



El Colegio de la Frontera Sur Université de Sherbrooke

Estudio de caso: acciones de restauración coralina en
Mahahual, Q.R. y revisión de estrategias para el Sistema
Arrecifal Mesoamericano (2010-2020)

TESINA

presentada como requisito parcial para optar al grado de
Maestro en Ecología Internacional
por

Nicolás R. Martínez Calvillo

Directora

Dra. Norma Emilia González Vallejo

2021



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Chetumal, Quintana Roo, 29 de junio de 2021

Las personas abajo firmantes, integrantes del jurado examinador de: **Nicolás Ricardo Martínez Calvillo** hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesina titulada **Estudio de caso: acciones de restauración coralina en Mahahual, Q.R. y revisión de estrategias para el Sistema Arrecifal Mesoamericano (2010-2020)** para obtener el grado de Maestro en Ecología Internacional.

Directora: Dra. Norma Emilia González Vallejo

Firma

Evaluador: Dr. Miguel Ángel Ruíz Zarate

Firma

Dedicatoria

A mi mamá, que me amó, motivó y encaminó a nuevos rumbos.

A la dicha de su amor, que trascendió la muerte.

Esto que no logró vislumbrar, pero en lo que confió, es para ella.

A las personas que han trabajado en proteger la naturaleza, en apreciar su belleza y significado para la humanidad y el equilibrio.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante mis estudios en la Maestría en Ecología Internacional.

Al Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y a la Universidad de Sherbrooke, que son ahora mis casas de estudio y por acoger este tipo de posgrados que alientan la colaboración multidisciplinaria de distintos perfiles profesionales para ser potenciales gestores en la resolución de problemas sociales y ambientales. Gracias también al personal que media a través de estas instituciones y que se esfuerzan para que la educación siga siendo un medio de entendimiento y resolución ante los panoramas sociales y ambientales de nuestro país.

A mi Directora, la Dra. Norma Emilia González, por sus aportaciones y asesoría constante que me otorgó con paciencia y disposición durante el desarrollo de este trabajo. Le agradezco su calidez y acompañamiento moral y profesional. Comparto con usted el mérito de este trabajo.

A mi Evaluador, el Dr. Miguel Ángel Ruiz Zárate, por sus sugerencias y correcciones.

A la coordinadora de la MEI, la Dra. Birgit Schmook por su guía y apoyo.

A mis profesores y profesoras, que despertaron de nuevo la curiosidad esencial de un biólogo, especialmente a la Dra. Sophie Calmé, la Dra. Colette Ansseau, a la M. Env. Caroline Cloutier y a la Mtra. María del Rosario Ortiz Quijano, por compartir con esmero sus conocimientos y experiencia. También por sostener y validar esta maestría con una visión congruente a sus ideales personales y profesionales. También a Nancy, por su apoyo y paciencia en estos dos años.

A mis compañeros y compañeras de la MEI, por la aventura y aprendizaje que implicó esta etapa y por las vivencias particulares con cada uno/una; a mis compañeras francófonas, por la paciencia de en el proceso de aprendizaje y por su disposición, risas y calidez. Gracias sobre todo por la concepción de nuevas amistades y hermandades transfronterizas.

A mi familia. A mi mamá, a mi papá, a mi hermana, Ro y mi hermano, José, por su motivación y presencia. Son la moción original, refuerzo constante del amor y referencia para seguir lejos de Chihuahua. A mi Kenia, mi chipiturri, por ser y seguir estando en todos los caminos y terrenos.

A mis amigas y amigos, quienes en la distancia compartieron su compañía y estuvieron en los reajustes de la vida en estos últimos dos años. Gracias por las meditaciones juntos, por compartir, aún en distintas ubicaciones, usos horarios y lenguas.

A Phyta y a Pelón.

Resumen

A pesar de la relevancia que los ecosistemas arrecifales presentan, estos están expuestos a diferentes presiones. Tales amenazas han demostrado potenciarse y repercutir negativamente en la salud de los corales, su crecimiento, madurez y reproducción. También se prevé que la frecuencia e intensidad de fenómenos de blanqueamiento o sucesión ecológica aumenten en las próximas décadas en adición a las amenazas antrópicas. Esto exacerbaría la magnitud de degradación de condiciones ambientales desfavorables para el desarrollo de los arrecifes, limitando o eliminando sus funciones ecológicas. Con base en lo anterior, los esfuerzos de restauración coralina han sido aceptados como una buena herramienta de gestión. Sus objetivos se centran en restaurar las poblaciones de taxa específicos para evitar la extinción localizada y promover la recuperación de poblaciones autosuficientes. Si bien resulta no ser una alternativa totalitaria, ni realista por si sola, para restaurar a sistemas arrecifales complejos, como el Sistema Arrecifal Mesoamericano, sí es una estrategia de mitigación, sobre todo en el Caribe, donde ya los corales pertenecientes al género *Acropora* están catalogados por la UICN como en “peligro crítico”.

Esta revisión presenta antecedentes y un periodo con las acciones de conservación limitadas al Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), así como el contexto en las que estas están inmersas. Tales acciones son respuesta a las amenazas particulares identificadas y que tienen en común la administración gubernamental, social y de financiamiento. Se exponen similitudes en el alcance de las formas de mitigación que distintas instancias han llevado a cabo, junto con un caso de estudio, en el que se exhorta al análisis y planteamiento de modificaciones al sistema de logística con el que se ha gestionado hasta la fecha las acciones de mitigación de la pérdida de cobertura coralina en el Caribe.

Sommaire

Malgré l'importance des écosystèmes récifaux, ils sont exposés à différentes pressions. Il a été démontré que ces menaces ont un impact positif ou négatif sur la santé, la croissance, la maturité et la reproduction des coraux. On s'attend également à ce que la fréquence et l'intensité des phénomènes de blanchiment ou de succession écologique augmentent au cours des prochaines décennies, en plus des menaces anthropiques. Cela aggraverait l'ampleur de la dégradation des conditions environnementales défavorables au développement des récifs, limitant ou éliminant leurs fonctions écologiques. Sur la base de ce qui précède, les efforts de restauration des coraux ont été acceptés comme un bon outil de gestion. Leurs objectifs sont axés sur la restauration de populations de taxons spécifiques afin d'éviter une extinction localisée, ainsi que sur la promotion de la reconstitution de populations autonomes. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une alternative totalitaire, ni réaliste en soi pour restaurer le système de récifs méso-américains, il s'agit d'une stratégie d'atténuation. Surtout lorsque les coraux appartenant au genre *Acropora* des Caraïbes sont déjà répertoriés par l'UICN comme étant "en danger critique d'extinction",

Cette revue présente l'historique et une période des actions de conservation limitées au Système Récifal Méso-américaine, ainsi que le contexte dans lequel elles s'inscrivent. Ces actions sont une réponse aux menaces particulières identifiées et ont pour dénominateur commun le contexte de la gestion gouvernementale, sociale et financière. Ce document expose les similitudes dans la portée des formes d'atténuation que les différentes agences ont entreprises. Cet examen, ainsi qu'une étude de cas, incite à analyser et à envisager des modifications du système logistique par lequel l'atténuation de la perte de couverture corallienne dans les Caraïbes a été gérée jusqu'à présent.

Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Sommaire	v
Lista de Figuras	vii
Abreviaciones y acrónimos	vii
Introducción	1
Capítulo I: Arrecifes de coral	3
Características generales	3
Requerimientos ambientales	4
Reproducción y reclutamiento coralino	5
Importancia de los arrecifes coralinos	8
Amenazas a los sistemas arrecifales	10
Calentamiento global	11
Eutrofización	12
Enfermedades coralinas	13
Capítulo II: Sistema Arrecifal Mesoamericano	17
Delimitación geopolítica	17
Amenazas particulares	19
Acciones para su conservación	22
Capítulo III: Restauración activa de sistemas arrecifales	24
Restauración activa	24
Viveros de coral	25

Reproducción asexual in situ	26
Capítulo IV: Revisión de Estrategias y Acciones de conservación del SAM..	27
Esfuerzos en la última década (2010-2020).	33
Revisión de estrategias de países que conforman el SAM	46
Capítulo V: Estudio de caso en Mahahual, Quintana Roo	51
Acciones de restauración	52
Trabajo de campo.....	53
Discusión del caso de estudio.....	54
Conclusiones	56
Referencias	62

Lista de Figuras

Figura 1. Sistema Arrecifal Mesoamericano.	16
---	----

Abreviaciones y acrónimos

ANPs	Áreas Naturales Protegidas
CC	Cambio climático
CITES	Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres
CRC	Coral Restoration Consortium
EBB	Enfermedad de la banda blanca
IMRA	Iniciativa Mesoamericana de Rescate de Arrecifes
ONGs	Organizaciones no gubernamentales
RRA-SAM	Red de Restauración Arrecifal del Sistema Arrecifal Mesoamericano
SAM	Sistema Arrecifal Mesoamericano
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

Introducción

En la actualidad se sabe que los arrecifes coralinos están expuestos a diversas amenazas de distinta índole. Asimismo, los arrecifes del Caribe también han sufrido pérdidas masivas de corales desde principios de la década de 1980. Johnson y colaboradores (2011) señalaron un declive global en la cobertura de coral vivo debido a los impactos antrópicos; el incremento poblacional en la zona costera, gran parte asociada a los desarrollos comerciales y residenciales en las costas; la pesca excesiva; las repercusiones por la sedimentación de lixiviados en las lagunas costeras, como la eutrofización y contaminación, ocasionando cambios de regímenes por eventos naturales (biológicos y físicos); especies invasoras; así como efectos asociados a regímenes de Cambio Climático (CC) (García *et al*, 2008; Young *et al*, 2012; Jackson *et al*, 2014; McLeod *et al*, 2018; Bayraktarov *et al*, 2020).

En todo el mundo se han planteado estrategias de prevención y remediación en aras de la conservación de los arrecifes (i.e Johnson *et al*, 2011; Arias-González *et al*, 2015; Frias-Torres *et al*, 2018; Zepeda-Centeno *et al*, 2019). Actualmente existen organizaciones no gubernamentales, sectores de gobiernos nacionales en alianza con organizaciones internacionales, así como instituciones académicas y de investigación científica que han generado herramientas útiles en la búsqueda de una adecuada restauración en sistemas arrecifales. Se han realizado estudios para la comprensión de las amenazas que enfrenta el arrecife, así como implementado actividades de mitigación y/o restauración que ayuden directa e indirectamente a su recuperación después de sufrir perturbación (Ardisson *et al*, 2011; Young *et al*, 2012; Comte y Pendleton, 2018;).

En la región del Caribe se ha definido el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), política y académicamente, que se extiende en el Caribe occidental entre los márgenes costeros fronterizos de México, Belice, Guatemala y Honduras. Como en otros arrecifes coralinos del mundo, este enfrenta un declive en sus poblaciones, principalmente *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis* (McField y Kramer, 2006; Johnson *et al*, 2011). Ambas especies coralinas son consideradas formadoras de arrecifes en la región. Según la Lista Roja emitida por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) ambas especies se encuentran en la categoría de peligro crítico (Aronson *et al*, 2008). Por otro lado, la Convención Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, por sus siglas en inglés) las incluye en su Apéndice II. En este aparecen especies que no están necesariamente amenazadas de extinción pero que podrían llegar a estarlo a menos que se controle estrictamente su comercio y donde sólo autoriza el comercio internacional si los corales se recolectan de forma sostenible. Sin embargo, en la mayor parte del Caribe, es ilegal dañar, extraer o recolectar corales.

En la zona que comprende el SAM, se han implementado estrategias y técnicas de restauración activa, a través de establecimiento de viveros y trasplante de corales a falta de la recuperación natural de los arrecifes; con la intención de amortiguar su pérdida, así como extender la densidad-cobertura de las especies coralinas dominantes conformadoras del arrecife (Carne y Baums, 2016).

Con base en lo anterior, este documento comprende una revisión de los estudios y actividades de restauración más relevantes desarrolladas por

distintos organismos gubernamentales y no gubernamentales durante la década 2010-2020. Se revisan los antecedentes y las acciones emprendidas por dichas organizaciones relativas al SAM para dicho período. Se pretende que el compendio de información facilite el conocimiento del estado actual, las estrategias implementadas relacionadas a la restauración del sistema arrecifal y sus posibles tendencias relativas a las acciones y herramientas.

Capítulo I: Arrecifes de coral

Características generales

Las asociaciones de pólipos que conforman colonias se conocen como coral, estos son animales pertenecientes al phylum Cnidaria y que conforman el tejido vivo que se fija a la misma estructura de carbonato de calcio, segregada previamente, pudiendo ser inclusive por otro organismo que le ha sucedido en la colonia. Además, poseen una relación simbiótica con unas microalgas llamadas zooxantelas que les proveen de alimento (azúcares sintetizadas), producto de la fotosíntesis, al tiempo que el pólipo le provee refugio en su tejido en las condiciones ambientales óptimas para la misma (Spalding *et al.*, 2001). Con ello, y en condiciones óptimas, la relación simbiótica entre el pólipo y las zooxantelas permite que la tasa de crecimiento del esqueleto calcáreo del coral sea superior a la erosión causada por organismos adjuntos al arrecife y al oleaje (Ruppert y Barnes, 1996; Spalding *et al.*, 2001).

Los arrecifes coralinos son centros de alta biodiversidad y acogen a numerosas especies fungiendo como hábitats muy específicos parcial o totalmente de estadios de vida para diversas especies y son refugio para una tercera parte

de las especies marinas conocidas (Spalding *et al.*, 2001; Veron *et al.*, 2009). Son formaciones extensas compuestas por estructuras biogénicas, producto de la acumulación de carbonato de calcio (CaCO₃) secretado primordialmente por corales hermatípicos o corales pétreos (Ruppert y Barnes, 1996; Veron, 2000). Tales formaciones, son compuestas por esqueletos de generaciones sucesivas de corales y definen la estructura de la comunidad: biogeografía, evolución, historia geológica, diversidad y abundancia de las especies formadoras de arrecife y la dinámica del sitio (Ruppert y Barnes, 1996).

Requerimientos ambientales

Los arrecifes coralinos se encuentran en aguas consideradas como oligotróficas, es decir, de baja productividad primaria y con pocos nutrientes (Veron, 2011). Además, su distribución global se limita a latitudes entre los 30°N y 30°S, en una franja circumtropical (Schuhmacher, 1978; Levinton 1982).

Los requerimientos ambientales del coral presentan condiciones fisicoquímicas muy específicas y limitantes. Para su sobrevivencia, necesitan rangos particulares de temperatura (entre los 20-28°C), luz (agua clara y poca profundidad), salinidad, sedimentación y turbidez, entre otras. Estas condiciones se deben al rol biológico con su simbionte: las zooxantelas. Éstas realizan fotosíntesis, por lo tanto, la distribución vertical de los arrecifes coralinos está asociada a la penetración de la luz oscilando en profundidades no mayores a 60m (Schuhmacher, 1978; Ruppert y Barnes, 1996). Considerando lo anterior, el crecimiento del arrecife podrá ser alterado por factores como la profundidad, la turbidez, los arribos masivos de macroalgas y otros, que alteren la cantidad de luz en la columna de agua (Arias *et al.*, 2017).

Reproducción y reclutamiento coralino

El reclutamiento coralino es la adición de nuevos individuos a la población existente, puede ser producto de una reproducción sexual o asexual. Este depende de tres fases importantes durante el proceso. En primer lugar, la disposición de larvas según el tipo de reproducción (sexual o asexual), su fertilización y la conectividad entre distintas colonias; en segundo lugar, su establecimiento junto con las condiciones propicias para su fijación de estadio sésil; en último lugar se refiere al crecimiento en el sustrato específico y su sobrevivencia. (Ritson-Williams *et al.*, 2009).

El ciclo de vida de los corales hermatípicos consta de una fase larvaria y una sésil o béntica. Una vez expulsada la larva, o bien formada por la fecundación de gametos, ésta sobrevivirá en la columna de agua y logrará asentarse en el fondo marino, y si este es adecuado, podrá comenzar su transformación a pólipo primario, iniciando a formar el esqueleto calcáreo hasta madurar y llegar a ser un organismo reproductivo junto con los demás de la colonia. Durante la fase sésil es donde el crecimiento de los tejidos y el esqueleto del pólipo muchas veces incluye una o más formas de reproducción asexual. Inclusive ciclos de reproducción sexual repetitivos, que implican la producción de gametos, su fertilización, el desarrollo embrionario y una fase planctónica (Harrison y Wallace, 1990).

El proceso de reproducción asexual posee ventajas, pues no requiere mucha energía comparada con la reproducción sexual, como el caso de la fragmentación colonial, que puede ayudar al incremento de la cobertura coralina mediante la propagación local en colonias ya adaptadas si logra fijarse al

arrecife (Richmond, 1997). Esto se traduce en adiciones de nuevas estructuras al arrecife y que llevará ventaja en la competencia por los recursos; así como una resiliencia debido a un escenario de mortalidad parcial de la colonia (Harrison, 2011; Ruppert y Barnes, 1996). Entre sus desventajas está la dispersión limitada de reclutas. Asimismo, dado que no existe intercambio genético, la plasticidad y adaptabilidad del genotipo de corales es reducida y podría mermar la resiliencia a las condiciones climáticas futuras y a enfermedades (Richmond, 1997).

Por otro lado, la reproducción sexual favorece la dispersión a mayor escala de los corales e incrementa el pool genético que se traduce en variabilidad y procesos evolutivos que promueven la adaptación y supervivencia de las especies (Harrison, 2011). Además, los corales tienen dos estrategias reproductivas diferentes que son importantes para la cría de larvas de coral: el desove y la incubación. Las especies que desovan liberan los gametos (huevos y esperma) en la columna de agua para la fecundación externa y el posterior desarrollo de las larvas. Por otro lado, en las que incuban, la fecundación se produce dentro del pólipo y las larvas completamente formadas (llamadas plánulas) se liberan durante el desove. Los incubadores suelen desovar sólo una vez al año, mientras que los corales desovadores pueden reproducirse más de una vez durante el año y a menudo se reproducen durante varios meses consecutivos. Los corales también pueden ser hermafroditas (los pólipos producen tanto huevos como esperma) o gonocóricos (es decir, que los pólipos tienen sexos separados) (Edwards, 2010).

Los desovadores, ya sean hermafroditas o gonocóricos, liberan gametos en la columna de agua, donde se encontrarán con gametos de otras colonias. En el

caso de las especies hermafroditas, los óvulos y los espermatozoides suelen estar agrupados en paquetes flotantes en el momento de la liberación del pólipo. La flotabilidad de los paquetes los lleva a la superficie, donde se separan, liberando los huevos y el esperma en la superficie del mar y permitiendo que se produzca la fecundación cruzada. Por otro lado, los incubadores, a diferencia de los corales que liberan los gametos, los reproductores absorben el esperma liberado por las colonias cercanas y, tras la fecundación interna de los huevos, liberan plánulas completamente formadas. Los pólipos liberan las plánulas directamente en el agua o, en ocasiones, las crían externamente en una bolsa especializada en la superficie del coral. Las larvas criadas suelen contener zooxantelas, a menudo son capaces de asentarse y comenzar su metamorfosis a los pocos minutos de ser liberadas y pueden empezar a alimentarse inmediatamente (Edwards, 2010).

En el caso de *A. palmata* como *A. cervicornis*, estas liberan sus gametos (tanto masculinos como femeninos) a la columna de agua de forma simultánea donde se fertilizan. Sin embargo, poseen un mecanismo que puede inhibir la fertilización entre gametos de un mismo individuo genético, con lo que se favorece la variabilidad genética (Szmant, 1986). Harrison y Wallace (1990) mencionan en su estudio que el género *Acropora* la fertilización y el desarrollo larval son externos. La larva plánula crece mientras que las zooxantelas se incorporan al tejido. Por ejemplo, para *A. palmata*, el reclutamiento sexual de comienza con el desove de paquetes de gametos en unas pocas noches después de las lunas llenas de agosto y/o septiembre para que luego suceda la fertilización y desarrollo en el plancton de las larvas de plánula; además, las larvas son competentes para asentarse hasta después de al menos 4 a 8 días de desarrollo durante los cuales están expuestas a la depredación y a los

factores de estrés ambiental, así como a la dispersión por las corrientes (Miller y Szmant, 2006).

Importancia de los arrecifes coralinos

Los arrecifes coralinos son centros de alta biodiversidad, acogen a numerosas especies fungiendo como hábitats muy específicos (parcial o totalmente) de estadios de vida para diversas especies y, de hecho, son refugio para una tercera parte de las especies marinas conocidas (Spalding *et al*, 2001; Veron *et al* 2009). Su complejidad da cabida al flujo eficiente de reciclaje biológico y de una alta retención de nutrientes, albergan aproximadamente 30 phyla, incluidas especies de peces e invertebrados de importancia comercial, y ello en una cobertura de superficie menor al 1% del planeta (Ruppert y Barnes, 1996; Veron *et al.*, 2009; Birkeland, 2015).

El ecosistema arrecifal normalmente se comporta como un sitio de secuestro de carbono desde la atmósfera. El CO₂ entra al océano por difusión y se incorpora a los ecosistemas gracias a la fotosíntesis de algas y fitoplancton, y como carbonatos de origen animal, vegetal o químico (Kleypas *et al.*, 2006). Dado que el carbono (como carbonatos) que depositan las especies arrecifales como corales y otros miembros del ecosistema (como moluscos, esponjas, etcétera) permanece fijo en sus esqueletos incluso después que el organismo muere. Esto implica que este servicio ambiental es fundamental para amortiguar el efecto invernadero que ha dado lugar al cambio climático global y que su presencia tenga relevancia y prioridad en la conservación como un sitio de secuestro de carbono (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; Sheppard *et al.*, 2017; Reyes *et al.*, 2014).

Por otro lado, el arrecife coralino y la laguna que forma con la costa son parte de los llamados ecosistemas costeros. Estos lo complementan las praderas de pastos marinos, la duna costera, los humedales y el manglar, siendo beneficiados por la acción protectora del arrecife, evitando la erosión. Asimismo, diferentes grupos de animales, entre ellos aves, peces, crustáceos, moluscos y hasta mamíferos marinos, dependen en algún momento de ellos, por lo que poseen una compleja dinámica (Johnson *et al*, 2011). El manglar, por ejemplo, que es el ecosistema costero más lejano al arrecife tiene un rol en la regulación de filtración de nutrientes, contaminantes y de la concentración de sales, protege las costas y tiene también una relación intrínseca con la suspensión de sedimentos en la laguna arrecifal que, junto con la duna costera y las zonas con parches de pastos marinos, dan estabilidad a las comunidades bentónicas; este conjunto de hábitats es vital para el sostén de la trama trófica en el mismo (Dorenbosch *et al*, 2005; Ardisson *et al*, 2017). Por su parte, los pastos marinos funcionan como zonas de alta productividad primaria, pues son fuente de alimentación directa de otros animales, y también zonas de refugio para organismos en etapas juveniles, como peces de importancia comercial (van Tussenbroek *et al*, 2017).

Los arrecifes de coral tropicales de todo el mundo sustentan una amplia gama de servicios, entre algunos de los servicios de provisionamiento más estudiados se encuentran las pesquerías, los servicios culturales que acogen la recreación y el turismo, y los servicios de regulación que incluyen la protección costera. También sustentan una serie de otros servicios de regulación importantes, como la generación de arena y el procesamiento de nutrientes. Asimismo, los arrecifes delimitan una diversidad de medios de vida e identidades asociadas, de la misma forma que proporcionan oportunidades

para la investigación y la educación, de forma que los servicios culturales de los arrecifes de coral constituyen espacios que generan y apoyan la experiencia humana. Entre otros servicios de apoyo que hacen ahínco en su importancia, se incluyen importantes servicios de hábitat y biodiversidad para el arrecife y los ecosistemas adyacentes que contribuyen indirectamente al bienestar humano, pero son difíciles de captar en términos de su valor de servicio independiente (Woodhead *et al*, 2019).

Como se hace notar anteriormente, la importancia de los sistemas arrecifales implica una comprensión multidisciplinaria de sistemas sociales y ecológicos. Como otros ecosistemas, estos también pueden evidenciar lo que se ha definido como servicios ecosistémicos, es decir, a aquellos los elementos tangibles o intangibles que sustentan, tanto el equilibrio ambiental, como los recursos de los que se benefician o dependen los organismos o individuos que co-habitan. En este caso, el arrecife y el complejo sistema costero del que forman parte los sistemas arrecifales. Pues brindan elementos como las pesquerías de sustento, así como una importancia paisajística de la que se vale el turismo. Esto se interpreta como un ecosistema de alto valor biológico, físico, económico y sociocultural (Reyes *et al.*, 2014; Woodhead *et al*, 2019).

Amenazas a los sistemas arrecifales

Los sistemas arrecifales de todo el mundo enfrentan amenazas particulares, ya sea por su localización, por su contexto histórico y actual, las actividades extractivas de pesca, la gestión (o la falta de ella) relativa al desarrollo urbano, el desarrollo de actividades turísticas y las consecuencias asociadas a las mismas. También, las enfermedades coralinas, la eutrofización y el blanqueamiento son amenazas globales, pero que pueden tener afectaciones

en diferentes escalas con base en los estresores regionales. Estos se definen por corrientes marinas, eventos climáticos, la consecuencia directa del desarrollo urbano y de las tecnologías implicadas en servicios sanitarios de manejo de agua y residuos propios de las comunidades (Edwards y Gómez, 2007).

Calentamiento global

El calentamiento global es un agente de cambio que afecta de manera generalizada a los arrecifes de todo el mundo, está relacionado con otra sinergia de factores que lo promueven y refuerza. Si bien perturbaciones naturales pueden alterar los patrones espaciales y los procesos ecológicos de los ecosistemas, estos resisten a los regímenes de perturbación natural manteniendo la capacidad de renovación. Empero un cuestionamiento en la ecología contemporánea es si esa resiliencia se mantendrá a medida que las perturbaciones naturales se amplifiquen por las presiones antropogénicas (IPCC, 2014; Cheal *et al.*, 2017). Además, se prevé que precisamente en los océanos más cálidos, el potencial destructivo de los ciclones tropicales aumentará y por lo tanto, las pérdida de refugio y alimento para fauna que requiere de los corales (Hughes *et al.*, 2018).

Se prevé que los océanos se volverán más ácidos a medida que aumenten los niveles de CO₂ en la atmósfera y que el calentamiento de los océanos inducirá un blanqueamiento masivo, convirtiéndose rápidamente en una amenaza permanente para los corales formadores de arrecife perdiendo o transformando su integridad y funcionamiento ecológico (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; Lough, 2008; IPCC, 2014). En el estudio de Sheppard y colaboradores (2017) se notó

que la prevalencia de mortalidad masiva de corales tras el blanqueo por olas de calor severas, han representado un cambio radical en los regímenes de perturbación de los arrecifes tropicales, dejándoles fisiológica y nutricionalmente comprometidos; incluso pueden morir si el blanqueo es grave y el tiempo de recuperación de sus simbiontes se prolonga. Aunque la relación entre la exposición al calor, el blanqueamiento y la mortalidad a largo plazo de los diferentes taxa no se conoce bien ni se ha cuantificado, si se le suman otros problemas locales, esto supone un reto de recuperación ecológico fundamental para estos ecosistemas (Hughes *et al.*, 2018).

Eutrofización

Por otro lado, el aumento de las cargas de nitrógeno (N) procedentes de los fertilizantes, la capa superior del suelo, las aguas residuales y la precipitación de contaminantes atmosféricos en el agua son importantes impulsores de la eutrofización en las aguas costeras de todo el mundo (NRC, 2000). Esto ha tenido importantes consecuencias ecológicas para los arrecifes de coral, incluido el aumento de las floraciones de fitoplancton que impiden el paso de la luz bajo el agua, así como la disposición de elementos útiles para los corales hermatípicos y la competencia por espacio, llevando al declive de sus poblaciones. De hecho, ya desde 1985 se reportó una gran cantidad de efectos ecológicos nocivos por el aumento del enriquecimiento de nitrógeno en arrecifes coralinos (Tomascik y Sander, 1985).

Existe evidencia sustentada por Arias y colaboradores (2017) que, factores como la eutrofización y la sedimentación, pueden ser al menos tan importantes como la reducción de los herbívoros para provocar cambios de fase (asociado

a su sobrepesca y falta de regulaciones). Esas amenazas se derivan del desarrollo costero que da lugar a un aumento de las cargas de nutrientes y sedimentos, sobre todo cuando no existe un tratamiento adecuado de las aguas grises y negras. Eso estimula el crecimiento de las algas, teniendo un impacto negativo en los corales. Los mismos autores indican que el desarrollo costero puede comprometer la capacidad de recuperación de los arrecifes de coral y que la ordenación de las cuencas hidrográficas y las zonas costeras, junto con el mantenimiento de los niveles funcionales de los peces herbívoros, son fundamentales para la persistencia de los arrecifes de coral.

Otro estudio relativo a la eutrofización realizado por Lapointe y colaboradores (2019) analizó 3 décadas de datos para el arrecife de Cayo Looe, situado frente a la costa de la parte baja de Cayos de la Florida. Su trabajo sugiere que la eutrofización interactuó con otros factores que provocaron el declive de los arrecifes de coral en la región. Indicaron que el enriquecimiento importante de nitrógeno inorgánico disuelto entre 1991 y 1995 coincidió con el aumento de la escorrentía en los Everglades, que drena zonas agrícolas y urbanas, dando lugar a un aumento de la limitación de fósforo (P) de los productores primarios del arrecife, y que puede causar estrés metabólico en los corales pétreos (por el desbalance químico en la relación N:P). Además, se asoció con los brotes de enfermedades coralinas, blanqueamiento y mortandad de los corales pétreos entre 1995 y 2000, que se produjeron tras la proliferación de algas.

Enfermedades coralinas

El Caribe alberga el 8% de los arrecifes de coral del mundo y también posee más del 66% de las enfermedades coralinas (Green & Bruckner, 2000). Las enfermedades son probablemente la principal causa del reciente declive de los corales del Caribe. Estas han contribuido en gran medida a los cambios sustanciales en la heterogeneidad espacial y la funcionalidad ecológica de los arrecifes, pues los corales afectados son las principales especies constructoras (Álvarez-Filip *et al.*, 2009). En consecuencia, *A. palmata* y *A. cervicornis* han sido catalogadas como se mencionó anteriormente en peligro crítico (UICN).

Entre las enfermedades que predominan, están las llamadas "blancas", que son similares a simple vista. Esto ha llevado a la adopción del término colectivo *White syndromes* (síndromes blancos) en el Caribe. A pesar de la gravedad del síndrome y de su temprana detección en la década de 1970 (Antonius, 1982) por las tecnologías de aquellas décadas no fue posible secuenciar la enfermedad o describir su causa; sin embargo, fue evidente la merma en las poblaciones de corales. Las enfermedades persisten en los arrecifes del Caribe que todavía mantienen poblaciones de *Acropora* (Klin y Vollmer, 2011; Randall y Van Woesik, 2015), pero del 2018 a la fecha, la enfermedad de la banda blanca (EBB) parece ser la más dominante en los mismos. De hecho, desde ese año es que se comenzó a notar una disminución abrupta en la cobertura coralina de los corales del género *Acropora* en el Caribe. Ya para el 2019 Álvarez-Filip y colaboradores, estimaron que casi el 80% de la población se ha perdido.

Estudios moleculares y de campo sugieren que la EBB es causada por uno o más patógenos bacterianos, principalmente del género *Vibrio spp.* Sin

embargo, se han encontrado inconsistencias, pues ahora se sabe que el género *Acropora* alberga comunidades microbianas en su capa superficial de mucopolisacáridos, en su tejido y esqueleto, entre ellos *Vibrio spp.* Esto se presenta inclusive en tejidos aparentemente sanos de *A. cervicornis* (Muller y Van Woesik, 2012). Dado lo anterior, es posible que la EBB sea el resultado de una infección por microbios que ya existen en los corales. También puede ser que esté causada por un patógeno primario que infecte sólo a los corales que experimentan estrés por presiones en el ambiente (por ejemplo, bajo ciertas condiciones de temperatura, resultado del calentamiento global o parámetros fisicoquímicos del agua como sedimentación y eutrofización (Muller y van Woesik, 2012; Randall y van Woesik, 2015).

También Randall y van Woesik (2015) estimaron la posible relación entre el reciente calentamiento del océano y los brotes de las enfermedades del síndrome blanco, específicamente EBB en los corales del género *Acropora*. Su estudio sugiere que el cambio climático (el aumento de los valores mínimos de TSM y la ruptura de sus récords máximos) ha desempeñado un papel importante en la proliferación de la enfermedad de la banda blanca. Concluyeron que dicha enfermedad ha estado fuertemente vinculada a las tensiones térmicas asociadas al cambio climático, lo que ha contribuido al declive regional de estos corales constructores de arrecifes que llegaron a dominar el Caribe. También, con base en sus resultados generaron una hipótesis: “las colonias de coral más superficiales (0-2 m) pueden haber tenido menos casos de la enfermedad de la banda blanca que las colonias más profundas (>2m) porque estaban aclimatadas localmente a una TSM persistentemente alta y a una luz elevada, lo que puede haber reducido su susceptibilidad a la enfermedad. También es posible que los hábitats poco

profundos y de alta energía redujeran el estrés térmico a través de las altas tasas de transferencia de energía, o que la alta luz impidiera la supervivencia y el crecimiento de los patógenos microbianos en el hábitat poco profundo” (Randall y van Woesik, 2015).

El estudio de la epidemiología y ecología de las enfermedades coralinas es importante debido a la amplia prevalencia y/o a la rápida mortalidad asociada a varias enfermedades. Si bien no existe certeza de los modos y patrones de propagación para los síndromes blancos, se puede inferir con base en otros estudios, como el de Álvarez-Filip y colaboradores (2019), que la propagación de la enfermedad de pérdida de tejido en corales pétreos (*SCTLD*, por sus siglas en inglés) en el Caribe mexicano, evaluada en distintos años y temporadas, presentó como patrón común una dispersión de la enfermedad y prevalencia en relación con el desarrollo urbano costero, donde se censaron y encontraron la mayor cantidad de arrecifes enfermos. Con relación a lo anterior, el estudio de Shore y Caldwell (2019), propuso que las enfermedades de los corales pueden propagarse por múltiples mecanismos: contacto directo, transmisión por el agua y/o transmisión por vectores. Sin embargo, la importancia relativa de esos mecanismos puede cambiar con el tiempo y diferir entre regiones y tipo de enfermedad.

Capítulo II: Sistema Arrecifal Mesoamericano

Delimitación geopolítica

Los intereses turísticos de los países caribeños que dependen parcialmente de los ecosistemas coralinos convinieron en una estrategia de conservación y manejo; por su importancia turística, recreativa, o por los servicios ecosistémicos y/o importancia cultural, pero también por las amenazas de degradación que presentan.

En 1997, los mandatarios de Belice, Guatemala, Honduras y México firmaron *la Declaración de Tutlum* y el *Plan de Acción Intergubernamental*, con base en la similitud e interconexión de los procesos ecológicos y oceanográficos de los ecosistemas costeros y corrientes marinas a lo largo de la barrera arrecifal. Esta declaración resultó en el reconocimiento del Sistema Arrecifal Mesoamericano como una unidad transfronteriza del ecosistema y también incentivó a la creación de más Áreas Marinas Protegidas (AMPs), además de las ya existentes bajo la gestión de cada país (SAM, 2003). Posteriormente, en julio de 2006, los países que le acogen, solicitaron a la Organización Marítima Internacional (OMI) que consideraran una iniciativa que fungiera como mecanismo para la conservación de la biodiversidad y uso sostenible de los recursos del SAM a través de un “Acuerdo de renovación de los compromisos en torno al Sistema Arrecifal Mesoamericano en el Marco de la Declaración de Tulúm”. Esto contemplaría al SAM como una Zona Marítima especialmente Sensible (ZMES) y disminuiría los efectos directos del tráfico marítimo internacional (Ardisson *et al.*, 2011).

El SAM incluye a los arrecifes coralinos del norte de la península de Yucatán (Cabo Catoche) hasta la frontera de Honduras. Acoge a más de 500 especies de peces, poblaciones de manatíes y tortugas marinas, además de conformar ecosistemas costeros como manglares y pastos marinos en toda su extensión (García *et al*, 2008).



Figura 1. Área delimitada para el Sistema Arrecifal Mesoamericano. Tomada de MAR Fund 2021.

Amenazas particulares

Las principales amenazas al SAM han sido los grandes desarrollos costeros, pues la modificación de la zona costera para la construcción de complejos turísticos y residenciales, ha provocado la pérdida de grandes extensiones de manglar y zonas de pastos marinos, mismos que actúan como filtro para los sedimentos y nutrientes de las escorrentías de la costa. Además, las descargas de aguas residuales de hoteles y residencias, muchas veces sin tratamiento, merman las condiciones ambientales de la laguna arrecifal (Burke *et al*, 2011; Martínez *et al.*, 2020). La contaminación por sedimentos limita la actividad fotosintética de las zooxantelas, exige a los corales una gran cantidad de energía para eliminar los sedimentos y afecta a los ciclos reproductivos de algunas especies de coral y puede derivar en efectos negativos sobre las comunidades arrecifales, ya que los corales son sensibles a la sedimentación excesiva; la fotosíntesis se ve afectada por la turbidez en la columna de agua y consecuentemente disminuye el crecimiento de los esqueletos coralinos; limitando su reproducción y aumentando la mortandad de larvas durante la fase de vida temprana. (Rogers, 1990; Jones *et al*, 2015).

Aunado a lo anterior, hay que considerar los fenómenos naturales extremos que se atribuyen al aumento de temperatura de mar derivada del CC, como tormentas tropicales y huracanes, la acidificación del mar que propicia el blanqueamiento coralino y también que puede actuar en sinergia con enfermedades coralinas como síndromes blancos (que afectan principalmente a los corales Acropóridos, especialmente la enfermedad de la banda blanca), la enfermedad de la banda negra, banda café, banda amarilla y la pérdida de tejido pétreo; tales perturbaciones se han agravado en décadas recientes y el

escenario previsto para ellas no luce alentador (Gatusso *et al*, 2015). Hay evidencia de que en los últimos 40 años hay nula o escasa recuperación de los arrecifes del Caribe, esto considerando solamente los daños por huracanes, ya que al impacto del oleaje, producido por los vientos de alta velocidad, rompen las estructuras (García *et al*, 2008).

Además de las amenazas señaladas anteriormente, y los efectos conocidos ya para los arrecifes coralinos, Antonio-Martínez y colaboradores (2020) identificaron una nueva para *A. palmata*, especie clave por su abundancia en el arrecife de Mahahual, Su estudio presentó los efectos de lixiviados en la columna de agua, producto de arribos masivos de sargazo de dos especies de macroalgas pelágicas. Ellos evaluaron particularmente los efectos de las especies *Sargassum fluitans* (Borgesen, 1914) y *S. natans* (Gaillon, 1828), y encontraron que los parámetros físicos y químicos, producto de los lixiviados de estas macroalgas, tienen la capacidad de modificar el comportamiento de las larvas del coral *A. palmata*, pues pueden alterar negativamente su natación y/o percepción sensorial. Esto se traduce en la disminución de reclutamiento de las larvas, es decir, el éxito de larvas que se fijarán para comenzar una vida sésil se ve comprometido.

Existen especies de corales pétreos oportunistas que forman colonias pequeñas y de vida corta o mediana (por ejemplo, *Porites asteroides*, Lamarck 1816) que no contribuyen de la manera en que *A. palmata*, que es precisamente la especie con que trabajaron en su estudio. Esta última es una especie clave en la composición y construcción de arrecifes por su complejidad estructural y larga vida. Sin embargo, ambas especies que componen el arrecife se han visto afectadas por el sargazo, comprometiendo su diversidad

genética y la extensión coralina. Actualmente, las arribazones de sargazo están previstos como una perturbación recurrente, pues ha tenido mayor frecuencia en las playas del Caribe mexicano, como consecuencia de las condiciones ambientales cambiantes, que modifican la calidad del agua, además la eutrofización y otros contaminantes que permiten las condiciones idóneas para su crecimiento, (Arias-González *et al*, 2017).

Es importante señalar que existen medidas implementadas por el gobierno, hoteleros y organizaciones de ecologistas para la contención y remoción de los grandes arribos de sargazo –antes de que llegue a las playas-. No obstante, esta práctica deberá ser casi inmediata a su localización. Pues es precisamente a partir de su descomposición, que los lixiviados comienzan a formar parte de la columna de agua y a tener los posibles efectos negativos mencionados sobre el coral. Dado que actualmente el estudio de Antonio-Martínez y colaboradores (2020) es pionero en este sentido, se desconocen aún las respuestas precisas especies específicas de corales, así como su posible resiliencia a estos fenómenos reportados. Sin embargo, estudios como el de van Tussenbroek y colaboradores (2017), evidencian los efectos negativos de los arribazones de *Sargassum spp.* a la deriva cerca de la costa. Pues estos, al causar una severa reducción de la luz y, en combinación con los lixiviados y las partículas de materia orgánica liberadas por el material degradado en la costa, inciden en la mortalidad parcial o total de pastos marinos y corales, que dan pauta a los cambios de fase (Arias-González *et al*, 2017; van Tussenbroek *et al*, 2017; Antonio-Martínez *et al*, 2020).

Conociendo entonces que los arribazones de estas macroalgas y sus lixiviados han tenido y tendrán efectos negativos en los corales, en sus primeras etapas de desarrollo, la región que compone al SAM estará comprometida: tanto lo que se refiere al éxito reproductivo de los corales, como a la mortandad de corales pétreos adultos.

Acciones para su conservación

La degradación de los arrecifes de coral en todo el mundo ha llegado a un punto en que las estrategias locales de conservación y los procesos de recuperación natural, por sí solos, pueden resultar ineficaces para preservar y restaurar la biodiversidad, así como la integridad a largo plazo de los arrecifes de coral, de los ecosistemas costeros y por ende, de sus servicios ecosistémicos (Goreau y Hilbertz 2005). En 1990, Craik y colaboradores reportaron que los usos de los arrecifes han cambiado y aumentado. Si bien se han diversificado creando prácticas suplementarias a las tradicionales que motivan su conservación y sostenibilidad (por ejemplo: la investigación y recreación), los arrecifes continúan degradándose al no existir una adecuada gestión y con presiones crecientes.

Las motivaciones que anteceden los esfuerzos radican en la importancia ecológica, económica y cultural. Si bien el equilibrio ecológico es el sostén de las otras dos aristas, éstas ayudan a revelar motivaciones para los gestores y justificar la adquisición de información, promoción y adopción de herramientas de mitigación de daños. Consecuencia de ello, han surgido estrategias para mantener los procesos ecológicos esenciales a través de la preservación de sistemas de soporte para diversidad biológica y genética, como las

regulaciones pesqueras y turismo, la creación de AMPs, santuarios para la conservación y la restauración arrecifal, entre otras.

Además, acotándose a un contexto internacional y actual, los países miembros del SAM están suscritos a la Agenda de Objetivos de Desarrollo Sostenible resuelta por la Organización de las Naciones Unidas y que contextualiza y refuerza el compromiso con el Acuerdo de París (ONU, 2015; 2015). Entre dichos objetivos, se encuentra uno en particular que motiva el compromiso y la participación con base en el reconocimiento del estado crítico de la salud de los océanos: Objetivo 14 (ODS14), Conservación de océanos, mares y sus recursos marinos. Ante la creciente presión sobre los ecosistemas marinos y costeros (mencionados en el apartado de Amenazas), los países firmantes reconocen la capacidad del océano como proveedor clave de servicios como alimentos, turismo y servicios ecosistémicos, fuente causal de un desarrollo económico sostenible y como regulador del clima. Es por ello que el ODS14 intenta contribuir a la salud humana con base en la seguridad alimentaria y la erradicación de la pobreza; también al desarrollo económico y a las medidas de mitigación frente al cambio climático a través de la conservación de océanos y mares.

El impulso de políticas y acciones que consideren esfuerzos colaborativos para la conservación del SAM, a través de la investigación y gestión, son también otras motivaciones compartidas. De esa forma se podrá fortalecer la cooperación, coordinación y la coherencia entre las políticas regionales e internacionales de los programas relativos a la restauración del sistema arrecifal. La importancia de desarrollar estrategias basadas en evidencia científica busca el reconocimiento por los países en cuestión sobre la

importancia natural y cultural del sistema arrecifal, su función y el estado de vulnerabilidad en el que se encuentra. Esto haciendo énfasis en la importancia de su conservación para el desarrollo sostenible de las comunidades que dependen directamente de él, así como de su importancia ecológica a nivel global.

Capítulo III: Restauración activa de sistemas arrecifales

Restauración activa

La restauración de los arrecifes coralinos es una herramienta que se ha vuelto cada vez más importante en la conservación marina tropical y su principal objetivo es crear sitios de amortiguamiento que atenúen la pérdida de los arrecifes de coral y la dinámica ecológica alrededor de ellos (Young *et al*, 2012; Bayraktarov *et al*, 2019; Böstrom *et al*, 2020). Si bien no se espera que necesariamente recuperen la condición original del ecosistema, la meta es establecer poblaciones de corales autosuficientes que, luego de su recuperación, puedan reproducirse sexualmente creando poblaciones con variabilidad genética que permita recuperar la resiliencia y adaptaciones al medio ambiente (Rinkevich, 2000; Hughes *et al.*, 2018).

Con el entendimiento de las variables que vulneran el funcionamiento natural de un sistema, es más sencillo accionar puntualmente para la restauración y conservación de los mismos. En el caso del SAM y los ecosistemas costeros, el entendimiento integral de las sinergias de amenazas es complejo y torna difícil su conservación. Ya sea por el tipo, la frecuencia y/o la intensidad de amenazas a lo largo de su extensión, estas pueden interactuar de forma

diferente con escenarios puntuales (como huracanes -aunados a dicha sinergia de amenazas- (Arias *et al.*, 2017). Además de que la gestión y los esfuerzos de conservación varían por localidades.

Para lograr los objetivos de restauración entonces se recurre a distintas técnicas que logren con éxito la simulación de un sistema saludable y autosostenible. Con las amenazas que se han identificado, se ha precisado recurrir a las llamadas técnicas de restauración activa, donde el arrecife es intervenido a través de dos formas: con trabajo *in situ* y *ex situ*, ambos tienen como objetivo la reproducción de corales formadores de arrecife y su replantación para mitigar el decremento de las poblaciones, a diferencia de la restauración pasiva, en donde se delimitan, protegen y monitorean áreas, pero no se interviene de forma directa (Omori y Shuichi, 2004; Johnson *et al*, 2011; Lirman y Schopmeyer, 2016). Dado que los arrecifes pueden degradarse mucho más rápido de lo que pueden volver a crecer, debido a tensiones causadas por el hombre, como la eutrofización y la escorrentía terrestre, se ha visto una reducción neta de los arrecifes durante décadas. Es por eso que la restauración pasiva dejó de ser popular cuando se trata de restaurar arrecifes vulnerados. Este documento hace énfasis en los esfuerzos de técnicas de restauración activa.

Viveros de coral

La restauración activa contempla el desarrollo de programas de restauración coralina basados en instalación de viveros. Estos pueden estar en el mar, comúnmente con fragmentos de oportunidad y cerca de la zona a restaurar (*in situ*), es decir que se valen de una reproducción asexual, o bien, en un

laboratorio (*ex situ*) que tiende a buscar una reproducción sexual para garantizar el intercambio de gametos. Estas técnicas de restauración junto con las de trasplante son prácticas esenciales y complementarias que ayudan a la restauración del arrecife, pretendiendo mitigar la degradación de los mismos mediante el repoblamiento (Rinkevich, 1995; Johnson *et al*, 2011).

La variedad de técnicas y métodos específicos es diferencial para cada vivero de coral. Pues si bien hay generalidades y existen protocolos más populares que otros, siempre se considerarán factores con base en las especies elegidas en la localidad (constructoras de arrecife), la zona, además las condiciones bióticas deberán ser específicas, la logística operativa y las limitaciones de presupuesto.

Reproducción asexual *in situ*

Rinkevich (1995) basado en la silvicultura terrestre, utilizando viveros de coral *in situ*, colocó fragmentos de coral directamente en estructuras sólidas de diversos tipos, que proporcionaran una estructura firme, pero temporal. Una vez que los fragmentos alcanzan el tamaño y la forma adecuados, se trasplanta a un sitio del arrecife a restaurar, es decir degradado. La clave del éxito de la jardinería de corales es de hecho, la fase de vivero o de crecimiento, en la que se han desarrollado diversas técnicas para maximizar la supervivencia y la productividad de los corales (Johnson *et al.*, 2011). Los requerimientos morfométricos de las estructuras previos al trasplante varían según la especie, madurez y/o arreglo.

La jardinería de corales se ha vuelto el método preferido para la recuperación de algunas especies de corales y la restauración ecológica de los arrecifes en el Caribe y Atlántico occidental, gracias a factores como recolecciones iniciales limitadas y sin la necesidad de recolecciones en el futuro. Así mismo, debido a la productividad alta de fragmentos mientras están en el vivero, requisitos técnicos sencillos y por tanto, el bajo costo en comparación con los grandes proyectos de ingeniería (estructuras de concreto o materiales que funjan como arrecifes y barreras para la costa, cuando se degrada todo el sustrato) (Young *et al.*, 2012). Con el mantenimiento y buen control del crecimiento de los fragmentos de coral en el vivero, estos pueden constituir rápidamente una fuente sostenible de corales para el proyecto de restauración ecológica, basado en la tasa de supervivencia y en el crecimiento, esto reduce la necesidad de nuevas recolecciones de poblaciones naturales degradadas.

Capítulo IV: Revisión de Estrategias y Acciones de conservación del SAM

En la región del Caribe mexicano, un estudio realizado por Salazar y González (1995) revisaron los impactos a los principales ambientes costeros, sus recursos e importancia. También las problemáticas de sostenibilidad considerando la ecología y dinámica de los mismos, así como factores socioeconómicos y culturales que tienen una dependencia directa de lo anterior. Por ello, su estudio atribuye a una gestión basada en conocimiento científico, que sea responsable y culta a través del análisis y sus propuestas. Reconocieron la importancia económica del turismo costero y qué, inclusive valiéndose éste de los recursos estéticos por los cuales fue promovido, la interacción ha resultado negativa, pues el crecimiento de los desarrollos turísticos ha conllevado a mermas en el ecosistema. Revisaron también los

efectos que la sobreexplotación de los recursos naturales puede tener, encaminando a un principio de precaución para amparar tanto el medio ambiente, como el desarrollo turístico mediante la capacidad de carga y el límite de cambio aceptable. Los autores promueven aspectos relativos a la reglamentación con énfasis en la consideración de información ecológica y las problemáticas del turismo, que en la actualidad permanecen sin cambio; proponen el financiamiento de proyectos de investigación y conservación de los ambientes costeros con la recomendación de establecer programas de manejo adecuado e integral que comprendan intereses ambientales, sociales, económicos y éticos.

Es en 1997, cuando los jefes de estado de México, Belice, Guatemala y Honduras se comprometieron a desarrollar un plan de acción para la conservación y uso sostenible del SAM, firmando la Declaratoria de Tulum y es nueve años más tarde (el 11 de julio de 2006, en Panamá) que se solicitó de manera conjunta a la Organización Marítima Internacional (OMI), declarar el área del SAM como Zona Marítima Especialmente Sensible (ZMES) para protegerla del incremento del tráfico marítimo a través del “Acuerdo de renovación de los compromisos en torno al Sistema Arrecifal Mesoamericano en el marco de la Declaración de Tulum”.

Un año después, en 1998 se implementó el Programa de Evaluación Rápida de Arrecifes del Atlántico y Golfo (AGRRA por sus siglas en inglés), donde sus objetivos iniciales eran proporcionar una evaluación estandarizada de indicadores estructurales y funcionales clave que pudieran aplicarse para revelar patrones espaciales y temporales del estado de los arrecifes regionales. Se dio prioridad a la realización de evaluaciones de referencia de

arrecifes remotos, como los de Cuba, Bahamas, Panamá y Los Roques, y a la creación de material educativo y la organización de talleres de formación para los socios de los países del Caribe, mismos que cogen el SAM.

Posteriormente, McField y Kramer (2006) propusieron la Iniciativa del Ecosistema del Arrecife Mesoamericano Sano, que planteó establecer un consenso sobre lo que se podía caracterizar como un arrecife moderno y saludable para la ecorregión del SAM. Entre los objetivos de la iniciativa se listaron: (i) desarrollar un marco cuantitativo para evaluar la salud del arrecife y (ii) poner la información a disposición de los practicantes, científicos, el público y los responsables de la toma de decisiones. Consideraron que un entendimiento común de la salud del arrecife proporcionaría claridad y cohesión a los esfuerzos locales e internacionales de conservación en la región. Además, un marco de análisis compartido que ayudaría a la interpretación de los datos de vigilancia que se están obteniendo. Con tal objeto, identificaron 16 atributos estructurales y funcionales clave, así como amenazas humanas y cuestiones sociales que proporcionan el marco para su análisis. Además, encontraron y consideraron 50 indicadores potenciales que probaron para evaluar esos atributos, amenazas y cuestionamientos. Esa iniciativa desarrolló una serie de herramientas de comunicación y apoyo a la toma de decisiones destinadas a fusionar el apoyo público y político a la conservación de los arrecifes.

En 2003, Kramer realizó una síntesis de los indicadores de salud de los arrecifes coralinos en el Atlántico occidental y concluyó que las fuerzas motrices que influyen en el estado actual de los arrecifes de la región son complejas y probablemente implican múltiples fuentes que operan a varias

escalas espaciales y temporales. Su síntesis utilizó 15 indicadores para evaluar la salud de los arrecifes entre los años 1998 y 2000 en 20 distintos sitios del Caribe con base en las evaluaciones de AGRRA y con diferentes historiales de perturbación, condiciones ambientales y presiones pesqueras. Sugirió que, con base en la media de coral vivo del 26% en los sitios profundos, se han producido pérdidas significativas durante las últimas décadas, aunque quedan cantidades sustanciales de coral. Señaló que vínculos entre las enfermedades infecciosas, el blanqueo y la mortalidad, fueron evidentes y que pudieron ser resultado de una mayor actividad patógena y de la sensibilidad de los corales a las enfermedades y a la mortalidad durante los periodos de elevadas temperaturas de la superficie del mar (refiriéndose al evento El Niño de 1998 (Oscilación del Sur, El Niño), y que fueron más evidentes en las subregiones del Caribe occidental y las Bahamas.

Por otra parte, estudios realizados entre 1999 y 2008 (García *et al.* 2008) sugirieron que hasta un 75% de la cobertura de coral vivo está en grave peligro de extinción en la región del Caribe; particularmente, se registró una disminución de entre el 80-90% de la abundancia de corales del género *Acropora*. Posteriormente, Johnson y colaboradores (2011) señalaron también un declive global en la cobertura de coral vivo debido a los impactos antrópicos, que se reflejan en presiones negativas que alteran el medio ambiente, tanto los efectos asociados al CC, como interacciones negativas específicas en los sistemas costeros como la acidificación del mar, el aumento del nivel medio del mar, el estrés térmico, además de enfermedades y fenómenos biológicos y fisicoquímicos.

Esto representa un problema para el equilibrio y sostenibilidad de los arrecifes, ecosistemas costeros y las dinámicas físicas y biológicas involucradas, y un reto para la conservación. De hecho para 2006, a *Acropora palmata* (Lamarck, 1816) y *Acropora cervicornis* (Lamarck, 1816), se les encontraba bajo el estatus especies amenazadas, sin embargo, dos años después de haberles otorgado ese estatus, en el año 2008 pasaron a ser reconocidas como especies en riesgo crítico por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) a través de la Lista Roja de Especies Amenazadas (García *et al*, 2008; Johnson *et al*, 2011).

En 2008, García y colaboradores realizaron una evaluación del SAM, señalando que la región mostraba una tendencia general de disminución de cobertura coralina en las Áreas Marinas Protegidas (AMPs) evaluadas y otros sitios de muestreo, y encontraron los mayores cambios entre 2004 y 2005, relacionándoles a actividades antrópicas como los desarrollos turísticos costeros y pesquerías. En su estudio, reportaron en promedio una pérdida del 7% de cobertura coralina y una tendencia de pérdida anual sucesiva aproximada al 2%. Estas disminuciones reportadas en AMPs, sirven como referencia para estimar pérdidas de coral más graves en el resto de la región que no tiene una regulación estricta o monitoreada. También, según la evaluación del boletín de calificaciones de la Iniciativa de Healthy Reef, enfatizó que el estado general de los arrecifes estuvo en un estado "pobre" o "regular" a través de evaluaciones realizadas a gran escala en 2006 (García *et al*, 2008).

Por su parte, Jackson y colaboradores (2014) realizaron un reporte sobre el estatus de los arrecifes coralinos en el Caribe, donde algunas áreas evaluadas

corresponden a la delimitación del SAM. Encontraron que las tendencias entre la cobertura de coral y macroalgal constituyó una fase de cambio de dominación de las comunidades de macroalgas larga y persistente frente a los corales durante los últimos 25 años (a la fecha de la publicación, 2014) y corroborado por los análisis de orden de composición de las comunidades bentónicas a través de modelos de predicción, por ejemplo, de 1984 y 1998 la cobertura de macroalgas creció del 7% al 23.6%. Encontraron que los cambios de fase más significativos y perjudiciales en los arrecifes del Caribe sucedieron entre 1984 y 1998, salvo en lugares afectados por fenómenos extraordinarios de calentamiento de 2005 y 2010, antes de que se tuviera conocimiento del declive de la salud de los arrecifes. Además, su trabajo basado en las áreas donde hubieron datos disponibles, destacó un declive del 34.8% al 19.1% al 16.3% durante tres intervalos basados en acontecimientos ecológicos que sucedieron en el Caribe a gran escala (el primer intervalo de 1970-1983, que engloba los primeros datos hasta la mortalidad del erizo de mar *Diadema antillarum* (Philippi, 1845) en 1983 y los primeros informes sobre la enfermedad de la banda blanca; el segundo de 1984 a 1998, relativo a la desaparición del erizo, hasta el fenómeno de El Niño 1998; y finalmente, de 1999 a 2011, la era moderna de arrecifes coralinos en fase de severa degradación) (Jackson *et al*, 2014).

No obstante lo anterior, el estudio más reciente de la condición arrecifal del SAM lo realizó Healthy Reefs en 2020, donde destacó que el Índice de Salud Arrecifal (ISA) disminuyó por primera vez en 12 años, de 2.8 en 2016 a 2.5 en 2018 (McField *et al*, 2020). Los mismos autores señalaron que la cobertura de macroalgas carnosas disminuyó (23% a 20%), reduciendo la competencia por espacio con los corales hicieron notar que esfuerzos de restauración del

ecosistema están siendo aplicados, sin embargo, también señalaron que los impactos por cambio climático y los contaminantes de los lixiviados provenientes de aguas no tratadas, junto con las enfermedades. Particularmente, el síndrome blanco ha afectado severamente la porción mexicana del SAM desde julio del 2018 y que ha llegado al norte de Belice en julio del 2019, matando a más del 30% de más de 20 especies de coral en México en aproximadamente un año (McField *et al.*, 2020).

Esfuerzos en la última década (2010-2020).

Los proyectos de restauración coralina en el SAM tienen un patrón común en donde organizaciones locales (ya sean ONGs, cooperativas de pescadores, miembros voluntarios, tiendas de buceo y/o académicos especialistas), con representantes de sectores público y/o privado (principalmente el sector hotelero y prestadores de servicios turísticos) suman esfuerzos para la creación de proyectos de viveros de coral, donde apoyan con las actividades de monitoreo, mantenimiento y trasplante. Comúnmente estas iniciativas privadas y/o civiles han tendido a crear mancuernas con los gobiernos federales, estatales/provinciales de los países y con instituciones académicas. Durante la última década, las instancias internacionales como Fondo SAM (MarFund), Coral Reef Resilience, Healthy Reef for Healthy People, Coral Reef Alliance y Grupo Iberostar, son las que tienen mayor presencia e iniciativa en materia de restauración de corales en los países del SAM. Este esfuerzo se ha multiplicado en toda la región, con la creación de grupos locales de restauración y el desarrollo de iniciativas en otros países que comparten el SAM para desarrollar programas similares.

Los esfuerzos que se realizan por las instancias anteriores y los avances de la restauración arrecifal se evidencian con literatura formal, es decir, a través de publicaciones científicas, revisiones y manuales que buscan y/o promueven nuevas tecnologías para optimizar tiempo y recursos de la restauración de los arrecifes. Se puede decir que, en los últimos años, se ha enfatizado en procurar el incremento del pool genético de las poblaciones coralinas y en realizar los proyectos en áreas prioritarias para la conservación (AMPs).

Ya en 1980, la UICN definió que las acciones de conservación debían concebirse con un manejo de tal forma que la biósfera pudiera proporcionar los mayores beneficios posibles a las presentes generaciones sin que pierda su potencial para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras, así como su equilibrio ecológico basal (IUCN, Talbot, 1980).

Entre las acciones para la restauración arrecifal de la última década está la Iniciativa Mesoamericana de Rescate de Arrecifes (IMRA,2014), que busca incrementar la capacidad de recuperación y resiliencia del SAM y sus servicios ambientales y culturales mediante el desarrollo de regulaciones, incentivos económicos y sostenibilidad financiera para desarrollar restauración continua (mediante viveros de coral) y para respuesta de emergencia, como fondo de gestión para mitigar daños por huracanes o encallamientos. La IMRA surge del Acuerdo firmado entre el Fondo SAM¹ y el gobierno de Alemania, donde este

¹ Fondo SAM es un fondo privado con bas en donates expertos como la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y los fondos ambientales de cada uno de los países que componen el Arrecife Mesoamericano PACT (Belice), Fundación para la Conservación de los Recursos Naturales y Ambiente en Guatemala (FCG), Fundación Biosfera (Honduras) y el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (México).

último otorgó \$8.5 millones de dólares para la implementación del resacte arrecifal del SAM (MarFund, 2021).

Por otro lado, en 2019 se creó la Red de Restauración de Arrecifes Del Sistema Arrecifal Mesoamericano (RRA-SAM), una comunidad de organizaciones de la sociedad civil e instituciones gubernamentales y académicas de México, Belice, Guatemala y Honduras. Posteriormente, en 2020 fue aprobada como “Grupo Regional” en el CRC (Coral Restoration Consortium, por sus siglas en inglés) y desarrolló un plan de acción estratégico regional donde su comité directivo describe la estrategia general que evaluará en períodos de dos años. Esta pretende fortalecer las actividades de restauración en el SAM utilizando un enfoque interdisciplinario y de colaboración mediante la coordinación de la capacidad científica y técnica de las organizaciones que lo forman; también busca ser la principal fuente de información actualizada e innovación sobre el tema de la restauración. La IMRA se propone que, con base en la visión común de los países del SAM, tengan una perspectiva de alto nivel que refleje los retos, éxitos pasados y su desarrollo permanente en la restauración arrecifal.

Debido al declive histórico y continuo de las poblaciones de *Acropora*, la mayoría de las actividades de restauración arrecifal se ha enfocado en ese grupo debido a su importancia en la construcción de arrecifes, además su crecimiento relativamente rápido en comparación con otras especies según Acropora Biological Review Team (2005).

Estudios formales en la región

En 2012, Young y colaboradores presentaron un estudio que enfatizó en los corales pertenecientes al género *Acropora* en el Caribe, realizando una revisión bibliográfica de los proyectos de propagación y restauración; también recopilaron conocimiento y opiniones colectivas actualizadas de los investigadores y practicantes de la restauración de arrecifes mediante un cuestionario en línea. Encontraron que para el Caribe sólo existe un manual de restauración (Johnson *et al.*, 2011) y su estudio precisamente complementa dicho manual aportando un análisis y revisión de los proyectos de restauración de arrecifes y particularmente con los proyectos que tienen relación con las especies de corales acropóridos amenazados. Hallaron que, debido a la escasez de literatura relativa a la restauración arrecifal en la zona, así como de datos publicados, su estudio reconoció la carencia de conocimiento e información sobre las fuentes bibliográficas disponibles como artículos o libros y literatura no difundida.

Igualmente, notaron que las técnicas de propagación y restauración de arrecifes de coral más eficaces fueron las metodologías con bajas tecnologías, es decir, que utilizan materiales fáciles de conseguir y económicos; indicaron que las actividades de propagación y restauración con *Acropora* pueden llevarse a cabo con éxito y a bajo costo (Young *et al.*, 2012). Algunos ejemplos son, el uso de PVC, cinchos de plástico, bloques de cemento, clavos, hilo de nylon y cuerdas.

Con base en la revisión bibliográfica, Young y colaboradores (2012) sugirieron que aparentemente el futuro de la restauración de arrecifes en el Caribe y el

Atlántico occidental depende de dos prioridades fundamentales: la primera, sobre la utilización de metodologías de restauración de bajo costo; la segunda, de las actividades de restauración deben llevarse a cabo junto con prácticas de gestión y conservación en AMPs. De tal forma se podría mejorar el número, la duración y el éxito de los proyectos de restauración.

Por otro lado, en un proyecto liderado por Carne y colaboradores (2016), reportan los resultados de diez años de trabajos de restauración de *Acropora palmata*, *A. cervicornis* y *A. prolifera* (Lamarck, 1816) en el Parque Nacional de Laughing Bird Caye (Belice), donde plantaron más de 59,000 fragmentos de coral cultivados en vivero (incluidos los tres acropóridos del Caribe) en más de una hectárea de arrecife degradado. Obtuvieron datos sobre la diversidad de algas hospederas (zooxantelas), las tasas de crecimiento de los corales (en los viveros) y la supervivencia (en los trasplantes), su historial de blanqueamiento y la temperatura *in situ*, los indicadores reproductivos, el cambio en la cobertura de coral vivo y la biomasa de peces. Además de los parámetros evaluados destacaron, las zonas de exclusión y la participación de la comunidad, señalando que fueron componentes integrales del éxito en los esfuerzos de recuperación del sistema arrecifal.

Señalaron también que, para ese tiempo (2016) los trabajos de recuperación de acropóridos en el Caribe era escaso en cuanto a métodos estandarizados para evaluar parámetros como las tasas de crecimiento, la supervivencia y la cobertura de los corales. Además de que había pocos datos publicados que demostraran la supervivencia a largo plazo de los corales trasplantados; igualmente, hay poca información sobre los efectos de las actividades de

re poblamiento de los corales en la ecología de los arrecifes coralinos (Young et al. 2012).

En cuanto a la última consideración mencionada (la escasa información sobre el repoblamiento coralino), su estudio consideró que la identificación de genotipos utilizados, debe ser un componente obligatorio de los esfuerzos de repoblamiento de los acropóridos por varias razones. En primer lugar, porque es importante asegurarse de que múltiples genotipos de cada especie se trasplanten lo suficientemente cerca como para permitir la fecundación cruzada durante los eventos de desove masivo, y para tratar de que exista diversidad genética en los sitios de repoblamiento. Además, observaron diferencias en las tasas de crecimiento de *A. cervicornis* entre los genotipos comparados de los tres acropóridos, así como variación en el patrón de crecimiento (morfología), resistencia al blanqueo, a otras enfermedades, también a la supervivencia en general. Lo anterior remarca que la diversidad genética de las poblaciones restauradas es una consideración importante, independientemente de los métodos de propagación (sexual o asexual) ya que podría simular las condiciones de reproducción sexual en un arrecife sano.

También, Lirman y Schopmeyer (2016) señalaron que los proyectos de restauración comúnmente inician con financiamiento externo y que es difícil dar seguimiento más allá de uno a tres años. De hecho, en el Caribe sólo existen dos estudios de restauración que incluyen fragmentos del género *Acropora* con datos que superan los 10 años, el de Bruckner y colaboradores (2009) y Garrison y Ward (2012). De forma que, en la mayoría de los casos, la falta de datos deja inconclusa la información de los proyectos, la escasez de estos y finalmente los resultados de restauración parcial o nula de los arrecifes

en cuestión. Así, los nuevos proyectos que surgen comienzan con conocimiento previo limitado, con exploración personal y probablemente enfrentando las mismas limitaciones que imposibilitan su éxito.

La mayor parte de las publicaciones (Young *et al*, 2012; Lirman y Schopmeyer, 2016; Bayraktarov *et al*, 2019; Boström-Einarsson *et al*, 2020) se refieren únicamente a los viveros o a los resultados del seguimiento a corto plazo (aproximadamente un año) de los corales trasplantados. Sin embargo, el estudio de Carne *et al* (2016) es particularmente inusual por el periodo de trabajo relativamente largo y alta tasa de éxito. Sus esfuerzos de repoblamiento sugirieron que las especies de coral seleccionados para los viveros fueron elegidas de lugares poco profundos y más cálidos, y suponían que tendrían una tolerancia térmica inherente. A la fecha, los autores siguen diseñando protocolos y recopilando datos sobre la abundancia y diversidad de peces asociados a los acropóridos. Así como datos sobre otros invertebrados asociados, como crustáceos y esponjas, que fomentan en general la biodiversidad de la comunidad.

Por su parte, Lirman y Schopmeyer (2016) señalaron un común denominador y componente clave para el éxito de la restauración de los arrecifes, el desarrollo de un marco práctico para la jardinería de coral responsable. Esto precisa de practicantes capacitados que asistan a las personas involucradas en los proyectos de viveros coralinos, con orientación continua y que los grupos interesados estén presentes en las distintas etapas del desarrollo del proyecto, para garantizar coherencia y comunicación. Por ejemplo, en el caso de México, el Instituto Nacional de la Pesca (INAPESCA) apoyado, ya sea por la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), que provee presupuesto de la

federación, o por el Gobierno Estatal de Quintana Roo, son quienes hacen seguimiento a los proyectos de restauración coralina establecidos. Tal es el caso de un proyecto “Coral INAPESCA”, que proyectó en 2017 trasplantar 265,000 fragmentos de coral para el 2022 y que, para abril 2021, sólo se tenía el 35% de los objetivos planteados (INAPESCA, 2019). Estos resultados basados en las cifras indican que la gestión del proyecto, desde el alcance de los objetivos, como el tiempo y sus métodos pareciera no acatarse a un alcance realista, tendiendo al fracaso del proyecto.

Otro caso es el de Estados Unidos, donde los proyectos son más estrictos y la gestión de los proyectos está más regulada. Para ello deben obtenerse permisos por parte de autoridades locales y federales que se encargarán de supervisar actividades de restauración. Como estos permisos tienen estrictos requisitos de control e información, los programas dan supervisión y seguimiento en el desarrollo de los proyectos y su éxito.

Los programas de jardinería exitosos y a largo plazo son el resultado de asociaciones entre instituciones académicas, ONGs, organismos gubernamentales, empresas privadas y voluntarios de comunidades locales (Johnson *et al.*, 2011). Para limitar desafortunados resultados, es crucial que los programas de jardinería sean coordinados, con compromiso y participación entre las partes interesadas a nivel local, y de educación ambiental a la comunidad.

Lirman y Schopemeyer (2016) hicieron énfasis en que el objetivo de estas actividades debería ser, fomentar la recuperación natural mediante el restablecimiento de poblaciones conectadas espacialmente con una alta

diversidad genotípica que promueva la reproducción sexual exitosa y la recuperación natural de las especies objetivo, y no como una herramienta única que evite el decremento que experimentan el sistema arrecifal. Es decir, la jardinería de corales y la restauración de arrecifes no deberían ser las únicas herramientas empleadas. Al mismo tiempo, señalaron retos y lagunas en los datos publicados, como en la trascendencia de la propagación y el trasplante a escalas significativas y la falta de rigor científico en los proyectos que ayude en la restauración de las comunidades de los arrecifes de coral. Mencionaron también que hace falta evaluar los servicios ecológicos y económicos, así como la recuperación de los taxa de coral amenazados. Lo anterior podría servir para justificar la inversión de tiempo y recursos económicos de la colaboración entre los gobiernos involucrados.

Comte y Pendleton (2018) realizaron una revisión bibliográfica (entre 1990 y 2016) sobre las estrategias de manejo de arrecifes coralinos a nivel global, así como de las comunidades costeras que dependen de ellos, bajo condiciones del cambio ambiental global. Centrarón su estudio en los impactos derivados por el mismo, así como estrategias de manejo para la sostenibilidad de sistemas socio-ecológicos. Señalaron que ha existido tendencia de publicaciones científicas con el paso de los años centradas en cuatro estrategias de manejo: protección, mitigación, adaptación y restauración. Destacan que de la literatura revisada existe mayor representatividad y condensación de estudios por parte de países como Australia y Estados Unidos, ambos con liderazgo en estudios de caso y diversificación en sus estrategias de manejo. Sin embargo, en países en desarrollo (como los que integran al SAM) que poseen arrecifes coralinos, los impactos de CC en los arrecifes de coral podrían tener consecuencias mayores por el pobre

entendimiento y gestión de las amenazas. Sugieren que debería existir más esfuerzo académico, monitoreo y el conocimiento de su estatus con la intención de comprender cómo las estrategias de adaptación y restauración, junto con la sinergia de sus acciones, podrán enfrentar los impactos ambientales.

Otro estudio por Bayraktarov y colaboradores (2020) llevaron a cabo una evaluación de los proyectos de restauración en la región del Caribe y países latinoamericanos. Su estudio puede finalmente compararse con otros en el mundo académico, pues realizaron la primera recopilación exhaustiva de datos de los esfuerzos de restauración de arrecifes de coral en América Latina. Exponen los esfuerzos de restauración presentando información generada de 12 estudios de caso de restauración arrecifal proveniente de cinco países latinoamericanos. Además, describen los motivos y técnicas empleadas, una estimación de los costos anuales totales de los proyectos, en relación con la superficie de arrecife intervenida, su extensión espacial y duración de cada uno. Encontraron que la mayoría de los proyectos tenían como objetivo ampliar los enfoques de restauración y/o proporcionar alternativas sostenibles a través de utilizar las técnicas de trasplante directo, la jardinería de corales, la microfragmentación o la propagación de larvas.

Calcularon que el costo promedio para intervenir y restaurar una hectárea de arrecife (la medida de superficie más común), es de \$93,000 US anuales (precio estimado en 2018). Notaron también, que en promedio la duración de los proyectos es de tres años, pero que la viabilidad de los proyectos puede llegar a ser mayor.

Los autores encontraron que la mayoría de los proyectos tienen objetivos específicos para optimizar y ampliar los enfoques de restauración, seguidos de proporcionar oportunidades de medios de vida alternativos y sostenibles, y finalmente, promover la gestión de la conservación del ecosistema arrecifal para que sean autosuficientes y funcionales. De los proyectos que consideraron, encontraron que la mayoría de las motivaciones para llevar a cabo los proyectos de restauración de arrecifes de coral pretenden la mejora de la biodiversidad (por ejemplo: conservar especies endémicas, la creación de hábitats, la conectividad de los ecosistemas, y la resiliencia ecológica). Así mismo, mejorar los servicios ecosistémicos como la protección de la zona costera, la calidad del agua, las pesquerías y los cambios de fase, que es la conversión de un arrecife coralino a un ambiente dominado por macroalgas,. Por otro lado, mencionan que algunos proyectos surgen con fines culturales y/o políticos, incluso por iniciativas legislativas, que responden a controversias ambientales, para amortiguar daños al ambiente costero comúnmente efectuados por los desarrollos turísticos.

Finalmente, Boström-Einarsson y colaboradores (2020) revisan y resumen los métodos activos de restauración de corales, utilizados a nivel global y hasta la fecha, junto con una base de datos disponible en línea, lo que constituye un recurso bastante útil para científicos, practicantes y gestores. Describieron proyectos de restauración de corales realizados a nivel circumtropical, con una sorprendente diversidad de especies de coral y morfologías utilizadas. Esta revisión resultó de gran ayuda para la estructura de este ejercicio, porque semeja el panorama en el que el SAM está contextualizado, tanto ecológicamente, como en su gestión internacional.

La revisión de Boström-Einarsson y colaboradores presentó un panorama de casos exitosos, fracasos y obstáculos que han enfrentado los diversos proyectos de restauración coralina; así como oportunidades de mejorar las técnicas, y aquellos proyectos donde se evidenció la falta de objetivos claros y alcanzables, con mal diseño, carentes de seguimiento y ausencia de reportes formales de resultados con técnicas estandarizadas.

Los autores llaman a hacer conciencia sobre algunos factores que pueden mermar la calidad de los proyectos más allá de la técnica científica. Mencionan la desconfianza pública y científica hacia la restauración y la atribuyen a una falta de correlación entre los objetivos planteados con lo que sucede realmente. Es decir, no existe congruencia, quizá por factores como la falta de financiamiento, seguimiento, monitoreo o resultados poco evidentes para los involucrados. De acuerdo con lo anterior, sugieren que los objetivos ecológicos no sean lo único relevante y plantean que las metas suscriban intereses socioeconómicos, más apropiados y relevantes. Por ello, con su revisión exhortan a los practicantes y gestores a que los proyectos sean dirigidos bajo la estrategia SMART, por sus siglas en inglés. Eso significa que se establezcan objetivos específicos y claros, realizables, medibles y limitados en el tiempo, con el fin de poder delimitar de forma positiva los alcances de cada proyecto.

También señalan la probabilidad de que en el futuro la restauración de los arrecifes de coral se enfoque hacia dos escalas diferentes: proyectos a pequeña escala e intervenciones a gran escala, es decir en todo el arrecife. La primera incluye proyectos locales con objetivos a nivel socioeconómico, como los promovidos y liderados por la industria turística, los ciudadanos y científicos. Estos proyectos a pequeña escala pudieran lograrse con buena

aceptación por parte de la ciudadanía, el turismo y ONGs. Aprovechando las tecnologías existentes para viveros y trasplantes, lograr aumentar la cobertura de coral en sitios dañados y de alto valor socioeconómico. Por otra parte, proyectos a mayor escala, deben considerarse a nivel ecosistema y requieren una ampliación espacial y temporal que trascienda la de los actuales proyectos, si se desea que la restauración responda a los retos futuros de recuperación de los arrecifes de coral, como en el caso del SAM.

Dado que la restauración de los corales es un campo que ha crecido y cambiado rápidamente, no debe de desestimarse el aprendizaje que han generado pequeños proyectos, ni de la voluntad de trabajar de forma multidisciplinaria. Boström-Einarsson et al (2020) consideran que quizás debería existir la tendencia a trabajar de forma un poco automatizada, y poder desarrollar proyectos a gran escala, pero que al mismo tiempo tengan en cuenta a esos proyectos de pequeña escala y poder crear conectividad. Es por ello que la coordinación entre las distintas instancias debe ser coordinada y propositiva.

En general, las principales técnicas aplicadas en restauración coralina revelaron un promedio similar de supervivencia y crecimiento de los corales (60-70%), por lo que las decisiones sobre qué técnicas utilizar deben basarse en las condiciones ambientales de cada sitio, los costos y financiamiento, la disponibilidad de materiales y la idoneidad en función de los objetivos establecidos. Se están probando y adecuando nuevas técnicas, menos contaminantes, haciendo cada vez más hincapié en la ampliación espacial y temporal de los proyectos. Los métodos y proyectos de restauración de corales podrían ser un componente de la gestión basada en la resiliencia, junto con la

gestión de la calidad del agua y la pesca. Señalaron también, que uno de los principales motores del declive de los arrecifes de coral es el cambio climático. Aunque muchos proyectos abordan esta cuestión mediante la propagación de corales preexistentes tolerantes al calor (es decir, los que han sobrevivido a recientes episodios de blanqueamiento), la restauración de corales no sustituye una gestión significativa de los recursos de los arrecifes ni a la adopción de medidas contra el cambio climático.

Revisión de las estrategias de los países que conforman el SAM

México

En el caso específico de México, existe una iniciativa por parte de Oceanus AC llamada Programa de Restauración de Arrecifes y desde 2014 han sembrado más de 60, 000 colonias de *Acropora* en 18 sitios de restauración en el Golfo de México y el Caribe Mexicano, particularmente en Xcalak, Sian Ka'an, Riviera Maya, Tulum y Puerto Morelos. Tan solo en 2017 lograron 9,553 trasplantes de coral, utilizando principalmente especies de coral del género *Acropora* y entre sus metas pretenden trasplantar más de 10,000 corales por año, crear un centro de capacitación regional y capacitar más civiles, voluntarios, guardaparques y pescadores (página web Oceanus AC 2021).

Se espera que con la selección de sitios estratégicos de restauración y el trasplante constante de corales sanos del vivero y genéticamente diversos al arrecife, se pueda incrementar el potencial de resiliencia y adaptación de los arrecifes de coral, promoviendo así la recuperación de especies asociadas de peces e invertebrados (Oceanus, A.C., 2020). Esta iniciativa se ha multiplicado

en toda la región, con la creación de grupos locales de restauración y el desarrollo de iniciativas en otros países que comparten el SAM para desarrollar programas similares.

Otro ejemplo de México es un caso que tiene en desarrollo un plan de siembra de corales con un escenario menos alentador que el anterior. El proyecto es un esfuerzo entre el INAPESCA y el gobierno del Estado de Quintana Roo. El primero financiado por esta última instancia, pero que desgraciadamente careció de objetivos realistas, ya que el planteamiento original era sembrar 265,000 fragmentos de coral entre los años 2016 y 2022 (INAPESCA, 2019). Según una investigación periodística reciente, a la fecha sólo se tiene un avance del 35% y se cuenta con 2 años para intentar terminar el 65% de la colocación de fragmentos en el arrecife (Hernández, 2020). Sin embargo, INAPESCA admite que la realización del proyecto en tiempo no está garantizada.

También existen otras instancias en el país enfocadas en el desarrollo de investigación para la restauración arrecifal como CONACyT y CONANP que, en colaboración con universidades y centros de investigación, realizan mancuernas entre el financiamiento y la asesoría académica, técnica e inclusive, el voluntariado para la ejecución de los proyectos, como es el caso de las pequeñas organizaciones que trabajan a nivel local. Por ejemplo, el Laboratorio de Investigación Integrativa de Conservación de Arrecifes del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Puerto Morelos, que colabora en el desarrollo de biotecnología para la restauración de corales, como los proyectos que desarrolla el INAPESCA en Puerto Morelos (INAPESCA, 2019; ICMYL, 2020).

Belice

Belice ha implementado el Proyecto de Conservación Marina y Adaptación al Cambio Climático (MCCAP, por sus siglas en inglés) en sus zonas costeras bajo la dirección del Ministerio de Agricultura, Silvicultura, Pesca, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. El MCCAP ha desarrollado un programa para llevar a cabo inversiones piloto para repoblarlos de coral resistentes a la temperatura para apoyar las medidas de adaptación al cambio climático que mejorarán la resiliencia del arrecife. Dicho proyecto contrató a Fragments of Hope para ampliar el programa de restauración del arrecife en Belice (Carne, 2020).

Fragments of Hope, es la única organización privada que trabaja con un enfoque en la restauración arrecifal, y que ha incrementado la cobertura de coral vivo específicamente en el Parque Nacional Cayo Lauging Bird (PNCLB) de un 6% a más de un 35% mediante el trasplante de *Acropora* criados en viveros entre 2010 y 2016 (Carne, 2020). Actualmente, los viveros instalados en PNCLB han cultivado alrededor de 49,000 fragmentos al mismo tiempo que la ONG se encarga de divulgar el problema en la sociedad civil y (Sargent, 2020). La ONG fue pionera en el país y ha creado indicadores de éxito cuantificables para evaluar el proceso de reposición, además de haber establecido metodologías reproducibles para el mapeo, la genética y el trasplante (Carne, 2011, 2020). Fragments of Hope es liderada por la bióloga marina Lisa Carne, quien ha realizado estudios formales de monitoreo y seguimiento a los arrecifes restaurados con 10 años de observaciones y

registros. Además, el trabajo de restauración de arrecifes en Belice es único porque se centra en arrecifes poco profundos que ayudan a proteger las costas, lo que ha facilitado la participación de las comunidades locales.

Guatemala

En Guatemala ha existido sólo un proyecto piloto de restauración de corales por la iniciativa de Healthy Reefs. El proyecto se desarrolló en 2016 con 239 fragmentos pero no tuvo mayor seguimiento y financiamiento por la mala selección del sitio y el robo de las estructuras con los corales (Fondo SAM, 2020).

Honduras

En el caso de Honduras, con base en sus acciones de restauración arrecifal, éste no ha tenido proyectos masivos, pues a pesar de ser firmante del SAM, es hasta 2018 que la restauración arrecifal comenzó a tomar prioridad.

La primera ONG dedicada específicamente a la restauración coralina en Honduras fue Utila Coral Reef. Actualmente han instalado tres viveros con fragmentos (también en 2018), pero no presentan información sobre el registro y seguimiento de sus actividades (comunicación directa, mayo 2021). Actualmente no existen actualizaciones del proyecto, salvo que la ONG se ha incorporado a la Red de Restauración del Sistema Arrecifal (RRA-SAM) (Utila Coral Restoration, 2021).

También, en 2018 Grupo Iberostar Puntacana (República Dominicana) aportó una capacitación de restauración arrecifal que a la Fundación Cayos Cochinos

(Honduras), pero no existe evidencia disponible de la cantidad de fragmentos, localidades o el plan de acción (Valeriano, 2018); además, de forma independiente, Grupo Iberostar inauguró un laboratorio de corales, concebido para contribuir a la protección de la vida marina frente al incremento de la temperatura global y crear un refugio genético de corales libres de enfermedades. Su esfuerzo está acorde a su movimiento “Wave of Change”, que acata al ODS 14 (Valeriano, 2018).

Posteriormente, con el apoyo de la Cooperación alemana para el desarrollo (GIZ), a través del financiamiento del Fondo Regional para la Cooperación Triangular en América Latina y el Caribe (GIZ, 2019), se creó la “Aplicación de herramientas innovadoras para la conservación y restauración de arrecifes de coral” junto con el Ministerio de Biodiversidad, Ambiente y Recursos Naturales de Honduras. Estas acciones buscaron promover experiencias para el fortalecimiento, transferencia de herramientas y creación de organizaciones o estructuras dedicadas a la gestión y conservación de arrecifes coralinos entre los países de Honduras, Costa Rica y República Dominicana. Sin embargo, no existe información oficial de las metas del proyecto.

Finalmente, desde 2019 la organización Roatan Marine Park a través del Fondo MAR ha establecido 20 viveros de coral (*A. cervicornis* y *A. palmata*). Su director, Tripp Funderburk, señala que poseen alrededor de mil corales en el vivero y que se han plantado alrededor de 800 corales en el arrecife con una tasa de supervivencia del 80% atendido por seis tiendas de buceo que colaboran en el proyecto (Fondo MAR, 2020; Roatan Marine Park, 2021).

Capítulo V: Estudio de caso en Mahahual, Quintana Roo

Mahahual se ha convertido en otro *hotspot* turístico de la costa de Quintana Roo y sigue ganando popularidad. Sin embargo a la fecha, carece de infraestructura, no hay regulación estricta en el tratamiento de aguas negras y grises por parte de hoteles y de desarrollos urbanos que aumentaron junto con el crecimiento acelerado del lugar. La migración y ocupación masiva ha propiciado la tala inmoderada de la zona costera y los manglares. El uso de la costa, inclusive el mismo camino costero, ha causado fragmentación de hábitats y directamente el deterioro de los pastos marinos, también impactados por el creciente turismo. Todo ello está produciendo un impacto general en los ecosistemas arrecifales al grado de propiciar el colapso de su biodiversidad y de sus servicios ecosistémicos, así como de las ganancias económicas que se obtienen a partir de ellos (Ardisson *et al*, 2011, Arias *et al*, 2017).

Como parte de los objetivos de la Maestría en Ecología Internacional, que promueve la conceptualización y discusión de problemas complejos relacionados con la gestión de ecosistemas, los principios de gestión de proyectos y la realización de un proyecto individual de práctica en el extranjero: el ECOSUR, la Universidad de Sherbooke y al apoyo del Centro de Investigación Takata, participé en el programa de restauración coralina en Mahahual mediante la realización de tres actividades que se describen en el presente documento. El proyecto fue a través de una tienda de buceo que incluye un programa de educación ambiental en el que se involucra a la comunidad regularmente con proyectos relativos a la conservación del medioambiente costero.

En los últimos 20 años el arrecife de Mahahual ha experimentado un cambio de fase. La cobertura de macroalgas aumentó de entre 20-30% en el año 2000 y al 60-70% hacia el 2006, mientras que la cobertura de corales desde entonces sigue mermando (Arias *et al.*, 2017). Este cambio de fase ha sucedido a la par con el cambio de giro de una comunidad pesquera a un desarrollo turístico, aún exponencial. En consecuencia, se han perdido más de 40 hectáreas de cobertura coralina al tiempo que la ictiofauna ha disminuido en un 70% (Arias *et al.*, 2017; Álvarez-Filip *et al.*, 2019). Esto ha ocasionado un colapso del ecosistema y una reducción en el aprovechamiento de sus recursos ecosistémicos, como la pesca local.

Acciones de restauración

Con base en lo anterior, el centro de investigación Takata creó un proyecto de restauración utilizando la jardinería de coral en Mahahual, con el fin de contribuir a la rehabilitación de dos sitios de 500m² del arrecife y recuperación de la biodiversidad a largo plazo. Su objetivo es trasplantar 10,000 fragmentos de coral. El proyecto de restauración consta desde el planteamiento logístico, una revisión de literatura de métodos y materiales de otros trabajos de restauración y de recomendaciones basadas en las acciones realizadas y aprendidas, hasta el trabajo operación en campo. El proyecto fue dividido en varias fases, pero la fase particular para el estudio de caso constó en un análisis de las amenazas particulares que enfrenta la comunidad de Mahahual, Quintana Roo y la región circundante en el Caribe mexicano.

Trabajo de campo

El trabajo de campo de las actividades relativas al proyecto de restauración de Takata consistió en monitorear los corales que se encontraban en el vivero. Se midieron mensualmente dichos corales para analizar su crecimiento conforme a las condiciones de profundidad donde crecían y poder así realizar recomendaciones ligadas a la fase del trasplante con base en los resultados obtenidos

Para el análisis se compararon las tallas iniciales y finales de los fragmentos de coral, así como las diferencias de crecimiento que pudieran existir dependiendo del origen del fragmento (de oportunidad u obtenido de colonia madre) y por profundidad, seleccionando dos categorías: los corales en los niveles más profundos (entre los 11 y 12.5m) y los fragmentos más superficiales (entre los 9 y 10.5m). Se encontró que no existió una diferencia considerable entre las tasas de crecimiento de los dos grupos evaluados según la profundidad, esto posiblemente a que los rangos de profundidad evaluados son cercanos, por lo que no son muy diferente. Además, ambas profundidades están en el intervalo óptimo de profundidad (Kubicek y Reuter, 2016). Asimismo, considerando los resultados relativos a la tasa de crecimiento junto con la experiencia en campo, los corales con más ramificaciones tienen un crecimiento más acelerado y evidente. Eso se puede notar en la cantidad de ápices que desarrollan, por lo que conviene crecer fragmentos en el vivero con ramificaciones, aunque los fragmentos sean pequeños, les da ventaja al no crear resistencia ante corrientes y minimizando la probabilidad de desprenderse del vivero.

Discusión del caso de estudio

Tal como se han encontrado dificultades en el seguimiento de los proyectos de restauración en el Caribe, el caso de estudio en Mahahual comparte limitaciones, sobre todo en las etapas de seguimiento. A continuación, se mencionan algunas de ellas

En primer lugar, la pandemia por COVID-19 causó retraso en la ejecución del proyecto durante varios meses. Fue un evento extraordinario, que no estaba contemplado y que ha promovido la discusión sobre este y otros proyectos de conservación. Estos deberían gestionarse considerando una contingencia sanitaria como la que se presentó, Sin embargo, salvaguardar la salud pública era importante, y quizá con algunos ajustes en el proyecto a largo plazo podrían ejecutarse para no dimitir o mermar los esfuerzos de trabajo (por ejemplo, reducción del equipo operativo y los recursos para la ejecución del proyecto);

En segundo lugar, las otras limitaciones estuvieron relacionadas a la dinámica de la instancia que desarrolla el proyecto. La tienda de buceo es una entidad privada que está vinculada a Takata y que sostiene el proyecto con dos tipos de recursos: uno es la obtención de financiamiento de organizaciones internacionales que apoyan directamente la restauración activa a través de viveros. No obstante, el apoyo está supeditado a los recursos económicos de las mismas organizaciones y no son una fuente segura. El otro son donaciones de material (de otras entidades privadas de la comunidad y, usualmente, ONGs y hoteles), como de mano de obra. Esto último suele realizarse a través de voluntarios o estudiantes en pasantías de investigación. Dado lo anterior, el centro de buceo funge y se sostiene económicamente como empresa de

servicios turísticos, por lo que las actividades relacionadas con el proyecto que no generan directamente un ingreso financiero se llevan a cabo programadas en calendario y a disponibilidad de mano de obra de los voluntarios que pagan una cantidad monetaria y amortizan los gastos de equipo, tanques de aire comprimido, pago a la tripulación, combustible de la embarcación. Además, los voluntarios deben tener una certificación como buzos o rescatistas para trabajar en el proyecto, lo que restringe aún más la colaboración de gente en el mantenimiento de los viveros.

En tercer lugar, la generación de datos de campo. Se puede decir que un indicador de éxito del proyecto es la información cuantitativa y cualitativa que se pueda obtener del monitoreo, plasmados en los documentos que cada voluntario o estudiante genere en su reporte. Sin embargo, lo anterior está sujeto a lo mencionado, hay limitaciones financieras y operativas que son clave en el buen seguimiento y mantenimiento del programa. Se percibió que los altibajos en las operaciones de monitoreo fueron, por disponibilidad de calendario y voluntarios preparados, afectando la ejecución del proyecto en tiempo y forma, llegando a variar el apego al calendario y finalmente el éxito de los objetivos propuestos.

Actualmente, existen apoyos económicos y asesoría académica entre instituciones para realizar proyectos de restauración arrecifal. En algunos casos los gobiernos federales, estatales y/u ONGs, a través de las instituciones en materia ambiental, financian proyectos a centros de investigación, comúnmente de universidades con personal especializado. Gracias a estas colaboraciones se continúa justificando su importancia para la investigación, que es fundamental para la preservación de los ecosistemas arrecifales. Esto

motiva la contribución entendimiento biológico, ecológico y oceanográfico de la región. Tomando a México como ejemplo, que posee la extensión del Sistema Arrecifal más grande, sus particularidades y condiciones fomentan la investigación científica y refuerza su conservación a través de la promoción de actividades de educación ambiental para intentar minimizar el impacto antrópico. En el país existen proyectos financiados por CONANP, CONACyT o INAPESCA que trabajan junto con centros académicos universitarios como la UNAM o ECOSUR (ICMYL, 2020; SADER, 2020; Oceanus, A.C., 2020). Las mancuernas entre asesorías y desarrollo de los proyectos se ven reflejados en literatura científica que respaldan el trabajo. Sin embargo, las desventajas de ello son que se dejan financiar proyectos de restauración que merman sus objetivos a largo plazo.

Conclusiones

Mientras las amenazas antrópicas al SAM se evidencian desde hace varias décadas (1980s a la fecha), se encontró que la realización integral de algunos programas de restauración activa en el Caribe ha tenido objetivos poco realistas o se han presentado dificultades en la realización integral de proyectos. Sobre todo en aquellos que tienen problemas con el personal técnico y/o materiales, por la transición de las administraciones gubernamentales (la facilitación de permisos o las prioridades en la agenda gubernamental), o bien, por una percepción errónea de los alcances, entre otros problemas puntuales (como el robo de estructuras de viveros o el tránsito y atraco de megacruceros en puertos contiguos a los arrecifes).

Se concluye que, si bien la restauración activa no es la solución para el repoblamiento coralino y la salud de los ecosistemas costeros, es un elemento que ayudará. Para llevarla a cabo es imprescindible una gestión rigurosa, extensiva y de buena planeación; que los recursos financieros destinados a la restauración estén en instituciones y organizaciones que cuenten con la experiencia y perfiles necesarios para poder hacer efectivos los proyectos.

En ese sentido, el apego a la estrategia de la RRA-SAM deberá ser fundamental para dejar atrás el formato de proyectos pequeños que, aunque con buenas intenciones, son ingenuos y no poseen rigor o línea base formal, es decir, que no dan seguimiento ni resultados sustanciales. O bien, con base en el aprendizaje al proyecto de restauración en Mahahual, se recomienda que las iniciativas de organizaciones sin mucha experiencia puedan estar adscritas a programas gubernamentales, junto con otras organizaciones especializadas (academia u ONGs).

Por otra parte, la documentación de los esfuerzos no ha aumentado de forma significativa, si comparamos con los esfuerzos que se realizan en Estados Unidos o Australia, países con sistemas arrecifales y con mayor posibilidad de solventar proyectos, crearlos y darles seguimiento. En el Caribe y Latinoamérica, el número de proyectos iniciales es mayor que el número de programas exitosos que completan efectivamente los dos principios del enfoque de jardinería (fase de crecimiento en el vivero y trasplante de corales (Lierman y Schopmeyer, 2016)). De hecho, suelen tener una vida de 1 a 3 años, sin poder vislumbrar esfuerzos a largo plazo (Bayraktarov *et al.*, 2020).

Se asocia que las acciones de la última década han tenido una tendencia a la propagación asexual de los corales, debido las implicaciones financieras y operativas que representan. A pesar de que los costos de los viveros pueden ser relativamente bajos y que los conocimientos iniciales necesarios para establecer viveros de coral se han popularizado, la pérdida de recursos o de interés tras las fases iniciales de un nuevo programa ha dado lugar a viveros abandonados en los que los corales siguen creciendo, pero no se mantienen o que nunca se trasplantan.

Lo anterior puede ser una amenaza agregada, pues además que puede afectar a arrecifes adyacentes, los materiales con que se construye finalmente son ajenos al mar y terminan siendo desechos y esfuerzos opuestos a la buena causa de procurar resiliencia a los ecosistemas. De hecho, el estudio de caso en Mahahual tenía como principal objetivo que, en la fase de trasplante, no se utilizaran o bien, la menor cantidad posible, de elementos ajenos al mar (como cinchos plásticos, varillas de metal u otras estructuras), buscando fijar los corales directamente en sustratos adecuados o en ranuras y/o huecos naturales del arrecife, dado que no se conocen los efectos de la degradación de estos materiales, más allá de su desintegración.

No obstante, en esta última década, especialmente en su segunda mitad, los países del SAM han analizado esfuerzos de restauración a nivel global y regional. Acordaron analizar con más rigor las herramientas usadas para mitigación e incluso en generar un esfuerzo colectivo entre países. Dos proyectos puntuales mencionados en esta revisión han realizado acciones de restauración en la región: Fragments of Hope y Oceana AC, donde el planteamiento que proponen ha sido realista en sus objetivos y logística;

además de la formalidad de las organizaciones y su financiamiento. También se han realizado innovaciones en las técnicas de restauración activa, se han presentado lecciones aprendidas y se ha generado información formal relativa a los factores que amenazan la salud de los arrecifes.

Cabe resaltar que las ONGs ecologistas han jugado un rol importante en las acciones de restauración arrecifal, pues incentivan planes de manejo y han logrado trabajar de forma multilateral con los gobiernos y este, con instancias internacionales que refuezan los proyectos de conservación. Se puede decir que gran parte esto se debe a los compromisos por parte de las ONGs, de su personal y los voluntarios, así como a la participación de la comunidad local y los operadores turísticos, que normalmente colaboran con universidades. Esto resalta que las motivaciones socioeconómicas desempeñan un papel importante en la restauración de los arrecifes de coral en el Caribe (Bayraktarov *et al*, 2020; Böstrom *et al*, 2020. demás han incitado a promover y promulgar leyes y reglamentos en materia ambiental innovadores.

Asimismo, con base en la síntesis presentada aquí, se intuye una mayor probabilidad de éxito de restauración cuando los proyectos se desarrollan dentro de las AMPs. En ellas existe menor riesgo de amenazas potenciales no identificadas; de otra forma en sitios no vigilados/protegidos se podrían encontrar alteraciones al equilibrio del ecosistema por la falta de gestión y vigilancia. Por ejemplo, sí estuvieron expuestos a contaminación, áreas de pesca, escorrentías, entre otras presiones.

Cabe considerar que en esta última década, con diferencia a las pasadas, las actividades de restauración arrecifal y de propagación coralina tienen en

cuenta la expresión génica, pues la restauración activa a través de la propagación y al establecimiento de poblaciones monoclonales (copias de los fragmentos cultivados). Eso implica que se reduzca la recombinación genética de las poblaciones silvestres, debido al aumento artificial la dominancia de ciertos genotipos, además el menor éxito de fecundación (Young *et al*, 2012). Por lo tanto, las contribuciones se refieren al poder evaluar la diversidad genotípica local y regional de las poblaciones silvestres, así como evaluar el linaje génico de los viveros de coral y de los lugares de trasplante. De esa forma, la información puede ser vinculada al éxito de la restauración.

A la fecha las herramientas moleculares han permitido reiterar la importancia de la diversidad génica. Su contribución es imprescindible para las actividades de restauración, tanto en la restauración de los arrecifes, donde se podrá planear el arreglo espacial, como en los viveros, donde puedan servir como bancos genéticos (Carne *et al*, 2016; Lirman y Schopmeyer, 2016). Sin embargo, el contexto regional que poseen los países circunscritos al SAM dificulta las operaciones para llevar a cabo una restauración activa basada en técnicas novedosas, por la diversidad de intereses socioeconómicos que prevalecen en cada país.

Otro aspecto relevante relativo a la salud de los sistemas arrecifales, como de los viveros de coral, es que sigue habiendo pocos estudios relacionados con enfermedades coralinas y su mitigación. Si bien se han propuesto teorías sobre los vectores de propagación (Shore y Caldwell, 2019) y, aunque pareciera que es de origen bacteriano actuando en sinergia con otras presiones ambientales, aún no se sabe cómo prevenirlos. Desgraciadamente, la aparente falta de fondos y estrategias de financiamiento representa otro reto para la restauración

de los arrecifes de coral en el gran Caribe, pues ninguno de los países cuenta con planes nacionales cohesionados para la restauración de los arrecifes coralinos (Bayktarov *et al.*, 2020).

La toma de decisiones deberá tener una visión sostenible y respetuosa con las dinámicas naturales de los ecosistemas costeros o habrá una degradación irreversible. Es necesario que se reconozca y comprenda la importancia de proyectos de conservación y restauración, que se les impulse o cuando menos, se agilice el trámite de los permisos necesarios.

Finalmente, a nivel local y con base en la experiencia del estudio de caso, se reflexiona sobre el manejo de los proyectos. Estos deberán trabajar de forma específica involucrando a la comunidad, con organizaciones y con respaldo de instituciones académicas y gubernamentales para poder llevarse a cabo con éxito. Tal y como Bayraktarov y colaboradores (2020) señalaron: “los actores deberán asegurarse de que comparten y aplican sus protocolos de mejores prácticas para estandarizar los esfuerzos y hacer un seguimiento de los progresos de restauración mediante parámetros específicos de éxito, medibles, alcanzables y repetibles a lo largo del tiempo”.

Referencias

- Acropora Biological Review Team. (2005). Atlantic Acropora status review document. National Marine Fisheries Service Report, 152 .
- AGRRA. Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment, (2020). Ocean Research & Education Foundation, Inc. & AGRRA. Coral Reef Monitoring. consultado en: <https://www.agrra.org/training-tools/>
- Alvarez-Filip, L., Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., Molina-Hernández, A., and González-Barrios, F. J. (2019). A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the mexican caribbean. *PeerJ*, 7.
- Antonio-Martínez, F., Henaut, Y., Vega-Zepeda A, Cetz-Navarro, N.P., Espinoza-Ávalos, J. (2020). Leachate effects of pelagic Sargassum spp. on larval swimming behavior of the coral *Acropora palmata*. *Sci. Rep.*10(1),3910.
- Antonius, A. (1982). The "band" diseases in coral reefs. Marine Sciences Center, University of the Philippines. Proc 4th Int. *Coral Reef Symp.* Vol. 2. 7–14.
- Ardisson, P.L, May-Kú, M.A., Herrera, M.T., Arellano, A. (2011). El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: Consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiol.* 21, 261-280.
- Arias-González, J. E., Fung, T., Seymour, R. M., Garza-Pérez, J. R., Acosta-González, G., Bozec, Y. M., y Johnson, C. R. (2017). A coral-algal phase shift in Mesoamerica not driven by changes in herbivorous fish abundance. *PLoS ONE*.12(4), 17.
- Bayraktarov, E., Banaszak, A., Montoya Maya, P., Kleypas, J., Arias-González, J., Blanco, M., + 22 (2020). Coral reef restoration efforts in Latin American countries and territories. *PLoS ONE* .15(8), 19.
- Birkeland, C. (2015). Coral reefs in the Anthropocene. In *Coral reefs in the Anthropocene* Springer, Dordrecht. 1-15.

- Boström-Einarsson, L., Babcock R.C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S.C.A., + 9. (2020) Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures, and future directions. *PLoS ONE*. 15(1), 24.
- Bruckner, A., Bruckner, R., Hill, R. (2009). Improving restoration approaches for *Acropora palmata*: lessons from the Fortuna Reefer grounding in Puerto Rico. *Proc 11th Int Coral Reef Symp.* 24:1199–1203.
- Burke, L., Reytar, K., Spalding, M., Perry, A. (2011). *Reefs at risk revisited*. World Resources Institute, Washington, DC. 114.
- Carne L, Kaufman L, Scavo K. (2016). Measuring success for Caribbean acroporid restoration: key results from ten years of work in southern Belize. Conference paper. 352-368.
- Carne, L. (2020). Repopulate reefs within replenishment zones of Turneffe Atoll Marine Reserve and South Water Caye Marine Reserve with temperature resilient coral varieties. Summary of replenished coral reef sites in SWCMR and TAMR). MCCAP/SER/05. *Fragments of Hope*, The World Bank and The Adaptation Fund. 45.
- Carne, L., Baums, I. (2016). Demonstrating effective Caribbean acroporid population enhancement: all three nursery-grown, out-planted taxa spawn in August 2015 & 2016 in Belize. *The News Journal of the International Society for Reef Studies, Short Communications*. International Society for Reef Studies, Reef encounter 2016,31(2), 42-43.
- Cervantes, A., Quintero, E. 2016. La importancia de conservar las praderas de pastos marinos. *CONABIO Rev. Biodiversitas*. 128,12-16.
- Cheal, A. J., MacNeil, M. A., Emslie, M. J., & Sweatman, H. (2017). The threat to coral reefs from more intense cyclones under climate change. *Glob. Change. Biol.* 23(4), 1511–1524.
- Compte, A., Pendleton, H. (2018). Management strategies for coral reefs and people under global environmental change: 25 years of scientific research. *J. Environ. Manag.* 209, 462–474.
- Comunicación personal (2021). Comunicación con la Utila Coral Restoration.

- Craik W., Kenchington, R., Kelleher, G. (1990). Coral-reef management p En: Dubinsky, Z (ed.) *Coral Reefs*. Elsevier, Amsterdam. 453-467.
- Dorenbosch, M., Grol, M., Christianen, M., Nagelkerken, I., van der Velde, G. (2005). Indo-Pacific seagrass beds and mangroves contribute to fish density and diversity on adjacent coral reefs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 302, 63–76.
- Edwards, A.J. (ed.) (2010). Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program: St Lucia, Australia. II, 166.
- Edwards, A.J., Gomez, E.D. (2007) Reef restoration concepts and guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty. St Lucia, Australia: Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Programme. 4, 38.
- Fondo SAM. (2020). Guía de capacitación para la restauración de arrecifes. Iniciativa mesoamericana de rescate de arrecifes. 50. Disponible en: <https://marfund.org/es/wp-content/uploads/2020/09/Guia-de-Capacitacion-para-la-Restauracion-de-Arrecifes.pdf>.
- García, M.A., Nava, G.G., Vásquez, M., Jacobs, N.D., Majil, I., Molina, A., Yáñez, B., Cubas, A., Dominguez, J.J., Hadaad, W. (2008). Declining Trend on the Mesoamerican Reef System Marine Protected Areas. Proc. 11th Int. Coral Reef Symp. Ft. Lauderdale, Florida. 18: 883-888.
- Garrison, V.H., Ward, G. (2012). Transplantation of storm-generated coral fragments to enhance Caribbean coral reefs: a successful method but not a solution. *Rev. Biol. Trop.* 60, 59–70.
- Gattuso J.P., Magnan, A., Bille, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., +17. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO² emissions scenarios. *Science*. 349.
- GIZ, Fondo Regional para la Cooperación Triangular en América Latina y el Caribe (2019). Aplicación de herramientas innovadoras para la conservación y restauración de arrecifes de coral en Honduras. Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ). 25. Disponible en:

https://enbcr.go.cr/sites/default/files/verificador_m15_proyecto_triangular.pdf

- Goreau T., Hilbertz, W. (2005). Marine ecosystem restoration: costs and benefits for coral reefs. *World Resour. Rev.* 17(3), 375-409.
- Goreau, T.F., N.I. Goreau and T.J. Goreau. (1979). Corals and coral reefs, *Scientific American*, 241, 124-136.
- Green EP, Bruckner A.W. (2000). The significance of coral disease epizootiology for coral reef conservation. *Biol. Conserv.* 96, 347–361.
- Harrison, P. L., y Wallace, C. C. 1990. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. En: Z. Dubinsky (Ed.). *Ecosystems of the World. Vol. 25. Coral Reefs* Elsevier, New York, 133-207.
- Harrison, P.L. (2011). Sexual reproduction of scleractinian corals. En: Dubinsky, Z., Stambler, N. (Eds.) *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Springer. 59-85.
- Harrison, P.L. y Wallace, C. 1990. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. En: Dubinsky Z. (ed.). *Ecosystems of the World. Coral Reefs*. Elsevier, Healthy Reefs. (2021). 133-207. Disponible en <https://www.healthyreefs.org/cms/publications/>
- Hernández, L. (21 de abril 2020). Viveros de coral son cultivados muy lento. Periódico *Por Esto!*: La ciudad. 11. Disponible en: <https://www.poresto.net/quintana-roo/2021/4/1/cultivo-de-corales-que-finaliza-en-dos-anos-tiene-un-35-de-avance-en-quintana-roo-246399.html>
- Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten A.J, +14. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*. 318, 1737–1742.
- Hughes, T. P., Andreson, K., Connolly, S., +23 (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*. 359, 80–83.
- ICMYL-UNAM, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, ICMYL. (2020). Laboratorio de Investigación Integral para la Conservación de Arrecifes,

Puerto Morelos. Universidad Autónoma de México. Portal disponible en: https://www.icmyl.unam.mx/puerto_morelos/es/investigacion/laboratorio-de-investigacion-integral-para-la-conservacion-de-arrecifes

IMRA, Iniciativa Mesoamericana para el Rescate de los Arrecifes. (2014). Acuerdo de Cooperación Financiera entre el Gobierno de Alemania y el Fondo SAM. Disponible en: <https://marfund.org/es/iniciativa-rescate-arrecifes/> (Revisado el 20 de junio de 2021).

INAPESCA, Instituto Nacional de Pesca. (2019). Comunicado. Disponible en <https://www.gob.mx/inapesca/prensa/banderazo-de-inicio-de-la-siembra-masiva-de-corales-en-el-arrecife-mesoamericano>

INAPESCA, Instituto Nacional de Pesca. (2019). Comunicado. Disponible <https://www.gob.mx/inapesca/prensa/logra-inapesca-reproduccion-sexual-de-corales-en-laboratorio>

IPCC, 2014: Summary for policymakers. En: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, +13 (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, EUA.1-32 .

IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (IUCN). (1980). World Conservation Strategy, Living Resource Conservation for Sustainable Development. IUCN, United Nations Environment Programme (UNEP) and World Wildlife Fund (WWF): Gland. 77.

Jackson, J., Donovan, M., Cramer, K., Lam, V.Y. (eds.) (2014) Status and Trends of Caribbean Coral Reefs 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network, Portal IUCN. Gland, Switzerland. 304.

Johnson, M., Lusic, C., Bartels, E., Baums, I., Gilliam, D., Larson, L., Lirman, D., Miller, M.W., Nedimyer, K., Schopmeyer, S, (2011). Caribbean *Acropora* restoration guide: best practices for propagation and population enhancement. The Nature Conservancy, Arlington, VA. 53.

- Jones, R., Ricardo, G.F., Negri, A.P., (2015). Effects of sediments on the reproductive cycle of corals. *Mar. Pollut. Bull.* 100, 13–33.
- Kleypas, J. A.; Feely, R. A.; Fabry, V. J.; Langdon, C.; Sabine, C. L. y Robbins L.L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers, A Guide for Future Research, Baltimore, NSF-NOAA-NSGS. 18,88..
- Klin, D., Vollmer, S. (2011). White band disease (type I) of endangered Caribbean Acroporid corals is caused by pathogenic bacteria. *Sci. Rep.* 1(7), 5.
- Kline, D.I., Vollmer, S.V. (2011) White band disease (type I) of Caribbean acroporid corals is caused by pathogenic bacteria. *Sci. Rep.* 1(1), 5.
- Kramer, P.A. (2003). Synthesis of indicators of coral reef health in the western Atlantic: results from the AGRRA program (1997-2000). *Atoll Res. Bull.* 1-55 p. En J.C. Lang (Ed.), Status of Coral Reefs in the Western Atlantic: Results from Initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment Program. (AGRRA) *Atoll Res. Bull.* 496.
- Kubicek, A., and Hauke, R. (2016). Mechanics of Multiple Feedbacks in Benthic Coral Reef Communities. *Ecological Modelling* 329, 29–40.
- Lapointe, B.E., Brewton, R.A., Herren, L.W., Porter, J.W., Hu, C. (2019) Nitrogen enrichment, altered stoichiometry, and coral reef decline at Looe Key, Florida Keys, USA: a 3-decade study. *Mar. Biol.* 166(108). 31.
- Levinton J.S. 1982. Marine Ecology. Prentice Hall. USA. 526.
- Lirman, D., Schopmeyer, S. (2016). Ecological solutions to reef degradation: optimizing coral reef restoration in the Caribbean and Western Atlantic. *PeerJ*, 4.
- Lough, J.M. (2008) 10th Anniversary Review: a changing climate for coral reefs. *Journal of Environmental Monitoring*, 10, 21–29.
- MAR Ffund (2021). Sitio web oficial. Disponible en <https://marfund.org/es/arrecife-mesoamericano/>

- Martínez-Rendis, A., Acosta, G., Hernández, J. L., Arias, J.E. (2016). Quantifying the reefscape transformation of a coastal Caribbean coral reef during a phase shift and the associated coastal landscape change. *Mar. Ecol.* 37(3), 697-710.
- McField, M., Kramer, P. (2006). The Healthy Mesoamerican Reef Ecosystem Initiative: a conceptual framework for evaluating reef ecosystem health. Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium, 1118-1123.
- McField, M., Kramer, P., Petersen, A.G., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N., Rueda, M. (2020). Healthy Reefs. 2020 Mesoamerican Reef Report Card. 35.
- McLeod, I.M., Böstrom-Einarsson, L., Johnson, C.R., Kendrick, G.A., Layton, C., Rogers, A. (2018). The role of restoration for conserving matters of national environmental significance. Report. NESP. Marine Biodiversity Hub.186.
- Miller, M. A., Szmant, A.M. (2006). Lessons learned from experimental key-species restoration en *Coral Reef Restoration Handbook: The Rehabilitation of an Ecosystem Under Siege*, W. F. Precht, ed. CRC Press, Boca Raton. FL. Pp. 219 –234.
- Muller, E. M y van Woesik, R. (2012). Caribbean coral diseases: Primary transmission or secondary infection? *Glob. Change Biol.* 18, 3529–3535.
- NRC National Research Council (2000). Clean coastal waters: understanding and reducing the effects of nutrient pollution. Ocean Studies Board, Water Science and Technology Board. National Academy Press. Washington DC. 428.
- Oceanus, A.C. (2020). Programa de Restauración de Arrecifes. Disponible en: <https://oceanus.org.mx/programa-de-restauracion-de-arrecifes-de-coral/>
- Omori, M., Shuichi, F. (2004). Manual for restoration and remediation of coral reefs. Nature Conservation Bureau. Ministry of Environment, Japan. 90.

- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 195 países signatarios. Referencia: C.N.63.2016.TREATIES-XXVII.7.d
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs> (Acceso: 19 junio 2021).
- Randall, C., van Woesik, R. (2015). Contemporary white-band disease in Caribbean corals driven by climate change. *Nature Climate Change*, 5.
- Reyes-Bonilla, H., Álvarez del Castillo Cárdenas, P.A., Calderón-Aguilera, L., Ricárdez, C., Fernández-Rivera, F., Frausto, T., Salguero, B., Moreno-Sánchez, X., Torres, M., Norzagaray, O., Petatán, D. (2014). Servicios ambientales de arrecifes coralinos: el caso del parque nacional Cabo Pulmo, B.C.S. En Desarrollo Regional en Baja California Sur: Una perspectiva de los servicios ecosistémicos. J. I. Urciaga (ed). Cuadernos Universitarios. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Cap. 3, 49-78.
- Richmond, R.H. (1997). Reproduction and recruitment in corals: Critical links in the persistence of reefs. En: Birkeland C. (ed). Life and death of coral reefs. Chapman & Hall, Nueva York. 175-197.
- Rinkevich, B. (1995). Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits. *Restor. Ecol.* 3(4), 241–251.
- Rinkevich, B. (2000). Steps towards the evaluation of coral reef restoration by using small branch fragments. *Marine Biology* 136: 807-812.
- Ritson-Williams, R., Arnold S.N., Fogarty, N.D., Steneck, R.S., Vermeij, M.J.A., Paul, V.J. (2009). New Perspectives on Ecological Mechanisms Affecting Coral Recruitment on Reefs. *Smithson. Contrib. Mar. Sci.* 437-457.
- Roatán Marine Park. (2021). Coral reef restoration program. Disponible en <https://www.roatanmarinepark.org/coral-reef-restoration-program> (Revisado el 24 de junio de 2021).

- Rogers, C.S., 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Progr.* 62, 185–202.
- Ruppert, E., Barnes, R. (1996). Zoología de los Invertebrados. Sexta ed. McGraw-Hill Interamericana, México, 1064.
- Salazar, S., González, N.E. (1994). Turismo costero y conservación. Centro de Investigaciones de Quintana Roo. *Revista Caribe.* 1(3), 1-29.
- Sargent, C. (2020). How Belize saved its coral reefs. One Earth. Publicado el 7 de noviembre de 2020. Disponible en: <https://www.oneearth.org/how-belize-saved-its-coral-reefs/>
- Schuhmacher, H. 1978. Arrecifes coralinos. Omega. Barcelona, Esp. 288.
- SEDETUR, Secretaría de Turismo del Estado de Quintana Roo. (2019). Disponible en <http://sedeturqroo.gob.mx/ARCHIVOS/COMO-VAMOS-201912.pdf>
- Sheppard, C., Sheppard, A., Mogg, A., Bayley, D., Dempsey, A., Roche, R., Turner, J., Purkis, S. (2017). Coral bleaching and mortality in the Chagos Archipiélago. Smithsonian Institution Scholarly Press. *Atoll. Res. Bull.* 613(2), 26.
- Shore, A., y Caldwell, J. M. (2019). Modes of coral disease transmission: how do diseases spread between individuals and among populations? *Mar. Biol.* 166(45), 14.
- Spalding M.D, Ravilious C, Green E.P. (2001). World Atlas of Coral Reefs. UNEP World Conservation Monitoring Center, University California Press. 432.
- Szmant, A. (1986). Reproductive ecology of Caribbean reef corals. *Coral Reefs*, 5: 43-53.
- Talbot, L. (1980). The World's Conservation Strategy. *Environ. Cons.* 7(4), 259-268.
- Tomascik, T y Sander, F. (1985) Effects of eutrophication on reef-building corals. *Mar. Biol.* 87(2):143–155.

- Util Coral Reef. (2021). History of Utila Coral Restoration. Disponible en: <http://www.utilacoral.org/history-utilacoral-restoration/> (Revisado el 24 de junio de 2021).
- Valeriano, M. (2018). República Dominicana transfiere modelo para restauración de arrecifes de coral a Honduras. Nota para CHM Honduras, Mecanismo de Facilitación del Convenio sobre Diversidad Biológica en Honduras. Disponible en: <http://www.chmhonduras.org/index.php/acerca>. (Revisado del 24 de junio de 2021).
- Veron, J. E., Hoegh-Guldberg, O., Lentont, T., +7. (2009). The coral reef crisis: The critical importance of <350ppm CO₂. *Mar. Poll. B.* 1428–36.
- Veron, J.E. (2000). Corals of the world. Townsville: Australian Institute of Marine Science. (1): 275-281.
- Veron, J.E. (2011). Corals: biology, skeletal deposition, and reef-building. En: Hopley D. (ed) Encyclopedia of Modern Coral Reefs Structure, Form and Process. Springer. 275- 281.
- Victoria Salazar, I. (2018). Resiliencia y sucesión ecológica de un arrecife de coral afectado por un encallamiento. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de México. México. 99 .
- Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., & Graham, N. A. J. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Funct. Ecol.* 33, 1023–1034.
- Young, C.N., Shopmeyer, S.A., Lirman, D. (2012). A Review of Reef Restoration and Coral Propagation Using the Threatened Genus *Acropora* in the Caribbean and Western Atlantic. *Bull. Mar. Sci.* 88:1075-1098.