

Revista Ciencias del Mar UAS



Enero - Marzo 2025

Núm. 2 Vol.2

U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A



**Edición
especial
mujeres
en las ciencias
del mar**

ISSN (en trámite)



Artículo Científico

Arrecifes coralinos en Mahahual: estado de conservación actual e importancia de una gestión local

Mahahual coral reefs: current conservation status and the relevance of local management



1. Ana Daniela Romero García

0009-0003-0923-7768

MARES Center

2. Nadia Sandoval Laurraquío Alvarado

0009-0007-8537-646X

ECOSUR y MARES Center

Autor de correspondencia: nadia@takataexperience.com

3. María Geovana León Pech

0000-0001-9521-2257

Tecnológico Nacional de México /
Instituto Tecnológico de Chetumal

4. Cassiopea Carrier Doney

0009-0007-6013-8430

MARES Center

5. Esmeralda Pérez Cervantes

0000-0002-4244-9004

Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación, Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM,

latindex



CREATIVE COMMONS

OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



Arrecifes coralinos en Mahahual: estado de conservación actual e importancia de una gestión local.

Mahahual coral reefs: current conservation status and the relevance of local management.

► RESUMEN

Los arrecifes de Mahahual pertenecen al Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), una región de alta biodiversidad que sustenta la economía de numerosas familias. Sin embargo, este ecosistema se encuentra bajo una fuerte presión debido a factores globales como el cambio climático y la contaminación, así como a factores locales como el desarrollo costero no sostenible y el turismo masivo. Este estudio constituye una evaluación reciente y detallada de 10 parches arrecifales en Mahahual, realizado durante 2021 y 2022 utilizando el protocolo Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment para el monitoreo de Coral (AGRRA por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron una muy baja cobertura de coral duro (%LC = 9.2 en promedio) y una alta cobertura macroalgal (%FMA = 16.6 en promedio). No obstante que la biomasa de peces comerciales es alta en promedio (BPC = 2,719.6 g/100 m²), presenta una alta variabilidad entre sitios y baja biomasa de peces herbívoros (BPH = 1,746.6 g/100 m² en promedio), además, fueron registradas muy bajas densidades de invertebrados móviles (0.015 individuos por m² en promedio). Los resultados en conjunto evidencian un marcado deterioro ecológico en el arrecife estudiado, resaltando la urgencia de implementar medidas a nivel local que aseguren la conservación del ecosistema marino y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en la región.

Palabras Clave: AGRRA, arrecifes de coral, Mahahual, degradación ambiental



▶ ABSTRACT

The Mahahual reefs are part of the Mesoamerican Barrier Reef System (MBRS), a region of high biodiversity that supports the economy of numerous families. However, this ecosystem is under great pressure due to global factors such as climate change and pollution, and local factors like unsustainable coastal development and mass tourism. This study presents a recent and detailed assessment of 10 reef patches in Mahahual, conducted during 2021 and 2022 using the Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) monitoring protocol. The results showed a very low hard coral cover (%LC = 9.2 on average) and a high macroalgal cover (%FMA= 16.6 on average), indicating severe ecological degradation. Although the biomass of commercial fish is high on average (BPC = 2,719.6 g/100 m²), it presents a high variability among sites and low biomass of herbivorous fish (BPH= 1,746.6 g/100 m² on average). Additionally, very low densities of mobile invertebrates (0.015 individuals per m² on average) were recorded, indicating a severe ecological degradation in the sampled area, thus urging the need to establish local measures to ensure the protection of the marine ecosystem and compliance with environmental laws applicable in this locality.

Key Words: AGRRA, coral reefs, Mahahual, environmental degradation

▶ INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son sitios que albergan una alta biodiversidad y proveen valiosos servicios ambientales (Veron, 2000; McField y Kramer, 2007; Calderón et al., 2017), sin embargo, diversas amenazas los han situado dentro de los ecosistemas en mayor riesgo a nivel mundial (Daltabuit Godás, 1999, Arguelles et al., 2019). En el caso particular del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), a las amenazas globales como cambio climático y contaminación se han sumado numerosas a nivel regional como la presencia de especies invasoras, turismo en masa, desarrollo social no sostenible y enfermedades (Arias et al., 2017; Rioja-Nieto y Alvarez-Filip, 2018; Alvarez-Filip et al., 2019) que han ocasionado pérdidas, principalmente de especies clave



como los corales hermatípicos, y disminuciones poblacionales de vertebrados e invertebrados herbívoros, por ejemplo, peces loro, cangrejos rey y erizos (Ruiz-Zárate et al., 2003; Alvarado et al., 2015; de Alba, 2020; McField et al., 2022), relacionados con el estado de salud del arrecife (Kramer et al., 2015; McField et al., 2022). Conocer el estado y los cambios experimentados a través del tiempo en los ecosistemas arrecifales a nivel global, regional y local es esencial para establecer medidas encaminadas a su continuidad en el futuro

Desde el 2005, la Iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente Saludable, ha utilizado el protocolo denominado AGRRA (por sus siglas en inglés para Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment) para la evaluación del SAM de manera simultánea y bianual en los 4 países que lo conforman: México, Belice, Guatemala y Honduras (Feingold et al., 2003; Lang et al., 2012; AGRRA, 2018). Las evaluaciones revelaron variaciones significativas en el estado de conservación entre los diferentes países y subregiones del SAM, que en el caso de México son cinco: la zona norte, centro y sur del Caribe Mexicano, Cozumel y Banco Chinchorro (WWF, 1999; Barón, 2017).

La subregión Sur está conformada por los arrecifes de las localidades de Mahahual e Xcalak, que históricamente ha sido menos monitoreada que otras en el Caribe mexicano (Contreras-Silva et al., 2020). Los resultados de las evaluaciones sugieren que los distintos niveles de degradación observados en estos sitios podrían atribuirse a sus diferentes niveles de protección y desarrollo costero (Díaz-Pérez et al., 2016; Díaz-Orsorio et al., 2022), lo cual es importante a considerar en Mahahual, una zona que carecía de algún tipo de denominación como Área Natural Protegida (ANP) hasta el año 2016 en que se volvió parte de la Reserva de la Biósfera del Caribe Mexicano (DOF, 2016), y cuyo puerto de cruceros se encuentra entre los primeros lugares de personas recibidas a nivel nacional (SECTUR, 2014-2022).

Todos estos años sin medidas de protección particulares y de turismo en masa han agravado el deterioro de sus arrecifes (Arias et al., 2017; Rodríguez, 2019), lo que junto con el desarrollo costero actual y proyectado a futuro, como el tren Maya y aeropuerto de Tulum, suponen una grave amenaza para este sitio debido al potencial aumento de



visitantes, poniendo en riesgo un sitio de alta importancia turística y ecológica (Arias et al., 2017), así como de zonas aledañas que ya han presentado señales de deterioro ambiental (Figueroa-Zavala et al., 2015).

La conservación de los ecosistemas requiere la implementación de estrategias de manejo tanto en áreas protegidas como no protegidas, de modo que se puedan aprovechar de manera sostenible sus recursos naturales (Toledo, 2005; Barranco, 2010; López, 2011). Evaluar el estado de los ecosistemas arrecifales mediante un monitoreo sistemático es necesario para la implementación de planes y estrategias de manejo, considerando su actual deterioro ecosistémico y disminución drástica de diversidad biológica.

La proximidad del 80 % de los arrecifes del SAM a la línea costera los hace altamente vulnerables a las actividades humanas (Álvarez y Wong, 2015). Existe la necesidad de un plan de manejo integral que incluya programas regionales y locales para reducir activamente el impacto de la contaminación de las cuencas y las descargas de aguas residuales; así como acuerdos y legislaciones proactivas para mejorar el estado de los arrecifes en beneficio de la ecología y economía de las diferentes comunidades que dependen de ellos (Gutiérrez et al., 2013; Andrade, 2018).

Mahahual pasó de ser un pueblo pescador a presentar un acelerado desarrollo turístico denominado “Costa Maya” aproximadamente hace 23 años, dando como resultado estar entre los primeros lugares de personas recibidas a nivel nacional en su puerto de cruceros (SECTUR, 2014-2022; Sosa e Inés, 2014), proveyendo servicios turísticos como el buceo recreativo, el snorkel, la pesca, navegación y hospedaje lo que, considerando también los asentamientos urbanos en aumento, resalta la necesidad de actualizar y aumentar los datos de esta localidad para saber el estado de conservación actual de sus parches coralinos y plantear un plan de acción inmediata para el manejo, preservación y la explotación sostenible turística de la zona.



La disminución de la cobertura de coral inició desde los años 70 en el Caribe. En un estudio de largo plazo se reportó una disminución de la cobertura del 26 % en 1970, y de 16 % en 2016, mientras que las macroalgas fueron el grupo bentónico que ha ido en aumento hasta un 30 % de cobertura en 2016 (Contreras-Silva et al., 2020). En la actualidad, la mayoría de los arrecifes del Caribe mexicano ya no se encuentran dominados por corales duros.

Los programas de monitoreo en el Caribe iniciaron a finales de los años 70. Sin embargo, no fue hasta 1980 cuando la degradación coralina se hizo más evidente. Estos proyectos tomaron un alto valor y se iniciaron los planes para seguir informalmente con la recolección de datos, hasta que McField et al. (2005) junto con Arrecifes Saludables empezaron con su iniciativa en el Sistema Arrecifal Mesoamericano.

De acuerdo con los datos recabados por la Iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente Saludable, la condición general del arrecife mesoamericano ha empeorado desde el 2018, después de que había presentado una recuperación (reportes 2020 y 2022), lo anterior puede explicarse debido a diversos factores en los diferentes países que conforman esta región (México, Belice, Guatemala y Honduras) que afectan en cierta medida a cada uno de los parámetros que se utilizan para la generación del índice de salud arrecifal: cobertura de coral, cobertura de macroalgas carnosas, presencia de peces herbívoros y comerciales.

Para el 2018, se tenía registros de entre 15 y 20 % de cobertura de coral en la mayoría de los arrecifes de la región del Caribe mexicano y los datos de macroalgas carnosas y biomasa de peces herbívoros mostraban una tendencia en aumento, además de la pérdida de hábitat de pastos marinos, por lo que se sugería establecer nuevas áreas protegidas en la región y mayor apoyo de financiación (Rioja-Nieto y Alvarez-Filip 2018). En el 2018 se registró el primer brote de la enfermedad de pérdida de tejido en el Caribe mexicano, donde se observó un incremento en la mortalidad de especies susceptibles y cambios drásticos en la estructura de las comunidades coralinas de la región (Alvarez-Filip, *et al.* 2019).

Particularmente, Ruíz-Zárate, *et al.* (2003) encontraron que los arrecifes en Mahahual tenían una cobertura de coral vivo de aproximadamente 17 %, demostrando una disminución de aproximadamente el 54.53 % en 24



años, es decir, un 2.7 % de pérdida anual, si se toma en cuenta el promedio obtenido en este estudio de 9.27 %. Mientras que en la región de Uvero-Punta Piedras, una localidad cercana a Mahahual se reportó en 2015 una dominancia de macroalgas de 61 %, seguida por 12.4 % de corales blandos y 8.2 % de corales duros, además, se encontraron valores de densidad de peces de entre 83 ± 25 ind/100 m² a 144 ± 124 ind/100 m². Estos resultados sugieren una tendencia a la disminución en la estructura de la comunidad arrecifal (Figuroa-Zavala et al., 2015).

En Mahahual también se ha documentado un cambio de fase de coral a algas principalmente relacionado al desarrollo costero, lo que compromete la resiliencia y sobrevivencia de los arrecifes en esta localidad (Arias-González et al., 2017).

La mayoría de los estudios han resaltado que las actividades humanas limitan la eficacia de la protección y conservación de los ecosistemas arrecifales. Se ha demostrado que la cobertura de coral depende de la protección e intensidad de las actividades humanas como es el desarrollo costero (Suchley y Alvarez-Filip 2018).

► MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue llevado a cabo en Mahahual, una localidad en el estado de Quintana Roo, México, ubicado en el municipio de Othón P. Blanco (Fig. 1a.), entre las coordenadas $18^{\circ} 15' - 18^{\circ} 45'$ latitud norte y $87^{\circ} 40' - 87^{\circ} 55'$ longitud oeste (Can, 2003; Chávez-Hidalgo, 2009; Hirales et al., 2010). Solía ser una localidad principalmente de pescadores, sin embargo, a partir de 1997 se inicia un proceso de desarrollo turístico en la zona, particularmente acelerada con la construcción de un muelle para cruceros, parte del megaproyecto turístico denominado “Costa Maya”, que hizo de Mahahual una zona altamente turística (Escalante y Carrol, 2013; SECTUR, 2014-2022).

Los parches arrecifales de Mahahual, forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual se extiende por más de 1,000 km, en el Atlántico Occidental (Aguilar, 1998). En Mahahual, el arrecife coralino es de tipo barrera, con una extensión de 3,600 metros aproximadamente y se divide en tres zonas principales: laguna arrecifal, cresta arrecifal y arrecife frontal. (Chávez, Hidalgo, 2009; Arias-González et al., 2017).

El muestreo de este estudio fue realizado en seis sitios de la localidad durante el mes de junio del 2022, mediante el protocolo de monitoreo AGRRA (Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment, por sus siglas en inglés), metodología estandarizada mediante la cual se generan bases de datos que permiten detectar cambios de la comunidad bentónica, coralina y de algunas especies de peces, así como estimar un índice de salud arrecifal relacionado con el estado de conservación de los sitios, centrándose en 4 estimadores: la cobertura coralina, la cobertura de macroalgas carnosas, la biomasa de peces comerciales y la biomasa de peces herbívoros (Fig. 1 b).

Cabe señalar que los sitios muestreados son utilizados de forma regular para el buceo recreativo y están ubicados en el arrecife frontal: Dos ojos, Tortugas, Río Bermejo, Acuario, Escalones y 40 Cañones. Se incorporaron al análisis los datos de cuatro sitios muestreados en la misma localidad durante septiembre del 2021 con la misma metodología, por el equipo de Arrecifes Saludables: Cocos, San Francisco, Puerto Bravo y Faro Viejo (Fig. 1 c).

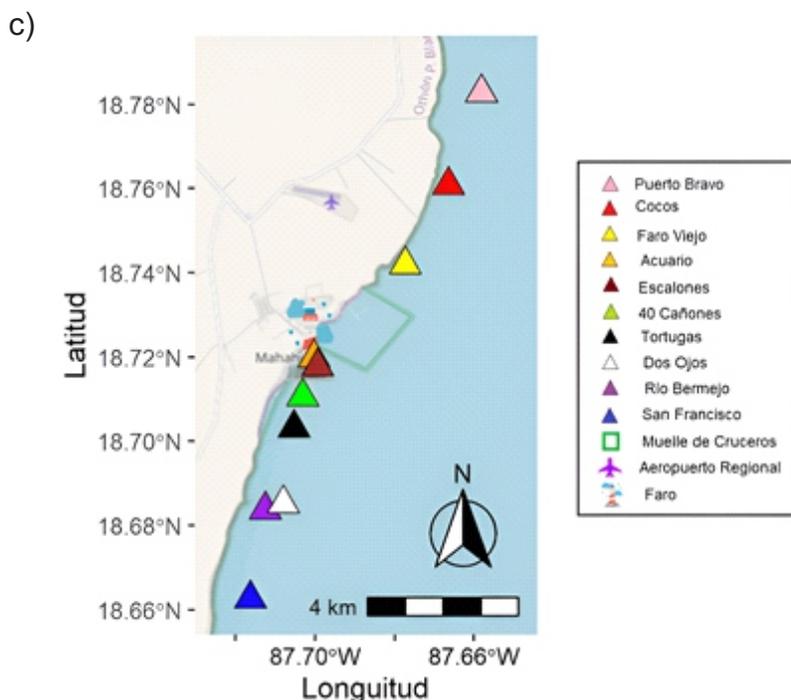
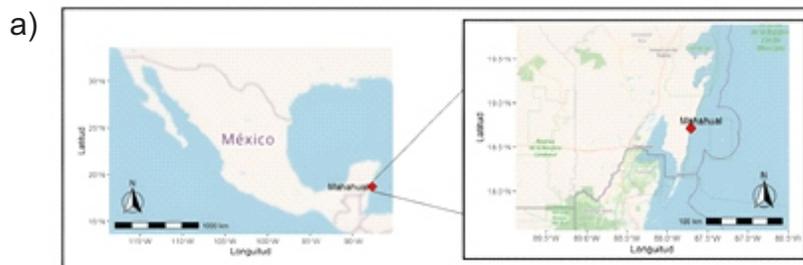


Figura 1. a) Ubicación Geográfica de Mahahual; b) Protocolo AGRRR; c) Sitios de muestreo.



El protocolo de AGRRA consiste en la realización de transectos submarinos en los cuales se identifican especies clave de tres grupos: corales, bentos y peces. Los transectos en el caso de la evaluación de corales y bentos se delimitan por una cuerda plomada de 10 m de largo y un cuadrante de PVC de 25 x 25 cm, mientras que para el monitoreo de peces se miden una cinta métrica de 30 m de largo que es atada al chaleco del buceador y que se va desenrollando mientras el buzo nada, a una velocidad constante que permita terminar el transecto en aproximadamente 6 minutos.

Se realizaron de uno a dos transectos para corales, seis para bentos y de siete a ocho para peces en cada sitio, en un rango de profundidad de 6 a 15 metros. A lo largo de cada transecto se censaron las especies de corales, peces y bentos (incluyendo algas e invertebrados móviles) consideradas en el protocolo AGRRA (<https://www.agrra.org/training-tools>). Así como una aproximación del tamaño de cada pez registrado de acuerdo a las categorías descritas en la metodología mencionada y tamaño de las colonias coralinas.

En cada sitio se determinó la composición bentónica (por porcentaje) considerando los 12 grupos morfofuncionales de la metodología AGRRA: invertebrados móviles, invertebrados agresivos para los corales duros, otros invertebrados, peyssonnelias, cianobacterias, algas incrustantes, macroalgas calcáreas, macroalgas carnosas, alfombra de algas, tapete algal con sedimentos, tapetes de turf y coral vivo (sólo considerando corales hermatípicos).

Los datos obtenidos fueron analizados por el equipo de la Iniciativa Arrecifes Saludables para Gente Saludable, quienes los procesaron de la misma manera que se hace para el monitoreo bianual del Arrecife Mesoamericano, con la finalidad de poder ser comparados con las evaluaciones realizadas en la localidad, en el Caribe de México y en el SAM. Con los datos del monitoreo se estimó el porcentaje de cobertura coralina (%LC), porcentaje de macroalgas carnosas (%FMA), la densidad de invertebrados móviles (#individuos/m²), composición arrecifal por sitio, biomasa (g/100 m²) de peces herbívoros (BPH) y 4) biomasa (g/100 m²) de peces comerciales (BPC). Parámetros mediante

los cuales se calculó el Índice de Salud Arrecifal (ISA) por sitio de muestreo, y general para Mahahual.

Para estimar el %LC se tomaron en cuenta todas las colonias individuales registradas de corales hermatípicos y se obtuvo su porcentaje relativo considerando las especies del método AGRRA, para el %FMA se estimó la biomasa algal, considerando dos parámetros: porcentaje de cobertura algal (el cual se estima con los registros de los cuadrantes) y su altura, mientras que para la biomasa de peces se utiliza una fórmula de longitud – peso ($W=a(L)^b$), en donde la L es la longitud estimada por la mediana de la longitud para cada familia de peces, los coeficientes a y b son características específicas de las dietas de las especies (herbívoros, invertívoros y piscívoros) e importancia comercial, que se obtienen por regresiones lineales del peso y longitud de especímenes datados y se calcula para cada familia) junto con la densidad que se estima con el número los peces registrados entre 100 m²) y tamaño (Marks, 2008).

Para evaluar si existe un agrupamiento entre las localidades en función de su composición bentónica y coralina se realizó el Análisis de Escalamiento Multidimensional (NMDS, por sus siglas en inglés) y un agrupamiento jerárquico con el algoritmo UPGMA, en ambos se utilizó el índice de similitud de Bray Curtis. Los datos fueron transformados con la transformación de Box-Cox utilizando el programa computacional Past 4.13 (Hammer et al., 2001).

▶ RESULTADOS

La composición bentónica por sitio estuvo conformada por entre 3.3 y 12.7 % de coral hermatípico vivo (%LC), con un promedio de 9.27 %. El grupo morfofuncional que sobresalió fue el tapete algal con sedimentos (TAS) conformando entre 5.7 % a 40 % por sitio, con un promedio de 19.31 %, seguido de las macroalgas carnosas (FMA) con un rango de 6.2 % a 31.4 % con un promedio de 16.6 % y las macroalgas calcáreas (CMA) entre 3.4 % a 20.2 % con un promedio de 12.25 %. Los invertebrados móviles presentaron una densidad de 0.015 individuos por m² en promedio, representando el 0.01 % de la composición bentónica (Fig. 2a). Además, el análisis de MDS y el cluster de la composición bentónica, mostraron un agrupamiento de los sitios de Dos Ojos, Acuario, Escalones, Tortugas y Río Bermejo, mientras que los sitios de Faro Viejo, Cocos; Puerto Bravo y 40 Cañones no se agruparon (Fig. 2b; 2c).

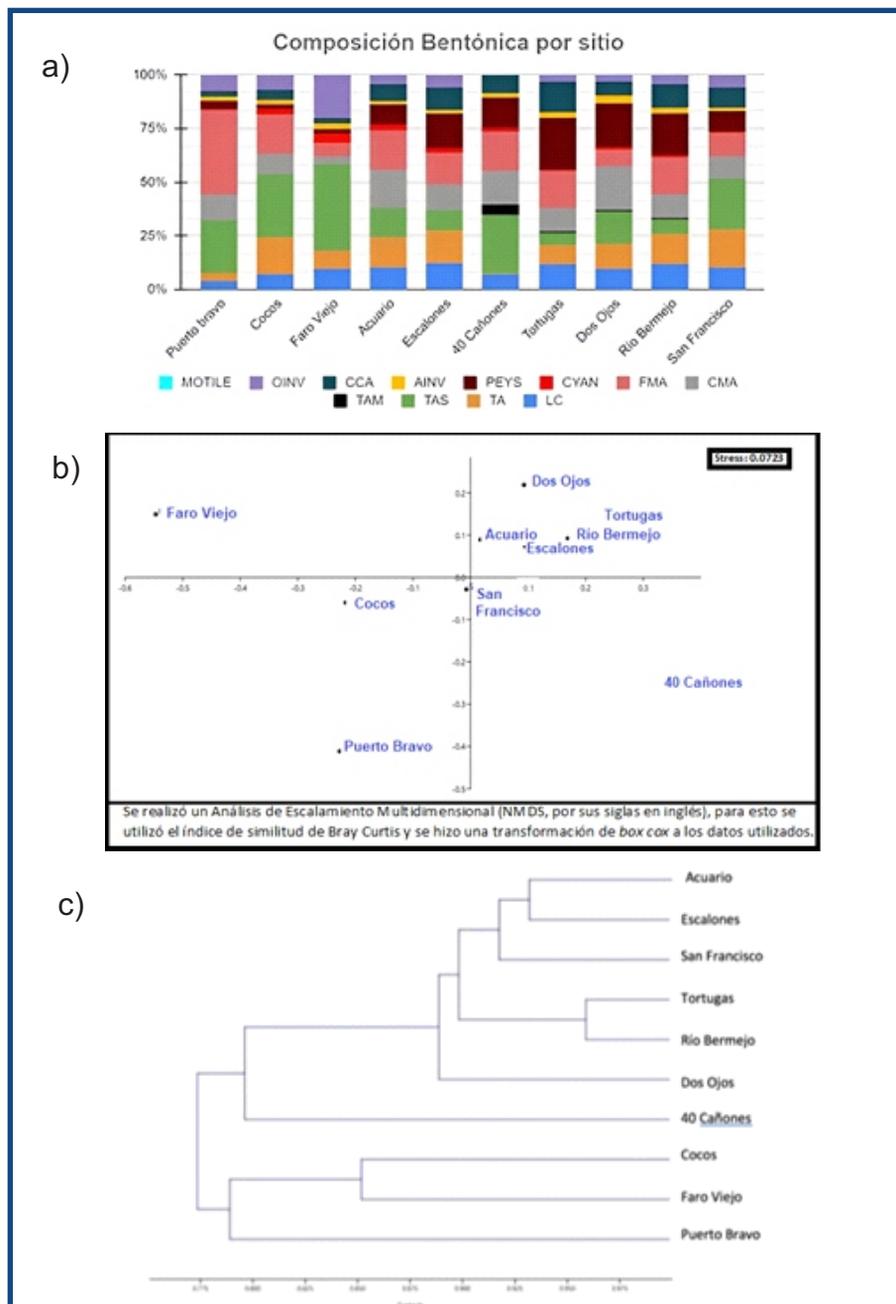
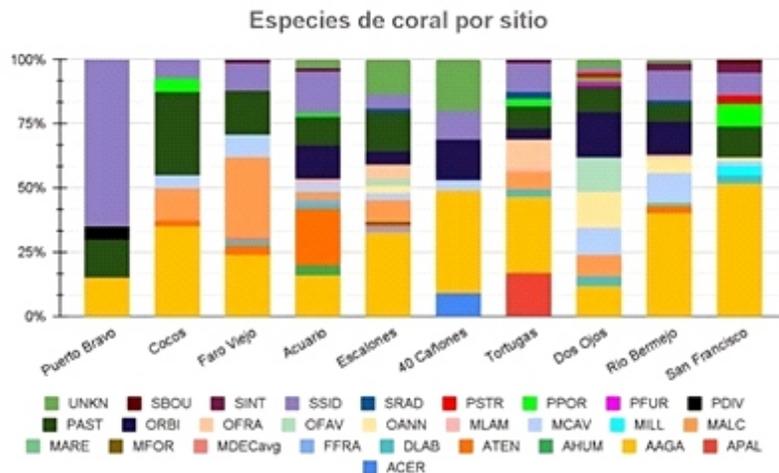


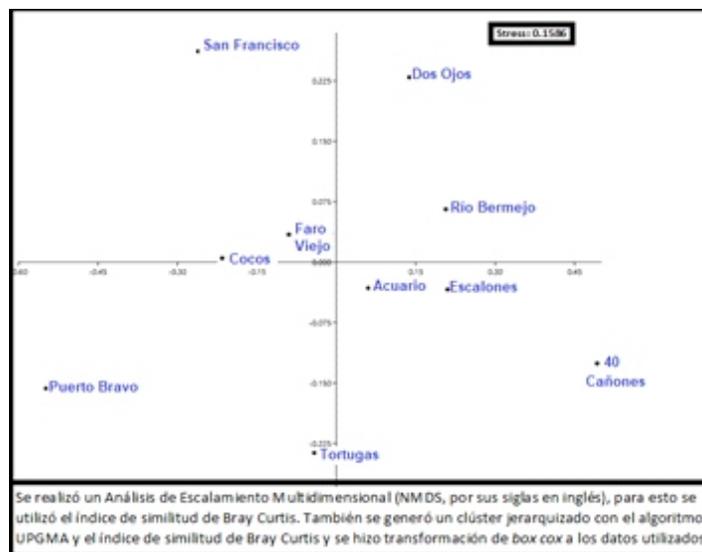
Figura 2. a) Grupos Morfofuncionales que conforman el Bentos de los sitios muestreados. En donde: MOTILE (Invertebrados móviles), OINV (Otros Invertebrados), CCA (Alga coralina costrosa), AINV (Invertebrados agresivos), PEYS (Peyssonnelias), CYAN (Cianobacterias), FMA (Macroalgas Carnosas), CMA (Macroalgas calcáreas), TAM (Alfombra de algas), TAS (Alga Tapete con sedimentos), TA (Alga tapete) y LC (Coral vivo). b y c) Los resultados que se generaron con los datos transformados muestran cuatro grupos en función de la composición bentónica, el primero formado por los sitios de Puerto Bravo y Cocos; el segundo grupo está representado por el sitio de 40 cañones y San Francisco; el tercer grupo Faro Viejo y el cuarto grupo por las localidades restantes. El grupo 1 conformado por Puerto Bravo y Cocos en cuanto a su conformación bentónica puede ser explicado por la alta presencia de TAS, FMA y OIN, mientras que 40 Cañones tuvo la más alta presencia de TAM, y las otras localidades tuvieron estuvieron más representadas por PEYS. En general, todos los sitios se caracterizaron por presentar muy baja cobertura de coral vivo, Invertebrados agresivos, CYAN y motile.

Se registraron 28 especies de coral hermatípico en toda la zona de muestreo. Resaltaron en la composición arrecifal tres de ellas, abarcando en conjunto el 57.4 % del promedio total: *Agaricia agaricites* (AAGA) con un rango de aparición por sitio entre 12.1 % y 51.7 %, con un promedio de 29.66 % de la composición coralina total, *Porites asteroides* (PAST) con un rango de aparición por sitio del 7.1 % al 32.5 %, con un promedio de 12.9 % de dicha composición coralina total, y *Siderastrea siderea* (SSID) con un rango de aparición por sitio del 1.7 % al 65 %, con un promedio de 14.84 % de la composición coralina (Fig. 3a). En cuanto al análisis de MDS y al cluster de la composición coralina no se observó un patrón claro de agrupamiento de los sitios (Fig. 3b; 3c).

a)



b)



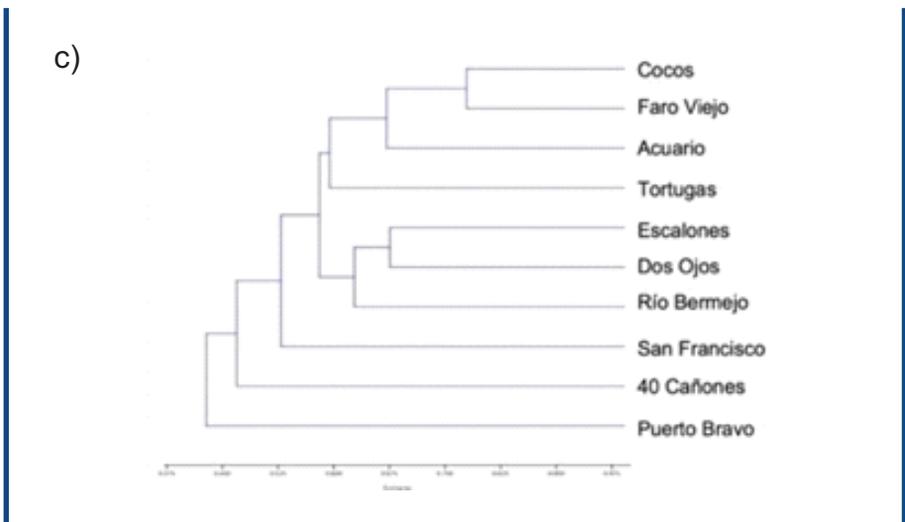


Figura 3. a) Composición de las especies de coral por sitio. Donde: UNK (desconocidas), SBOU (*Solenastrea bournoni*) SINT (*Stephanocoenia intersepta*), SSID (*Siderastrea siderea*), SRAD (*Siderastrea radians*), PSTR (*Pseudodiploria strigosa*), PPOR (*Porites porites*), PFUR (*Porites furcata*), PDIV (*Porites divaricata*), PAST (*Porites astreoides*), ORBI (*Orbicellas*), OFRA (*Orbicella franksi*), OFAV (*Orbicella faveolata*), OANN (*Orbicella annularis*), MLAM (*Mycetophyllia lamarckiana*), MCAV (*Montastrea cavernosa*), MILL (*Millepora sp.*), MALC (*Millepora alcicornis*), MARE (*Manicina areolata*), MFOR (*Madracis formosa*), MDEC (*Madracis decactis*), FFRA (*Favia fragum*), DLAB (*Diploria labyrinthiformis*), ATEN (*Agaricia tenuifolia*), AHUM (*Agaricia humilis*), AAGA (*Agaricia agaricites*), APAL (*Acropora palmata*) y ACER (*Acropora cervicornis*). b) y c) Los resultados que se generaron con los datos transformados no muestran algún agrupamiento en función de la cobertura de coral. El sitio que presentó menor similitud fue Puerto Bravo.

La biomasa de peces herbívoros (BPH) varió entre 687 y 3,504 g/100 m², con un promedio de 1,746.6 g/100 m². Los sitios de Acuario (2,139 g/100 m²), 40 Cañones (3,504 g/100 m²) y Dos Ojos (2,406 g/100 m²), presentaron los valores más altos. Por otro lado, la biomasa de peces carnívoros (BPC) mostró una mayor variabilidad con valores entre 194 y 15,641 g/100 m². Los sitios de Faro Viejo (6,646 g/100 m²) y 40 Cañones (15,641 g/100 m²) destacaron por sus altas BPC, atribuidas principalmente a la abundancia de pargos (familia Lutjanidae: 6,379 g/100 m²), y meros (familia Serranidae: 15,418 g/100 m²) respectivamente. En particular el mero negro *Mycteroperca bonaci* fue el principal contribuyente a la BPC en 40 Cañones (15,270 g/100 m²) (Fig. 4).

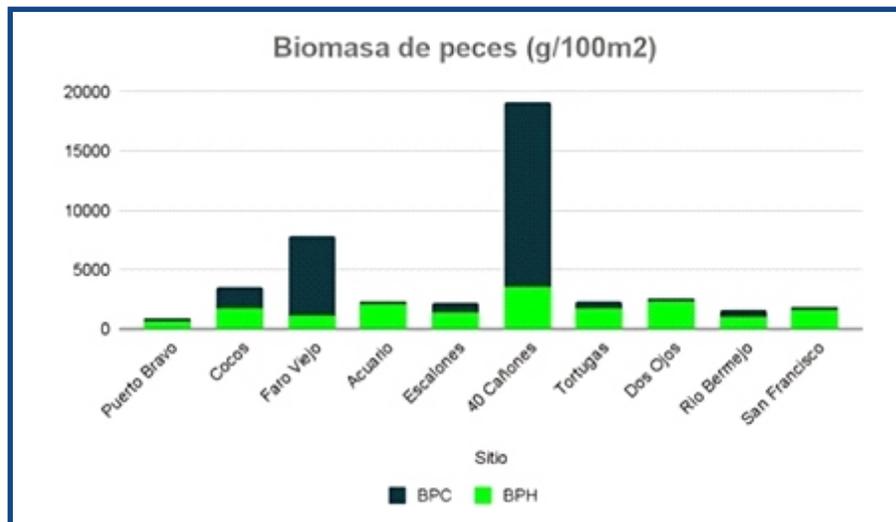


Figura 4. Biomasa de peces por sitio: BPH (biomasa de peces herbívoros) y BPC (biomasa de peces comerciales).

El índice de salud arrecifal (ISA) osciló entre 1 y 3.75, siendo el más bajo en Puerto Bravo (1) y el más alto en 40 Cañones (3.75), dando un promedio de 2.6 para Mahahual (fig.5).

SITIO	%LC	%FMA	BPH g/m2	BPC g/m2	ISA
Puerto bravo	3.33	31.2	687	234	1
Cocos	6.83	18.2	1799	1772	3
Faro Viejo	9.67	5.9	1195	6646	3.25
Acuario	10.41	18	2139	194	2.5
Escalones	12.17	14.3	1354	937	2.75
40 Cañones	7.5	20.3	3504	15641	3.75
Tortugas	11.83	17.2	1782	625	2.5
Dos Ojos	9.67	7.8	2406	233	2.5
Rio Bermejo	11.67	17.3	996	592	2.5
San Francisco	9.67	10.4	1604	322	2.25
Mahahual (Promedio)	9	16	1747	2720	2.6

Figura 5. Estimadores principales por sitio y promedio para Mahahual: cobertura de coral vivo (%LC), macroalgas carnosas (%FMA), biomasa de peces herbívoros (BPH), biomasa de peces comerciales (BPC) e Índice de Salud Arrecifal (ISA) por sitio y para la localidad de Mahahual. El color rojo representa un estado crítico, el naranja malo, el amarillo regular, el verde bien y el azul muy bien de acuerdo con la categorización de la iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente Saludable.

► DISCUSIÓN

El porcentaje de cobertura de corales vivos (%LC) resultante en este estudio (promedio igual a 9.27 %; Fig. 3) es menor al de todas las subregiones evaluadas recientemente en el Arrecife Mesoamericano con la misma metodología de muestreo y estimación, 19 % en promedio para la evaluación realizada en el 2021 y 17 % para la del 2023 (McField et al., 2022 y 2024, respectivamente) y a lo reportado de manera general para los parches arrecifales del Caribe Mexicano con ésta y otras metodologías, entre el 11 y 20 % (Rioja-Nieto y Alvarez-Filip 2018; Suchley y Alvarez-Filip 2018, McField et al., 2022).

La subregión sur del Caribe mexicano donde se encuentra Mahahual ha presentado una importante pérdida de cobertura coralina (Contreras-Silva et al., 2020) que sigue ocurriendo en años recientes de acuerdo a los últimos reportes de la Iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente saludable (18 % en el 2018, 14 % en el 2020, 11 % en 2022 y 12 % en 2024). Al comparar nuestros resultados con estudios previos realizados en Mahahual se tiene que, anteriormente, el %LC era mayor; 25 % de acuerdo con Garza-Pérez y Arias-González (2001) y 17 % de acuerdo a lo reportado por Ruíz-Zárte y colaboradores (2003), también se han encontrado bajos niveles en evaluaciones más recientes, concordante con nuestros resultados (menor al 10 % en Arias-González et al., 2017), incluso en zonas aledañas (8.2 ± 5.1 %; Figueroa-Zavala et al., 2015).

Diversos factores han contribuido a la pérdida de cobertura coralina en el Caribe de México tales como el grado, tiempo y adecuada protección de un área (Figueroa-Zavala et al., 2015; Suchley y Alvarez-Filip 2018; Rioja-Nieto y Alvarez-Filip, 2018; Díaz-Osorio et al. 2022), lo que en gran parte puede explicar el bajo nivel para este parámetro obtenido en Mahahual, una localidad que hasta el 2016 carecía de alguna denominación como ANP y que ha carecido de evaluación y vigilancia en el cumplimiento de legislación ambiental para acciones que, directa e indirectamente afectan al arrecife, tales como la pesca no sustentable de especies clave para la salud arrecifal como invertebrados herbívoros, principalmente cangrejo rey y langostas que suelen atraparse muy cerca del arrecife.



Además de esto, la baja cobertura coralina puede explicarse por el desarrollo costero descontrolado en general en el Caribe de México (Suchley y Alvarez-Filip, 2018), y que en Mahahual se ha asociado particularmente a la construcción de un muelle de cruceros que fomenta el incremento de turistas y desarrollo de infraestructura (Arias-González et al., 2017), así como la destrucción de manglares en la localidad (Hirales-Cota et al., 2010), siendo estos ecosistemas clave para el buen funcionamiento de los arrecifes (Mumby et al., 2004).

Los arrecifes de Mahahual se vieron seriamente afectados desde el 2000 cuando se construyó un puerto para cruceros turísticos, para lo que fue necesario el dragado del arrecife y hubo como consecuencia, entre otras cosas, el levantamiento de mucho sedimento. Posteriormente, se construyó un barrio residencial para alojar a los trabajadores, destruyendo hectáreas de manglar. Actualmente, los cruceros siguen teniendo afectaciones directas a la biodiversidad de la localidad como contaminación acústica. En Mahahual, también es visible la erosión de las playas, causada en parte por la construcción de un malecón muy cerca del mar, lo que corta o impide el flujo hídrico entre manglar y arrecife que en Mahahual está muy cerca de la costa, lo cual lo hace muy sensible a los cambios en ecosistemas asociados, contaminación, exceso de nutrientes y sedimentación, etc.

Es necesario también recalcar que la calidad del agua que llega a los arrecifes ya se ha reportado como una de las principales causas de su deterioro. En todo el SAM, ya se ha reportado la existencia alarmante de patógenos provenientes de aguas residuales humanas, lo que contradice lo establecido por convenios internacionales (McField et al., 2024), y varios sitios del Caribe Mexicano han sido señalados por no cumplir con los criterios establecidos por la normatividad ecológica mexicana, incluyendo puntos de muestreo en Mahahual (Camacho-Cruz et al., 2024).

Un “arrecife saludable” se caracteriza por tener un porcentaje más alto de cobertura de corales vivos en relación con el porcentaje de cobertura de macroalgas (Gutiérrez, 2016; Steneck y Sala 2005). Sin embargo, muchos arrecifes de coral se han degradado en las últimas décadas



debido a una combinación de perturbaciones naturales y antropogénicas, estas perturbaciones pueden causar el reemplazo de especies dominantes por otras, a este proceso se le denomina cambio de fase (Hughes, 1994; Arias-González et al. 2017). De acuerdo con Arias-González et al., (2017) este proceso empezó en la localidad de Mahahual hace aproximadamente 20 años, lo cual coincide con en este estudio donde se encontró mayor cobertura algal (%FMA 16.6) que de corales (%LC 9.2). Diversos estudios han mostrado que la región del Caribe ha sufrido cambio de fase coral-alga más severo que en otras regiones (Pandolfi et al. 2003; Bellwod et al. 2004; Bruno et al 2009).

Además del bajo porcentaje de cobertura coralina es importante considerar que en seis de los diez sitios evaluados predominaron las Agaricias (Fig. 2), resultando un promedio de 29.66 % de la composición coralina total, resultados similares han sido reportados en ambientes arrecifales perturbados sometidos a presiones ambientales como material suspendido por corrientes prevalecientes, fuerte oleaje y ciclones en otras localidades del Caribe (Fonseca et al., 2006; Chavez et al., 2007; Chávez-Hidalgo, 2009).

En cuanto a la biomasa de peces herbívoros (BPH), nuestros sitios tuvieron un promedio de 1,746.6 g/100 m², inferior al promedio para el Caribe de México (2656 g/100 m²; McField et al., 2024) estimado mediante la misma metodología utilizada en este estudio. En el año 2010 en Mahahual la BPH se estimó en aproximadamente 3,000 g/100 m² (Arias et al., 2017), se utilizó otra metodología de muestreo y estimación, sin embargo, puede implicar que se ha perdido casi la mitad de la BPH en la localidad lo que contribuye a la alta cobertura de macroalgas encontrada en este estudio y la pérdida de cobertura coralina.

El bajo nivel de conservación de los parches arrecifales también está relacionado a la explotación pesquera en el caso particular de Mahahual, el no pertenecer a una ANP por décadas puede ocasionar que sea un sitio con alto nivel de pesca (Arias-González et al., 2004), lo que explicaría que seis de los diez sitios muestreados se encuentren en estado de crítico a regular y que sólo tres hayan presentado niveles altos de BPC (Fig. 5).

Sin embargo, existió una amplia variabilidad para este parámetro entre los diez sitios evaluados (Fig. 5), y el alto valor promedio resultante ($2,720 \text{ g}/100 \text{ m}^2$) se debe principalmente a 3 de los 10 sitios, principalmente el sitio de 40 Cañones, que tuvo un valor muy alto de BPC (mayor a $15,641 \text{ g}/100 \text{ m}^2$), cinco veces mayor que Cozumel ($2,663 \text{ g}/100 \text{ m}^2$), subregión de México con los valores más altos reportados en el SAM desde 2018 (McField et al., 2024; 2022; 2020 y 2018).

La pesca asociada a invertebrados marinos como langosta, caracol y cangrejo rey, son también importantes a considerar para determinar la sostenibilidad de la pesca en Mahahual. Los bajos valores encontrados en este estudio para la presencia de invertebrados móviles (0.015 individuos por m^2 en promedio) son congruentes con estudios previos (Rodríguez, 2017).

Considerando los cuatro parámetros principales evaluados: %LC, %FMA, BPH y BPC, los arrecifes de Mahahual tuvieron un índice de salud arrecifal (ISA) promedio de 2.6, lo que sitúa a esta localidad por debajo del promedio reportado para el Caribe Mexicano en el 2022 y 2024 (2.8 en ambos; McField et al., 2022 y 2024), lo que indica un grado de deterioro importante del ecosistema arrecifal en esta localidad. Sin embargo, no se observó un patrón claro de agrupamiento entre las localidades en cuanto a la composición bentónica y cobertura de coral, que señale los sitios más degradados o más conservados y que estén relacionados a las actividades turísticas o pesqueras en particular, siendo relevante el bajo %LC en todos los sitios (figura 2a).

Este estudio representa la evaluación más reciente de los arrecifes de Mahahual y la que ha abarcado el mayor número de sitios mediante el protocolo de AGRRA que utiliza el método de transecto de punto intercepto para las estimaciones del bentos, el cual se ha comprobado que proporciona un nivel de información casi equivalente a otros métodos, como el de intercepto de línea, y con menor consumo de tiempo bajo el agua, por lo que es altamente recomendable utilizar el protocolo AGRRA para evaluar la salud del arrecife (Facon et al., 2016), ya que es un protocolo calibrado de recopilación de datos. Esto permitió analizar con detalle el estado de conservación del arrecife y compararlo con los resultados obtenidos en otras localidades del SAM y subregiones de



México, especialmente aquellas donde se ha aplicado la misma metodología, lo que asegura la validez, confiabilidad y reproducibilidad del conocimiento generado (Jackson et al., 2014).

Además, este estudio marca el inicio de una serie de evaluaciones dirigidas a comprender los cambios a lo largo del tiempo y el impacto a largo plazo de las estrategias de conservación en los arrecifes de Mahahual. En general, estos arrecifes muestran un alto grado de deterioro ecológico, evidenciado en la composición del bentos, dominado principalmente por TAS, PEYS y FMA (Fig. 2), con una baja presencia de corales hermatípicos y de invertebrados móviles como erizos, caracoles y langostas, organismos característicos de arrecifes saludables, por lo que es imprescindible realizar estudios más localizados y detallados como el presente trabajo sobre la salud del arrecife que permitan detectar las problemáticas locales y poder implementar acciones de gestión local para conservación y recuperación del arrecife en Mahahual.

El manejo local efectivo ayuda a mejorar la sobrevivencia de especies en los arrecifes de coral, y mejora su recuperación después de eventos que los perturban como olas de calor intensas (Donoval et al., 2021; Walker et al., 2024). Existen numerosas acciones que llevadas a cabo en el corto, mediano y largo plazo pueden contribuir a una mejoría ambiental de los arrecifes de coral en Mahahual. En particular, hacemos énfasis en acciones agrupadas en cuatro ejes: investigación, educación, restauración ecosistémica y una gestión costera integrada que incluya trabajar con el sector público y privado.

En Mahahual falta conocimiento de datos clave para un mejor manejo de sus arrecifes, entre ellos es necesario cuantificar con regularidad la calidad de agua que llega al arrecife desde la costa, considerado que la contaminación por descargas residuales es uno de los principales estresores en los arrecifes de coral (Wear y Thurberg, 2015).

Otros puntos fundamentales de investigación deben basarse en la obtención de datos de pesca realizada en la localidad, donde se desarrolla la captura de especies clave para la salud del arrecife como meros, cangrejo rey, langosta y caracol. Recabar datos de tallas, temporadas de reproducción y sitios de agregación, son importantes



para una mejor gestión.

También debe determinarse cuidadosamente la capacidad de carga turística. En Mahahual el INEGI registró 920 pobladores en 2010 y 2,636 en 2020, lo que implica que casi triplicó su población en 10 años, número que incrementa al considerar la población fluctuante y no cuantificada incluyendo turistas que llegan principalmente mediante el arribo de pasajeros en el puerto de cruceros que se encuentra entre los tres puertos que más personas reciben en todo México (SECTUR, 2014-2022), con una cifra relevante en 2018 y 2019, al recibir más de un millón de pasajeros cada año.

Asimismo, son necesarias campañas efectivas de concientización y capacitación en las que participen actores de la sociedad civil, pero también autoridades ambientales, alcaldía y sector privado. La educación ambiental, que aunque existe en la localidad enfocada a escuelas y niños, debe fortalecerse con diversos actores clave, entre ellos, es necesario que los dueños y administradores de restaurantes se comprometan a conocer y respetar las reglas ambientales establecidas en cuanto a la obtención de sus productos. De acuerdo a los pescadores locales, son ellos los que solicitan especies como langosta y mero, aún en época de veda, y se niegan a comprar otras especies que están en menor riesgo de desaparecer debido a que no los consideran de buena calidad. Esta concientización ambiental también debe aplicarse hacia los turistas ya que es común observar que todos ellos incursionan en prácticas dañinas para el arrecife como la utilización de bloqueador solar, lo que ya se ha documentado como un estresor a los arrecifes de coral (Casas-Beltrán et al. 2021) y que en la localidad incrementa su impacto considerando el gran número de visitantes temporales ya mencionado.

En cuanto a la restauración ecosistémica, ésta se ha determinado como un componente clave en la conservación y recuperación de los recursos naturales (Aronson y Alexander, 2013; Duarte, et al. 2020). En la localidad de Mahahual ya se está llevando a cabo un programa de restauración de corales por parte de científicos de asociaciones civiles y sector académico, en conjunto con las autoridades ambientales, lo que a largo plazo pretende recuperar la estructura y biodiversidad en algunos



parches arrecifales, mediante la implementación de acciones, entre las que cabe mencionar, reproducción sexual y asexual de corales en peligro de extinción. Este programa deberá incrementar el área restaurada e incluir la restauración de ecosistemas asociados como manglares y dunas costeras, además de lograr una mayor participación ciudadana y del gobierno local.

En cuanto a cuestiones de gestión, recomendamos se atienda de manera prioritaria la mala calidad del agua que en Mahahual llega al arrecife, esto está relacionado, entre otros factores con el desarrollo costero y falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas negras, lo cual tiene como consecuencia la sobrecarga del sistema y el desborde de las aguas contaminadas en las calles y eventualmente al mar. Esto se ha visto reflejado en el deterioro del arrecife (Arias-González et al., 2017), lo que urge a que el desarrollo urbano y turístico en Mahahual venga acompañado de medidas para que quede asegurado el tratamiento adecuado de las descargas residuales.

Se deben incrementar los esfuerzos de manejo y conservación que incluyan manejo de aguas residuales y regulación del desarrollo costero para minimizar las amenazas que enfrentan los arrecifes de esta localidad (Suchley y Alvarez-Filip, 2018). Esto se puede hacer mediante una inversión pública que asegure una mayor capacidad de tratamiento, tomando en cuenta el crecimiento poblacional y el arribo masivo de turistas. También se recomienda la separación de los sistemas de recuperación de aguas pluviales del sistema de tratamiento de aguas negras, las cuales saturan la planta de tratamiento cuando hay fuertes lluvias. Recomendamos que cada establecimiento privado reciba la información adecuada y sea vigilado en cuanto a su obligación de hacer un mantenimiento adecuado de su desagüe, o que se empiece a utilizar sistemas particulares como biodigestores.

La gestión ambiental integrada propone un proceso integral que incluye acciones a nivel ecosistémico pero también sociales, económicas, de gobernanza y de desarrollo. El conjunto de estrategias y acciones es lo que da al enfoque integral su habilidad de solucionar las problemáticas relacionadas al deterioro del arrecife desde su origen.



Las acciones sugeridas en este estudio permitirían que los arrecifes de Mahahual mejoren en beneficio a la comunidad que se sustenta de este ecosistema y de especies en grave peligro de extinción que lo habitan como los corales cuerno de alce (*Acropora palmata*) y ciervo (*Acropora cervicornis*), tortuga verde (*Chelonia mydas*), caguama (*Caretta caretta*) y carey (*Eretmochelys imbricata*), tiburón martillo gigante (*Sphyrna mokarran*), caracol rosado (*Strombus gigas*), entre otras.

► AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Andrea Rivera-Sosa y Olivia Moudy por su participación en el monitoreo, al centro de buceo Takata Experience por proporcionar equipo de buceo, lancha y personal necesario para la realización de los muestreos. Al equipo de Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment, y a los miembros y monitores voluntarios de la Iniciativa Arrecifes Saludables para Gente Saludable por proporcionarnos los datos del 2021, capacitación y procesamiento de los datos de este estudio. Particularmente, agradecemos a Melina Soto por su asesoría y apoyo, así como a Israel Muñiz-Castillo por las correcciones y sugerencias en el escrito.

► LITERATURA CITADA

Aguilar, D. (1998). Estructura de la comunidad bentónica del arrecife de Mahahual, Quintana Roo, México (*No. Q/593.6097267 A3*).

AGRRA. (2018) Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment: coral reef monitoring. Disponible en <http://www.agrra.org>.

Alvarado, J., Reyes-Bonilla, H., & Benítez-Villalobos, F. (2015). *Diadema mexicanum*, erizo de mar clave en los arrecifes coralinos del Pacífico Tropical Oriental: lo que sabemos y perspectivas futuras (Diadematoida: Diadematidae). *Revista de Biología Tropical*, 63, 135-157.



- Álvarez-Filip L, Estrada-Saldívar N, Pérez-Cervantes E, Molina-Hernández A. y González-Barrios, F. (2019).** A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean. *PeerJ*:e8069.
- Alvarez, R. y Wong, K. (2015).** Sistema Arrecifal Mesoamericano: Construyendo Futuro desde Tulum 1997. *Fondo SAM (MAR FUND)*.
- Andrade, N. (2018).** Cambios en la comunidad de peces arrecifales del caribe mexicano como medida para evaluar la efectividad de áreas marinas protegidas. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Arias-González, J., Nuñez-Lara, E., González-Salas, C. y Galzin, R. (2004).** Trophic models for investigation of fishing effect on coral reef ecosystems. *Ecological modeling*, 172(2-4), 197-212.
- Arias-González, J., Fung, T., Seymour, R., Garza-Pérez, J., Acosta-González, G. y Bozec Y. (2017).** *Changes in herbivorous fish abundance do not drive a coral-algal phase shift in Mesoamerica. PLoS ONE 12(4): e0174855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174855>.*
- Arguelles, J., Brenner, J. y Pérez-España, H. (2019).** Línea base para el monitoreo de los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) a través de la metodología AGRRA (Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment). *The Nature Conservancy – Sea&Reef. Boca del Rio*, 26 pp. DOI:[10.13140/RG.2.2.35372.92807](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35372.92807).
- Aronson, J., y Alexander, S. (2013).** Ecosystem restoration is now a global priority: time to roll up our sleeves. *Restoration Ecology* 21(3):293-296. <http://dx.doi.org/10.1111/rec.12011>
- Baker, P., Gabrielatos, C. y McEnery, T. (2013).** Sketching Muslims: A Corpus Driven Analysis of Representations around the word 'Muslim' in the British Press 1998-2009. *Applied Linguistics*, 34 (3), 255-278.
- Barón, M. (2017).** La restauración de arrecifes de coral; una alternativa de conservación en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).
- Barranco, H. y Morín, J. (2010).** Áreas Naturales Protegidas. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*, 414-419.



- Bellwood, D., Hughes, C. y Nystro, M. (2004).** Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429:827–833.
- Bruno, J., Sweatman, H., Precht, W., Selig, E. y Schutte, V. (2009).** Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. *Ecology*, 90: 1478-1484. <https://doi.org/10.1890/08-1781.1>.
- Calderón, L., Bonilla, H., López, C. y Pérez, R. (2017).** Los arrecifes coralinos de México: servicios ambientales y secuestro de carbono. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(1), 53-62.
- Camacho-Cruz, K., Ortiz-Hernández, M., Carrillo, L., y Sánchez, A. (2024).** Variability of the trophic state in a coastal reef system associated with submarine groundwater discharge in the Mexican Caribbean. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.
- Can, A. (2003).** Manejo integrado de recursos costeros en Mahahual reporte final periodo octubre-2002-septiembre-2003. 42p.
- Casas-Beltrán, D., Febles-Moreno, K., Hernandez-Yac, E., Gallaher, C., Alvarado-Flores, J., Leal-Bautista, R., & Lenczewski, M. (2021).** Impact of tourist behavior on the discharge of sunscreen contamination in aquatic parks, sinkholes, and beaches of the Mexican Caribbean. *applied sciences*, 11(15), 6882.
- Chávez-Hidalgo, A. (2009).** Conectividad de los arrecifes coralinos del Golfo de México y Caribe Mexicano. *Tesis de Maestría en Ciencias*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz. B.C.S., México. 170p.
- Contreras-Silva, A., Tilstra, A., Migani, V., Thiel, A., Pérez, E., Estrada, N., & Wild, C. (2020).** A meta-analysis to assess long-term spatiotemporal changes of benthic coral and macroalgae cover in the Mexican Caribbean. *Scientific reports*, 10(1), 1-12.
- Daltabuit Godás, M. (1999).** Desarrollo turístico en Quintana Roo y sus efectos en el sistema arrecifal mesoamericano y del Caribe. 22 Pp. *En: IX Reunión Anual del Programa*.



- De Alba, C. (2020).** Efecto del huracán Dean en la variación del ensamblaje de coral hermatípico en áreas someras y profundas de Banco Chinchorro, México. *Tesis de Maestría*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara.
- Díaz-Pérez, L., Rodríguez-Zaragoza, F., Ortiz, M., Cupul-Magaña, A., Carriquiry, J., Ríos-Jara, E., Rodríguez-Troncoso, A. y 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), e0161812.
- Díaz-Osorio, A., Schmitter-Soto, J., Vega-Zepeda, A. y Espinoza-Tenorio, A. (2022).** How effective are marine parks in protecting their coral reef ecosystem? A study case in the Mexican Caribbean. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 32(7), 1126-1140.
- Donoval, M., Burkepile, D., Kratochwill, C., Shlesinger, T., Sully, S., Oliver, T., y Van Woesik, R. (2021).** Local conditions magnify coral loss after marine heatwaves. *Science*, 372(6545), 977-980.
- Duarte, C., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G., Castilla, J., Gattuso, J., y Worm, B. (2020).** Rebuilding marine life. *Nature*, 580(7801), 39-51.
- Escalante, M. y Carrol, I. (2013).** Antropología y turismo. Cuicuilco, 20(56), 249-259. ISSN: 1405-7778. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=35128956012>.
- Facon, M., Pinault, M., Obura, D., Pioch, S., Pothin, K., Bigot, L., Garnier, R., Quod, Jean-Pascal. (2016).** A comparative study of the accuracy and effectiveness of Line and Point Intercept Transect methods for coral reef monitoring in the southwestern Indian Ocean islands. *Ecological Indicators*, 60, 1045-155. 10.1016/j.ecolind.2015.09.005.
- Feingold, J., Thornton, S., Banks, K., Gasman, N., Gilliam, D., Fletcher, P. y Avila, C. (2003).** A rapid assessment of coral reefs near Hopetown, Abaco Islands, Bahamas (stony corals and algae). pp. 58-75 in J.C. Lang (ed.), *Status of Coral Reefs in the western Atlantic: Results of initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program*. *Atoll Research Bulletin* 496.



- Figuroa-Zavala, B., Correa-Sandoval, J., Ruiz-Zárata, M., Weissenberger, H. y González-Solís, D. (2015).** Environmental and socioeconomic assessment of a poorly known coastal section in the southern Mexican Caribbean. *Ocean & Coastal Management*, 110, 25-37.
- Garza-Pérez, J. y Arias-González, J. (2001).** Temporal change of a coral reef community in the south Mexican Caribbean. *Proceedings of the 52nd Gulf and Caribbean Fisheries Institute*.
- Gutiérrez, A., Torruco, D., Fraga, J. y Solís, G. (2013).** Participación ciudadana en la conservación de arrecifes coralinos en dos áreas protegidas del Sistema Arrecifal Mesoamericano: un análisis contingente. *Investigación Ambiental*, 5, 5-15.
- Gutierrez, D. (2016).** Evaluación de reclutamiento de coral en el arrecife de Mahahual; como indicador de recuperación. *Tesis de licenciatura*. Universidad de Quintana Roo. Chetumal.
- Hammer, O., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. (2001).** PAST. Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electrónica* 4(1):9p.
- Hirales, M., Espinoza, J., Schmook, B., Ruiz, A. y Ramos, R. (2010)** Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*. 36(2): 147–159p.
- Hughes, T. (1994).** Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*. 265(5178):1547-51. doi: 10.1126/science.265.5178.1547. PMID: 17801530.
- Jackson, J., Donovan, M., Cramer K., Lam. V. (editors). (2014)** Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Switzerland.
- Kramer, P., McField, F., Álvarez, I. Drysdale, F., Rueda, A. y Pott, R. (2015).** Report card for the Mesoamerican Reef. Disponible en www.healthyreefs.org
- Lang, J., Marks, K., Kramer, P., Kramer, P. y Ginsburg, R. (2012).** Protocolos AGRR version 5.5.



- López, H. (2011).** Aprovechamiento turístico y manejo de arrecifes de coral en Mahahual, Quintana Roo. *Tesis de licenciatura*. Universidad de Quintana Roo. Chetumal.
- Marks, K. (2008).** AGRRA Parametrized Online Reporting Tool. *AGRRA-PORT. Version 1.1 pp. 30.*
- McField, M. y Kramer, P. (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. *Washington, Smithsonian Press.*
- McField, M., Kramer, P., Alvares-Phillip, L., Drysdale, I., Rueda, M., Giro, A. y Soto, M. (2018).** Report Card for the Mesoamerican Reef. Healthy Reef Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Kramer, P., Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N. y Rueda, M. (2020).** Mesoamerican Reef Report Card.
- McField, M., Soto, M., Craig, N., Giro, A., Drysdale, I., Guerrero, C., Rueda, M., Kramer, P. y Muñiz, I. (2022).** Mesoamerican Reef Report Card. Healthy Reef Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Soto, M., Martínez, R., Giró A., Guerrero C., Rueda, M., Kramer, P., Roth L., y Muñiz, I. (2024).** Mesoamerican Reef Report Card. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org.
- Mumby, P., Edwards, A. y Arias-González, E. (2004).** Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature* 427, 533–536 <https://doi.org/10.1038/nature02286>.
- Pandolfi, J., Bradbury, E., Sala, T., Hughes, K., Bjorndal, R., Cooke, D., McArdle, L., McClenachan, M., Newman, G., Paredes, R. y Jackson, J. (2003).** Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science*.
- Rioja-Nieto, R. y Alvarez-Filip, L. (2019).** Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends, and conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 616-625.



Rodríguez, A. (2017). Estudios de Límite de Cambio Aceptable, para regular las actividades turístico recreativas que se desarrollan en Mahahual-Xahuayxol, en la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano. *PROZONA*. Convenio de Concertación Núm. CONANP/PROMANP/FOR/005/2017.

Rodríguez, M. (2019). Perspectiva socioeconómica de Área Marina Protegida, enfocada en arrecifes de coral en Mahahual, Quintana Roo *Tesis de Licenciatura*. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio Tesis UNAM Digital.

Ruiz-Zárate, M., Hernández-Landa, R., González-Salas, C., Nuñez-Lara, E. y Arias-Gonzalez, J. (2003). Mexico. Condition of Coral Reef Ecosystems in Central-Southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: Stony Corals and Algae). *Atoll Research Bulletin*.

SECTUR (2022) Análisis del arribo de cruceros 2018 - 2021 y expectativas 2022. DATATUR. Secretaria de turismo. Recuperado de : https://www.datatur.sectur.gob.mx/Documentos%20compartidos/Analisis_Turismo_Cruceros.PDF

Steneck, R. y Sala, E. (2005). Large marine carnivores: trophic cascades and top-down controls in coastal ecosystems past and present. pp. 110–137 in J. C. Ray, K. H. Redford, R. Steneck, and J. Berger, editors. Large carnivores and the conservation of biodiversity. *Island Press, Washington, D.C., USA*.

Suchley, A. y Alvarez-Filip, L. (2018). Local human activities limit marine protection efficacy on Caribbean coral reefs. *Conservation Letters*, 11(5), e12571.

Toledo, V. (2005). Repensar la conservación: ¿ áreas naturales protegidas o estrategia bioregional?. *Gaceta ecológica*, (77), 67-83.

Veron, J. (2000). Corals of the World, Townsville, *Australian Institute of Marine Science*.

Walker, A., Kratochwill, C., y Van Woesik, R. (2024). Past disturbances and local conditions influence the recovery rates of coral reefs. *Global Change Biology*, 30(1), e17112.



Wear, S., y Thurber, R. (2015). The Year in Ecology and Conservation Biology. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1355(1), 15.

WWF (1999). Arrecife Mesoamericano. Recuperado el 15/02/2023 de: https://www.wwf.org.mx/que_hacemos/programas/arrecife_mesoamericano/