distinguieron los componentes bióticos a los que se les da mayor énfasis en el monitoreo (comunidades de corales, invertebrados sésiles, invertebrados móviles, peces y otros organismos); así como los

atributos (propiedades), que estos componentes bióticos generan. Como parte de la estructura, se distinguieron los atributos que dan lugar a la estructura física en los arrecifes de coral. Dentro del funcionamiento se incluyeron los procesos que pueden estudiarse de manera general en los ecosistemas, por ejemplo, las interacciones biológicas y las redes tróficas, y aquellos cuyo estudio es más específico a los arrecifes de coral, como la bioerosión y acreción del arrecife. Además, se tomó en cuenta que los atributos y procesos en un ecosistema se manifiestan en diferentes niveles de organización biológica (Noon et al, 1999 citado por Dale, 2001), por lo que fueron clasificados dentro de la siguiente jerarquía: nivel de población, comunidad, ecosistema y paisaje, como se muestra en la Figura 6. La distinción de dichos niveles permite dar una mejor interpretación de los indicadores.



Figura 6. Niveles de organización biológica en los que se manifiestan los atributos y procesos del ecosistema

Una vez desarrollado el marco conceptual, se clasificaron dentro de éste los parámetros identificados en la revisión bibliográfica. En primer lugar, se agruparon dentro de las categorías de composición, estructura y función, y en segundo lugar se relacionaron con los atributos y procesos que cada parámetro puede indicar de acuerdo con lo reportado por Back y Meesters (1998), Nughes y Roberts (2003), McField y Kramer (2007), Fisher et al. (2008), Lang et al. (2010), Morris (2012), Lirman et al. (2013), Graham y Nash (2013), Mumby et al. (2014) y Flower et al. (2017). Cabe señalar, que dentro de los

parámetros asociados a procesos pueden distinguirse aquellos que miden directamente el proceso, (i.e., tasas de crecimiento, tasas de mortalidad), y parámetros, que son indicativos del proceso de manera indirecta, (i.e., la densidad de peces herbívoros puede indicar la herbivoría de manera indirecta) (Anexo II).

4.3 Resultados: parámetros y su uso como indicadores en el marco de integridad ecológica

La integridad ecológica de los arrecifes de coral está constituida por diferentes atributos y procesos de composición, estructura y función. Debe notarse que estos toman relevancia en diferentes niveles de organización biológica (Figura 7, Tabla 4). Por ejemplo, la composición taxonómica definida por la identidad de especies de grupos clave se presenta a un nivel de ecosistema. Así mismo, la presencia de pastos marinos y manglares en un área estudiada determina el tipo de interacciones con los arrecifes de coral y la configuración de estos tres tipos de ecosistemas a un nivel de paisaje (Harbone et al. 2006). Dentro de la función, los procesos relevantes para cada nivel de organización biológica son diferentes. A escala poblacional, los procesos que determinan la densidad de las poblaciones son el crecimiento, el reclutamiento y la mortalidad. A escala comunitaria, las interacciones entre especies tienen un efecto mayor en el ecosistema. A escala del ecosistema arrecifal, los procesos de herbivoría, provisión de hábitat, bioerosión, acreción del arrecife, disponibilidad de nutrientes, y la ocurrencia de disturbios (naturales o antropogénicos), son relevantes. Como parte de los procesos del paisaje se presenta la conexión entre los ecosistemas.

4.3.1 Parámetros de composición

Dentro de la composición del ecosistema se clasificaron diez parámetros, dentro del atributo de composición taxonómica, se clasificaron los parámetros que miden la composición de los diferentes organismos del arrecife, ya sea a nivel de género, especie o grupo taxonómico. Estos incluyen la composición de especies y los indicadores de diversidad (riqueza de especies, diversidad, equidad y dominancia). En la mayoría de los programas de monitoreo revisados no se menciona explícitamente si estos parámetros son considerados en la evaluación del estado del arrecife. Los programas que sí los incluyen, los miden para los corales y peces a nivel de especie (Tabla 3).

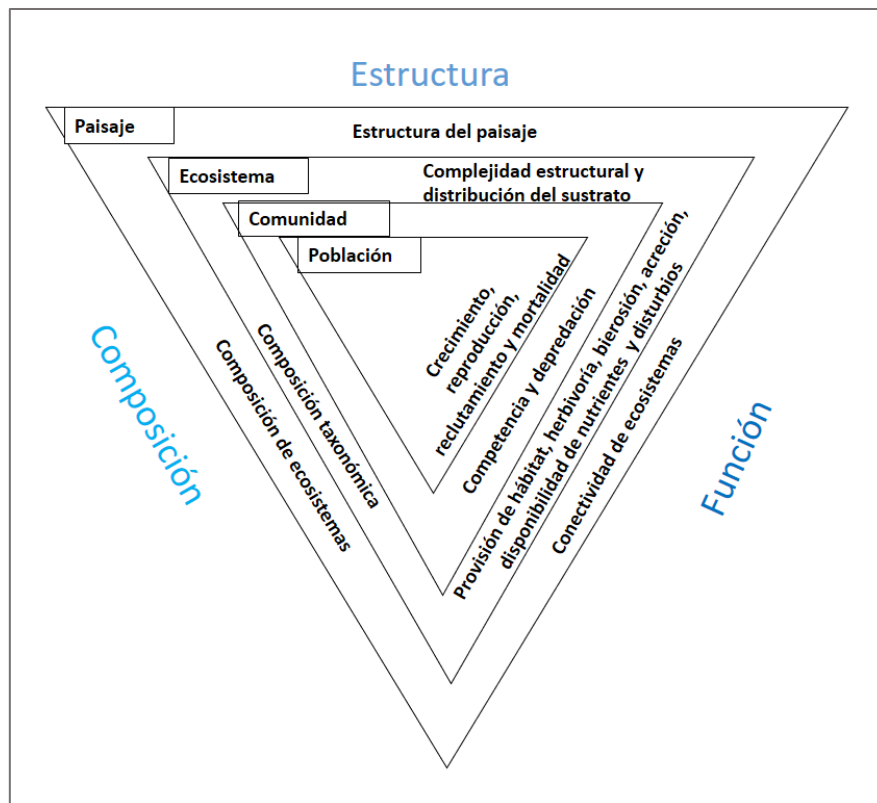


Figura 7. Marco conceptual de integridad ecológica de arrecifes de coral. A partir de Dale y Polasky (2007). Para los elementos de composición, estructura y función, se muestran los atributos y procesos identificados. El nivel de organización biológica de los atributos y procesos se incrementa de menor a mayor jerarquía del triángulo interno al triángulo externo.

4.3.2 Parámetros de estructura

Dentro la estructura se identificaron 15 parámetros. Para el atributo de distribución del sustrato se clasificaron los parámetros que miden la cobertura de los componentes bióticos (organismos de la comunidad bentónica) y abióticos (categorías de sustrato inerte). Dentro de la complejidad estructural se identificaron dos parámetros cuantitativos: la máxima elevación del arrecife y la complejidad topográfica, y la rugosidad cualitativa, la cual es una estimación visual. Para la estructura del paisaje solo se clasificó el parámetro de área de extensión del hábitat, considerado por la iniciativa HRI.

4.3.3 Parámetros de función

Dentro de la función se clasificaron 37 parámetros. Para los procesos a nivel de población, se clasificaron parámetros como estructura de tallas de corales, peces, y de otros invertebrados sésiles y móviles. Para el crecimiento de los corales se clasificó el

parámetro de tasa de crecimiento. El reclutamiento de los corales, de peces y de otros invertebrados móviles se mide mediante la densidad de reclutas, el cual es una medición indirecta del mismo. La provisión de hábitat en el arrecife se puede aproximar a través de la diversidad funcional mediada como el número de grupos morfo-funcionales (Díaz-Pérez et al. 2016). Ciertos grupos morfo-funcionales aportan a la complejidad estructural del arrecife y proveen hábitat para peces e invertebrados (Álvarez-Filip et al. 2009). La herbivoría puede aproximarse de manera indirecta a través de la densidad de peces herbívoros y la altura de algas filamentosas y macroalgas. Para la disponibilidad de nutrientes se puede utilizar diferentes parámetros como la altura de macroalgas, la abundancia de octocorales y abundancia de esponjas, los cuales son mediciones indirectas. Disturbios como la ocurrencia de enfermedades y blanqueamiento se miden a través de la prevalencia y porcentaje de la colonia afectada por cada uno de estos procesos. Dichos parámetros se consideraron mediciones directas. Para la conectividad (entre arrecifes, pastos marinos o manglares) no se clasificó ningún parámetro. Cabe señalar, que algunos programas como PMS-SAM y CARICOMP incluyen muestreos en pastos marinos y manglares, sin embargo, en ellos no se establece pautas para relacionar los parámetros con la condición de los arrecifes de coral. La función del ecosistema tuvo un mayor número de parámetros clasificados (Figura 8). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que un mismo parámetro puede tener diferentes significados en el sistema que se analiza y por tanto puede ser considerado más de una vez, tal es el caso de la densidad de erizos de mar, el cual es considerado para indicar la herbivoría y bioerosión.

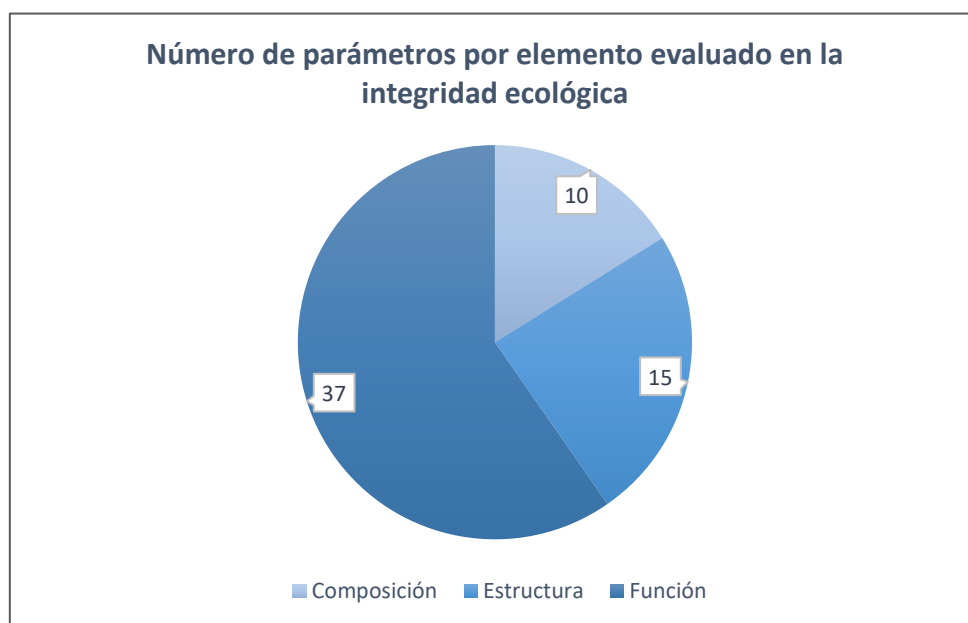


Figura 8. Número de parámetros clasificados por elemento de integridad ecológica

Tabla 4. Atributos y procesos que dan lugar a la integridad ecológica de los arrecifes de coral

Composición		
Atributo o proceso	Nivel de organización biológica	Definición
Composición taxonómica	Ecosistema	Identidad de los componentes bióticos presentes en el ecosistema en diferentes niveles taxonómicos (género, especie o grupos taxonómicos). Se considera la identidad de especies o taxones clave cuya pérdida puede causar cambios masivos en la estructura o en procesos del ecosistema (Léveque, 2003), especies bajo alguna categoría de riesgo y especies invasoras. Expresa la variedad de organismos que componen el ecosistema
Composición del paisaje	Paisaje	Tipos de ecosistemas y sus hábitats, que interaccionan a una escala de paisaje
Estructura		
Distribución del sustrato	Ecosistema	Forma en que se encuentran distribuidos los diferentes componentes del sustrato
Complejidad estructural	Ecosistema	Estructura tridimensional del ecosistema determinada en gran medida por los corales. (Ferrari et al. 2016)
Estructura del paisaje	Paisaje	Forma en que se encuentran distribuidos los arrecifes de coral y ecosistemas asociados, como los pastos marinos y los manglares en el paisaje
Función		
Crecimiento	Población	Son procesos que influyen en la densidad de las poblaciones de los organismos marinos (Chadwick y Morrow, 2011)
Reproducción	Población	
Reclutamiento	Población	
Mortalidad	Población	
Competencia	Comunidad	Es un proceso de interacción entre especies que controla la organización de las comunidades. Puede afectar el crecimiento y la reproducción de una de las especies en competencia (Léveque, 2003)
Depredación	Comunidad	Es un proceso de interacción entre especies que controla la organización de las comunidades. Puede ser un factor limitante para las poblaciones de las presas, o permitir la coexistencia de un cierto número de especies (Paine, 1996)

Tabla 4. (Continuación)

		Función
Atributo o proceso	Nivel de organización biológica	Definición
Herbívoria	Ecosistema	Es el proceso mediante el cual, la materia y energía de los productores primarios (las algas), es consumida por peces y otros herbívoros y es transportada a niveles tróficos mayores
Provisión de hábitat	Ecosistema	Los ecosistemas proveen las condiciones necesarias de los nichos ecológicos de los organismos. Los arrecifes de coral proveen hábitat a una gran variedad de organismos como algas, peces e invertebrados
Bioerosión	Ecosistema	La bioerosión es un proceso biológico, cuyos efectos se suman a la erosión física y la disolución química. Implica la remoción de sustrato por medio de organismos dentro de los cuales se encuentran equinodermos, algunos peces y esponjas (Perry et al. 2012)
Acreción	Ecosistema	La acreción biológica es un proceso constructivo mediado principalmente por corales y algas coralinas, que junto con la litificación fisicoquímica permite la acumulación de carbonatos (Perry et al. 2012)
Disponibilidad de nutrientes	Ecosistema	El reciclaje de nutrientes es el proceso que permiten el movimiento de nutrientes dentro del ecosistema y determina su disponibilidad (EPA, 1999). El aporte de nutrientes al arrecife se da de manera natural por escorrentía terrestre y puede ser alterado por actividades humanas como el desarrollo costero y la agricultura (Gil et al. 2015).
Disturbios	Ecosistema	Los disturbios son eventos discretos en el tiempo, fuera de rangos predecibles, que causan cambios en el ecosistema. En los arrecifes de coral, entre los disturbios físicos se encuentran los huracanes, dentro de los disturbios biológicos el blanqueamiento y la infección y dentro de los disturbios antropogénicos la explotación de recursos.
Conexión de ecosistemas	Paisaje	Los procesos ecológicos conectan a los ecosistemas que forman un paisaje. Los arrecifes de coral de una región se conectan a través del transporte de larvas (Hughes y Tanner 2000), y se conectan con manglares y pastos marinos través de flujos de materia orgánica, movimientos de organismos que utilizan a estos ecosistemas como hábitat en alguna etapa de su ciclo de vida, y por conexiones tróficas (Harborne et al. 2006).

5 Evaluación y selección de parámetros como indicadores de integridad ecológica

5.1 Marco teórico: características deseables de un indicador

El monitoreo de los arrecifes de coral ha sido una tarea costosa y requiere de una inversión considerable de tiempo, por lo que Galvis (2001) sugiere que las propuestas de monitoreo estén basadas en criterios de costo-eficiencia, y que estos sean utilizados como criterios para la selección de indicadores. Los criterios de costo-eficiencia toman en cuenta las características que permiten que un indicador sea útil para evaluar la condición del ecosistema y el costo correspondiente a su medición. Se han sugerido diversas características deseables para un indicador, algunas de las mencionadas por Jameson et al. (2001), Galvis (2001), Dale y Beyeler (2001) y Johnson et al. (2013) son las siguientes: sensibilidad a estresores, tiempo corto de respuesta a los estresores, facilidad de interpretación y comunicación del indicador, relevancia ecológica, así como la inversión de tiempo y económica. Además, Dale y Beyeler (2001) y Jones et al. (2011) resaltan la necesidad de establecer objetivos de monitoreo claros y definir cuales características son deseables para un indicador bajo estos objetivos. La relación costo-eficiencia de un indicador debe considerar el balance entre las características deseables del indicador y la inversión de recursos. Dentro de este balance Jones et al. (2011), sugieren comparar el costo de la medición de un indicador contra el valor esperado de la información que el indicador puede proveer.

5.2 Métodos: evaluación de la relevancia ecológica de los parámetros

En el proceso de selección de parámetros, es de gran importancia, que se sigan métodos reproducibles, que eviten sesgos y que los criterios sean establecidos claramente, para que los parámetros seleccionados sean de utilidad en el monitoreo y en las actividades de manejo de los ecosistemas (Slocombe, 1998; Belnap, 1998 citados por Dale y Beyeler, 2001). El criterio utilizado para evaluar los parámetros fue la relevancia ecológica, es decir, su relevancia para evaluar la integridad ecológica. Bajo este criterio, se definieron los indicadores con mayor prioridad de uso, ya que como lo sugieren Jameson et al. (2001) y Mumby et al. (2014), no es necesario medir todos los atributos o procesos para evaluar la condición del ecosistema. La relevancia ecológica se definió considerando las características mostradas en la Tabla 5, las cuales son: la importancia del atributo o proceso que mide el parámetro y la relación del parámetro con estresores. Se dio énfasis en los parámetros de organismos que contribuyen en mayor medida a cada atributo o

proceso. Por ello, dentro de los procesos que constituyen la función del ecosistema se dio prioridad a los parámetros que miden, el reclutamiento y la mortalidad de los corales, ya que estos influyen en la recuperación de un arrecife que ha tenido un cambio de un estado dominado por corales a un estado dominado por algas (Huges y Tanner, 2000). Además, se consideró el trabajo de McClahnahan et al. (2012), en el cual se estudió la relevancia de ciertos atributos y procesos para la resiliencia del arrecife de acuerdo con 28 científicos y la evidencia empírica de dicha relación con la resiliencia de los arrecifes de coral. Finalmente, se tomaron en cuenta consideraciones prácticas relacionadas con la interpretación de los parámetros cuando se tenía información disponible. De esta forma, se obtuvo una prioridad de uso como indicador para cada parámetro considerada como alta baja o media; de los cuales se seleccionaron los parámetros con calificación alta.

Tabla 5. Relevancia ecológica de los parámetros y prioridad de uso como indicador.

Composición: Composición taxonómica			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Composición de especies de coral	De acuerdo con McClanahan et al. (2012), la diversidad de corales es uno de los atributos clave del arrecife. Algunas especies clave de coral permiten el desarrollo de la complejidad estructural (Álvarez-Filip, et al. 2011). Se ha considerado que, para un ecosistema dado, una disminución en la diversidad puede implicar un deterioro en el ecosistema (McField y Kramer, 2007)	La composición y riqueza de especies puede obtener fácilmente de los datos de cobertura medidos en transectos, pero se requiere de un área de muestreo mayor para representar la diversidad del sitio (McField y Kramer, 2007). Permite calcular otras medidas de la diversidad e índices de Shannon o la diversidad funcional.	Media
Riqueza específica de coral			Media
Índice de diversidad de Shannon de coral		Los índices de diversidad como el índice de Shannon combinan la riqueza y abundancia de especies, la cual varía ampliamente (Jameson et al. 2001)	Alta
Índice de equidad de Pielou de coral		No es capaz de detectar el reemplazo de especies (McField y Kramer, 2007)	Baja
Composición de especies de peces	La diversidad de peces mediada como la riqueza, índices de diversidad permite evaluar la condición del arrecife, pero debe ser complementado con otros parámetros (McField y Kramer, 2007). Una pérdida en la riqueza de especies de peces, puede estar relacionada con una pérdida de hábitat (Mumby et al. 2014).	Permite calcular otras medidas de diversidad como los índices de Shannon o la diversidad funcional.	Media
Riqueza específica de peces			Media
Índice de diversidad de Shannon de peces		Los índices de diversidad combinan la riqueza y abundancia de especies, la cual varía ampliamente (Jameson et al. 2001).	Alta
Riqueza específica de invertebrados móviles	Algunos de estos organismos son bioerosionadores y otras especies son de interés comercial. Sin embargo, la relación con la diversidad de estos organismos y la condición del ecosistema es limitada.	La medición de estos parámetros implica un muestreo adicional con transectos de banda, lo cual implica una inversión económica y de tiempo adicional.	Baja
Diversidad de invertebrados móviles			Baja
Abundancia de especies clave (tortugas marinas, manatíes etc.)	Puede dar indicios de la condición de otros organismos que dependen de estas especies, de la pérdida de biodiversidad del ecosistema, y de la integridad de los hábitats de los que dependen estas especies (McField y Kramer, 2007).	El monitoreo de algunas especies es costoso (McField y Kramer, 2007).	Media

Tabla 5. (Continuación)

Estructura: Distribución del sustrato			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Cobertura de coral a nivel de forma de crecimiento	La distribución del sustrato influye en el crecimiento y reclutamiento de los corales (Mumby et al. 2014), así como en la construcción del arrecife. La cobertura de coral está relacionada con diversos procesos del ecosistema como competencia de los organismos bentónicos, la herbivoría, y la mortalidad y reproducción de los corales (McField y Kramer 2007).	Puede proveer información adicional, ya que los corales presentan respuestas diferenciales a los estresores por forma de crecimiento (Mumby et al. 2014)	Media
Cobertura de coral a nivel de género o especie		Permite obtener información de niveles taxonómicos inferiores, pueden obtenerse la composición y riqueza de especies a partir de estos datos.	Media
Cobertura de coral sin nivel de identificación		Es el indicador más utilizado y es fácil de comunicar (Hill y Wilkinson, 2004; McField y Kramer, 2007)	Alta
Cobertura de <i>Millepora</i>	Estos organismos aportan a la estructura del arrecife; sin embargo, debido a su baja cobertura, su contribución es baja		Media
Cobertura de octocorales	Los octocorales son abundantes en regiones de baja cobertura de escleractíneos en el Caribe mexicano (Jordán- Dahlgren, 1989). Además, se ha relacionado con la calidad de agua (Fabricious et al. 2012); sin embargo, otros factores naturales pueden influir en este parámetro.		Alta
Cobertura de esponjas	Estos organismos aportan a la estructura del arrecife; sin embargo, su contribución es baja.		Media
Cobertura de otros invertebrados sésiles (zoántidos, tunicados etc.)	De acuerdo con Lam et al. (2017), se ha optado por omitir estos organismos en el monitoreo. Además, estudios como Rodríguez-Martínez et al. (2011) muestran que en el Caribe mexicano la competencia de invertebrados como los tunicados y los corales es baja.		Baja

Tabla 5. (Continuación)

Estructura: Distribución del sustrato			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Cobertura de algas por grupo funcional	Un sustrato cubierto con algas filamentosas y macroalgas impide el reclutamiento; mientras que un sustrato cubierto con algas rojas incrustantes puede propiciarlo. Un incremento crónico en algas filamentosas puede relacionarse a la sobreexplotación de peces herbívoros, o a un incremento de nutrientes. La disminución de algas rojas incrustantes puede indicar un incremento de algas filamentosas y de la sedimentación (Mumby et al. 2014)		Alta
Cobertura de macroalgas por especie	Provee información adicional para entender la dinámica de los cambios de cobertura de macroalgas (Mumby et al. 2014).	La interpretación de los cambios en la cobertura de algunas especies (aquellas que presentan variaciones estacionales o se ven influenciadas por diversos factores) es difícil (Mumby et al. 2014). Requiere de mayor experiencia para la identificación de las especies.	Baja
Cobertura de pastos marinos	En las lagunas de los arrecifes del Caribe mexicano pueden encontrarse praderas de pastos marinos (Jordán-Dahlgren, 1993), las cuales evitan la erosión de las costas y forman hábitats para invertebrados y peces (Randall, 1965). El enriquecimiento de nutrientes puede reflejarse en cambios en la extensión de las praderas de pastos marinos.	La cobertura de pastos marinos puede medirse para monitorear cambios en la disponibilidad de nutrientes; pero otros parámetros como densidad o biomasa en relación con cambios en las algas pueden ser indicadores más útiles, (Enríquez, y Pantoja-Reyes, 2005, van Tussenbroek, 2011)	Media
Cobertura de sustrato inerte	Algunos autores consideran que no es necesario medir la cobertura de arena y sedimento, ya que no es un sustrato disponible para el asentamiento de corales. Sin embargo, si se encuentra un incremento de arena puede deberse al impacto de un huracán (Mumby et al. 2014).		Baja

Tabla 5. (Continuación)

Estructura: Complejidad estructural			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Índice de complejidad topográfica	La complejidad estructural permite la creación de micro hábitats para una gran variedad de organismos (Graham y Nash, 2012; Álvarez-Filip, 2009). Influye en los cambios de fase de un estado dominado por corales a un estado dominado por algas (Ferrari et al. 2016).		Alta
Rugosidad cualitativa		Esta estimación visual aporta información limitada acerca de la complejidad estructural	Baja
Máxima elevación del arrecife		No permite capturar nivel de detalle de complejidad estructural en escala de microhábitat (McField y Kramer, 2007).	Baja
Estructura: estructura del paisaje			
Área de extensión de hábitats	La configuración de los hábitats afecta la riqueza y densidad de peces (McCook, et al 2009).	Cuando se cuenta con datos históricos, puede indicar cuánto hábitat está disponible y cuánto se ha perdido. Para conocer la causa de pérdida de hábitat deben considerarse otros indicadores (McField y Kramer, 2007)	Alta
Función: reproducción, crecimiento reclutamiento y mortalidad			
Densidad de colonias de coral	Este parámetro puede indicar el potencial de reproducción y crecimiento de los corales (Fisher et al. 2008). Se ha asociado un alto número de colonias con una buena condición del ecosistema; pero esta relación no siempre se cumple y otros parámetros deben ser tomados en cuenta (Nughes y Roberts, 2003).	Este parámetro puede utilizarse en evaluaciones que consideran las poblaciones de corales, por ejemplo, evaluaciones de enfermedades de coral (Weil et al. 2008). Se utiliza para calcular la prevalencia de mortalidad, de enfermedades y de blanqueamiento.	Baja
Tasa de crecimiento de coral	De acuerdo al estudio de McClanahan et al. (2012), la evidencia empírica entre la relación de este parámetro con la recuperación de un arrecife es limitada.	Es un parámetro que ha sido poco medido por los programas de monitoreo (Tabla del Anexo I) y diferentes métodos pueden ser utilizados (van Woesik et al. 2009; Hill y Wilkinson 2004) por lo que falta desarrollar este indicador.	Media

Tabla 5. (Continuación)

Función: reproducción, crecimiento reclutamiento y mortalidad			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Estructura de tallas de coral	Además de proporcionar información de la distribución de edades en las poblaciones de corales y de su potencial de reproducción (Fisher et. al. 2008), puede relacionarse con disturbios como eventos repetidos de blanqueamiento, cambiando a colonias menor tamaño (Done, 1999).	Puede utilizarse como un indicador complementario a las evaluaciones de blanqueamiento y enfermedades de los corales (Weil et al. 2008)	Media
Estructura de tallas de octocorales	Es un parámetro que aporta información sobre su potencial de reproducción y puede ser útil para interpretar cambios en la abundancia de octocorales; sin embargo, su relación con la condición del ecosistema es limitada.		Baja
Estructura de tallas de erizo de mar (<i>Diadema antillarum</i>)	Es un parámetro que puede utilizarse para monitorear la recuperación de las poblaciones de este erizo de mar.	Requiere un muestreo adicional.	Baja
Estructura de tallas de peces de especies seleccionadas	Permiten entender la dinámica de las poblaciones de peces. Existe una relación entre el tamaño de peces y el potencial de producción de huevos. Al remover a los peces de tamaño grande el reclutamiento se ve afectado (McField y Kramer, 2007). Puede relacionarse con la sobreexplotación pesquera y la destrucción del hábitat (McField y Kramer, 2007)	Con este parámetro se puede obtener la biomasa. La medición de una lista de especies seleccionadas disminuye el tiempo requerido y el nivel de experiencia en la identificación	Media
Estructura de tallas de peces de todas las especies			Baja
Densidad de reclutas de coral	El reclutamiento de corales es uno de los procesos que posibilitan la recuperación de un arrecife (McClanahan et al. 2012). Es sensible a varias condiciones de estrés como la mortalidad, las enfermedades, el blanqueamiento y contaminación. Las tasas de reclutamiento varían por la condición del hábitat y la conexión con la fuente de larvas.		Alta

Tabla 5. (Continuación)

Función: reproducción, crecimiento reclutamiento y mortalidad			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Densidad de reclutas de erizos de mar (<i>Diadema antillarum</i>)	Es un parámetro que puede utilizarse para monitorear la recuperación de las poblaciones de este erizo de mar.	Requiere un muestreo adicional.	Baja
Densidad de reclutas de peces de especies seleccionadas	Provee información acerca de las poblaciones de peces arrecifales, información de especial interés de las especies comerciales. Además, puede relacionarse con la conectividad de las poblaciones y el estado de las zonas de crianza de las larvas (McField y Kramer, 2007).	Se requiere un alto nivel de experiencia para identificar los reclutas de especies de peces (McField y Kramer, 2007)	Media
Prevalencia de mortalidad de coral	Altos niveles de mortalidad pueden dar lugar a una reducción del tamaño de la colonia y de la reproducción, e incrementar la susceptibilidad a enfermedades (McField y Kramer, 2007).		Alta
Porcentaje de mortalidad parcial de coral	La mortalidad reciente puede utilizarse para distinguir efectos temporales sobre efectos letales consecuencia de disturbios como el blanqueamiento. La mortalidad antigua integra los eventos de disturbio crónicos y agudos, y la condición de muerto en pie se relaciona con la historia y distribución de la mortalidad (McField y Kramer, 2007)	La medición requiere de experiencia para estimar de manera precisa el área de la colonia con mortalidad (Lirman et al. 2014)	Media
Prevalencia de mortalidad de otros invertebrados sésiles	Es un parámetro que aporta información sobre eventos de disturbio que han afectado a los octocorales y puede ser útil para interpretar cambios en la abundancia de octocorales; sin embargo, su relación con la condición del ecosistema es limitada.		Baja

Tabla 5. (Continuación)

Función: depredación y competencia			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Prevalencia de otras lesiones de coral	Es un parámetro que aporta información acerca de los cambios en la competencia entre los corales y otros organismos bentónicos, puede ser útil para interpretar los cambios en la abundancia de los corales.		Media
Prevalencia de otras lesiones de otros invertebrados sésiles	Es un parámetro que aporta información sobre cambios en la competencia entre los octocorales y otros organismos bentónicos y puede ser útil para interpretar cambios en la abundancia de octocorales; sin embargo, su relación con la condición del ecosistema es limitada.		Baja
Densidad de pez león	El pez león es una especie invasora en el Caribe, es un competidor importante que puede afectar a especies de interés comercial y un depredador con el potencial de disminuir el rol funcional de los herbívoros (Morris, 2012).		Media
Función: Herbivoría			
Altura de algas (macroalgas y algas filamentosas)	La herbivoría es un proceso clave en la transferencia de energía en la red trófica, además, influye en la competencia entre corales y algas. Un incremento en la altura de las macroalgas puede implicar una disminución en el reclutamiento de corales (Mumby et al. 2014). Cuando se da un cambio de fase dominado por macroalgas se ven afectados la estructura y funcionamiento del arrecife (Flower et al. 2017).	Presenta una respuesta rápida a los cambios en la herbivoría. Es una medición fácil y con poca inversión de tiempo (Flower et al. 2017).	Alta
Densidad de erizos de mar (<i>Diadema antillarum</i>)	El erizo de mar <i>Diadema antillarum</i> era un herbívoro importante antes del evento de mortalidad de 1983. Aunque en algunas localidades se han recuperado sus poblaciones, las densidades son bajas con respecto a los niveles anteriores al evento de mortalidad (Bodmer et al. 2015).	Requiere un muestreo adicional.	Media

Tabla 5. (Continuación)

Función: Herbivoría			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Diversidad funcional de peces	Mantener la diversidad de peces, especialmente dentro de grupos funcionales, permite que los procesos se sigan llevando a cabo; aun cuando especies clave hayan disminuido. (McField y Kramer, 2007).		Alta
Densidad o biomasa de especies seleccionadas (herbívoros)	La biomasa de especies seleccionadas según su grupo funcional provee información sobre la sobreexplotación pesquera y sus posibles efectos en funciones como la herbivoría (Mumby et al. 2014). Los peces loro son los principales consumidores de algas en el Caribe (Mumby et al. 2016).	La inversión de tiempo es moderada, similar al requerido para la cobertura bentónica (McField y Kramer, 2007)	Alta
Tasa de mordidas de peces en algas	Constituye una medición directa e independiente de la herbivoría que permite observar el efecto en la composición de algas (van Woesik et al. 2009)	Si bien, este parámetro presenta un potencial como indicador de herbivoría, ha sido poco utilizado por los programas de monitoreo (Tabla del Anexo I) y debe ser más desarrollado (McField y Kramer, 2007)	Baja
Función: provisión del hábitat			
Diversidad funcional de corales (número de grupos morfo-funcionales)	Especies de grupos ramificados como <i>Acropora palmata</i> y masivos como <i>Orbicellæ sp.</i> dan lugar a la complejidad estructural y proveen hábitat (Barranco et al. 2016)		Alta
Función: bioerosión y acreción			
Densidad de invertebrados móviles (erizos de mar <i>Diadema antillarum</i> y otras especies)	La bioerosión es un proceso que influye en la construcción de la estructura arrecifal (Perry et al. 2011); sin embargo, de acuerdo al estudio de McClanahan et al. (2012) la evidencia empírica que relaciona este proceso con la recuperación de un arrecife es limitada.	El uso de estos parámetros para monitorear la bioerosión se encuentra en desarrollo y ha sido poco integrado en los programas de monitoreo (Tabla del Anexo I). Una aproximación puede consultarse en Perry et al. (2011).	Media
Abundancia de bioerosionadores (esponjas, gusanos y otros)			Media

Tabla 5. (Continuación)

Función: bioerosión y acreción			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Tasa de acreción del arrecife	La acreción es un proceso que influye en la construcción de la estructura arrecifal (Perry et al. 2011)	El uso de este parámetro como indicador se encuentra en desarrollo (McField y Kramer, 2007) y ha sido poco integrado en los programas de monitoreo (Tabla 1 del Anexo 1).	Media
Función: disponibilidad de nutrientes			
Abundancia de octocorales	La disponibilidad de nutrientes influye en procesos de la red trófica, en el crecimiento, la reproducción y mortalidad de los corales (Thurber et al. 2014), en la abundancia de macroalgas y algas césped, y octocorales (Fabricius, 2005).	Se ha incluido este parámetro como un indicador de la disponibilidad de nutrientes (Mumby et al. 2014); sin embargo, estudios como Cooper et al. (2009); Fabricius et al. (2012) proponen otros parámetros de corales, macroalgas y foraminíferos como indicadores de mayor prioridad	Media
Altura de algas (macroalgas y o algas césped)		Presenta una respuesta rápida a los cambios en la disponibilidad de nutrientes. Es una medición fácil y con poca inversión de tiempo (Flower et al. 2017).	Alta
Función: Disturbios (infección y blanqueamiento)			
Prevalencia de enfermedades de coral	Las infecciones con enfermedades causadas por agentes biológicos alteran el crecimiento y la reproducción de los corales (Raymundo et al. 2008). Los incrementos en la prevalencia de enfermedades se han relacionado con cambios en la sedimentación y exceso de nutrientes (Vega et al. 2014), entre otros factores.	La prevalencia posee un valor limitado para su uso en el monitoreo, ya que representa una medición puntual en el tiempo (Flower et al. 2017).	Media
Porcentaje de la colonia de coral afectada con enfermedades		Provee información adicional sobre la infección, sin embargo, su medición requiere de mayor experiencia	Media
Incidencia de enfermedades de coral		La incidencia representa un parámetro con mayor valor para el monitoreo debido a que proporciona información acerca de los casos nuevos de infección (Flower et al. 2017)	Alta

Tabla 5. (Continuación)

Función: Disturbios (infección y blanqueamiento)			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Prevalencia de blanqueamiento de coral	El blanqueamiento afecta el potencial reproductivo de los corales y puede causar su mortalidad. Los incrementos globales de temperatura pueden causar eventos de blanqueamiento y mortalidad masivos (Santavy et al. 2005). Se ha tomado mayor énfasis en el monitoreo del blanqueamiento debido a que la intensidad y la frecuencia de estos eventos ha aumentado.	La prevalencia posee un valor limitado para su uso en el monitoreo, ya que representa una medición puntual en el tiempo (Flower et al. 2017).	Media
Porcentaje de la colonia de coral afectada con blanqueamiento		Provee información adicional sobre la infección, sin embargo, su medición requiere de mayor experiencia	Baja
Incidencia de blanqueamiento en coral		La incidencia representa un parámetro con mayor valor para el monitoreo debido a que proporciona información acerca de los casos nuevos de blanqueamiento (Flower et al. 2017)	Alta
Número de parches aislados de tejido suave de coral	Asociado con procesos de disturbio, el valor de este indicador se incrementa con eventos de mortalidad, enfermedades o blanqueamientos masivos (Lang et al. 2010).	La identificación de los parches puede dificultarse si ha habido sobrecrecimiento de algas u otros organismos en la periferia de los parches (Lang et al. 2010).	Baja
Prevalencia de enfermedades de otros invertebrados sésiles	Algunos invertebrados sésiles, específicamente los octocorales, pueden presentar enfermedades como la Aspergiolisis y la enfermedad de banda roja (CARICOMP, 2001); sin embargo, la relación de este parámetro con la condición del ecosistema es limitada.		Baja
Prevalencia de blanqueamiento de otros invertebrados sésiles	Es un parámetro que aporta información acerca de los efectos del blanqueamiento en otros invertebrados sésiles y puede utilizarse para interpretar los cambios en su abundancia; sin embargo, la relación de este parámetro con la condición del ecosistema es limitada.		Baja
Prevalencia de enfermedades de algas coralinas	Enfermedades no representativas en el Caribe (Flower et al. 2017)		Baja

Tabla 5. (Continuación)

Función: Disturbios (explotación de recursos)			
Parámetros	Relevancia ecológica: ¿Cuál es la importancia del atributo o proceso que mide? ¿Puede relacionarse con estresores?	Consideraciones prácticas relacionadas a a) facilidad de interpretación, b) los costos y c) tiempo	Prioridad de uso como indicador
Densidad de invertebrados móviles de interés comercial (langosta espinosa, caracol rosado, camarones y pepinos de mar)	Estos organismos representan los principales recursos pesqueros en el Caribe mexicano (Sosa-Cordero y Ramírez-González, 2011); sin embargo, medir la explotación de peces puede considerarse más relevante para la integridad del ecosistema debido a sus funciones ecológicas.		Media
Densidad o biomasa de peces de todas las especies	Puede asociarse con sobreexplotación pesquera o pérdida de hábitat. La disminución de la abundancia de las especies de interés comercial, dependiendo de sus funciones ecológicas, puede causar cambios en la red trófica. Los peces meros y abadejos de la familia Serranidae son los grupos de peces más aprovechados en el Caribe mexicano (Sosa-Cordero y Ramírez-González, 2011).	Si se toma la abundancia de todas las especies a nivel de especie se puede obtener la densidad o biomasa de especies seleccionadas. Generalmente, el método utilizado para medir la biomasa de todas las especies es con buceo errante; mientras que para especies seleccionadas se utilizan transectos de banda	Media
Densidad o biomasa de especies seleccionadas (especies de interés comercial)			Alta

5.3 Resultados: marco de indicadores de integridad ecológica de arrecifes de coral

El marco de indicadores propuesto (Figura 9 y Tabla 6) contiene quince indicadores que miden la composición, estructura y función de los arrecifes de coral. Estos indicadores presentan una alta relevancia ecológica por lo que contribuyen a optimizar los recursos invertidos en su medición. Además, en relación con los otros parámetros evaluados que miden los mismos atributos o procesos, resultan más eficientes por su facilidad de interpretación, y/o los costos económicos y tiempo de medición.

5.3.1 Indicadores de composición

Los números de Hill fueron propuestos como indicadores para la composición del ecosistema, ya que determinan cuántas especies son consideradas en la muestra analizada dependiendo de su nivel de rareza (Moreno et al. 2012). Algunos índices de diversidad como el índice de Simpson, o el índice de Shannon expresan la entropía de la comunidad, es decir, la certeza de conocer la identidad de una especie. Además, se expresan en diferentes unidades (p. ej. las unidades del índice de Shannon varían según la base del

logaritmo que se utilice). En cambio, los números de Hill se expresan en el número de especies efectivas y permiten comparar de manera más directa la diversidad entre comunidades de diferentes hábitats y gradientes ambientales (Moreno et al. 2012).

5.3.2 Indicadores de estructura

Para conocer la distribución de los organismos bentónicos en el sustrato arrecifal, se considera de mayor relevancia medir la cobertura de corales, la cobertura de octocorales y la cobertura de algas por grupo funcional (algas rojas incrustantes, algas filamentosas y macroalgas), debido a las implicaciones ecológicas que representan en su cobertura y los cambios en el tiempo. Las algas rojas incrustantes presentan un crecimiento lento, por lo que pueden tolerar tanto una baja como alta disponibilidad de nutrientes, y su dominancia es mediada por los factores que influyen a los corales y macroalgas. Las algas filamentosas mantienen un consumo de nutrientes y una tasa de crecimiento altas cuando las concentraciones de nutrientes son bajas, debido a su tamaño y rápida regeneración su pérdida de biomasa es moderada cuando la herbivoría es baja. Por ello, se vuelven dominantes en concentraciones bajas de nutrientes y herbivoría disminuida. Las macroalgas carnosas crecen rápidamente cuando los nutrientes son abundantes y se ven afectadas cuando la herbívora es alta (Littler et al. 2006). La dominancia de otros grupos sobre los corales da lugar a un cambio de fase con un funcionamiento del ecosistema distinto al de un arrecife dominado por corales (Norström, et al. 2009), por lo que medir la cobertura de estos organismos bentónicos resulta de gran relevancia. Para medir la complejidad estructural del arrecife se seleccionó el índice de complejidad topográfica, ya que se ha considerado como una buena aproximación de este atributo obtenida fácilmente en campo (Brokovich et al. 2006). El área de extensión de los hábitats presentes en el área estudiada (pastos marinos, manglares y arrecifes de coral) permite conocer la extensión disponible de estos hábitats, así como las pérdidas que han ocurrido.

5.3.3 Indicadores de función

La sensibilidad de la altura de algas filamentosas y macroalgas a los cambios en la intensidad de herbivoría y disponibilidad de nutrientes permiten que este parámetro sea un buen indicador de dichos procesos. Además, es una medición que puede ser fácilmente recabada (Flower et al. 2017), por lo que fue incluido en el marco de indicadores.

Otro aspecto importante que presentan los indicadores seleccionados, es su utilidad en el monitoreo. Por ejemplo, la incidencia de enfermedades y de blanqueamiento además de constituir indicadores con alta relevancia ecológica, son mediciones de especial utilidad en el monitoreo, debido a que permiten evaluar la dinámica de las enfermedades o el blanqueamiento en las comunidades coralinas a lo largo del tiempo (Work et al. 2008), mientras que, si solo se mide la prevalencia de estos padecimientos solo se obtiene la proporción de casos en un determinado tiempo (Flower et al. 2017). Cada uno de los indicadores propuestos por sí mismos proporcionan información acerca de la integridad del ecosistema, pero su mayor utilidad resulta cuando se utilizan en conjunto para inferir las causas de los cambios en la integridad ecológica. Por ejemplo, si se ha observado un incremento en la altura de algas filamentosas y/o macroalgas, puede observarse también un incremento en su cobertura, para corroborar si este cambio se debe a que la intensidad de herbivoría ha disminuido, puede analizarse la biomasa de peces herbívoros. Para saber si se debe a un incremento de nutrientes podrán consultarse datos de calidad de agua. Además, se podrán dirigir las acciones de monitoreo hacia posibles impactos como el reclutamiento de corales, o la incidencia de enfermedades de corales, midiendo estos parámetros con mayor frecuencia.

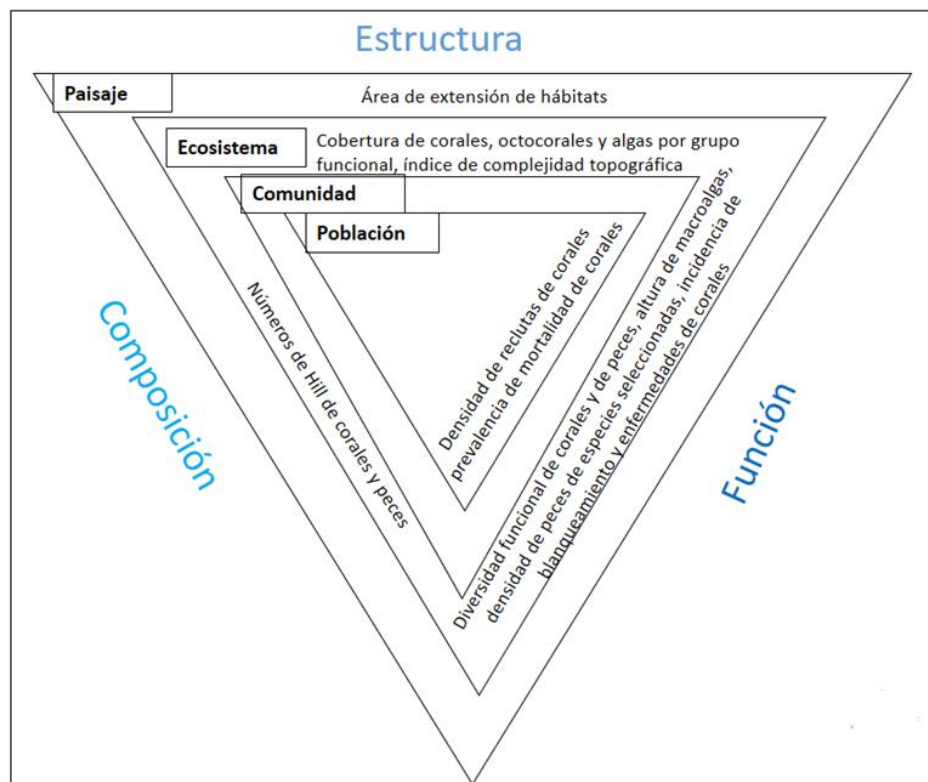


Figura 9. Indicadores seleccionados de integridad ecológica de arrecifes de coral basado en su relevancia en el marco de integridad ecológica.

Tabla 6. Indicadores de integridad ecológica de arrecifes de coral

Indicador	Atributos o procesos que mide	1) Parámetros (si es necesario especificarlos) y 2) métodos para coleccionar y calcular el indicador
Números de Hill de corales	Composición taxonómica	1) Composición de especies y riqueza específica de corales. 2) A partir de cobertura de coral a nivel de especie. Cálculo (ver Jost, 2006)
Números de Hill de peces		1) Composición de especies y riqueza específica de peces. 2) A partir de transectos de banda o buceo errante. Cálculo (ver Jost, 2006)
Estructura		
Cobertura de coral total	Distribución del sustrato	1) La cobertura de corales por especie y la cobertura de algas por género puede proporcionar la información para niveles taxonómicos con menor detalle. 2) Punto de intercepción, videotransectos etc. (ver Tabla 3)
Cobertura de octocorales		
Cobertura de algas por grupo funcional		
Índice de complejidad topográfica	Complejidad estructural	2) Método de la cadena. Cálculo (ver Garza-Pérez, 2012)
Área de extensión de hábitats	Estructura del paisaje	2) Técnicas de percepción remota
Función		
Densidad de reclutas de coral	Reclutamiento de corales	2) Cuadrantes (ver Tabla 3)
Prevalencia de mortalidad parcial de coral	Mortalidad de corales	1) Número de colonias de coral con mortalidad, densidad de colonias de coral. 2) En transectos de banda
Incidencia de enfermedades de coral	Disturbios (infección y blanqueamiento)	2) Transectos de banda con marcaje de colonias (ver Raymundo et al., 2008). Cálculo: número de casos nuevos en un tiempo determinado
Incidencia de blanqueamiento de coral		
Altura de macroalgas y algas filamentosas	Herbivoría y disponibilidad de nutrientes	2) Transectos (ver Lang et al. 2010)
Diversidad funcional de corales	Provisión de hábitat	1) Número de especies por grupo funcional
Diversidad funcional de peces	Herbivoría	
Densidad o biomasa de peces de especies seleccionadas	Herbivoría y disturbios (explotación de recursos pesqueros)	1) Para la biomasa se requiere el tamaño de peces. 2) En transectos de banda o buceo errante (ver Tabla 3)

6 Evaluación de la integridad ecológica de los arrecifes del Caribe mexicano

6.1 Marco teórico: aplicación de los indicadores en la evaluación ecológica

Bubb et al (2010) señalan como etapas clave en el uso de los indicadores para la evaluación del ecosistema: la revisión de los datos disponibles, el cálculo de los indicadores y el análisis e interpretación de los de los mismos. Como parte de la revisión de la información disponible, se identifican los métodos utilizados en la medición de los parámetros, la viabilidad para calcular los indicadores y se diseña un formato de almacenamiento de la información que sea consistente para el análisis. Posteriormente, se analiza si los indicadores se ajustan al marco conceptual de interpretación y finalmente se prueban diferentes métodos de análisis y presentación de la información considerando al público objetivo. Para evaluar la integridad ecológica de un ecosistema, se toma como referencia un sistema o línea base, que describe las condiciones de un ecosistema natural (McField y Kramer, 2007). La comparación de los indicadores con los valores de referencia permite determinar los cambios del ecosistema. El trabajo de McField y Kramer (2007) representa uno de los primeros esfuerzos por recopilar valores de referencia para los arrecifes del Sistema Arrecifal Mesoamericano, desarrollando y utilizados dichos valores en las evaluaciones que lleva a cabo la organización *Healthy Reefs Initiative* (Kramer et al. 2015). El sistema de referencia fue considerado como aquel precedente a los eventos de disturbio de 1980.

6.2 Métodos: diseño de la base de datos, análisis espacial y estadístico

6.2.1 Proyecto de monitoreo del caso de estudio

En 2010, la CONABIO inició un proyecto para conocer la distribución y estimación actual de la superficie de los arrecifes coralinos someros y otros hábitats bentónicos en el Caribe mexicano. Como parte de las campañas de muestreo de dicho proyecto, la zona de Puerto Morelos se muestreó en el 2010, la zona de Playa del Carmen en el 2014 y en la zona de Akumal a Tulum en el 2013. Dentro de este proyecto se generaron mapas de cobertura béntica, morfológicos y batimétricos (hasta aproximadamente 19 m de profundidad), a partir del procesamiento de imágenes satelitales WorldView-2 de muy alta resolución espacial (4 m) y validado con datos recabados en campo (levantamientos batimétricos, fotografías y videos). Ello con el objetivo de establecer una la línea base de la distribución de los arrecifes de coral para su futuro monitoreo (CONABIO, s.f.). Como parte de los datos recabado en campo, se registró la cobertura bentónica en transectos de

400 m con estaciones distribuidas uniformemente a lo largo del transecto. La cobertura de cada organismo o categoría de sustrato se estimó visualmente en un área aproximada de 5 m x 5 m alrededor de una boya. La cobertura bentónica registrada incluyó corales, hidrocorales, octocorales, esponjas, algas, otros invertebrados sésiles y pastos marinos.

6.2.2 Diseño de la base de datos y cálculo de indicadores

El almacenamiento de estos datos se realizó en el programa *Access 2016* y se diseñó una base de datos relacional. La primera tabla consistió en la información de los organismos: grupo, orden, familia género, especie y el grupo morfo-funcional. La segunda tabla consistió en la información de 184 estaciones de muestreo: coordenadas, fecha, profundidad, clase de cobertura y clase de relieve (éstas últimas correspondientes a los mapas CONABIO, 28/04/2017a y 28/04/2017b). La tercera tabla consistió en los valores de cobertura por taxón y estación. A partir de estos datos, fue posible calcular los siguientes indicadores de integridad ecológica: para la composición el número de Hill de orden 1 de corales, para la estructura la cobertura de corales escleractíneos, la cobertura de algas por grupo funcional (algas rojas incrustantes, filamentosas y macroalgas) y la cobertura de octocorales; para la función, la diversidad funcional de corales medida como el número de grupos morfo-funcionales.

El número de Hill de orden 1 se obtiene a partir de una transformación del índice de Shannon, conforme a la ecuación (1) (Jost, 2006). Para el cálculo del índice de Shannon se utilizó la cobertura a nivel de especie en sustitución de la abundancia (p_i) en la ecuación (2).

$$N1 = \exp(H') \quad (1),$$

donde H' es el índice de Shannon

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i * \ln(p_i) \quad (2),$$

donde S es el número de especies y p_i es la abundancia relativa

Los grupos morfo-funcionales considerados para el cálculo de la diversidad funcional fueron: ramificados (ramificado, digitiforme y columnar), copa y flor, masivos (cerebro, semiesférico y submasivo) y foliosos (Anexo III). Los grupos morfo-funcionales son considerados unas de las mejores aproximaciones a la funcionalidad de los corales (Denis

et al. 2017). La diversidad de formas aporta de manera diferencial a la complejidad estructural y tienen un rol funcional en la provisión de hábitat. Los sitios dominados por corales ramificados y masivos tienen una mayor complejidad estructural, seguido por corales plato y corales foliosos o incrustantes (Álvarez-Filip, 2009).

6.2.3 Análisis estadístico

El análisis de los datos consistió en un análisis exploratorio obteniendo parámetros estadísticos básicos (valores promedio y error estándar) de los indicadores. Para los indicadores de cobertura (cobertura de corales escleractíneos, de algas por grupo funcional y la cobertura de octocorales) se obtuvo la matriz de correlaciones y un posterior análisis de componentes principales (ACP). El ACP es un método multivariado que permite encontrar las direcciones que explican la mayor variabilidad, las cuales resultan de una combinación de las variables originales (Fisher, 2004). El análisis se realizó con el software *Statistica 8*. Los factores fueron obtenidos a partir de la matriz de correlación.

6.2.4 Análisis espacial

Se generaron mapas de los indicadores de cobertura en el área de estudio en un sistema de información geográfica con el software de *ArcMap 10.4*. Para el caso de los indicadores con los que se contaba con valores de referencia (cobertura de corales y cobertura de macroalgas), se utilizó una escala de color graduada en relación a la magnitud con una categoría de integridad ecológica, ello para interpretar los indicadores en términos de la condición del ecosistema (Tabla 7). Además, se exploraron diferentes formas para identificar patrones espaciales dentro del área de estudio. Una de ellas fue a partir de las ecorregiones marinas de Norteamérica nivel III, definidas por Wilkinson et al. (2009). Este sistema de ecorregiones ha sido propuesto como un marco espacial para la investigación, monitoreo y manejo de los ecosistemas marinos de Norteamérica por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CEC, por sus siglas en inglés). Otra forma de análisis fue a partir de las clases de relieve, también referidas como zonas del arrecife, dentro de las cuales se incluyeron el arrecife frontal, cresta arrecifal, piso lagunar, primer nivel de terraza y segundo nivel de terraza. El arrecife posterior no se incluyó en el análisis debido a que únicamente se tuvieron datos de una estación dentro de esta clase.

Tabla 7. Valores de referencia de cobertura de coral y cobertura de macroalgas. Adaptada de Kramer et al. (2015).

	Categorías de integridad ecológica				
	Muy alta	Alta	Regular	Baja	Crítica
Cobertura de coral (%)	> 40	20.0-39.9	10.0-19.9	5.0-9.9	<5
Cobertura de macroalgas (%)	0-0.9	1.0-5.0	5.1-12.0	12.1-25	>25.0

6.3 Resultados: integridad ecológica de los arrecifes del caso de estudio

6.3.1. Indicadores de composición

Se registraron un total de 32 especies de corales escleractíneos para toda el área de estudio y un taxón identificado hasta nivel de género: *Scolymia sp.* (Anexo III). El número de Hill de orden 1 de coral escleractíneo para toda el área de estudio fue en promedio 3.31 ± 0.15 especies efectivas. De acuerdo con (Moreno et al. 2012) en este índice todas las especies son consideradas con un valor de diversidad proporcional a su abundancia en la comunidad, por lo tanto, se tendría una diversidad de 3.31 ± 0.15 especies efectivas. Se pudo observar que a lo largo del área de estudio se presentan valores altos o bajos localmente y que en la zona de Ciudad Chemuyil a Tulum se distribuyen principalmente valores mayores a 4.21 especies efectivas. Mientras que, en la zona de Playa del Carmen se presentan valores bajos de 0 a 2.58 especies efectivas (Figura 10). El análisis del número de Hill por clase de relieve muestra una mayor diversidad en el primer nivel de terraza y un menor número de especies efectivas en la cresta arrecifal (Tabla 8).

Tabla 8. Valores promedio del número de Hill de orden 1.

Relieve	Número de Hill (media \pm error estándar)	Núm. estaciones
Arrecife Frontal	2.74 ± 0.49	10
Cresta Arrecifal	2.49 ± 0.56	12
Piso Lagunar	3.00 ± 0.28	28
Primer Nivel de Terraza	3.53 ± 0.18	125
Segundo Nivel de Terraza	2.95 ± 0.99	8
Toda el área de estudio	3.31 ± 0.15	184

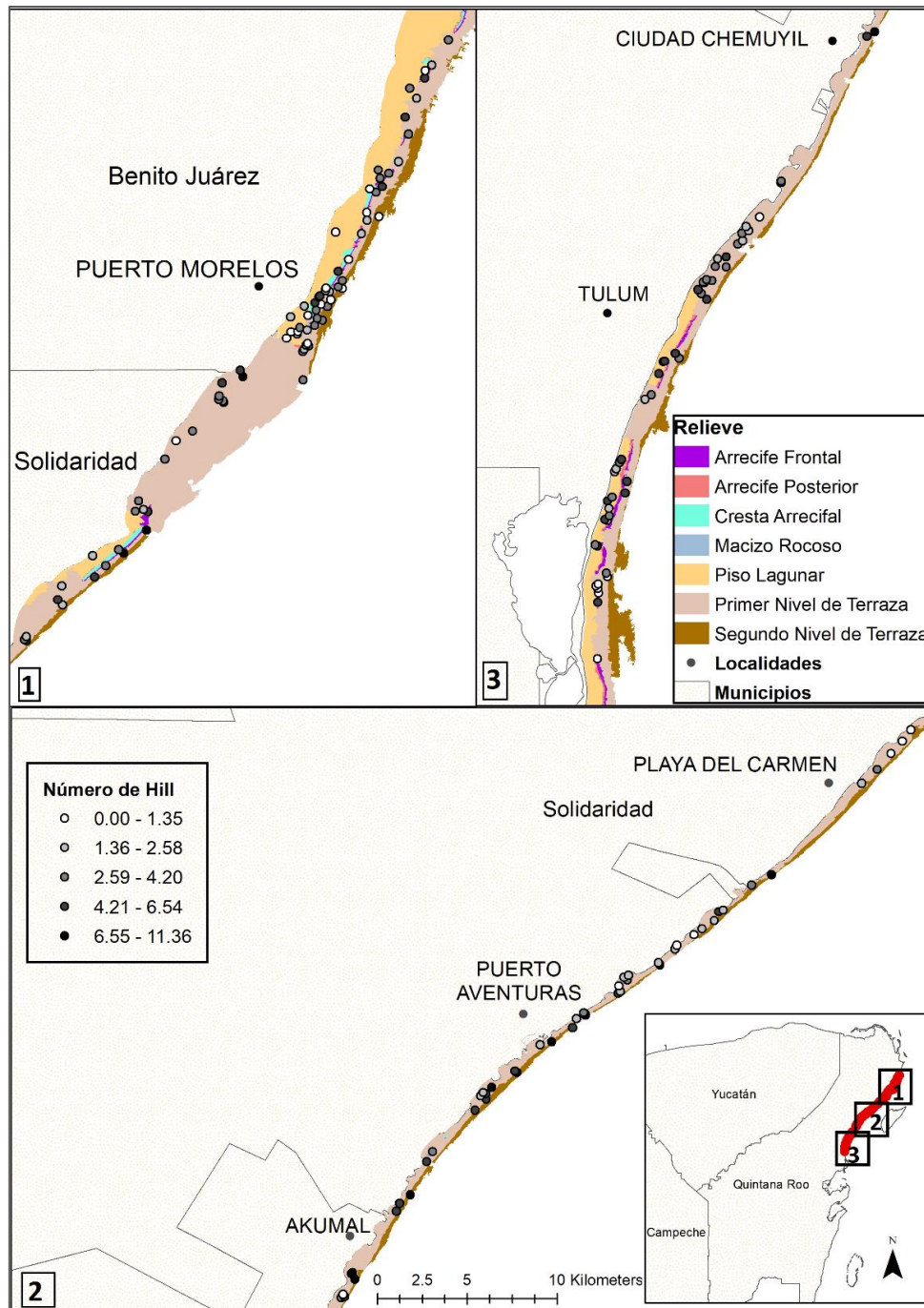


Figura10. Número de Hill de orden 1 de corales escleractíneos en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportadas por CONABIO, (28/04/2017b).

6.3.2 Indicadores de estructura

Se encontró que el sustrato estuvo dominado por macroalgas (23.74 ± 1.26 %). La cobertura de corales escleractíneos en promedio fue de 4.3 ± 0.44 %, lo cual se asocia a una condición crítica. Además, las macroalgas constituyeron el grupo dominante de algas, sobre las algas rojas incrustantes (5.88 ± 1.09 %) y las algas filamentosas (6.69 ± 1.01 %). Los octocorales tuvieron una cobertura mayor (7.22 ± 0.74 %) que los corales.

En cuanto al análisis de componentes principales de las variables de cobertura, la matriz de correlaciones obtenida mostró una correlación negativa entre la cobertura de coral y la cobertura de algas filamentosas ($r = -0.15$, $p < 0.05$). En cambio, la correlación con la cobertura de macroalgas no fue significativa. Así mismo, se encontró una correlación positiva de la cobertura de corales y octocorales ($r = 0.30$, $p < 0.05$).

Los tres primeros factores explicaron el 72.75 % de la variación, por lo que los demás factores pueden considerarse de menor utilidad para el análisis.

Tabla 9. Eigen-valores de los factores.

	Eigen-valor	Varianza explicada (%)	Varianza acumulada (%)
1	1.46	29.22	29.22
2	1.20	24.03	53.25
3	0.98	19.50	72.75
4	0.71	14.20	86.95
5	0.65	13.05	100.00

Las coordenadas de los factores muestran la correlación entre las variables originales y los factores obtenidos. Los valores de las coordenadas cercanos a 1 indican una mayor asociación entre las variables y el factor (Fisher, 2004). El factor 1 puede asociarse a la cobertura de corales y la cobertura de octocorales, lo cual también puede observarse en la cercanía de estas variables al eje del factor 1 (Figura 11).

El segundo factor puede asociarse a las macroalgas y algas rojas incrustantes, correspondiendo a estaciones con baja cobertura de macroalgas y alta cobertura de algas rojas incrustantes. La cobertura de algas filamentosas no se asocia a estos factores.

Tabla 10. Coordenadas de los factores.

Variables de cobertura	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Corales	0.72	-0.15	-0.25
Algas filamentosas	-0.48	0.39	-0.66
Algas rojas incrustantes	0.38	0.62	0.52
Macroalgas	-0.31	-0.76	0.28
Octocorales	0.68	-0.26	-0.38

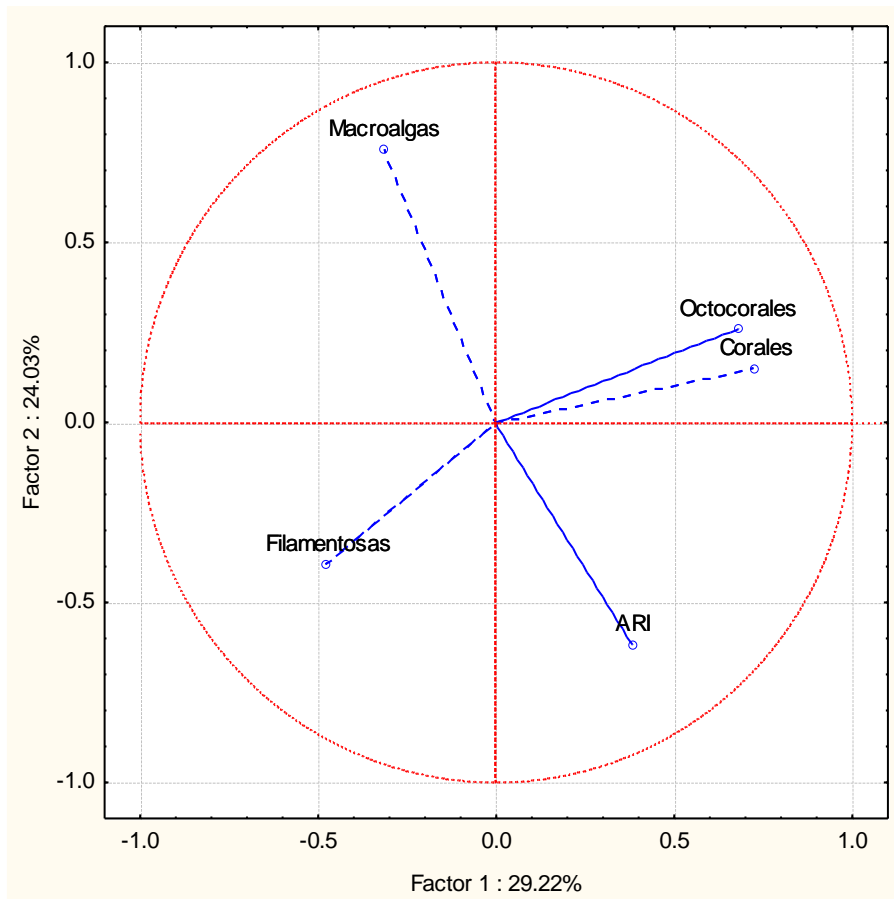


Figura 11. Proyección de las variables de cobertura en el plano de los factores 1 y 2. Los ejes en azul muestran las variables de cobertura utilizadas en el análisis de componentes principales. ARI: Cobertura de algas rojas incrustantes.

Los valores de cobertura de coral menores al 2 %, considerados como valores críticos se encontraron distribuidos en la mayor parte del área de estudio (Figura 10); mientras que los valores altos propios de un arrecife con alta integridad ecológica principalmente se encontraron en la zona de Puerto Morelos con valores del 20 y hasta el 30 %. Sin embargo, los arrecifes son ecosistemas muy heterogéneos y en esta misma zona se obtuvieron también valores bajos del 1 %. En la zona de Playa del Carmen se tuvieron principalmente valores críticos menores al 2 %. En la zona comprendida entre Puerto Aventuras y Akumal, los valores variaron del 5 % al 20 %, correspondiendo a una integridad ecológica de baja a media. Mientras que en la región de Ciudad Chemuyil a Tulum, se obtuvieron valores de integridad baja a crítica.

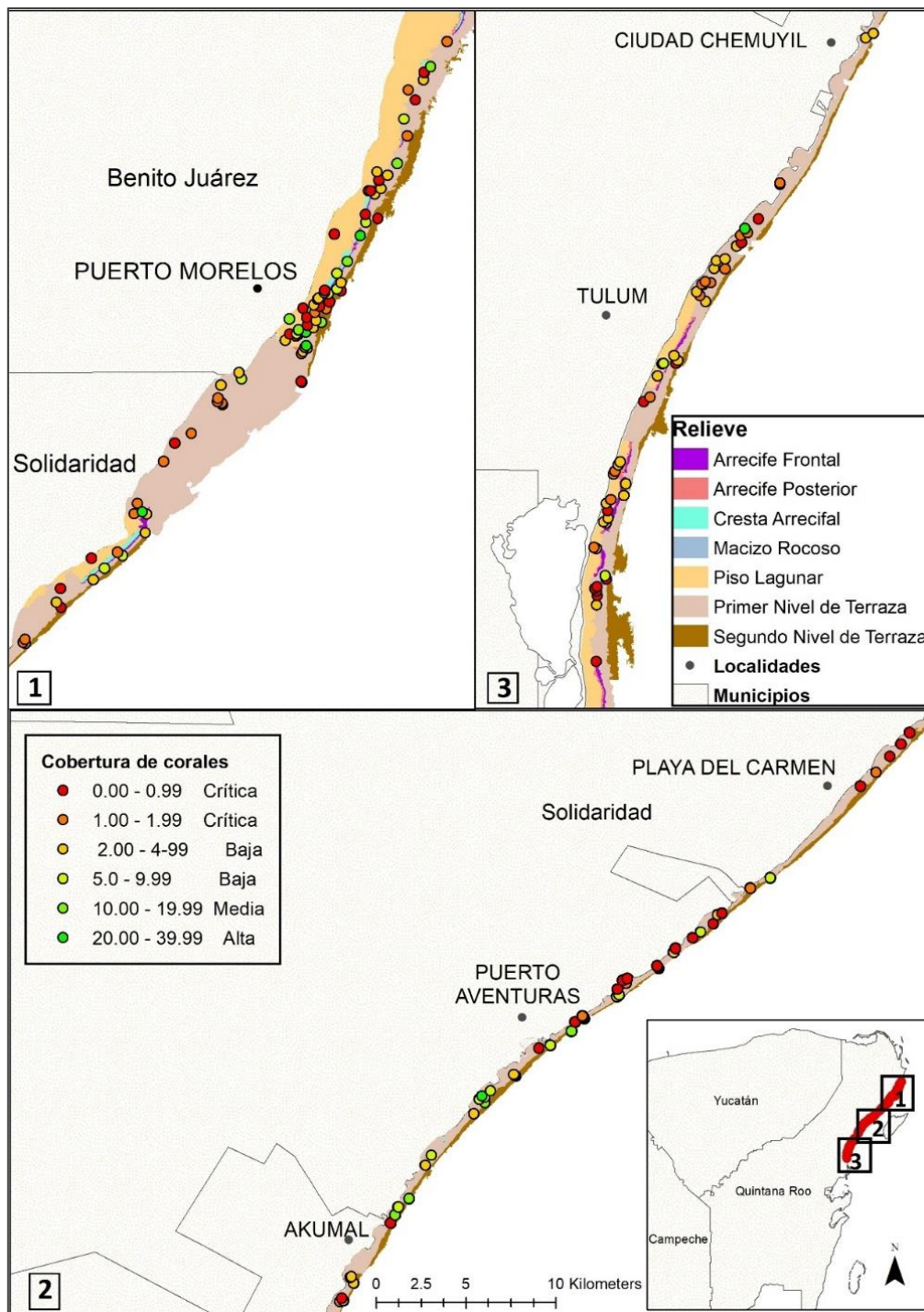


Figura 12. Cobertura de corales escleractíneos en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportadas por CONABIO, (28/04/2017b).

La zona donde se encontraron los sitios con la menor cobertura de macroalgas fue en Puerto Morelos, con valores menores a 5 %. Mientras que en Playa del Carmen se encontraron coberturas altas del 25 % al 50 % asociados a una condición crítica. En la zona de puerto Aventuras se encontraron valores de bajos a críticos, incrementado los valores hacia Akumal.

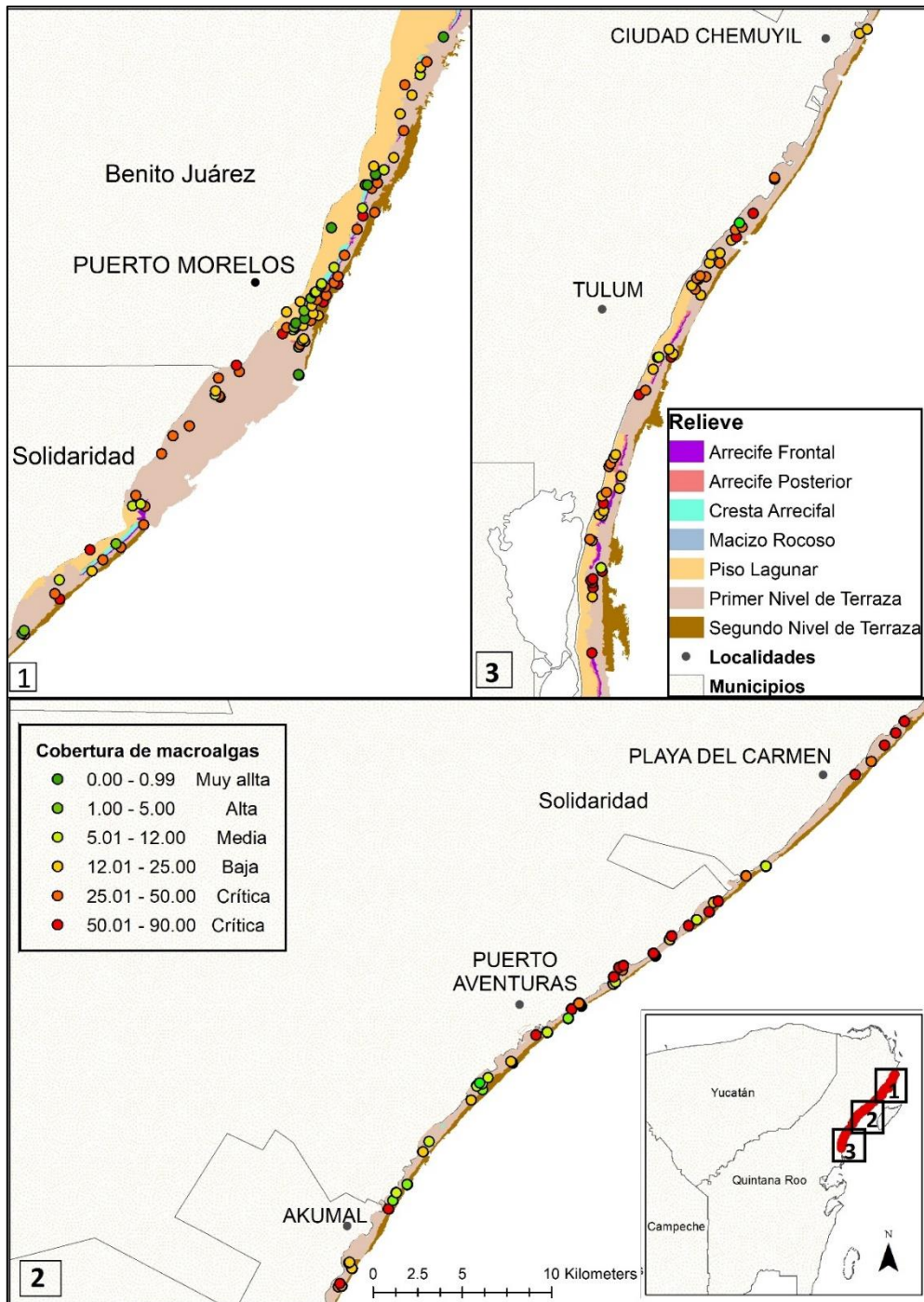


Figura 13. Cobertura de macroalgas en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportadas por CONABIO, (28/04/2017b).

La cobertura de octocorales, en general, siguió la distribución la cobertura de corales, la cobertura de algas rojas incrustantes fue baja en la mayor parte del área de estudio, principalmente en la zona de Puerto Morelos y de Ciudad Chemuyil a Tulum. La cobertura de algas filamentosas también fue baja en la mayor parte del área de estudio,

pero pudo observarse que en algunas estaciones tuvo un patrón opuesto a la cobertura de las algas rojas incrustantes, p ej. en la zona de Tulum (Anexo IV).

En cuanto a las ecorregiones analizadas, no se encontró una diferencia significativa entre los valores promedio de cobertura.

En el análisis por clase de relieve, la mayor cobertura de coral se encontró en el arrecife frontal; seguido por el segundo nivel de terraza.

Tabla 11. Valores promedio de cobertura, de corales, algas por grupo funcional y octocorales por clase de relieve.

Cobertura (media \pm error estándar %)						
Relieve	Corales	Macroalgas	Algas rojas incrustantes	Algas filamentosas	Octocorales	Núm. estaciones
Arrecife Frontal	11.65 \pm 4.28	21.25 \pm 3.80	4.5 \pm 1.33	2.15 \pm 2.04	7.85 \pm 2.76	10
Cresta Arrecifal	4.75 \pm 2.52	11.04 \pm 3.20	14.58 \pm 6.15	6.21 \pm 5.45	5.71 \pm 2.61	12
Piso Lagunar	3.16 \pm 0.54	24.38 \pm 3.98	7.30 \pm 3.65	5.93 \pm 1.81	5.16 \pm 1.97	28
Primer Nivel de Terraza	3.68 \pm 0.38	24.30 \pm 1.46	4.60 \pm 1.07	7.64 \pm 1.32	7.40 \pm 0.89	125
Segundo Nivel de Terraza	8.56 \pm 3.42	37.50 \pm 6.20	0.50 \pm 0.04	1.88 \pm 1.88	13.94 \pm 3.92	8
Toda el área de estudio	4.3 \pm 0.44	23.74 \pm 1.26	5.88 \pm 1.09	6.69 \pm 1.01	7.22 \pm 0.74	184

6.3.3 Indicadores de función

La diversidad funcional de corales, medida como el número de grupos morfo-funcionales en promedio fue de 2.67 ± 0.99 para toda el área de estudio.

La diversidad funcional de corales en el área de estudio varía principalmente de tres a cuatro grupos morfo-funcionales con valores bajos y altos dispersos en esta área. Pueden destacarse algunas zonas como la zona de Tulum en la que en su mayoría se obtuvieron valores intermedios de 2 a 3 grupos morfo-funcionales. Los valores bajos de 0 a 1 grupo morfo-funcionales se encontraron en la zona de Playa del Carmen hacia Puerto Aventuras.

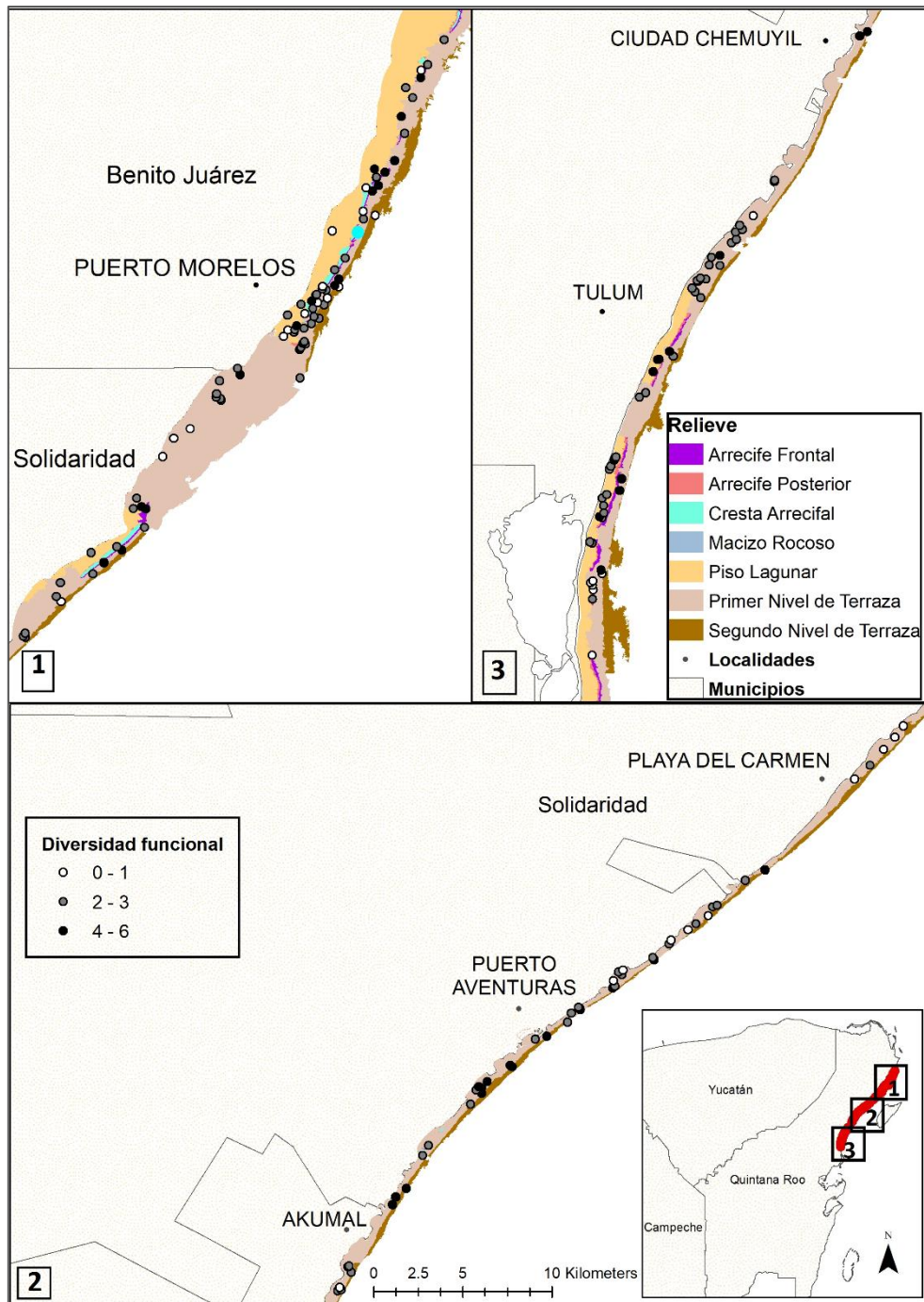


Figura 14. Diversidad funcional de corales (número de grupos morfo-funcionales) en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportadas por CONABIO, (28/04/2017b).

El arrecife frontal fue la zona con mayor diversidad funcional de corales con un valor promedio de 3.30 ± 0.37 grupos morfo-funcionales (Tabla 12).

Tabla 12. Valores promedio de la diversidad funcional de corales.

Relieve	Diversidad funcional (media \pm error estándar)	Núm. estaciones
Arrecife Frontal	3.30 \pm 0.37	10
Cresta Arrecifal	2.08 \pm 0.45	12
Piso Lagunar	2.50 \pm 0.20	28
Primer Nivel de Terraza	2.75 \pm 0.12	125
Segundo Nivel de Terraza	2.13 \pm 0.69	8
Toda el área de estudio	2.67 \pm 0.10	184

7. Discusión

La revisión de programas de monitoreo, el desarrollo del marco conceptual y la evaluación de los indicadores permitió identificar los siguientes aspectos que deben considerarse para el uso de indicadores en el monitoreo de los arrecifes de coral del Caribe mexicano.

El uso de un marco conceptual para la evaluación de los ecosistemas permite, en primer lugar, el entendimiento del ecosistema, describir su dinámica y sus principales atributos y procesos, y sirve como guía para la interpretación de los indicadores (Buub et al 2010). La integridad ecológica es una medida del grado en que la composición, estructura y función de un ecosistema se acerca a las condiciones de un ecosistema natural (Faber-Langendoen et al. 2012). Si se identifican los atributos y procesos relevantes, y se cuentan con indicadores que reflejan los cambios en cada uno de ellos, es posible analizar estos elementos de manera conjunta e integrada. Esto permite, que al evaluar el ecosistema se identifiquen relaciones de causa-efecto, por ejemplo, puede verse el efecto que tiene los cambios en la composición de especies y la pérdida de cobertura de coral en la complejidad estructural del arrecife, y cómo esto afecta la comunidad de peces. En cambio, si no se consideran estas interacciones y las mediciones que han sido tomadas en el monitoreo no están relacionadas, la evaluación del ecosistema resulta solo en una descripción de las diferentes variables colectadas.

El marco de indicadores propuesto en esta tesis mide la integridad ecológica de los arrecifes de coral en sus elementos de composición, estructura y función. Se propone

medir la composición de los grupos clave en el ecosistema como lo son los corales y peces con los números de Hill. Se propone evaluar la estructura a través de la cobertura de corales, octocorales y algas por grupo funcional, el índice de complejidad topográfica y el área de extensión de los hábitats (manglares, pastos marinos y arrecifes de coral). Se sugiere medir los siguientes procesos: la mortalidad, la incidencia de blanqueamiento y de enfermedades de los corales, la herbivoría a través de la altura de algas (macroalgas y filamentosas), la densidad de peces herbívoros y la diversidad funcional de peces; para estimar el nivel de explotación de los recursos se sugiere medir la densidad de peces de interés comercial y para la provisión de hábitat se recomienda medir la diversidad funcional de corales. Estos indicadores fueron escogidos porque presentan una alta relevancia ecológica. Para lo cual se consideró las implicaciones de cada atributo o proceso en el ecosistema y si el indicador podía relacionarse con un estresor. Este marco de indicadores podrá retroalimentarse con los avances en futuros estudios ecológicos, en los que se evalué que procesos tienen una mayor relevancia, tal como en el estudio de McClanahan et al. (2012).

Realizando una comparación entre los indicadores propuestos y los indicadores incluidos en los programas de monitoreo revisados se encontró que la mayoría de los programas de monitoreo revisados no mencionan utilizar la composición de corales o peces para calcular algún indicador de diversidad (cinco mencionan el índice de Shannon y tres mencionan el índice de equidad de Pielou). Sólo cuatro programas incluyen el índice de complejidad topográfica y solo un programa menciona el área de extensión del hábitat. En cuanto a los indicadores de función, la incidencia de blanqueamiento y de enfermedades de corales no son consideradas por ningún programa, sin embargo, son recomendados por Flower et al. (2017). La diversidad funcional de peces y de corales no es incluida por los programas de monitoreo, pero son recomendados por Díaz-Pérez et al. (2016). La altura de algas filamentosas y/o macroalgas es considerada por 2 programas, a pesar de ser reportado como un indicador sensible a los cambios en disponibilidad de nutrientes y herbivoría (Mumby et al. 2014). Cabe señalar, que no se encontraron indicadores para medir la conectividad de los arrecifes (con arrecifes adyacentes, pastos marinos y manglares). Algunos estudios y nuevas propuestas de monitoreo han sugerido indicadores para la conectividad entre los arrecifes de una localidad, por ejemplo, miden la capacidad de autofertilización de los corales, las corrientes marinas, así como barreras

para la dispersión de las larvas (Obura y Goldsmith, 2009), pero aún continúan en desarrollo.

De los 37 indicadores utilizados en los programas de monitoreo para medir procesos del ecosistema, 22 son del tipo directos, y 15 indicadores son mediciones indirectas, es decir, infieren el proceso a través de una medición (i.e. la biomasa de peces herbívoros indica la herbivoría de manera indirecta). Es óptimo encontrar un balance entre las mediciones directas e indirectas, ya que las mediciones directas permiten evaluar el ecosistema con un enfoque hacia la dinámica de los procesos relevantes como el reclutamiento de corales, la herbivoría, y la bioerosión del arrecife, etc. Las mediciones indirectas suelen referirse a variables de estado utilizadas para indicar procesos que pueden ser difíciles de medir como procesos de conectividad, y de reproducción (Lam et al. 2017). Si bien su carácter de mediciones indirectas puede representar una complicación al interpretarlas en términos de la dinámica del ecosistema, son de utilidad en el monitoreo ya que, en algunos casos, constituyen las únicas aproximaciones para estos procesos.

La interpretación de los indicadores es una etapa de gran relevancia en la evaluación de la condición de los arrecifes de coral. Si bien, los programas de monitoreo cumplen con el objetivo de establecer los métodos de muestreo, la información disponible de cómo realizar la interpretación de los indicadores aún es limitada. En este aspecto, el trabajo de Flower et al. (2017) representa una contribución valiosa, la cual guía a los tomadores de decisiones en el diagnóstico y pronóstico de recuperación de un arrecife a través del uso de un conjunto de indicadores. Se reconoce también, que es necesario el desarrollo de valores de referencia acordes al área de estudio, específicamente, para el caso de la cobertura de algas rojas incrustantes, algas filamentosas y octocorales. De esta forma, estos indicadores permitirían dar una evaluación más completa y complementaria a la información aportada por la cobertura de corales y la cobertura de macroalgas.

La base de datos del caso de estudio permitió calcular siete de los quince indicadores propuestos: el número de Hill de orden 1 de corales, la cobertura de corales, la cobertura de algas por grupo funcional (algas rojas incrustantes, filamentosas y macroalgas), la cobertura de octocorales y la diversidad funcional de corales. Para poder obtener los indicadores que no fueron calculados (índice de complejidad topográfica, densidad de reclutas de corales, densidad de peces, diversidad funcional de peces, altura de macroalgas, e indicadores del blanqueamiento y enfermedades de corales) se requieren

parámetros que no fueron encontrados en la base de datos. Incorporar estos indicadores en monitoreos futuros permitirá conocer cómo ha cambiado la complejidad estructural de los arrecifes, la herbivoría y el reclutamiento de los corales; así como detectar tendencias en la incidencia de enfermedades y blanqueamiento de corales.

De acuerdo a los bajos valores de cobertura de coral (4.3 ± 0.44 %) y los altos valores de cobertura de macroalgas (23.74 ± 1.26 %), la integridad ecológica de los arrecifes en el área de estudio es baja. Esta condición, específicamente la baja cobertura de corales, puede tener implicaciones como pérdida/reducción de hábitat, disminución/baja en la acreción del arrecife y en el reclutamiento de los corales (Flower et al., 2017). Tomando el modelo de dominancia relativa (Littler y Littler, 1984), la dominancia de las macroalgas sobre las algas filamentosas (valores de cobertura de 23.74 ± 1.26 % contra 6.69 ± 1.01 %) indica que los procesos de herbivoría y disponibilidad de nutrientes han sido alterados; sin embargo, ello deberá corroborarse con otros indicadores de estos procesos.

Se encontró que la comunidad coralina está compuesta por 32 especies de corales, pero que el número de especies efectivas es en promedio de 3.31 ± 0.15 , ello debido a los bajos valores de cobertura relativa que presentaron la mayoría de las especies de coral.

Arias et al. (2008) reportan para los años 1999-2000 en los arrecifes de Puerto Morelos, Punta Maroma y Boca Paila cuatro grupos morfo-funcionales. Mientras que, en el presente trabajo con los datos obtenidos para el 2010, 2013 y 2014 se presentaron en promedio tres grupos morfo-funcionales, lo cual puede sugerir que se está perdiendo el rol funcional de los corales en la provisión de hábitat.

Además, los mapas de la distribución de los indicadores mostraron que la integridad ecológica de la zona de Puerto Morelos es más alta con respecto a las demás zonas estudiadas, debido a que se encontraron valores más altos de cobertura y diversidad funcional de corales. Ello es consistente con lo reportado para esta zona, donde se han identificado arrecifes con una alta cobertura de coral como el arrecife Limones (Kramer et al. 2015). En cambio, la integridad ecológica de la zona de Playa del Carmen es la menor, debido a que en esta zona se encontraron los valores más bajos de número de Hill (0 a 2.58 especies efectivas), cobertura (menor al 2 %), y diversidad funcional de corales (0 a 1 grupos morfo-funcionales), así como, los valores más altos de cobertura de macroalgas (de 25 al 50 %).

La iniciativa HRI reporta que la condición de los arrecifes del Caribe mexicano para el 2013 y 2014 fue “regular”. Dicha evaluación es realizada por medio del índice de salud arrecifal, (RHI *Reef Health Index* por sus siglas en inglés), el cual considera la cobertura de corales, la cobertura de macroalgas y la biomasa de peces herbívoros y de interés comercial. La cobertura de coral reportada es de 14 % y la cobertura de macroalgas es del 18 % (Kramer et al. 2015). Si bien, estos valores de cobertura difieren a los valores obtenidos en el presente trabajo, en ambas evaluaciones se detecta una dominancia de las macroalgas. Además, la evaluación realizada en el presente trabajo, aportó información de otros atributos y procesos del arrecife que no son considerados en el índice de salud arrecifal. Se encontró que la comunidad coralina está compuesta por 33 especies de corales, pero que el número de especies efectivas es en promedio de 3.31 ± 0.15 , representando una baja diversidad, que la distribución del sustrato en el arrecife no es favorable para el reclutamiento de los corales, debido a la dominancia de las macroalgas sobre las algas rojas incrustantes (valores de cobertura de 23.74 ± 1.26 % contra 5.88 ± 1.09 %) y que puede haber ocurrido una pérdida en el rol funcional de los corales en la provisión del hábitat.

El análisis por clases de relieve en el arrecife permitió detectar una variabilidad en los valores de los indicadores. Dicha variabilidad es atribuida al cambio en las condiciones ambientales como la penetración de luz y la intensidad del oleaje en las diferentes clases de relieve. Es por ello, que se ha recomendado que las clases de relieve sean consideradas en la evaluación de los arrecifes de coral (Mumby et al. 2014). En el arrecife frontal se encontró la mayor cobertura de corales, así como el valor más alto de diversidad funcional de corales. Sin embargo, la cobertura de macroalgas también fue alta. Si bien, en el arrecife frontal las condiciones tienden a ser favorables para el desarrollo coralino (la luz solar es intensa, el movimiento del agua y los nutrientes son adecuados) (Lugo-Fernández y Roberts, 2011), es el arrecife posterior la zona donde se ha reportado la mayor cobertura y diversidad de corales para los arrecifes del sector Norte en el Caribe mexicano (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003). El presente estudio requeriría de un muestreo en el arrecife posterior para tener una descripción completa del sistema arrecifal. El incluir este relieve en el muestreo podría dar lugar a que la cobertura de corales fuera mayor. Por otra parte, la mayor diversidad de especies de coral se encontró en el primer nivel de terraza; las estaciones analizadas dentro de esta clase de relieve correspondieron a la plataforma continental en profundidades de hasta 14 m.

Se considera que, a nivel del área estudiada, el muestreo fue suficiente para analizar el estado de integridad ecológica de los arrecifes de coral; sin embargo, esta evaluación podría mejorarse con un muestreo más equitativo para todos los tipos de relieve dentro del arrecife y con un intervalo de profundidad establecido.

En resumen, el marco de indicadores propuesto pudo ser aplicado al caso del Caribe mexicano de forma parcial, debido a que es necesario medir más parámetros de los que se encuentran en la base de datos del caso de estudio. No obstante, con la evaluación realizada se obtuvo valiosa información para una extensa área en el Caribe mexicano. También se encontró que los indicadores calculados aportan información acerca de los elementos que buscan evaluarse en la integridad ecológica: la composición, la estructura y la función de los arrecifes de coral. De acuerdo con estos indicadores, la integridad ecológica de los arrecifes estudiados resultó ser baja.

El presente trabajo permitió identificar áreas de oportunidad para que el marco de indicadores propuesto tenga un mayor valor en futuras evaluaciones, como son el desarrollo de indicadores de la estructura a nivel del paisaje, indicadores de conectividad y el desarrollo de valores de referencia. Con ello en mente, la información que el monitoreo de los arrecifes del Caribe mexicano provea a los tomadores de decisiones será más completa, contribuyendo a que se determinen las medidas necesarias para su conservación.

8. Referencias

- Almada-Villela, P., Sale, P., Gold-Bouchot, G. y Kjerfve, B. (2003) Manual de Métodos para el Programa de Monitoreo Sinóptico del SAM. Ciudad de Belize. pp.149
- Álvarez-Filip, L. (2010). Habitat complexity in coral reefs: patterns of degradation and consequences for biodiversity. (Tesis de Doctorado) University of East Anglia, UK pp. 111.
- Álvarez-Filip, L., Dulvy, K. N., Coté, M., Gill, A. J. y Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean Coral Reefs: Region-Wide Declines in Architectural Complexity. *Proceedings: Biological Sciences*, (1669), 3019. doi:10.1098/rspb.2009.0339
- Álvarez-Filip, L., Dulvy, K. N., Coté, M., Watkinson, A. R. y Gill, A. J. (2011). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs *Ecological Applications*, (6), 2223.

- Arias-González, J. E., Legendre, P., y Rodríguez-Zaragoza, F. A. (2008). Scaling up beta diversity on Caribbean coral reefs. *Journal Of Experimental Marine Biology & Ecology*, 366(1/2), 28-36. doi:10.1016/j.jembe.2008.07.035
- Arnold, S.N., Steneck, R.S. y Mumby, P.J., 2010. Running the gauntlet: inhibitory effects of algal turfs on the processes of coral recruitment. *Marine Ecology Progress Series*, 414, 91–105
- Arrivillaga, A. y García, M. A. (2004). Status of Coral Reefs of the Mesoamerican Barrier Reef Systems Project Region, and Reefs of El Salvador, Nicaragua and the Pacific Coasts of Mesoamerica. En: Wilkinson, C. (ed.). *Status of coral reefs of the world: 2004. Volume 2.* (pp 473-492) Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia.
- Australia Institute of Marine Science- Long Term Monitoring Program of the Great Barrier Reef (AIMS-LTMP) Standard Operating Procedures 2, 3, 9 y 10. Recuperados de: <http://www.aims.gov.au/docs/research/monitoring/reef/sops.html>
- Bak, R. P. y Meesters, E. H. (1998). Coral population structure: the hidden information of colony size-frequency distributions. *Marine Ecology Progress Series*, 301.
- Barranco L.M., Carriquiry J.D., Rodríguez-Zaragoza F.A., Cupul-Magaña A.L., Villaescusa J.A., Calderón-Aguilera L.E. 2016. Spatiotemporal variations of live coral cover in the northern Mesoamerican Reef System, Yucatan Peninsula, Mexico. *Sci. Mar.* 80(2): 000-000. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/scimar.04294.23A>
- Beltrán-Torres, A. U. y Carricart-Ganivet, J. P. (1999). Revised checklist and key to the petreous zooxanthellate corals (Hydrozoa: Milleporina, Anthozoa : Scleractinia) of the Mexican Atlantic. *Internacional Journal of Tropical* 47:813-829.
- Block, H. (s. f.) Coral Reef Zonation Recuperado de: <https://www.unc.edu/courses/2007fall/masc/490/001/Coral%20Reef%20Decline/Zonation.html>
- Bodmer, M., Rogers, A., Speight, M., Lubbock, N., y Exton, D. (2015). Using an isolated population boom to explore barriers to recovery in the keystone Caribbean coral reef herbivore *Diadema antillarum*. *Coral Reefs* 34(4), 1011-1021. doi:10.1007/s00338-015-1329-4
- Borja, A., Dauer, D., Diaz, R., Llanso, R.J., Muxika, I., Rodríguez, J.G., Schaffner, L., (2008). Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: a comparison of three indices. *Ecological Indicators* 8, 395–403
- Brown, E. y Williams, B. (2016). Ecological integrity assesment as a metric of biodiversity: are we measuring what we are? *Biodiversity and Conservation* 25, 1011-1035 DOI 10.1007/s10531-016-1111-0
- Brokovich, E., Baranes, A., Goren, M., (2006). Habitat structure determines coral reef fish assemblages at the northern tip of the Red Sea. *Ecological Indicators*. 6, 494–507.

- Bryant, D., Burke, L., McManus, J. y Splading, M. (1998). Reefs at risk: A Map Based Indicator of Threats to the World's Coral Reefs. World Resource Institute, Washington, D.C. pp. 56
- Bubb, P., Almond, R., Kapos, V., Stanwell-Smith, D., y Jenkins, M. (2010). Guidance for national biodiversity indicator development and use. UNEP-WCMC, Cambridge, UK, 120 http://old.unep-wcmc.org/guidance-for-national-biodiversity-indicator-development-and-use_542.html
- Burke, L., K. Reytar, M. Spalding, y A. Perry (2011). Reefs at Risk Revisited. Washington, DC, USA: World Resources Institute.
- Cabioch, G. (2011). Forereef/Reef Front En Hopley, D. (ed.). Encyclopedia of modern coral reefs structure, form and process. (pp 422). Dordrecht: Springer, 2011.
- Cairns, S. D. 1999. Species richness recent scleractinia. Atoll Research Bulletin 459:1-46.
- Caribbean Coastal Marine Productivity (CARICOMP, 2001) CARICOMP Methods manual levels 1 and 2. Manual of methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean
- Carricat-Gavinet, J. P., y Horta-Puga, G. (1993). Arrecifes de Coral en México. En Biodiversidad Marina y Cosera de México. (pp. 81-92) Salazar-Vallejo S. I., y González, N. E. (eds.) Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 865 pp.
- Chadwick, N. E. y Morrow, K. M., (2011). Competition Among Sessile Organisms on Coral Reefs. En: Dubinsky, Z. y Stambler, N. (eds.). Coral Reefs: An Ecosystem in Transition. Springer, pp.347–371.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2016). Estudio Previo Justificativo para la declaratoria de la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano, Quintana Roo. pp. 305
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, s. f.) Protocolo de Monitoreo No. 28: Monitoreo de Arrecifes Coralinos en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, en el Estado de Quintana Roo. pp. 14.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 28/04/2017a). 'Cobertura Bentónica del Ecosistema Arrecifal Coralino del Caribe Mexicano: Cabo Catoche - Xcalak', escala: 1:20000. edición: 1. México, Ciudad de México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 28/04/2017b). 'Relieve Submarino del Ecosistema Arrecifal Coralino del Caribe Mexicano: Cabo Catoche - Xcalak', escala: 1:20000. edición: 1. Ciudad de México.
- Dale, V. H. y Beyeler, S. C. (2001) Challenges in the development and use of ecological indicators Ecological Indicators 1 (2001) 3–10
- Dale, V. H. y Polasky, S. (2007). Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. Ecological Economics, (2), 286.

- Denis, V., Deulofeu, Ribas-Deulofeu, L., Sturaro, N., Kuo, C-Y. y Allen, C. (2017). A functional approach to the structural complexity of coral assemblages based on colony morphological features. *Scientific Reports*. 7. 9849. 10.1038/s41598-017-10334-w.
- Díaz-Pérez, L., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Ortiz, M., Cupul-Magaña, A. L., Carriquiry, J. D., Ríos-Jara, E., ... Del Carmen García-Rivas, M. (2016). Coral reef health indices versus the biological, ecological and functional diversity of fish and coral assemblages in the Caribbean sea. *PLoS ONE*, 11(8), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161812>
- Dikou, A. (2010). *Ecological Processes and Contemporary Coral Reef Management*. *Diversity*, 2(5), 717-737; doi: 10.3390/d2050717
- DOF. (2016) Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región conocida como Caribe Mexicano. *Diario Oficial de la Federación*. 7 de diciembre del 2016.
- Downs, C., Woodley, C., Richmond, L., Lanning, L. y Owen, R. (2005). Shifting the paradigm of coral-reef health assessment *Marine Pollution Bulletin* 51, 486-494
- Eakin, C., Mark, A., Nim, C. J., Brainard, E., Aubrecht, C., Elvidge, C., Gledhill, K. y Ziskin, D. (2010). Monitoring Coral Reefs from Space. *Oceanography*, (4), 118.
- Enríquez, S. y Pantoja-Reyes, N. I. (2005). Form-function analysis of the effect of canopy morphology on leaf self-shading in the seagrass *Thalassia testudinum*. *Oecologia* 145, 235-243.
- Environmental Protection Agency US (EPA, 1999). *Considering ecological processes in Environmental Impact Assessments*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/.../ecological-processes-eia-pg.pdf> el 22de enero del 2017
- Equihua, M., García, N., Pérez, O., Benítez, G., Kolb, M., Schmidt, M., Equihua, J. y Álvarez-Palacios, J. (2014). Integridad ecológica como indicador de la calidad ambiental En González, C.A., Vallarino, A., Pérez, J.C., Low, A.M. (Eds.). *Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental*. Capítulo 33 El Colegio de la Frontera Sur, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático., (687 – 710).
- Equihua, M., Benítez, G., Pérez, M., Hernández, H., García, A., Equihua, J., Maeda, P., Kolb, M. y Schmidt, M. (2015). Integridad ecológica para la gestión de la sustentabilidad ambiental frente al cambio climático. En: Yañez, A. (Ed.) *Cambio, Climático: Adaptación y Mitigación hacia Agenda Siglo XXI* (75 – 88). AGT Editorial S.A., México DF, 250 pp. Resultados del 4to Coloquio Internacional sobre Cambio Climático, INECOL-2014.
- Faber-Langendoen, D., Hedge, C., Kost, M., Thomas, S., Smart, L., Smyth, R., Drake, J. y Menard, S. (2012). Assessment of wetland ecosystem condition across landscape regions: a multi-metric approach. Part A. Ecological integrity

assessment overview and field study in Michigan and Indiana. U.S. Environmental Protection Agency report EPA/600/R-12/021a, Washington, DC

Fabricius K. E., Cooper, T. F., Humphrey, C., Uthicke, S., De'ath, G., Davidson, J., LeGrand, H., Thompson, A. y Schaffelke B (2012) A bioindicator system for water quality on inshore coral reefs of the Great Barrier Reef. *Marine Pollution Bulletin* 65: 320–332

Fabricius, K. E. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 50(2), 125-146.

Fabricius, K. E. (2011). Octocorallia. En Hopley, D. (ed.). *Encyclopedia of modern coral reefs structure, form and process*. Dordrecht: Springer, 2011. 740-744

Ferrari, R., Bryson, M., Bridge, T., Hustache, J., Williams, S. B., Byrne, M. y Figueroa, W. (2016). Quantifying the response of structural complexity and community composition to environmental change in marine communities *Global Change Biology* 22, 1965–1975, doi: 10.1111/gcb.13197

Fisher, L., y Van Belle, G. (2004). *Biostatistics: A methodology for the health sciences*. New York

Fisher, W. S., Fore, L. S., Hutchins, A., Quarles, R. L., Campbell, J. G., LoBue, C., y Davis, W. S. (2008). Evaluation of stony coral indicators for coral reef management. *Marine Pollution Bulletin*, 56(10), 1737-1745. doi:10.1016/j.marpolbul.2008.07.002

Flower, J., Ortiz, J., Chollet, I., Abdullah, S., Castro-Sanguiano, C., Hock, K, Lam, V., Mumby, P. (2016). Interpreting coral reef monitoring data: A guide for improved management decisions. *Ecological Indicators*. 72, 848-869.

Fulton S., Garcia, C., Caamal, J., Cuevas, E., Marcos, S. y Bourillón, L. (2015). *Manual de Monitoreo Comunitario: Protocolo de Evaluación de Refugios Pesqueros: Arrecife Mesoamericano*. Comunidad y Biodiversidad A.C. Guaymas, Sonora, México.

Galvis, N. (2001). Monitoring ecological and socioeconomic indicators for coral reef management in Colombia. *Bulletin of Marine Science* 69(2), 847-859

Garza-Pérez, J.R. (2012) *Evaluación de Comunidades Bentónicas Arrecifales: Guía de Campo y Laboratorio*, 1a Edición, DGAPA-PAPIME, UNAM, 25 pp. <http://realreefs.sisal.unam.mx>

Gil, M. A., Renfro, B., Figueroa-Zavala, B., Penié, I. y Dunton, K. H. (2015). Rapid tourism growth and declining coral reefs in Akumal, Mexico *Marine Biology* 162 2225-2233. doi: 10.1007/s00227-015-2748-zc

Global Coral Reef Monitoring Network GCRMN, (2016). *Caribbean Guidelines for coral reef biophysical monitoring*. Recuperado de: http://www.car-spaw-rac.org/IMG/pdf/gcrmn-caribbean_guidelines.unep_depi_car_wg38.inf17-en.pdf el 11 de noviembre del 2016

- Graham, N., y Nash, K. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 32(2), 315-326. doi:10.1007/s00338-012-0984-y
- Guannel G, Arkema K, Ruggiero P, Verutes G (2016). The Power of Three: Coral Reefs, Seagrasses and Mangroves Protect Coastal Regions and Increase Their Resilience. *PLOS ONE* 11(7): e0158094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>
- Harborne, A. R., Mumby, P. J., Micheli, F., Christopher, T. P., Dahlgren, C. P., Holmes, K. E. y Brumbaugh, D. R. (2006). The Functional Value of Caribbean Coral Reef, Seagrass and Mangrove Habitats to Ecosystem Processes *Advances in Marine Biology* (50) 57-189. doi: 10.1016/S0065-2881(05)50002-6
- Hicks, C. C. (2011) How do we value our reefs? Risks and tradeoffs across scales in “biomass based” economies *Coast. Manage.*, 39 (4) pp. 358-376
- Hill, J. y Wilkinson, C. (2004). *Methods for ecological monitoring of coral reefs.* Australian Institute of Marine Science, Townsville Australia. pp. 116
- Hodgson, G. Hill, J. Kiene, W. Maun, L. Milhay, J. Liebeler, J. Shuman, C. y Torres, R. (2006). *Instruction manual. A guide to Reef Check Coral Reef Monitoring.* Reef Check Foundation, Pacific Palisades, California, USA
- Hopley, D. (ed.). (2011). *Encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process.* Dordrecht : Springer, 2011. 1205 pp.
- Houk, P. y van Woesik, R. (2013). Progress and perspectives on question-driven coral-reef monitoring. *Bioscience* 63, 297–303, <http://dx.doi.org/10.1525/bio.2013.63.4.10>
- Hughes, T. P., Jackson, J.B.C., (1980). Do corals lie about their age? Some demographic consequences of partial mortality, fission, and fusion. *Science* 209, 713–715.
- Jameson, S., Erdman, M., Karr, J. y Potts, K. (2001). Charting a course toward diagnosis monitoring: a continuing review of coral reef attributes and a research strategy for creating coral reef indexes of biotic integrity *Bulletin of Marine Science* 69(2) 701-7004
- Johnson, D. H. (2012). *Monitoring that matters.* En Gitzen, R. A. (Eds.) *Design and analysis of long-term ecological monitoring studies.* (pp. 54-73) Cambridge University Press
- Johnson, D., Benn, A. y Ferreira, A. (2013). *Review of ecosystem-based indicators and indices on the state of the Regional Seas UNEP (DEPI)/VW.1 /INF.1.* 118 pp.
- Jones, P. G., Collen, B., Atkinson, G., Baxter, P., Bubb, P., Illian, J. B., Katzner, T. E., Keane, A., Loh, J., McDonald-Madden, E., Nicholson, E., Pereira, H. M., Possingham, H. P., Pullin, A. S., Rodríguez, A. S. Gutierrez-Ruiz, V., Sommerville, M., y Milner-Gulland, E. J. (2011). The Why, What, and How of Global Biodiversity Indicators Beyond the 2010 Target. *Conservation Biology*, (3), 450. doi:10.1111/j.1523-1739.2010.01605.x

- Jordán-Dahlgren, E. (1993). El ecosistema arrecifal coralino del Atlántico mexicano. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 44:157175
- Jordán-Dahlgren, E. y Rodríguez Martínez, R. (2003). The Atlantic coral reefs of Mexico. En: Cortes, J. (Ed.). *Latin American Coral Reefs*. (pp. 131-157). Elsevier Science B.V. 131158
- Jorgensen, S. E., Xu, F., y Costanza, R. (2010). *Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health*. Boca Raton: Taylor & Francis. pp. 484
- Jost, L. (2006). Entropy and Diversity. *Oikos*, (2), 363.
- Kaine, A. (2016). A review of conceptual frameworks arising from the ESPA programme ESPA Working Paper Series No 002 ISSN 2058-9875
- Karr, J. R. (1991). Biological integrity: a long neglected aspect of water resource management. *Ecol. Appl.* 1:66-84
- Knowlton N, Jackson, J. B. C. (2008). Shifting baselines, local impacts, and global change on coral reefs. *PLoS Biol* 6(2): 0215-0220 e54. doi:10.1371/journal.pbio.0060054
- Kramer, P., McField, M., Álvarez-Filip, Drysdale, I., Rueda-Flores, M., Giró, A., y Pott, R. (2015). Reporte de la Salud Ecológica del Arrecife Mesoamericano 2015. *Iniciativa Arrecifes Saludables*. pp. 29
- Lam, V. Y., Doropoulos, C., y Mumby, P. J. (2017). The influence of resilience-based management on coral reef monitoring: A systematic review. *Plos One*, 12(2), e0172064. doi:10.1371/journal.pone.0172064
- Lang, J. C., Marks, K. W., Kramer, P. A., Richards, P. y Ginsburg, R. N. (2010). *AGRRA Protocols Version V.4* pp. 31
- Lehman, R., L. (2007). Reef Algae. En: Tunnell, J. W., Chávez, E. A., Withers, K., y Earle, S. (eds.) (2007). *Coral Reefs of the Southern Gulf of Mexico*. (pp. 165) College Station: Texas A&M University Press.
- Leveque, C. (2003). *Ecology from ecosystem to biosphere*. Enfield, New Hampshire: Science, c2003. pp. 472
- Liddell, W. D. (2007). Origin and Geology. En: Tunnell, J. W., Chávez, E. A., Withers, K., y Earle, S. (eds.) (2007). *Coral Reefs of the Southern Gulf of Mexico*. (pp. 53-74) College Station: Texas A&M University Press.
- Littler, M. M. y Littler, D. S. (1984). Models of tropical reef biogenesis: the contribution of algae. *Progress in phycological research*, 3, 323-364.
- Littler, M. M., Littler, D. S., y Brooks, B. L. (2006). Harmful algae on tropical coral reefs: Bottom-up eutrophication and top-down herbivory. *Harmful Algae*, 5(5), 565-585. doi:10.1016/j.hal.2005.11.003
- Littler, M. M., y Littler, D. S. (2011). Algae. En: Hopeley, D. (ed.). *Encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process*. (pp. 20 - 38) Dordrecht : Springer, 2011.

- Lugo-Fernández y Rodríguez Martínez (2011). Reef Front Wave Energy En: Hopley, D. (ed.). *Encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process.* (pp 876–880) Dordrecht: Springer, 2011
- Manuel-Navarrete, D., D. Dolderman, y J. Kay. 2001. A historical overview of the ecological integrity concept. En J. Porter y G. Nelson, (eds.). *Ecological Integrity and Protected Areas.* (pp. 113-123). North York, ON: Parks Research Forum of Ontario.
- McClanahan, T. R., Donner, S. D., Maynard, J. A., MacNeil, M. A., Graham, N. J., Maina, J., y van Woerik, R. (2012). Prioritizing key resilience indicators to support coral reef management in a changing climate. *Plos One*, 7(8), e42884. doi:10.1371/journal.pone.004288
- McCook L. J., Almany, G.R., Berumen, M. L., Day, J. C., Green, A. L., Jones, G. P., Leis, J. M., Planes, S., Russ, G. R., Sale, P. F. y Thorrold, S. R. (2009) Management under uncertainty: Guide-lines for incorporating connectivity into the protection of coral reefs. *Coral Reefs* 28:353–366.
- McCook L. J., Jompa J, Diaz-Pulido G (2001). Competition between corals and algae on coral reefs: a review of evidence and mechanisms. *Coral Reefs* 19, 400–417
- McField, M. y P. Richards Kramer. (2007). *Healthy Reefs for Healthy People: A Guide to Indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region.* With contributions by M. Gorrez and M. McPherson. 208 pp.
- Michigan State University Extension (s.f.) *Forest Ecology Basics.* Recuperado de <http://mff.dsisd.net/Environment/EcologyForests.htm> el 20 de enero del 2017
- Miller, W. J., C. Rogers, A. Atkinson, E. Muller, A. Davis, C. Loomis, M. Patterson, R. Waara, B. Witcher, A. Wright, J. Peterson. 2007. *Coral Reef Monitoring Protocol.* Natural Resource Report NPS/SER/SFCN/NRTR—2007/003. National Park Service, Miami, Florida. Recuperado de: <https://science.nature.nps.gov/im/units/sfcn/monitor/marine/coral.cfm> el 3 de octubre del 2016
- Mora, C. (2008). A Clear Human Footprint in the Coral Reefs of the Caribbean. *Caribbean Quarterly*, 54(4), 43-92.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E. y Pavón, P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4), 1249-1261.
- Morris, J. A., Jr. (Ed.). 2012. *Invasive Lionfish: A Guide to Control and Management.* Gulf and Caribbean Fisheries. Institute Special Publication Series Number 1, Marathon, Florida, USA. pp. 113. Disponible en: <http://lionfish.gcfi.org/manual/>
- Mumby, P. J. et al. (2014). *Hacia la resiliencia del arrecife y medios de vida sustentables: Un manual para los administradores de arrecifes de coral del Caribe.* University of Exeter, Exeter. pp. 172

- Mumby, P., Bejarano, S., Golbuu, Y., Steneck, R., Arnold, S., Woesik, R., y Friedlander, A. (2013). Empirical relationships among resilience indicators on Micronesian reefs. *32*(1), 213-226. doi:10.1007/s00338-012-0966-0
- Norström, A. V., Nyström, M., Lokrantz, J. y Folke, C. (2009). Alternative states on coral reefs: beyond coral–macroalgal phase shifts. *Marine Ecology Progress Series*, 295.
- Norström, A. V., Nyström, M., Lokrantz, J. y Folke, C. (2009). Alternative states on coral reefs: beyond coral–macroalgal phase shifts. *Marine Ecology Progress Series*, 376, 205-306.
- Nughes, M. M. y Roberts, C. M. (2003). Partial mortality in massive reef corals as an indicator of sediment stress on coral reefs. *Marine Pollution Bulletin*, 46314-323. doi:10.1016/S0025-326X(02)00402-2
- Paine, R. T. (1969). A Note on Trophic Complexity and Community Stability," *The American Naturalist* 103, (929) 91-93
- Perry, C., Edinger, E., Kench, P., Murphy, G., Smithers, S., Steneck, R., y Mumby, P. (2012). Estimating rates of biologically driven coral reef framework production and erosion: a new census-based carbonate budget methodology and applications to the reefs of Bonaire. *31*(3), 853-868. doi:10.1007/s00338-012-0901-4
- Randall, J. E. (1965). Grazing effect on seagrasses by herbivorous reef fishes in the West Indies. *Ecology* 46, 255-260.
- Rapport, D. (1998). Defining ecosystem health. En: Rapport, D., Costanza, R., Epstein, P, Gaudet, C., Levins, R. (eds.). *Ecosystem Health*. (pp. 18-33) Blackwell Scientific.
- Raymundo, Couch y Harwell (eds.). *A Coral Disease Handbook: Guidelines for Assesment, Monitoring and Management* (pp. 47-64) CRTR Program. Australia.
- Reaka-Kudla M. (2001). Known and unknown biodiversity, risk of extinction and conservation strategy in the sea. En: Bendell-Young L y Gallagher P. *Waters in peril* (pp. 19-33) Kluwer Norwell, Massachusetts
- Reyes-Bonilla, H., Calderón-Aguilera, L. E., Cruz-Piñón, G., Medina- Rosas, P., López-Pérez, R. A., Herrero-Pérezrul, M. D., Leyte- Morales, G. E., Cupul-Magaña, A. L. y Carriquiry-Beltrán, J. D. (2005). Atlas de corales pétreos (Anthozoa: Scleractinia) del pacífico mexicano. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y Conabio, Ensenada, Baja California. pp.124
- Rodríguez-Zuñiga, M. T. et al. (2013). Sistema de Monitoreo de los Manglares de México. En: Rodríguez-Zúñiga, M.T., Troche, C., Vázquez, A. D., Márquez, J. D., Vázquez, B., Valderrama, L., Velázquez, S., Cruz, M. I., Ressler, R., Uribe, A., Cerdeira, S., Acosta, J., Díaz, J., Jiménez, R., Fueyo, L. y Galindo, C. (2013). *Manglares de México/ Extensión, distribución y monitoreo*. Capítulo 3 (pp 48 - 69) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 128 pp.

- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Garza, A. G., Baker, D. M. et al. Coral Reefs (2012) 31: 571. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0871-y>
- Rolf, P. M., B., y Meesters, E. H. (1998). Coral population structure: the hidden information of colony size-frequency distributions. *Marine Ecology Progress Series*, 301.
- Santavy, D. L., Summers, J. K., Engle, V. D., y Harwell, L. C. (2005). The condition of coral reefs in South Florida (2000) using coral disease and bleaching as indicators. *Environmental Monitoring & Assessment*, 100(1-3), 129-152. doi:10.1007/s10661-005-4767-6
- Schofield, P. J. (2009). Geographic extent and chronology of the invasion of non-native lionfish (*Pterois volitans*) (Linnaeus 1758) and *P. miles* (Bennett 1828) in the Western North Atlantic and Caribbean Sea. *Aquatic Invasions* 4 (3): 473–479. doi: 0.3391/ai.2009.4.3.5
- Smithers, S. (2011). Fringing Reefs En Hopley, D (ed.). *Encyclopedia of modern coral reefs structure, form and process.* (pp. 430 - 445). Dordrecht: Springer, 2011.
- Sosa-Cordero, E. y Ramírez-González, A. (2011) Pesca marina En: Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé, S. (eds). *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Capítulo 3.* (pp. 183-189) El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México, D. F.
- Spalding, M. D., Fox, H. E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdaña, Z. A., Finlayson, M., Halpern, S., Jorge, M. A., Lombana, A., Lorie, S. A., Martin, K. D., McManus, M. E., Molinar, J., Recchia, C. A. y James, R. (2007). *Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas.* *Bioscience*, (7), 573. doi:10.1641/b570707
- Spalding, M., Ravilious C. y Green E. P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs.* University of California Press, Berkeley, pp. 424
- Spellerberg, I. F. (1991). *Monitoring ecological change.* Cambridge: Cambridge University Press, 1991. pp. 334
- Suter, G. (1993). A critique to ecosystem health concepts and indexes. *Environmental Toxicology and Chemistry* 12, 1533-1539
- Tunnell, J. W., Chavez, E. A., Withers, K., y Earle, S. (eds.) (2007). *Coral Reefs of the Southern Gulf of Mexico.* College Station: Texas A&M University Press.
- UNHCR y CARE, (2009). *Framework for Assessing, Monitoring and Evaluating the environment in refugee-related operations Module III Rapid Environmental Assessment* Recuperado de <http://www.unhcr.org/4a9690239.pdf#page=5&zoom=90,-7,625> el 21 de noviembre del 2016
- van Tussenbroek, B. I. (2011). Dynamics of seagrasses and associated algae in coral reef lagoons. *Hidrobiológica* 21 (3): 293-310.

- Vega Thurber, R. L., Burkepile, D. E., Fuchs, C., Shantz, A. A., McMinds, R., y Zaneveld, J. R. (2014). Chronic nutrient enrichment increases prevalence and severity of coral disease and bleaching. *Global Change Biology*, 20(2), 544-554. doi:10.1111/gcb.12450
- Weil, E., Jordán-Dahlgren, E., Bruckner, A. y Raymundo, L. (2008). Assessment and Monitoring Protocols. En: Raymundo, L. J., Couch, C. S., y Harwell, C. D. (eds.). *A Coral Disease Handbook: Guidelines for Assesment, Monitoring and Management* (pp. 47-64) CRTR Program. Australia
- Wilkinson T., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan y M. Padilla, (2009). Ecorregiones marinas de América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 2009, pp. 200.
- Work, T., Woodley, C., y Raymundo, L. (2008). Confirming Field Assessments and Measuring Disease Impacts. En Raymundo, L. J., Couch, C. S., y Harwell, C. D. (eds.). *A Coral Disease Handbook: Guidelines for Assesment, Monitoring and Management* (pp. 47-64) CRTR Program. Australia
- Yáñez-Arancibia, A., y Day, J. W. (2004). Environmental sub-regions in the Gulf of Mexico coastal zone: the ecosystem approach as an integrated management tool. *Ocean And Coastal Management*, 47(Integrated Coastal Management in the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem), 727-757. doi:10.1016/j.ocecoaman.2004.12.010
- Zavala, J., Salmeroaman, G., Kolb, M. (2006) Procesos oceanográficos. Caracterización y regionalización de los procesos oceanográficos de los mares mexicanos. Recuperado de: http://www.conabio.gob.mx/gap/index.php/Procesos_oceanogr%C3%A1ficos

9. Anexos

Anexo I. Número de programas en los que aparece cada parámetro y número de parámetros por programa

Parámetros	Programas											Frecuencia
	GCRMN	Reef Check	LTMP	AGRRA	SFCN	PMS-SAM	CARICOMP	HRI	CONANP	PIESACOM	COBL-AKK	
Composición de especies de coral							x			x		2
Riqueza específica de coral							x	x	x	x	x	5
Índice de diversidad de Shannon de coral					x			x	x	x	x	5
Índice de equidad de Pielou de coral								x	x	x		3
Cobertura de coral a nivel de forma de crecimiento			x		x		x					3
Cobertura de coral a nivel de género o especie	x		x			x	x	x	x	x	x	8
Cobertura de coral sin nivel de identificación		x										1
Densidad de colonias de coral				x						x		2
Estructura de tamaño de coral				x		x		x	x		x	5
Densidad de reclutas de coral	x		x	x		x		x	x		x	7
Tasa de crecimiento de coral								x				1
Diversidad funcional de coral (Diaz et al., 2016)												0
Prevalencia de mortalidad de coral			x	x	x	x		x	x		x	7
Porcentaje de mortalidad parcial de coral				x		x			x			3
Prevalencia de enfermedades de coral	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11
Porcentaje de la colonia de coral afectada con enfermedades		x										1
Incidencia de enfermedades de coral (Flower et al., 2017)												0
Prevalencia de blanqueamiento de coral		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10

Parámetros	Programas											Frecuencia
	GCRMN	Reef Check	LTMP	AGRA	SFCN	PMS-SAM	CARICOM P	HRI	CONANP	PIESACO M	COBI-AKK	
Porcentaje de la colonia de coral afectada con blanqueamiento		x		x								2
Prevalencia de otras lesiones de coral		x	x	x		x	x			x	x	7
Número de parches aislados de tejido suave de coral				x								1
Cobertura de Millepora	x									x		2
Cobertura de octocorales	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	10
Cobertura de esponjas	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	10
Cobertura de otros invertebrados sésiles (zoántidos, tunicados etc.)	x	x		x	x		x			x	x	7
Abundancia de octocorales							x					1
Estructura de tamaño de octocorales							x					1
Prevalencia de mortalidad de otros invertebrados sésiles				x								1
Prevalencia de enfermedades de otros invertebrados sésiles				x			x					2
Prevalencia de blanqueamiento de otros invertebrados sésiles				x			x					2
Prevalencia de otras lesiones de otros invertebrados sésiles				x			x					2

Parámetros	Programas											Frecuencia
	GCRMIN	Reef Check	LTMP	AGRA	SFCN	PMS-SAM	CARICOM _P	HRI	CONANP	PIESACO _M	COBI-AKK	
Cobertura de algas por grupo funcional	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11
Cobertura de macroalgas por especie	x			x			x					3
Altura de algas (macroalgas y o algas césped)				x		x		x				3
Prevalencia de enfermedades de algas coralinas			x									1
Riqueza específica de invertebrados móviles											x	1
Diversidad de invertebrados móviles											x	1
Densidad de invertebrados móviles (erizos de mar <i>Diadema Antillarum</i> y otras especies)	x	x		x	x	x	x	x	x		x	9
Densidad de reclutas de invertebrados móviles (erizos de mar)	x			x			x					3
Estructura de tamaño de invertebrados móviles (erizos de mar)							x					1
Densidad de invertebrados móviles de interés comercial (langosta espinosa, caracol rosado, camarones y pepinos de mar)	x	x		x					x		x	5

Parámetros	Programas											Frecuencia
	GCRMN	Reef Check	LTMP	AGRRA	SFCN	PMS-SAM	CARICOMP	HRI	CONANP	PIESACOM	COBI-AKK	
Composición de especies de peces						x						1
Riqueza específica de peces								x			x	2
Índice de diversidad de Shannon de peces						x		x			x	3
Diversidad funcional de peces (Diaz et al., 2016)												0
Densidad o biomasa de peces de especies seleccionadas	x	x	x	x		x	x	x			x	8
Estructura de tamaño de peces de especies seleccionadas	x	x		x		x	x	x			x	7
Estructura de tamaño de peces de todas las especies	x						x		x		x	4
Densidad o biomasa total de peces	x						x	x	x		x	5
Densidad de reclutas de peces de especies seleccionadas						x		x	x			3
Tasa de mordidas de peces en algas								x				1
Densidad de pez león	x			x							x	3
Cobertura de pastos marinos										x	x	2
Abundancia de especies clave		x						x				2

Parámetros	Programas										Frecuencia	
	GCRMN	Reef Check	LTMP	AGRRA	SFCN	PMS-SAM	CARICOMP	HRI	CONANP	PIESACOM	COBI-AKK	
Abundancia de especies clave		x						x				2
Cobertura de sustrato inerte	x	x	x	x	x	x	x		x	x		9
Complejidad topográfica					x		x	x		x		4
Rugosidad cualitativa			x									1
Máxima elevación del arrecife				x				x				2
Área de extensión del hábitat								x				1
Abundancia de bioerosionadores (esponjas y otros)								x				1
Tasa de acreción del arrecife								x				1

Anexo II. Clasificación de los parámetros utilizados en el monitoreo de los arrecifes de coral considerando elementos de integridad ecológica, atributos y procesos

Párametros	Elemento de integridad: atributos o procesos que el parámetro puede indicar	Referencias
Composición de especies de coral	Composición: Composición taxonómica	
Riqueza específica de coral	Composición: Composición taxonómica	
Índice de diversidad de Shannon de coral	Composición: Composición taxonómica	
Índice de equidad de Pielou de coral	Composición: Composición taxonómica	
Riqueza específica de invertebrados móviles	Composición: Composición taxonómica	
Diversidad de invertebrados móviles	Composición: Composición taxonómica	
Composición de especies de peces	Composición: Composición taxonómica	
Riqueza específica de peces	Composición: Composición taxonómica	
Índice de diversidad de Shannon de peces	Diversidad	
Abundancia de especies clave	Composición: composición taxonómica	(McField y Kramer, 2007)
Cobertura de coral a nivel de forma de crecimiento	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de coral a nivel de género o especie	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de coral sin nivel de identificación	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de Millepora	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de octocorales	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de esponjas	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de otros invertebrados sésiles (zoántidos, tunicados etc.)	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de algas por grupo funcional	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de macroalgas por especie	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de pastos marinos	Estructura: Distribución del sustrato	
Cobertura de sustrato inerte	Estructura: Distribución del sustrato	
Complejidad topográfica	Estructura: Complejidad estructural	(Graham y Nash, 2013)
Rugosidad cualitativa	Estructura: Complejidad estructural	(LTMP-AIMS)
Máxima elevación del arrecife	Estructura: Complejidad estructural	(AGRRA, 2010)
Densidad de colonias de coral	Función: Reproducción y crecimiento /indirecto*	(Fisher et al., 2008; Nughes y Roberts, 2003)
Estructura de tamaño de coral	Función: Reproducción	(Bak y Meesters, 1998)
Densidad de reclutas de coral	Función: Reclutamiento /directo	(McField y Kramer, 2007)
Tasa de crecimiento de coral	Función: Crecimiento/ directo	(McField y Kramer, 2007)
Densidad de invertebrados móviles (erizos de mar <i>Diadema antillarum</i> y otras especies)	Función: Hervivoría /indirecto y bioerosión /indirecto	(McField y Kramer, 2007)
Diversidad funcional de coral	Función: Provisión de hábitat /indirecto	
Prevalencia de mortalidad de coral	Función: Mortalidad /directo	(Lirman et al., 2013)
Porcentaje de mortalidad parcial de coral	Función: Mortalidad /directo	(Lirman et al., 2013)
Prevalencia de enfermedades de coral	Función: Disturbios (infección)	
Incidencia de enfermedades de coral	Función: Disturbios (infección) /directo	(Flower et al. 2017)
Porcentaje de la colonia de coral afectada con enfermedades	Función: Disturbios (infección) /directo	
Prevalencia de blanqueamiento de coral	Función: Disturbios (blanqueamiento) /directo	
Incidencia de blanqueamiento	Función: Disturbios (blanqueamiento) /directo	(Flower et al. 2017)
Porcentaje de la colonia de coral afectada con blanqueamiento	Función: Disturbios (blanqueamiento) /directo	
Prevalencia de otras lesiones de coral	Función: Depredación y competencia /directo	(AGRRA, 2010)
Número de parches aislados de tejido suave de coral	Función: Disturbios (infección y blanqueamiento) /directo	(AGRRA, 2010)
Abundancia de octocorales	Función: Disponibilidad de nutrientes /indirecto	
Estructura de tamaño de octocorales	Función: Reproducción /indirecto	
Prevalencia de mortalidad de otros invertebrados sésiles	Función: Mortalidad /directo	

Párametros	Elemento de integridad: atributos o procesos que el parámetro puede indicar	Referencias
Prevalencia de enfermedades de otros invertebrados sésiles	Función: Disturbios (infección) /directo	
Prevalencia de blanqueamiento de otros invertebrados sésiles	Función: Disturbios (blanqueamiento) /directo	
Prevalencia de otras lesiones de otros invertebrados sésiles	Función: Depredación y competencia	
Prevalencia de enfermedades de algas coralinas	Disturbios (infección) /directo	(AIMS-LTMP)
Altura de algas (macroalgas y o algas filamentosas)	Función: Herviboría /indirecto y disponibilidad de nutrientes /indirecto	(Mumby et al. 2014; McField y Kramer, 2007)
Densidad de reclutas de invertebrados móviles (erizos de mar)	Función: Reclutamiento /directo	(CARICOMP, 2001)
Estructura de tamaño de invertebrados móviles (erizos de mar)	Función: Reproducción /indirecto	
Densidad de invertebrados móviles de interés comercial (langosta espinosa, caracol rosado, camarones y pepinos de mar)	Función: Disturbios (explotación de recursos) /indirecto	
Diversidad funcional de peces	Función: Diferentes procesos dependiendo del grupo funcional: herbivoría, depredación, etc. /indirecto	
Densidad o biomasa de peces de especies seleccionadas	Función: Diferentes procesos dependiendo del grupo funcional o de la especie: herbivoría, disturbios (explotación de recursos) /indirecto	(Mumby et al. 2014; McField y Kramer, 2007)
Estructura de tamaño de peces de especies seleccionadas	Función: Reproducción	(Mumby et al. 2014; McField y Kramer, 2007)
Estructura de tamaño de peces de todas las especies	Función: Reproducción /indirecto	
Densidad o biomasa total de peces	Función: Disturbios (explotación de recursos) /indirecto	
Densidad de reclutas de peces de especies seleccionadas	Función: Reclutamiento /directo	
Tasa de mordidas de peces en algas	Función: Herbivoría /directo	(McField y Kramer, 2007)
Densidad de pez león	Función: Depredación, competencia /indirecto	(Morris y Green, 2012)
Área de extensión del hábitat	Estructura: Extensión de hábitats	(McField y Kramer, 2007)
Abundancia de bioerosionadores (esponjas, gusanos y otros)	Función: Bioerosión /indirecto	(McField y Kramer, 2007)
Tasa de acreción del arrecife	Función: Acreción /directo	(McField y Kramer, 2007)

Anexo III. Especies y grupos morfo-funcionales de los de corales escleractíneos identificados en el área de estudio

Especie	Grupo morfo-funcional
<i>Acropora cervicornis</i>	ramificado-ramificado
<i>Acropora palmata</i>	ramificado-ramificado
<i>Agaricia humilis</i>	folioso
<i>Agaricia agaricites</i>	masivo-submasivo
<i>Agaricia fragilis</i>	folioso
<i>Agaricia lamarcki</i>	folioso
<i>Agaricia tenuifolia</i>	folioso
<i>Colpophyllia natans</i>	Masivo-cerebro
<i>Dendrogyra cylindrus</i>	ramificado columnar
<i>Dichocoenia stokesi</i>	masivo semiesférico

Espece	Grupo morfo-funcional
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	masivo-cerebro
<i>Eusmilia fastigiata</i>	copa y flor
<i>Favia fragum</i>	masivo-semiesférico
<i>Isophyllia rigida</i>	masivo-semiesférico
<i>Madracis decactis</i>	masivo-submasivo
<i>Madracis pharensis</i>	masivo-submasivo
<i>Manicina areolata</i>	masivo-submasivo
<i>Meandrina meandrites</i>	masivo-semiesférico
<i>Montastraea cavernosa</i>	masivo-semiesférico
<i>Mussa angulosa</i>	masivo-submasivo
<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	masivo-semiesférico
<i>Orbicella annularis</i>	masivo-submasivo
<i>Orbicella faveolata</i>	masivo-submasivo
<i>Porites astreoides</i>	masivo-submasivo
<i>Porites branneri</i>	masivo-submasivo
<i>Porites divaricata</i>	ramificado-digitiforme
<i>Porites furcata</i>	ramificado-digitiforme
<i>Porites porites</i>	ramificado-digitiforme
<i>Pseudodiploria clivosa</i>	masivo-cerebro
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	masivo-cerebro
<i>Scolymia sp.</i>	copa y flor
<i>Siderastrea radians</i>	masivo-semiesférico
<i>Siderastrea siderea</i>	masivo-semiesférico
<i>Stephanocoenia intersepta</i>	masivo-semiesférico

Anexo IV. Mapas de cobertura de octocorales, de algas rojas incrustantes y de algas filamentosas

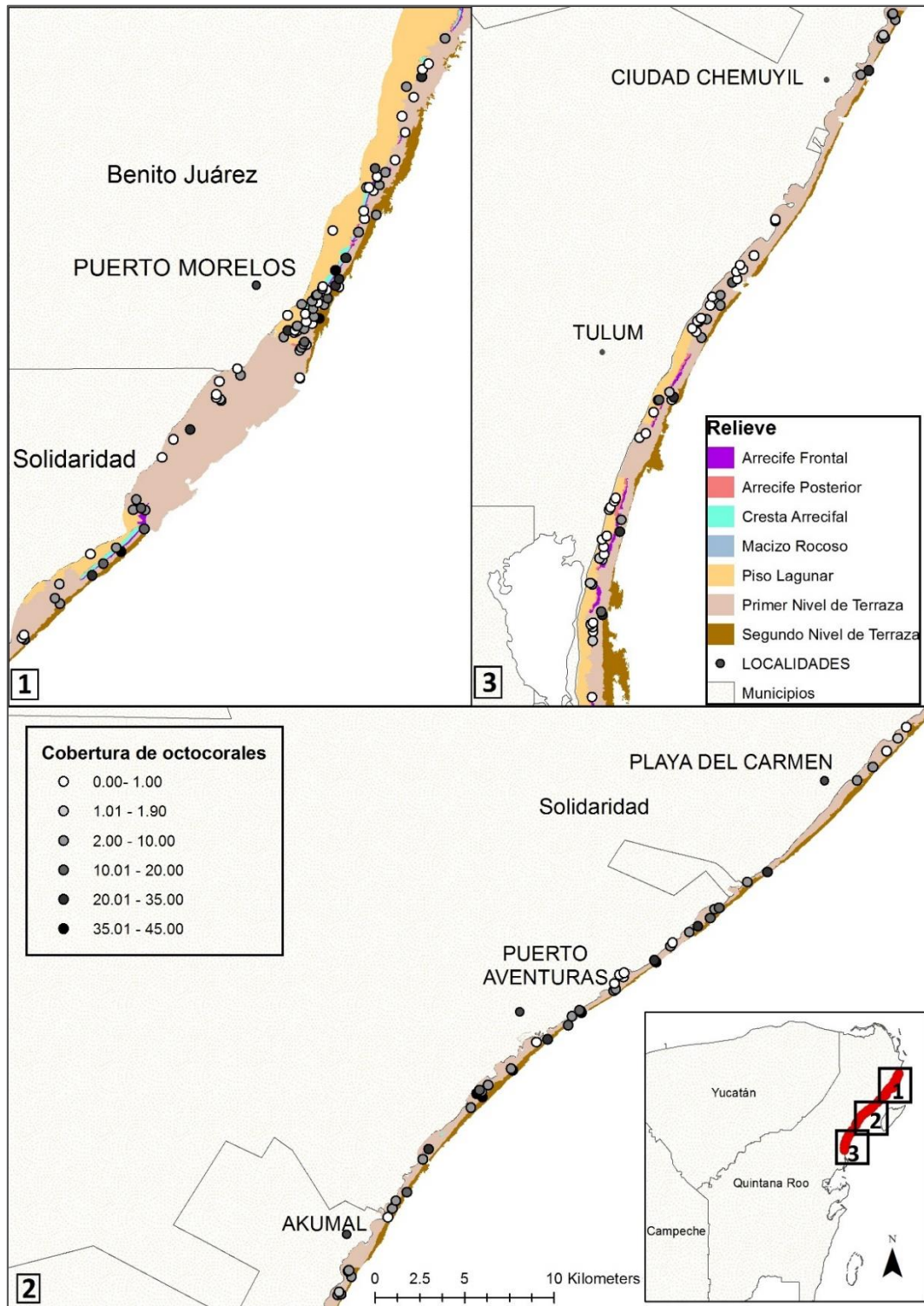


Figura 1. Cobertura de octocorales en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportadas por CONABIO, (28/04/2017b).

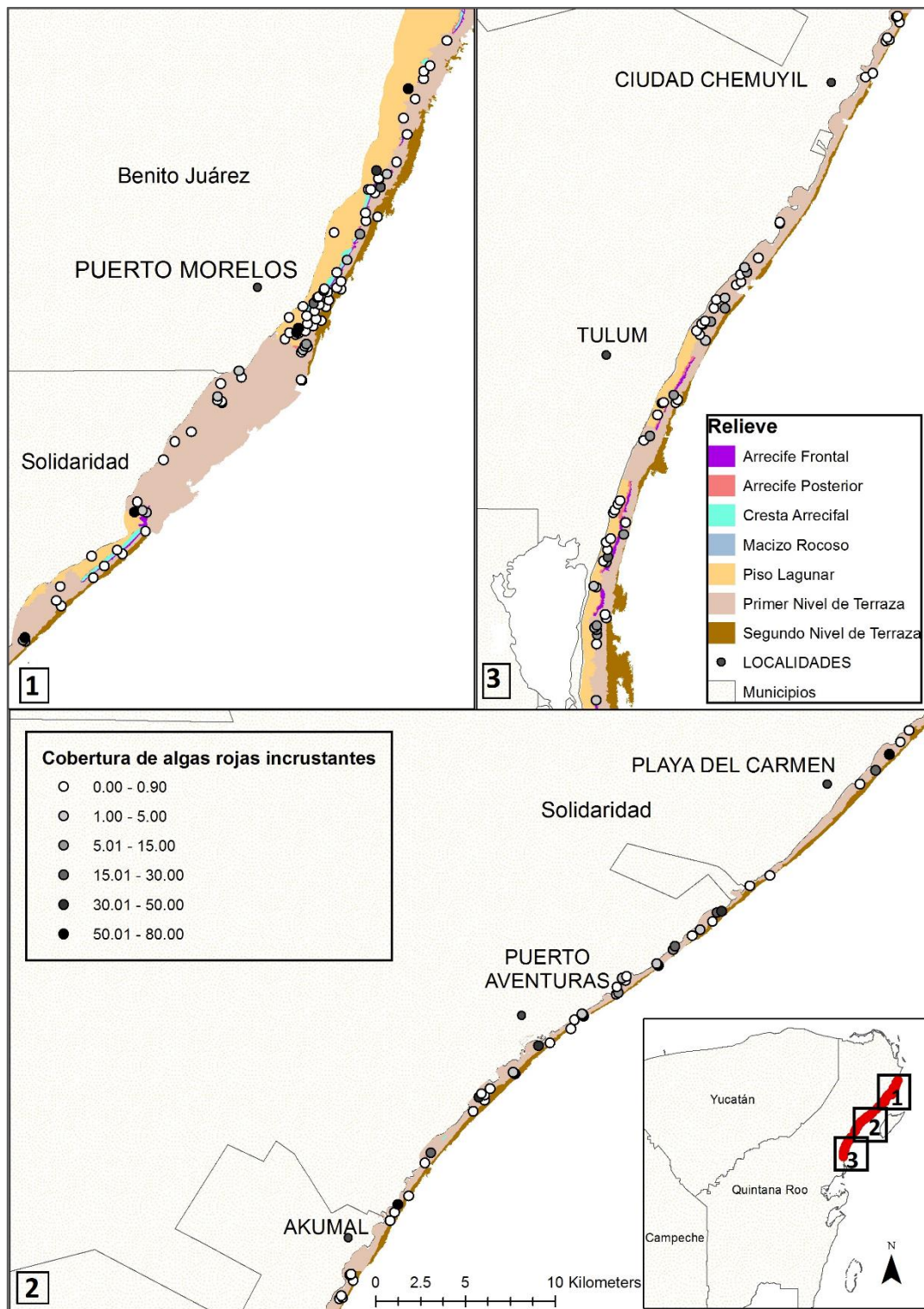


Figura 2. Cobertura de algas rojas incrustantes en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportadas por CONABIO, (28/04/2017b).

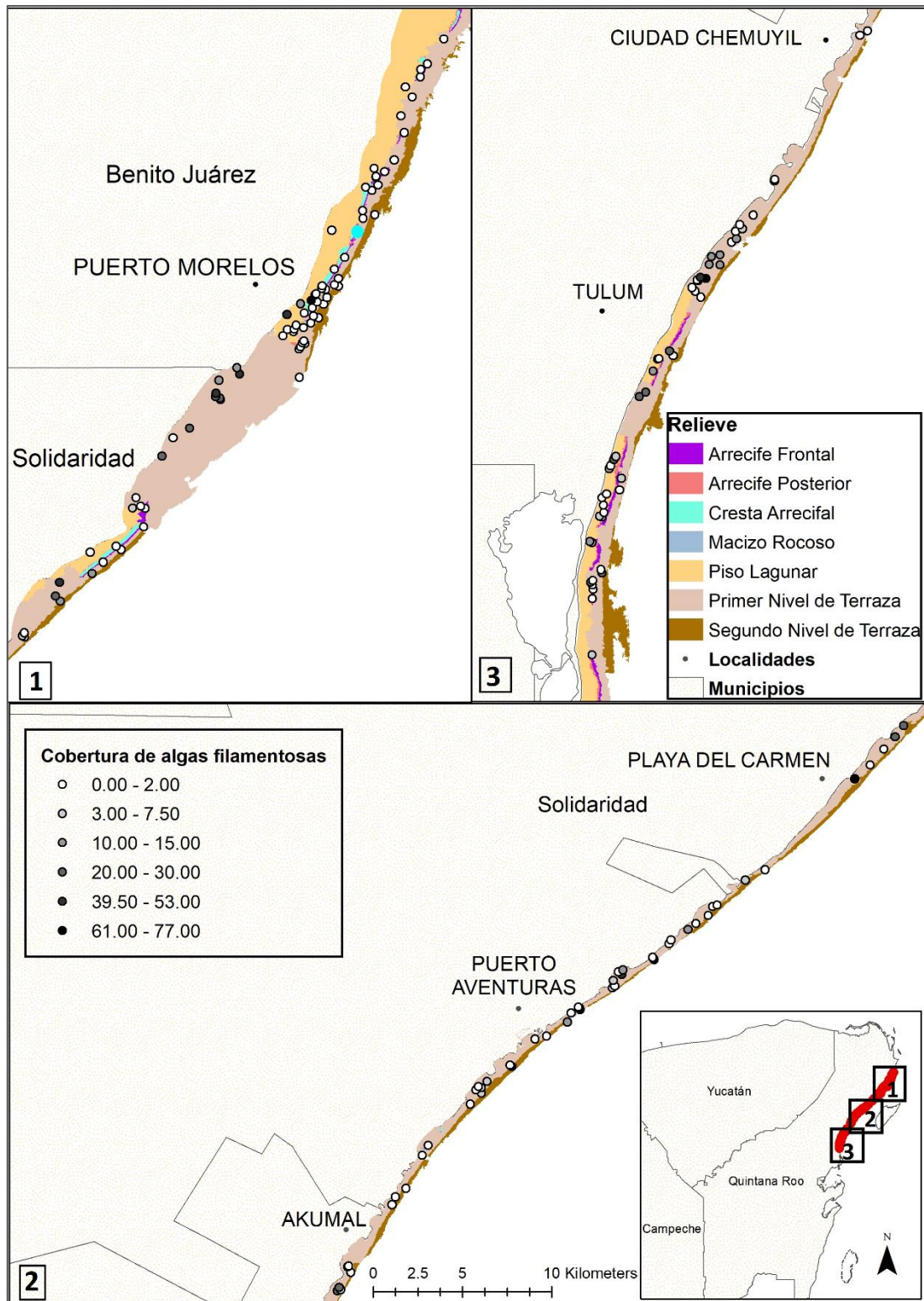


Figura 3. Cobertura de algas filamentosas en los arrecifes del sector Norte del estado de Quintana Roo. Se indican las clases de relieve reportados por CONABIO, (28/04/2017b).

Anexo V. Glosario

Algas (filamentosas): forman tapetes menores a 2 cm de alto. Las comunidades de algas filamentosas pueden estar compuestas de macroalgas juveniles y otras algas filamentosas de rápido crecimiento. En estos tapetes se puede capturar sedimentos del ambiente y gradualmente invadir a corales y otros grupos bentónicos. Cuando existe una dominancia de algas filamentosas sobre macroalgas, puede asociarse a que hay una baja concentración de nutrientes, y a la vez a una disminución en la herbivoría (Littler y Littler, 2011).

Algas (macroalgas): son plantas marinas multicelulares macroscópicas. Su cuerpo tiene una holdfast para adherirse. Pertenecen a los grupos de algas eucariontes Rhodophyta, Chlorophyta o Phaeophyceae, y al grupo de algas procariontes de las Cyanophytas. Las macroalgas en los arrecifes de coral tienen un rol funcional de productores primarios y sus poblaciones son influenciadas por los cambios en la herbivoría y en la disponibilidad de nutrientes (Littler y Littler 2011).

Algas (rojas incrustantes): son también conocidas como algas coralinas calcáreas y pertenecen al grupo Rhodophyta orden Corallinales (Littler y Littler, 2011). Depositan carbonato de calcio y cementan el sedimento calcáreo, por lo que se consideran dentro de los organismos formadores del arrecife (Lehman, 2007).

Arrecife tipo dedo: son arrecifes que crecen con gran proximidad a la costa. Pueden estar adheridos a la costa y el arrecife posterior puede estar sumergido someramente. Se ha utilizado como criterio para definir un arrecife tipo dedo, que el arrecife posterior tenga una profundidad de 10 m o menos (Milliam, 1994); sin embargo, pueden presentarse dificultades al distinguir un arrecife de barrera de un arrecife tipo dedo (Smithers et al., 2011).

Corales escleractíneos: pertenecen al phylum Cnidaria, clase Anthozoa, orden Scleractinia, y suelen ser referidos como “corales duros”. Son organismos modulares cuyo cuerpo está constituido por pólipos. Presentan un exoesqueleto de carbonato de calcio sobre el cual crecen (Wells, 1975, Goreau 1959 citados por Carricat-Gavinet y Horta-Puga, 1993).

Corales hermatípicos: son los corales que presentan una simbiosis con algas zooxantellas. La relación simbiótica alga-coral les permite características autótrofas a los

corales y la deposición rápida de carbonato de calcio. Debido a ello, los corales hermatípicos son los principales constructores del arrecife (Wells, 1975, Goreau 1959 citados por Carricat-Gavinet y Horta-Puga, 1993).

Octocorales: son organismos modulares que pertenecen al phylum Cnidaria y a la clase Anthozoa. Se alimentan de partículas suspendidas en el agua y algunos mantienen una simbiosis con algas zooxantelas. Son un componente importante de la comunidad bentónica de los arrecifes de coral, pero no contribuyen a la formación del arrecife ya que la mayoría de los octocorales no depositan carbonato de calcio. Al igual que los corales son sensibles a disturbios como tormentas, elevación de la temperatura y a la disminución en la claridad del agua (Fabricious, 2011).

Zonación del arrecife (arrecife frontal): es la parte exterior del arrecife en la cresta arrecifal que se encuentra hacia el mar. Presenta una pendiente cuya inclinación puede interrumpirse por terrazas o plataformas. Las partes superiores están expuestas a un oleaje con alta energía (Cabioch, 20011).

Zonación del arrecife (arrecife posterior): es la zona adyacente a la costa y se extiende hacia la cresta arrecifal. En esta región el nivel del agua es bajo, por lo cual se encuentra una alta intensidad de luz y temperatura. Sin embargo, los corales en esta región pueden estar protegidos del oleaje en comparación del estrés presente en la cresta arrecifal (Block, s. f.)

Zonación del arrecife (Cresta arrecifal): es la región con mayor elevación del arrecife y se encuentra entre la entre el arrecife posterior y el arrecife frontal. En esta región se encuentra la mayor acción del oleaje y en las mareas bajas queda expuesta. Por ello, hay poco crecimiento de corales y generalmente es dominado por algas rojas incrustantes (Block, s. f.).