

**ALTERNATIVAS APLICABLES PARA LA RESTAURACIÓN DE ARRECIFES
CORALINOS EN LAS CONDICIONES COLOMBIANAS**

JORGE ANDRÉS VALENCIA MÉNDEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN PRESERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS
RECURSOS NATURALES
BUCARAMANGA
2021**

**ALTERNATIVAS APLICABLES PARA LA RESTAURACIÓN DE ARRECIFES
CORALINOS EN LAS CONDICIONES COLOMBIANAS**

JORGE ANDRÉS VALENCIA MÉNDEZ

Documento de monografía presentado como requisito para optar al título de:
**ESPECIALISTA EN PRESERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS
NATURALES**

DIRECTOR:
ESP. RICARDO RESTREPO MANRIQUE

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN PRESERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS
RECURSOS NATURALES
BUCARAMANGA
2021**

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	4
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	11
2. OBJETIVOS	13
2.1. GENERAL	13
2.2. ESPECÍFICOS	13
3. METODOLOGÍA	13
4. MARCO REFERENCIAL	14
4.1. CONTEXTUALIZACIÓN	14
4.2. PERTURBACIONES	15
4.2.1. Acidificación oceánica	15
4.2.2. Blanqueamiento coralino	16
4.2.3. Enfermedades	18
4.2.4. Contaminación	18
4.2.5. Otras perturbaciones	20
5. POLÍTICAS Y ESTRATEGIAS	21
5.1. ALTERNATIVAS ADAPTATIVAS	26
6. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA	27
6.1. TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN DE CORALES	28
7. ARRECIFES ARTIFICIALES: ENTORNO GLOBAL	32
7.1. DESARROLLOS PARA LA CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE ARRECIFES ARTIFICIALES	38
8. CONTEXTO COLOMBIANO	42
8.1. ANTECEDENTES	42
8.2. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN COLOMBIA	44
8.3. ARRECIFES ARTIFICIALES: ENTORNO COLOMBIANO	49
9. RESUMEN DE RESULTADOS	52
10. DISCUSIÓN	53
11. CONCLUSIONES	56
12. RECOMENDACIONES	57
13. BIBLIOGRAFÍA	57

GLOSARIO

Acidificación. Proceso químico por el cual algunas sustancias se transforman, adquiriendo características ácidas.

Arrecife artificial. Es una estructura sumergida dispuesta de manera deliberada sobre el suelo marino, buscando imitar alguna de las características de un arrecife natural.

Biota. Es el conjunto de organismos vivos (flora y fauna) de un lugar determinado.

Blanqueamiento coralino. Fenómeno atribuido al estrés del coral sufrido principalmente por el incremento de la temperatura del agua, con lo cual la simbiosis entre la zooxantela y el coral se rompe, ocasionando la expulsión o muerte del primero.

Carbonato. Sustancia que parte de la combinación del dióxido de carbono con el agua formando ácido carbónico, para luego combinarse con una base.

Cepa. En microbiología, es la variante de una especie.

Cianobacterias. Son también conocidas vulgarmente como algas verde-azules, tienen ciertos rasgos de bacterias y algunos de algas; son autótrofas, por lo tanto, realizan la fotosíntesis.

Corales Someros. Son corales que se encuentran ubicados en aguas poco profundas.

Epifauna. Son los organismos que viven sobre el sedimento en el medio acuático, movilizándose sin impedimentos sobre el mismo.

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Es un fenómeno climático que implica el calentamiento de la superficie del Océano Pacífico, afectando principalmente el Sureste Asiático, Australia y Sudamérica.

Embriogénesis. Proceso por el cual se forman tanto embriones vegetales como animales.

Endosimbionte. Es aquel organismo que vive dentro de un hospedero.

Escleractinios. También conocidos como corales pétreos o corales duros.

Fractal. Es un objeto geométrico donde el mismo patrón se repite a diferentes escalas y con diferente orientación.

IDR. Denominación de la moneda oficial de Indonesia, Rupiah o Rp

Infauna bentónica. Es la comunidad de organismos bentónicos que viven enterrados en el sedimento de los fondos acuáticos.

Jardinería de corales: Es una técnica experimental de cultivo en vivero de fragmentos de corales, o propagación asexual de estos, especialmente empleada para el trasplante de colonias de coral a zonas destinadas para restauración.

Macroinvertebrados. Son organismos no vertebrados que superan el tamaño de un milímetro, y son generalmente empleados como bioindicadores en estudios sobre la calidad de los cuerpos de agua.

Mixótrofo. Son un tipo de plancton microscópico que a manera de híbrido cazan como animales y crecen como plantas, e influyen de manera significativa en las redes tróficas de los océanos.

Morfotipo. Concepto empleado para designar a un grupo de animales que no pueden diferenciarse a simple vista o con herramientas sencillas.

Necton. A diferencia del plancton, el Necton son los organismos que se desplazan en el agua de manera activa.

Peces demersales. Son aquellos peces que habitan en aguas profundas o cerca del fondo de zonas litorales, eulitoral y plataforma continental.

Phyla/phylum. Concepto empleado en Biología para referirse a una categoría taxonómica principal inferior al reino y superior a la clase.

Plancton. Se define como el conjunto de organismos, ya sea animales o vegetales que, al poseer una limitada capacidad para desplazarse, su movilidad depende básicamente de las corrientes marinas.

Planulae. Plural de plánula, el cual es el estado larvario que al crecer y desarrollarse origina corales juveniles.

Protistas. Reino que incluye los organismos eucariotas unicelulares en su mayoría, así como los pluricelulares.

Reef Ball. Son arrecifes artificiales hechos de un concreto especial y con diseños específicos que imitan los sistemas de arrecifes naturales.

Redes tróficas. Es una representación de la relación que existe entre los seres vivos en función de su alimento, a través del conjunto de cadenas alimenticias de un ecosistema.

Sésil. Término que hace alusión a un organismo que se encuentra fijado a un lugar o sustrato, inmóvil.

Servicios ecosistémicos. Son funciones de los ecosistemas que brindan algún tipo de bienestar indispensable para la vida de las personas, de manera directa e indirecta.

Sistema Lindenmayer. Es un tipo de lenguaje, un conjunto de reglas y símbolos empleados en su mayoría para modelar el proceso de crecimiento de las plantas.

Trófico. El nivel trófico de un organismo es el lugar que ocupa dentro de la cadena alimenticia.

UICN. Unión Interacional para la Conservación de la Naturaleza.

Zooxantelas. Son algas fotosintéticas pertenecientes al género *Symbiodinium*, las cuales aportan productos fotosintéticos como oxígeno y moléculas orgánicas a los corales, proporcionándole hasta el 90% de la energía que requiere.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ALTERNATIVAS APLICABLES PARA LA RESTAURACIÓN DE ARRECIFES CORALINOS EN LAS CONDICIONES COLOMBIANAS

AUTOR(ES): JORGE ANDRÉS VALENCIA MÉNDEZ

PROGRAMA: Esp. en Preservación y Conservación de los Recursos Naturales

DIRECTOR(A): RICARDO RESTREPO MANRIQUE

RESUMEN

Como parte de la necesidad de comprender aún más las posibles soluciones ante el progresivo deterioro al que se encuentran sometidos los arrecifes de coral a nivel mundial, que incluyen tanto amenazas de origen natural como de fuentes antrópicas, y la afectación a los servicios ecosistémicos que prestan, se realizó una investigación sobre los principales trabajos y desarrollos en técnicas, metodologías y procedimientos implementados en la restauración de arrecifes de coral, de igual forma se buscó ampliar la información acerca de alternativas a la restauración asistida como el uso de arrecifes artificiales, sus diferentes configuraciones y diversificación de materiales empleados en su fabricación. Se partió del contexto global al nacional, buscando identificar cuales resultaban ser las alternativas en restauración de arrecifes coralinos a nivel mundial con mejor prospección para ser implementadas en Colombia. Los esquemas de restauración asistida más sobresalientes fueron el trasplante directo de fragmentos/colonias de coral, y la jardinería de corales a través de guarderías para cultivos. Los materiales emergentes que pueden contar con mayor proyección en la fabricación de arrecifes artificiales fueron el concreto ecológico, la fibra de vidrio, los geotextiles, y los recubrimientos biotecnológicos de carbonato de calcio, además se resalta el amplio uso de materiales tradicionales como el acero y el concreto convencional, y los naturales reciclados procedentes de las conchas de moluscos. Esta investigación permitió evidenciar como la degradación de los arrecifes de coral afectaría significativamente los servicios ecosistémicos que se derivan de estos, y que son percibidos por los seres humanos de diferentes maneras, especialmente en un país como Colombia donde cerca del 50% de su territorio corresponde a áreas marítimas e insulares. Por lo cual es recomendable promover acciones, lineamientos y políticas más asertivas, aplicables y monitoreables que contribuyan a proteger y conservar a estos proveedores de servicios ecosistémicos.

PALABRAS

CLAVE:

Arrecifes de coral, servicios ecosistémicos, restauración ecológica, arrecifes artificiales

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ALTERNATIVES APPLYING FOR RESTORATION OF CORAL REEF IN COLOMBIAN CONDITIONS

AUTHOR(S): JORGE ANDRÉS VALENCIA MÉNDEZ

FACULTY: Esp. en Preservación y Conservación de los Recursos Naturales

DIRECTOR: RICARDO RESTREPO MANRIQUE

ABSTRACT

As part of the need to further understand the possible solutions to the progressive deterioration to which coral reefs are subjected worldwide, which include both threats of natural origin and anthropic sources, and the impact on the ecosystem services they provide, an investigation was carried out on the main works and developments in techniques, methodologies and procedures implemented in the restoration of coral reefs, in the same way it was sought to expand the information about alternatives to assisted restoration such as the use of artificial reefs, their different configurations and diversification of materials used in their manufacture. It started from the global to the national context, seeking to identify which were the alternatives in coral reef restoration worldwide with the best prospecting to be implemented in Colombia. The most outstanding assisted restoration schemes were direct transplantation of coral fragments / colonies, and coral gardening through nurseries for crops. The emerging materials that may have the greatest projection in the manufacture of artificial reefs were ecological concrete, fiberglass, geotextiles, and biotechnological calcium carbonate coatings, in addition to highlighting the wide use of traditional materials such as steel and conventional concrete, and natural recycled from mollusk shells. This research made it possible to show how the degradation of coral reefs would significantly affect the ecosystem services derived from these, and which are perceived by human beings in different ways, especially in a country like Colombia where about 50% of its territory corresponds to maritime and insular areas. Therefore, it is advisable to promote actions, guidelines and policies more assertive, applicable and traceable that help protect and conserve these ecosystem service providers.

KEYWORDS:

Coral reefs, ecosystem services, ecological restoration, artificial reefs

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Durante el siglo pasado, los ecosistemas de arrecifes de coral han experimentado cambios drásticos en su estructura y función, y por lo tanto en los diversos servicios que prestan a la humanidad (Bellwood *et al.*, 2019). Su funcionamiento está en peligro debido al cambio climático, la sobrepesca, la disminución de la calidad del agua (Elise *et al.*, 2019), y la acidificación oceánica (Rojas-Higuera & Pabón-Caicedo, 2015). Actualmente, el 75% de los arrecifes de coral del mundo se encuentran clasificados bajo algún tipo de amenaza, habiendo experimentado un incremento considerable de estrés en los últimos años (Schlüter *et al.*, 2020). Las consecuencias en el ámbito socioeconómico, basadas en la disminución de la salud de los arrecifes de coral, girarán alrededor de las industrias del turismo y la pesca, pero de igual forma indirectamente afectará la infraestructura a causa del incremento de la erosión (Lebrech *et al.*, 2019). De acuerdo con Hoegh-Guldberg *et al.*, (2019) las proyecciones climáticas apuntan que los arrecifes de coral continuaran experimentando cambios importantes aún si los objetivos del Acuerdo de París de 2015 tienen éxito en su implementación. Lo cual indica que retornar los arrecifes a disposiciones pasadas no se visualiza como una opción, ahora el desafío a nivel global es encaminar los arrecifes a través de la era del Antropoceno de tal forma que logren mantener sus funciones biológicas (Hughes *et al.*, 2017). Sin embargo Hoegh-Guldberg *et al.*, (2019) plantean una serie de cambios ecológicos que influyen de manera significativa en dicho objetivo, tales como redes tróficas modificadas, cambios en la estructura de la comunidad, reducción de la complejidad del habitat, descenso de la fecundidad y el reclutamiento, cambios en la productividad, oportunidad y variaciones en la disponibilidad de carbonato de calcio de algunos ecosistemas.

Ante el panorama actual han surgido una serie de acciones que buscan además de proteger, contrarrestar y mitigar hasta cierto nivel las consecuencias que trae la pérdida y deterioro de estos importantes ecosistemas a través de la recuperación total o parcial de sus funciones, estructura y composición, lo cual se ve reflejado en los servicios ecosistémicos que prestan. Dos de estas acciones son la restauración de arrecifes naturales apoyada en diferentes técnicas y el establecimiento de arrecifes artificiales (AR) que a su vez involucra el uso de materiales convencionales y alternativos para su construcción. Y es que la diversificación en metodologías, investigación, desarrollo y su aplicabilidad, ha hecho que cada vez sea más viable el uso de las mismas, sin embargo existen una serie de limitantes como los costos, la complejidad, la falta de involucramiento de las comunidades locales y en algunos casos, la tecnología requerida para la implementación y monitoreo.

Este trabajo pretende visibilizar y describir las principales investigaciones realizadas en materia de restauración de arrecifes naturales, las técnicas empleadas, los avances y aplicaciones, la implementación de alternativas como los AR y la identificación de los diferentes materiales empleados en su construcción, así como los servicios ambientales derivados de la restauración de los arrecifes de coral, partiendo de un contexto global hasta abordar el entorno local (Colombia). Como resultado de esta investigación se busca mostrar

cuales serían las principales técnicas, modelos, metodologías y adelantos tecnológicos en materia de protección y restauración de arrecifes de coral divulgadas a nivel mundial, que dadas ciertas condiciones y requerimientos podrían ser extrapoladas al contexto colombiano.

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Puede decirse que Colombia es un país con “tres zonas costeras”; Caribe continental, Caribe Insular (archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina) y Pacífico. Cada una con sus particularidades, entre ellas las amenazas costeras. El Caribe tiene mayor presión antrópica dado que cuenta con mayor población y desarrollo, en cambio el Pacífico salvo por algunos lugares como Tumaco y Buenaventura, presenta menos frecuencia de eventos por contaminación respecto a las costas del Caribe. Por otra parte, en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y en la Isla Gorgona, su planificación, manejo y en general todos los procesos físicos son controlados en su mayoría por las dinámicas marinas. No solo las actividades humanas influyen potencialmente sobre la vulnerabilidad a las amenazas en las costas colombianas, sino también las decisiones que se establecen en relación al manejo de las áreas en mención, lo que incluye contaminación, disposición de basuras, degradación de arrecifes, manglares, extracción de arena y otros recursos naturales, además de obras de infraestructura que son construidas en cercanía de la línea costera (Lacambra *et al.*, 2003).

Colombia es el único país suramericano que posee arrecifes coralinos en los Océanos Pacífico y Atlántico, cuyas áreas alcanzan una extensión total de 2.900 km² de los cuales 1.091 km² encierran fondos con alta cobertura arrecifal. Las áreas arrecifales que cubren mayor extensión se encuentran localizadas en el caribe, alcanzando el 77% únicamente en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, donde además se presentan los arrecifes más complejos y desarrollados (Rodríguez-Rincón *et al.*, 2014).

De acuerdo con el informe presentado por Burke & Maidens (2005) se estima que un tercio de los arrecifes coralinos del Caribe se encuentra amenazado por el desarrollo costero. En los resultados de la modelación en el que se analizaron más de 3.000 cuencas hidrográficas de toda la región, se lograron reconocer aguas costeras con elevadas probabilidades de experimentar aportes continuos de sedimentos y contaminantes relacionados con actividades propias del uso del territorio. El estudio permitió identificar áreas que presentaban un gran porcentaje de arrecifes amenazados en Jamaica, La Española, Puerto Rico, Panamá, Costa Rica y **Colombia**. Alrededor de dos tercios de los arrecifes de Colombia en el Caribe se encuentran localizados en islas oceánicas (San Andrés, Providencia y Santa Catalina), atolones y bancos que conforman el archipiélago de San Andrés y Providencia, donde la sobrepesca y el desarrollo costero (sobrepoblación, contaminación de aguas residuales no tratadas) se convierten en las principales amenazas de los arrecifes. Un informe sobre cambio climático presentado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) indicó que San Andrés, que cuenta con alrededor de unas 85 especies de coral, es el territorio con mayor riesgo en el país por el cambio climático (IDEAM *et al.*, 2017).

Un estudio sobre los posibles efectos del calentamiento y la acidificación en el medio marino costero colombiano fue llevado a cabo por Rojas-Higuera & Pabón-Caicedo (2015) a partir

del análisis de datos de la temperatura superficial del mar y del pH. En primer lugar establecieron un aumento en la temperatura superficial del mar alrededor de 0,23°C por decenio en el Mar Caribe y de 0,18°C por decenio en el Océano Pacífico, de igual forma una disminución en el pH de -0,071 unidades por decenio y -0.090 unidades por decenio para el Caribe y el Pacífico, respectivamente. Dentro de las estimaciones realizadas encontraron que hacia finales del siglo XXI se presentaría un aumento de la temperatura superficial del mar de hasta 2°C en comparación con la registrada a comienzos de siglo en las zonas objeto de estudio del Caribe y el Pacífico, por otra parte el pH con el escenario A2 del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), disminuiría hasta en 0,5 sus valores en áreas de estudio hacia finales del presente siglo. Finalmente a partir de diferentes investigaciones realizadas por diversos autores en el Caribe, el Atlántico tropical occidental y el Pacífico tropical oriental, infirieron los posibles efectos del calentamiento del mar a medida que va transcurriendo el siglo XXI, dentro de los cuales sobresalen una gradual reducción en la cobertura de los arrecifes coralinos colombianos, blanqueamiento y mortalidad de algunas especies y áreas coralinas. En cuanto a los posibles efectos de la acidificación oceánica en los ecosistemas marinos colombianos inferidos en base a una serie de investigaciones generadas en la región de estudio, se encuentran la reducción del crecimiento de arrecifes coralinos, blanqueamiento, disminución en la densidad de las zooxantelas, reducción de las tasas de calcificación y mortalidad de algunas especies.

Factores ambientales y ciclos naturales han sufrido alteraciones y son potenciados por las actividades humanas; la rectificación del canal del Dique implicó un punto álgido en la salud de los arrecifes del PNN Corales del Rosario y San Bernardo, afectando negativamente los niveles de salinidad debido al vertimiento de sus aguas en zonas de vulnerabilidad alta (Fonseca & García, 2019), e incrementando el aporte de sedimentos, principalmente sedimentos livianos, ricos en nutrientes (Pinilla & Ulloa, 2007), generando variaciones en las condiciones normales para el desarrollo y crecimiento de las poblaciones coralinas. Especies de corales de rápido crecimiento y regeneración como *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata* fueron catalogadas en 2005 como especies focales vulnerables en el PNN Corales del Rosario y San Bernardo, *Acropora cervicornis* en estado de Peligro crítico (CR) y *Acropora palmata* En Peligro (EN) (Giraldo, 2007).

En respuesta a lo anterior, Colombia, ha venido trabajando en una serie de proyectos relacionados con restauración de arrecifes coralinos con problemas de degradación, como el potencial cultivo y siembra de 10.000 corales en San Andrés que involucra a pescadores y turistas (2017), el cual consta de seis etapas; la evaluación del Protocolo Nacional para la Restauración Ecológica de Arrecifes de Coral Someros (2014); el proyecto de reproducción sexual y cría de larvas de corales en el PNN Corales del Rosario y San Bernardo (2019); así mismo han sido implementados trabajos basados en alternativas que benefician la recuperación de este ecosistema y contribuyen con la restauración ecológica, como el programa Díaspora, el cual involucra AR en el Golfo de Morrosquillo, Caribe Colombiano; los AR sumergidos en la costa de Pozos Colorados en el Golfo de Salamanca, Santa Marta, y hogar de 144 especies de animales entre peces y macroinvertebrados (2009); además de la

creación de un mortero ecológico para su aplicación en AR (2014); entre otros. Si bien se han conseguido avances importantes aún falta bastante camino para llegar a cubrir todas las necesidades requeridas en materia de restauración y promoción de nuevas alternativas como los arrecifes artificiales.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Revisar los alcances que tienen las diferentes alternativas a nivel mundial en los modelos de restauración de arrecifes de coral, aplicables al contexto colombiano.

2.2. ESPECÍFICOS

- Reseñar las principales políticas y estrategias que pueden contribuir a tener acciones más eficientes de restauración ecológica en arrecifes de coral.
- Describir las principales técnicas empleadas en la restauración asistida de arrecifes de coral.
- Identificar los diferentes avances y desarrollos empleados en la construcción e implementación de arrecifes artificiales.

3. METODOLOGÍA

Se consultó información a través diversas fuentes primarias (libros, bases de datos con artículos y estudios científicos, artículos de periódicos especializados, documentos oficiales de instituciones públicas, informes técnicos y de investigación de instituciones públicas o privadas, patentes, normas técnicas, entre otras) y secundarias (libros o artículos que analizan otros trabajos o investigaciones). Los documentos seleccionados debían cumplir con criterios técnicos relacionados con la relevancia del tema a investigar, la credibilidad de la fuente, la fecha de publicación dependiendo de lo que se quería indicar en determinada sección del trabajo, además, documentos con información directa e indirecta que permitieran aportar a la búsqueda de respuestas a los objetivos específicos y por ende al objetivo general.

Las configuraciones de búsqueda definidas previamente fueron: “coral+reefs”, “coral+reefs+ecosystem+services”, “coral+reef+transformations”, “coral+reefs+disturbances”, “coral+reef+diseases”, “sea+acidification+coral”, “global+warming+coral”, “coral+reef+bleaching”, “coral+reef+restoration”, “coral+nursery”, “coral+transplantation”, “alternatives+coral+reef+restoration”, “artificial+reefs”, “artificial+reefs+materials”, “coral+reefs+Colombia”, “coral+reef+restoration+Colombia”, “artificial+reefs+Colombia”, “arrecifes+corales+Colombia”, “arrecifes+corales+servicios+ecosistémicos”, “degradación+arrecifes+corales”, “acidificación+océano+corales”, “cambio+climático+corales”, “problemáticas+arrecifes+corales+Colombia”, “contaminación+arrecifes+corales”

“restauración+corales+Colombia”, “jardinería+corales+Colombia”, “trasplante+corales+Colombia”, “arrecifes+artificiales” “arrecifes+artificiales+Colombia”, arrecifes+artificiales+materiales”.

Los datos recopilados de las configuraciones expuestas obedecieron a un orden y clasificación que partían de variables con categorías definidas, cuya función era contribuir a la construcción de las respuestas de los objetivos específicos planteados. Una variable era el contexto global, la otra variable correspondía al contexto local. La categoría principal obedeció a las palabras clave “coral reefs” y “artificial reefs”, ya que estas sustentan buena parte del sentido del documento. La siguiente categoría sumaba un nuevo elemento a cada palabra clave en mención, buscando primero establecer un significado global del fenómeno, por ejemplo “coral reefs ecosystem services”, “coral reef transformations” y “coral reefs disturbances”, y posteriormente entrar a una tercera categoría, derivada de la anterior, que pretendía crear relaciones de respuestas más concretas con la categoría principal, involucrando para esto conceptos como “bleaching”, “diseases”, “acidification”, “global warming”, “restoration” y “materials”. El último eslabón categórico permitió profundizar aún más sobre los dos últimos conceptos mencionados, puesto que eran fundamentales para responder dos de los tres objetivos específicos, para esto se incluyeron criterios como “nursery”, “transplantation” y “alternatives restoration”. Finalmente, y a manera de co-variable, las categorías definidas anteriormente se delimitaron al contexto colombiano, con lo cual se pretendió reflejar en el entorno local lo encontrado en el ámbito global, y con esto terminar de dar respuesta al objetivo general del trabajo.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. CONTEXTUALIZACIÓN

Los corales son animales muy pequeños llamados pólipos, en cuyos tejidos habita una población de algas llamadas zooxantelas, las cuales viven en asociación simbiótica con ellos; el pólipo proporciona protección a las algas y éstas a cambio brindan alimento y oxígeno al coral. Los pólipos o constructores arrecifales, gracias a secreciones de carbonato de calcio van desarrollando un tipo de esqueleto duro alrededor de sí mismos, a medida que van creciendo se dividen, formando colonias, las que se constituyen en comunidades de una gran biodiversidad, también conocidas como arrecifes de coral (Muñiz & Gio, 2016). El éxito de los ecosistemas de arrecifes de coral altamente productivos y que bordean gran cantidad de costas tropicales, está basado en gran parte por la capacidad combinada de fotosíntesis y depredación, funcionando justamente como mixótrofo (Cropp & Norbury, 2020).

Los arrecifes de coral son ecosistemas biodiversos y productivos, reflejan categóricamente la estrecha relación entre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Allemand & Osborn, 2019), son el hábitat de más de un millón de especies (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018), de ellos dependen aproximadamente tres mil millones de personas de manera directa tanto para su

sutento como para su seguridad alimentaria (Hilmi *et al.*, 2019). Adicional a esto, son fundamentales para el turismo y protegen de la erosión y otros sucesos relacionados con las tormentas a las costas que se encuentran expuestas (Lebrec *et al.*, 2018). De acuerdo con el Instituto Smithsonian soportan alrededor del 25% de las especies oceánicas y su valor económico global se ha estimado en 30 billones de dólares y tal vez hasta en 172 billones de dólares por año. Un arrecife gestionado de una forma adecuada en los océanos Pacífico e Índico puede llegar a suministrar entre 3 y 5 toneladas de pescado y marisco por km²/año, y un valor comercial en ingresos que ronda los 200 a 500 millones de dólares ha/año (Romero, 2018). Sin embargo, se encuentran amenazados por diferentes tipos de tensiones tanto locales como globales, su pérdida representa un serio riesgo para la alimentación y los medios de vida costeros (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019).

La transformación acelerada de los arrecifes de coral de todo el mundo, se ve reflejada con una cubierta de coral en descenso y nuevas configuraciones de especies, por lo que estos nuevos arrecifes del Antropoceno deben abordarse de una manera diferente, desde el punto de vista de la conservación, no pueden establecerse los mismos planes de gestión que se venían trabajando, ni las mismas acciones diseñadas para preservar el “status quo” cuando los desafíos y amenazas que enfrentaban los hábitats de los arrecifes de coral eran bastante diferentes (Bellwood *et al.*, 2019). Gracias al incremento en la accesibilidad de los arrecifes de coral a partir del último tercio del siglo XX se ha logrado identificar rápidamente la vulnerabilidad de las comunidades de arrecifes de coral ante impactos humanos combinados directos e indirectos. Con cuatro décadas de experiencia se ha podido demostrar lo relevante que resulta la combinación de las ciencias biofísicas y socioeconómicas, y el intercambio de conocimiento con las comunidades para el desarrollo e implementación de una gestión eficaz en aras de comprender mejor y aumentar la resiliencia de las comunidades de arrecifes de coral (Kenchington, 2018).

4.2 PERTURBACIONES

4.2.1. Acidificación oceánica

Los efectos combinados tanto de las perturbaciones naturales como de las presiones antropogénicas han producido la disminución de los arrecifes de coral, esto incluye el blanqueamiento de los corales relacionado con el cambio climático global (Evans *et al.*, 2020), y la acidificación de los océanos, producto de la disolución del dióxido de carbono en aumento, lo que reduce la concentración de carbonato en el agua de mar, requerido para la formación de los esqueletos en los corales (Allemand & Osborn, 2019). Adicional a esto, la acidificación genera un descenso de las especies pesqueras y de mariscos (Hall-Spencer *et al.*, 2018).

De acuerdo con Albright & Cooley (2019) es probable que los arrecifes de coral que sufren los efectos de la acidificación del océano tengan un proceso de recuperación mucho más lento comparado con aquellos que han sido afectados por fuertes eventos como el blanqueamiento masivo, puesto que la acidificación oceánica disminuye la velocidad de crecimiento y la

reproducción de los arrecifes de coral. Esto indica que se requiere detener el impacto de la acidificación buscando alcanzar una condición neutral que permita sostener el crecimiento de los corales. Al combinar la acidificación del océano con otros factores de estrés en los arrecifes de coral y las especies marinas, esta tiende a empeorar los efectos nocivos en los arrecifes coralinos, perjudicando especialmente los países del Océano Índico y de Asia, ya que un alto porcentaje de ellos depende de los servicios ecosistémicos que se derivan de los arrecifes de coral, para mantener el bienestar de sus habitantes (Lam *et al.*, 2019). La disminución del pH oceánico puede afectar la recuperación de corales *Porites porites* con lesiones tisulares, tal como lo reportaron Hall *et al.*, (2015) al someterlos a dos niveles de pH (7.6 y 8.1) después de infligir artificialmente daño mecánico.

4.2.2. Blanqueamiento coralino

La pérdida de la mayor parte de las zooxantelas simbióticas localizadas habitualmente dentro del tejido coralino se traduce en blanqueamiento de los corales, fenómeno que ha ocurrido con mayor frecuencia durante los últimos 20 años en los arrecifes de coral de todo el mundo, especialmente en los periodos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Coles & Brown, 2003). Tal como lo reporta Glynn (1990), cuando un blanqueamiento generalizado y una considerable mortalidad de corales tuvieron lugar en la región tropical del Pacífico oriental durante un evento severo y prolongado de ENSO de 1982-1983. Al momento de alcanzar el pico del periodo (10 meses) de calentamiento del mar, los arrecifes de coral en Costa Rica, Panamá y **Colombia** alcanzaron hasta un 70-90% de mortalidad. El incremento en las últimas décadas de la frecuencia e intensidad de las olas de calor marinas que generan eventos de blanqueamiento de los corales han ocasionado pérdidas significativas en la formación coralina en muchas regiones; cambios drásticos en el fenómeno del Niño de 2009 a 2010 en el Pacífico central a un fuerte fenómeno de La Niña a finales de 2010 expusieron a la comunidad de corales más austral del mundo en la isla Lord Howe, incluidos en la lista de la UNESCO, a continuas anomalías térmicas, con lo cual la comunidad experimentó un blanqueamiento consecutivo extremo y sin precedentes tanto en 2010 como en 2011 (Dalton *et al.*, 2020).

En siete arrecifes superiores de coral cuerno de alce, *Acropora palmata*, de los Cayos de Florida (EE.UU.), se presentaron tres eventos de estrés térmico cálido entre 2010 y 2016, en uno de 2011 hasta el 59% de las colonias se decoloraron, en 2014 y 2015 el blanqueo fue extremo y sin precedentes con hasta un 100% de las colonias blanqueadas; como resultado se redujo en un tercio la cobertura de tejido vivo de *Acropora palmata*, después de los eventos 2014-2015 (Williams *et al.*, 2017).

En la costa de Pilbara, Noroeste de Australia, Evans *et al.*, (2020) evaluaron la dinámica de recuperación no tardía de arrecifes de coral en zonas con turbidez, después de eventos repetitivos de blanqueamiento. Estos arrecifes, dada su ubicación espacial están expuestos a fenómenos de turbidez significativos a lo largo de la plataforma continental causados posiblemente por actividades de dragado en la zona, y han sufrido blanqueamientos continuos

de los corales debido a estrés térmico tras tres oleadas de calor. Pasando del 45% en 2009 al 5% de cobertura en 2014, fecha a partir de la cual se monitoreó el reclutamiento y la abundancia de corales jóvenes hasta el año 2018, separando de los corales duros al género *Acropora*, encargados de la recuperación en el corto plazo (<7 años). Al final del periodo entre 2014 a 2018 la cobertura de coral se incrementó del 5 al 10%, tanto los corales duros como los *Acropóridos* tuvieron mayor recuperación en sitios con menor turbidez y cobertura de macroalgas. Esto probablemente significa que en áreas con perturbaciones antrópicas que derivan en alta turbidez del agua y adicional a ello presiones generadas por actividades como el dragado, la recuperación de los corales sea más lenta.

Al respecto, Bessell-Browne *et al.*, (2017) investigaron los efectos de la calidad del agua de dragado, bajo diferentes concentraciones de sedimentos en suspensión (SSC) y niveles de luz en corales *Acropora millepora*, *Montipora capricornis* y *Porites spp*, durante un periodo de 28 días. En los dos tratamientos con menor luminosidad se presentó mortalidad en los corales y esta aumentó en presencia simultánea de altas concentraciones de SSC, por otra parte todos los corales en los tratamientos con luz más baja perdieron clorofila a y sufrieron blanqueamiento transcurrida una semana.

Ante los constantes eventos de estrés por calor en los corales, y para gestionar mayores pérdidas de biodiversidad y el funcionamiento del ecosistema, principalmente en los arrecifes afectados por los asentamientos humanos, es esencial predecir las respuestas por blanqueamiento de los corales (Lionel *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos por la recuperación de zonas degradadas de arrecifes coralinos, como las del sur del Golfo Pérsico, estos parecen ser insuficientes de acuerdo con un estudio llevado a cabo por Burt & Bauman (2019), en el cual encontraron que las tasas de asentamiento fueron bajas en comparación con otros arrecifes marginales, y la eliminación de asentamientos vinculada con el blanqueamiento observado en el estudio suscita que haya una baja probabilidad de que las larvas de coral sean suficientes para soportar el éxito de la recuperación en dichos habitats con importantes problemas de degradación.

Para tener una visión más aproximada del nivel de daño alcanzado en arrecifes degradados producto del blanqueamiento de sus corales, es importante cuantificar el grado de blanqueamiento, Chow *et al.*, (2016) gracias a un método no invasivo lograron cuantificar “in situ” la decoloración o el cambio de color en siete especies comunes de corales de Hong Kong en función de su porcentaje de blancura a través de la fotografía digital. Empleando *Goniopora lobata* como especie experimental llegaron a demostrar que existe una correlación negativa del porcentaje de blancura con su densidad de zooxantelas y concentración de clorofila a. Por lo cual este método podría resultar efectivo para la evaluación rápida de campo de la salud de los corales a lo largo del tiempo, gracias a la posibilidad de registrar pequeños cambios en su color.

4.2.3. Enfermedades

Las enfermedades son un factor importante de perturbaciones que afectan los corales en todo el mundo asociadas con infecciones por varios patógenos microbianos; especies bacterianas, principalmente *Vibrio*, al igual que miembros de cianobacterias (enfermedad de la Banda Negra), hongos, virus y protistas (Sharma & Ravindran, 2020). Weil *et al.*, (2019) analizaron de forma cronológica la propagación de una nueva enfermedad que afecta los corales en el Caribe denominada Enfermedad de Pérdida de Tejido de Coral Pétreo (SCTLD). Es altamente transmisible y lo hace a través del agua, además es potencialmente virulenta ya que mata los tejidos de coral a una tasa de 3-4 cm/día, y perjudica al menos a 22 especies escleractinias fundamentales.

De manera similar, Muller *et al.*, (2020) trabajaron en el comportamiento, evolución y distribución de la enfermedad SCTLD bajo múltiples escalas espaciales y temporales a lo largo del tramo de arrecifes de la Florida. Como resultado encontraron que los arrecifes fueron afectados por la enfermedad a una escala de cientos de kilómetros, perjudicó al menos a 19 especies de coral, y los sitios con mayor profundidad y diversidad eran más propensos de adquirir la enfermedad, en comparación con aquellos menos profundos y diversos. En un esfuerzo por demostrar la incidencia de enfermedades en corales ramificados en la Gran Barrera de Coral, Sisney *et al.*(2018) evaluaron si dichas comunidades coralinas eran propensas a la infección por la enfermedad de la banda negra y de la banda marrón, y el síndrome blanco, comparando la prevalencia de enfermedad en los corales entre las zonas del Parque Marino de la Gran Barrera de Coral. Al final reportaron que en el 9.06% de los sitios se encontró evidencia de enfermedad, resaltando la presencia del síndrome blanco, que alcanzó un 5.46% de los sitios, seguido por la banda marrón y la banda negra, que se encontraron en 2.90% y 1.45% de los sitios, respectivamente.

No sólo las enfermedades generan afectaciones en la salud de los corales, en un estudio realizado por Ross (2014) sobre el cultivo en vivero de cuatro linajes de fragmentos de coral *Acropora cervicornis* bajo diferentes condiciones, fue reportada depredación por parte del gusano de fuego (*Hermodice carunculata*) y se combinó con un síndrome de bandas en uno de los sitios del experimento.

4.2.4. Contaminación

Otra amenaza que rodea los arrecifes coral es la contaminación de origen antrópico, Narciso-Ortiz *et al.*, (2020) reportaron contaminación por hidrocarburos en arrecifes y cuencas hidrográficas en Veracruz, México. Abaya *et al.*,(2018) sugieren de acuerdo a los resultados obtenidos de las correlaciones negativas entre la cobertura de coral con las bacterias indicadoras fecales, macroalgas $\delta^{15}N$ y concentraciones de nutrientes, que las aguas residuales pueden estar contribuyendo al deterioro de un arrecife de coral Hawaiano. Patterson *et al.*, (2020) infirieron que los arrecifes de corales asociados con los gupos de islas Tuticorin y Vembar en el Golfo de Mannar, sureste de la India, están en riesgo por una

combinación de contaminación por microplásticos (ingestión, limpieza deteriorada, aumento de las respuestas por estrés, desintoxicación y capacidades inmunes suprimidas) y metales pesados, originados principalmente en fuentes terrestres locales.

Un estudio realizado por Patti *et al.*, (2020) analizó la distribución espacial de microplásticos, concentrados en los sedimentos marinos, en torno a la isla de coral habitada de Naifaru (República de Maldivas), en el Océano Índico Central. Analizaron los sedimentos de 22 sitios de muestreo que abarcaban los ambientes de los arrecifes frontales, arrecifes planos y playas, buscando detectar partículas de plástico menores a 5 mm. Resgistrando al final del estudio elevadas concentraciones de microplásticos en los sedimentos marinos de todos los sitios evaluados, con tamaños ingeribles por organismos marinos, lo cual representa un peligro potencial y causa preocupación sobre los posibles efectos de la ingestión de microplásticos por arrecifes de coral.

En relación a esto, Reichert *et al.*, (2018) realizaron un estudio sobre las respuestas de corales formadores de arrecifes a la exposición de microplásticos. Emplearon seis especies de coral pétreo pertenecientes a los géneros *Acropora*, *Pocillo* y *Porites*, los cuales fueron sometidos durante cuatro semanas a microplásticos de polietileno, tamaño 37-163 μm y concentración de aproximadamente 4000 partículas L^{-1} . Encontrando respuestas diferentes de los corales a los microplásticos, como mecanismos de limpieza y también patrones de alimentación. Finalmente el estudio permitió evidenciar que en cinco de las seis especies de corales evaluadas se registraron efectos negativos sobre la salud, causados por blanqueamiento y necrosis tisular. De acuerdo con Huang *et al.*, (2020) los parámetros de distribución y abundancia de los microplásticos en los sistemas de arrecifes de coral no tienen una amplia investigación científica. Los mismos autores realizaron una revisión de los posibles impactos de los microplásticos en los corales, entre los que destacan una eventual afectación de la fisiología, la energía, el crecimiento y la salud de los mismos, además pueden llevar al blanqueamiento y necrosis de los tejidos coralinos al ser sometidos a una exposición prolongada.

La contaminación por microplásticos alrededor de islas remotas, por ejemplo sistemas de arrecifes de coral en mar abierto, cuenta con escasa evidencia respecto a su alcance, sin embargo Tan *et al.*, (2020) llevaron a cabo un estudio sobre la contaminación por microplásticos alrededor de los arrecifes de coral en las islas remotas y deshabitadas de Nansha, Mar de China Meridional. Encontrado que los microplásticos, compuestos principalmente de polipropileno (PP) y polietileno (PE), y más del 70% de ellos con tamaños inferiores a 3 mm, se encontraban bastante extendidos en las aguas superficiales, con una abundancia promedio de 0.0556 ± 0.0355 ítems/ m^3 , con variaciones entre los arrecifes de coral. Aunque la abundancia de los microplásticos encontrados en la zona de estudio fue relativamente baja, no se debe desconocer la contaminación que ello representa dada la importancia de los ecosistemas de arrecifes de coral.

4.2.5. Otras perturbaciones

El turismo mal administrado en arrecifes de coral puede producir el efecto contrario al deseado. En la costa Oeste de la India, en un Área Marina Protegida (AMP) conocida como Santuario Marino Malvan, De *et al.*, (2020) llevaron a cabo una investigación en la cual evaluaron el impacto que tiene la actividad del buceo recreativo en la comunidad arrecifal allí presente. Las pruebas obtenidas corroboraron el evidente daño físico a los corales, inducido por el buceo recreativo. Santander & Propin (2009) recalcan como la acción directa de los buzos puede afectar las colonias de coral, ocasionando fracturas, lesiones y asfixia, producidos por golpes y contactos, ya sea de forma accidental o deliberada a través de las aletas, extremidades, tanque de aire u otros componentes del equipo. Por ello una alternativa realista es el diseño y la implementación de la capacidad de carga turística de estos ecosistemas.

De igual forma, la proliferación de diferentes actividades antrópicas en zonas de influencia de arrecifes de coral somete a estas comunidades a presiones antes poco usuales que pueden ocasionar daños severos y pérdidas considerables en los corales. Al interior del Área Natural Protegida (ANP) con influencia en Isla Mujeres, en Punta Cancún y Punta Nizuc, Quintana Roo, México, reportaron información en 2018 de corales dañados por desprendimiento de tejido, golpes y blanqueamiento. Los diferentes polígonos que configuran el ANP sufren diversas presiones y degradación, asociadas con un turismo masivo, diversificación de actividades náuticas relacionadas con un considerable tráfico marítimo, encallamientos, modificación costera sostenida y desarrollo urbano acelerado (desarrollo costero sin planeación), pesca intensiva (legal e ilegal), a lo cual se suman las variables vinculadas con el cambio climático (Caamal *et al.*, 2019).

Entender como la acción de un conjunto de variables puede perjudicar la salud de los corales puede contribuir a la formulación de estrategias que ayuden a mitigar el impacto producido en estos, y a fortalecer la toma de decisiones en términos de protección y conservación. Al respecto, Paradis *et al.*, (2019) realizaron una serie de experimentos de laboratorio para investigar cual era la respuesta fisiológica metabólica en los corales formadores *Acropora cervicornis* ante dos factores estresantes combinados, variación de la temperatura y abrasión de los tejidos coralinos (causada por el incremento en el buceo recreativo). Con las temperaturas más elevadas se presentó una reducción en la relación entre la fotosíntesis y la respiración. Por otra parte se produjo un efecto de interacción importante entre ambos factores de estrés, donde la abrasión del tejido afectó la fotosíntesis y aumentó la respiración, principalmente en presencia de las temperaturas más altas.

Por otra parte, Speare *et al.*, (2019) evaluaron la incidencia de los céspedes de algas y los céspedes de algas más sedimento, en el asentamiento de dos especies de relevancia ecológica, *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*. Encontrando que el cespced de algas por si sólo no representa mayor riesgo para el asentamiento en comparación al cespced de algas en presencia

de sedimento, ya que este lo limita significativamente, restando capacidad de asentamiento entre 10 y 13 veces para *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*, respectivamente.

5. POLÍTICAS Y ESTRATEGIAS

En la actualidad, los científicos y formuladores de políticas se encuentran reevaluando conjeturas de tiempo atrás sobre cómo enfrentar al cambio climático antropogénico, especialmente aquel supuesto de que las instituciones locales robustas están en la capacidad de mantener la resiliencia ecológica y social mediante la gestión, la adaptación y la restauración basadas en los ecosistemas, por lo cual el sistema de gobernanza se encuentra en un proceso de readaptación, buscando estar en sintonía con las transformaciones que los conjuntos de ecosistemas experimentan, convirtiéndolo en un reto para los encargados de la formulación de políticas en el Antropoceno, ya que deben hacer frente a las crisis ambientales, a la inseguridad y el cambio social (Morrison *et al.*, 2020). En ese orden de ideas Comte & Pendleton (2018) investigaron el esfuerzo científico enfocado a cuatro clases de estrategias de gestión: mitigar, proteger, reparar y adaptar; relacionándolos a los elementos de la cadena de impacto que perturban: vulnerabilidad ecológica o vulnerabilidad social.

Por su parte McClanahan (2020) describe como la conservación pasiva o la distancia de viaje y posiblemente las restricciones de pesca son las principales herramientas que protegen los arrecifes de coral, puesto que la conservación activa (especialmente en los océanos) debido a su elevado costo no permite conservar más que pequeñas áreas en muchos países con economías limitadas. Otra alternativa para proteger los arrecifes de coral, es el uso de herramientas de gestión en la toma de decisiones, de acuerdo con esto Hilmi *et al.*, (2017) investigaron la problemática relacionada con la destrucción de los arrecifes coralinos y analizaron las partes involucradas que se ven afectadas por la destrucción. Para ello propusieron una matriz de partes interesadas versus amenazas y generaron un algoritmo en el cual las autoridades públicas están en la capacidad de hacer más eficiente la política en función de las pérdidas presupuestadas. Adicional a esto, Cropp & Norbury (2020) analizaron mediante un modelo ecoevolutivo el potencial de los arrecifes de coral para adaptarse a un clima en constante cambio. Los resultados encontrados respaldan las sugerencias actuales sobre ecologías de arrecifes de coral, las cuales argumentan que los sistemas de arrecifes coralinos tendrían la capacidad de adaptarse al cambio climático, si este no es excesivo o acelerado, en caso contrario, el calentamiento global y otras actividades antrópicas nocivas los podrían estar condenando a desaparecer.

Un mecanismo que soporta la sostenibilidad de los sistemas ecológicos y sociales, es la resiliencia; estudiada durante aproximadamente cuatro décadas (Roff & Mumby, 2012). Apoyar la resiliencia de los ecosistemas puede contribuir al mejoramiento de las acciones de restauración ecológica a futuro, mediante estrategias y políticas que promuevan su fortalecimiento, reduciendo costos y facilitando en cierta medida los procesos restaurativos. Un ejemplo de lo anterior, se refleja en el estudio realizado por Hernández *et al.*, (2002) donde evaluaron la resiliencia a partir de variables edáficas de un ecosistema terrestre

degradado, sistema de abandono de cultivo cerealista, para llegar a la restauración ecológica del mismo mediante el uso de fitorrestauración. Para Hilmi *et al.*, (2019) la clave que contribuirá en el futuro de los arrecifes coral radica en desarrollar la resiliencia empleando diversas herramientas, lo que significa acudir a combinaciones de políticas innovadoras, complementadas con nuevos desarrollos tecnológicos en materia ambiental e inversiones continuas. Una perspectiva similar fue expuesta por Hattam *et al.* (2020), quienes a través de la identificación de diferentes estrategias para el fomento de la resiliencia, buscaban apoyar a las comunidades de coral en el Océano Índico Occidental.

Por su parte, Thompson *et al.*, (2020) indican que la gestión de los arrecifes de coral se centra con mayor frecuencia en apoyar la resiliencia de las comunidades de coral ante las constantes y severas presiones a las que se encuentran sometidas. Una herramienta útil empleada por los mismos autores para generar un resumen concreto de la resiliencia de las comunidades coralinas es el Índice de Coral, que tiene la particularidad de ser sensible a los impactos violentos esperados cuando las comunidades de coral se enfrentan a perturbaciones como ciclones, eventos masivos de blanqueamiento o brotes de coronas de espinas, adicional a esto, tiene la característica de poder ser transmitido de una manera eficiente a diferentes partes políticas y gestoras interesadas, además podría ser aplicado a mayor escala en la presentación de informes relacionados con la resiliencia de los ecosistemas.

De forma alterna, Ferrigno *et al.*, (2016) emplearon una versión modificada del Índice de Condición de Coral para evaluar el estado de los arrecifes de coral sometidos a diferentes presiones antropogénicas en la isla Banka (North Sulawesi, Indonesia), este Índice tiene en cuenta por completo las formas de crecimiento de los géneros *Acropora* y *Pocillopora*, además toma en cuenta la presencia de enfermedad como categoría adicional de daño en el coral. Como parte de los resultados encontraron que, en función del Índice, el arrecife de coral cuenta con un estado de salud notablemente bueno, adicionalmente, y de acuerdo con los datos actuales parece que los conjuntos bien estructurados y con gran biodiversidad están en la capacidad de resistir las perturbaciones de forma más eficiente.

McLeod *et al.*, (2019) argumentan que apoyar la resiliencia del sistema se proyecta como una estrategia factible en la gestión de los arrecifes de coral, teniendo en cuenta que la gestión basada en la resiliencia no está en la capacidad de anticiparse a los impactos negativos que ocasionan eventos como los de blanqueamiento masivo, pero si tiene la facultad de apoyar procesos naturales que impulsen la resistencia y la recuperación. Y es por esto, que su efectividad en el manejo de arrecifes depende en gran medida de involucrar tanto intervenciones existentes como nuevas que en conjunto reduzcan el estrés y aporten al mantenimiento de poblaciones y especies, y adicionalmente brinden apoyo a las poblaciones y economías para acoplarse a un ecosistema que refleja un alto grado de transformación.

En otra investigación realizada por McLeod *et al.*, (2021) fue estudiado el uso de evaluaciones de resiliencia, las cuales permiten cuantificar el contexto ecológico, social y ambiental de los arrecifes de coral, convirtiéndose en un pilar estratégico para determinar la

capacidad del sistema para absorber, mitigar o resistir factores estresantes de tal forma que el sistema logre mantener su estructura y funciones al tiempo que esté en la capacidad de hacer frente a futuras perturbaciones y cambios, adaptándose a ello. En consecuencia, las evaluaciones de resiliencia se convierten en un importante mecanismo de planificación para apoyar futuras decisiones que deben asumir los administradores marinos y tomadores de decisiones, buscando anticipar cambios, identificar zonas con alta probabilidad de supervivencia y procurar abordar acciones de gestión para apoyar la resiliencia, entre otras. Sin embargo, es importante resaltar de acuerdo a lo expuesto por Roff & Mumby (2012) la necesidad de eliminar el sesgo alrededor de una sola teoría de la resiliencia aplicable por igual a todos los ecosistemas arrecifales del mundo, puesto que la mayor parte de investigaciones sobre este tema proviene de una sola región biogeográfica, el Caribe.

Esto genera una serie de inquietudes sobre la factibilidad de extrapolar conceptos entre regiones, por ejemplo Caribe-Indo-Pacífico; explicado en parte por una serie de factores que podrían llegar a influir o predisponer al Caribe a su baja resiliencia, esto incluye tasas más elevadas de crecimiento de macroalgas, mayores tasas de reclutamiento de algas, enriquecimiento de hierro en toda la región donde ocurre el crecimiento de algas a partir del polvo eólico, necesidad de mayor presencia de corales acropóridos, menor biomasa de herbívoros y grupos desaparecidos de herbívoros. Actualmente hay desarrollos tecnológicos a partir de Inteligencia Artificial que permiten monitorear, caracterizar y analizar la resiliencia de los arrecifes de coral. Tal es el caso del proyecto CORail, desplegado en 2019 en el arrecife circundante de la isla Pangatalan en Filipinas, ha registrado cerca de 40.000 imágenes que pueden brindar información para toma de decisiones en tiempo real sobre la protección de los arrecifes de coral en base a su estado de salud (Intel, 2020).

La biodiversidad y ecología compleja de los arrecifes de coral hace que sea un reto la cuantificación de la variación de rasgos entre especies, sin embargo el acercamiento a responder una variedad de procesos biológicos y ecológicos puede contribuir en la capacidad para proteger ecosistemas globales fuertemente amenazados (Madin *et al.*, 2016). Al respecto, Hoegh-Guldberg *et al.*, (2018) proponen una estrategia global coordinada de conservación de los arrecifes de coral, basada en la posibilidad de identificar los arrecifes que sean menos vulnerables al cambio climático y que se encuentren mejor posicionados para ayudar a impulsar en el futuro la regeneración de otros arrecifes degradados. La estrategia se enfoca en 50 grandes regiones (500 km²) que son las menos sensibles al cambio climático y tienen altas posibilidades de convertirse en facilitadores futuros de regeneración de los arrecifes coralinos. Se reparten de la siguiente manera: cuatro en la Polinesia Francesa, seis en el Caribe, uno en la costa de Brasil, cuatro en el Golfo Pérsico/Árabe, cuatro en África del Este, dos en India, uno en Birmania, dieciocho en el Triángulo del Coral (distribuidos entre Indonesia, Malasia, Islas Filipinas y Timor Oriental) y diez en las Islas Salomón, Papua Nueva Guinea la Gran Barrera de Coral y Fiji.

De acuerdo con Muallil *et al.*,(2019) a pesar que Filipinas tiene la mayor cantidad de áreas marinas protegidas del mundo (AMP), gestionadas a nivel local, más de 1600, es cuestionable

la eficacia en la gestión para la ordenación de las pesquerías de los arrecifes de coral. Un estudio realizado por los mismos autores en la zona mencionada, mostró que las AMP actuales gestionadas localmente no satisfacen a cabalidad los requerimientos para un adecuado manejo de las pesquerías de arrecifes de coral. Por su parte, en el Mar Rojo, con base en datos científicos, y en un esfuerzo por esclarecer cuales serían las soluciones más adecuadas para conservar y mantener la resiliencia de los arrecifes de coral allí localizados, se clasificaron soluciones como áreas mínimas protegidas, regulación de la pesca y enfoques de restauración de arrecifes para cinco secciones latitudinales diferentes (Fine *et al.*, 2019). Además, en el Mar Caribe, Andersson *et al.*, (2019) propusieron una serie de estrategias ecológicas y socioeconómicas a nivel local y regional buscando mitigar y revertir la degradación de los arrecifes coralinos del Caribe debido al calentamiento global y la acidificación de los océanos.

Las soluciones en el ámbito ecológico están basadas en el conocimiento propio de los elementos que pueden favorecer a la restauración de los arrecifes y al incremento de la resiliencia en el Caribe, estas son: a) mejor gestión de la calidad del agua, b) disminución de prácticas pesqueras insostenibles, c) implementación de ingeniería ecológica, y d) ejecutar la planificación espacial marina. En cuanto a las soluciones socioeconómicas y de gobernanza complementarias se estipula: a) incrementar la comunicación y emplear los recursos a través de la consolidación de una secretaría regional de arrecifes, b) añadir en los planes de economía azul para la región los objetivos de salud y sostenibilidad de los arrecifes, y d) realizar un programa de identificación o etiquetado de arrecifes con el objetivo de estimular la conformación de asociaciones corporativas para su restauración y protección.

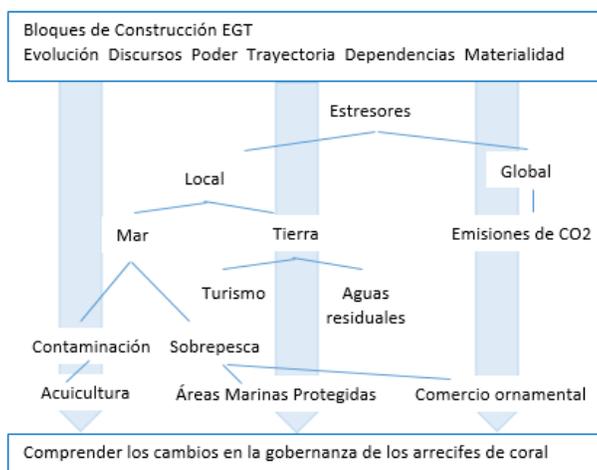
Bajo el mismo contexto, Leenhardt *et al.*, (2017) exploraron la dinámica socioecológica de un sistema de arrecifes de coral empleando modelos participativos y datos empíricos. El estudio llevado a cabo en arrecifes coralinos costeros y en la laguna que conforma la isla de Moorea en la Polinesia Francesa, mostró que las interacciones socioecológicas presentan diferentes patrones en los subsistemas de arrecifes y en la laguna. Además, el estudio permitió identificar que los modelos conceptuales de sistemas socioecológicos se muestran como un instrumento válido para generar ambientes de carácter exploratorio, que a la final ayuden a respaldar los procesos de toma de decisiones de planificación. Otro modelo, fue desarrollado por Bradley *et al.* (2020), conocido como Gradiente de Condición Biológica (BCG) de peces de arrecife, fue aplicado a poblaciones de peces de los ecosistemas de arrecifes de coral del Caribe Estadounidense. Este modelo muestra como las condiciones biológicas han ido cambiando gradualmente en el transcurso de un gradiente de estrés antropogénico en ascenso. El BCG de peces de arrecife puede ser una herramienta útil para advertir cuales ecosistemas de arrecifes coralinos se encuentran saludables y cuales degradados.

Entre tanto, un estudio llevado a cabo en el archipiélago Japonés de Nansei por Collin *et al.*, (2015) mapeó la resiliencia socioeconómica y ecológica de los arrecifes de coral, a partir de la combinación de gradientes espacio temporales japoneses de población activa y la

exposición de amortiguación de los corales a factores que estimulan y mitigan el estrés Como complemento en la búsqueda de soluciones para conservar los arrecifes coralinos, Gurney *et al.*, (2019) describen en su investigación como se efectuó la implementación de un marco de Sistemas Socioecológicos Múltiples (SES) para el monitoreo de la conservación de los mismos, involucrando a más de 85 comunidades en cuatro países (Fiji, Indonesia, Kenia y Madagascar) y partiendo de un proceso transdisciplinario que incluye académicos y profesionales que cuentan con experiencia en ciencias sociales y ecológicas. Por otra parte Schlüter *et al.*, (2020) examinaron como la Teoría de la Gobernanza Evolutiva (EGT) puede contribuir en la comprensión de los procesos actuales de cambios en la gobernanza que intervienen en la salud de los arrecifes de coral. En la Figura 1 se presenta un ejemplo de un marco EGT que involucra diversos factores estresantes a los que se encuentran expuestos los arrecifes de coral.

Figura 1

Marco empírico para comprender el cambio de gobernanza de los arrecifes de coral.



Nota. Tomado de Schlüter *et al.*, (2020).

Beyer *et al.*, (2018) emplearon la Teoría del Portafolio Moderno a partir de la cual lograr una planificación más acertada para la conservación de los arrecifes de coral dado el cambio climático acelerado que se está presentando. Estimaron una serie de unidades bioclimáticas (BCUs) las cuales contienen aproximadamente 500 km² de arrecifes, y representan aquellos arrecifes de coral que en ausencia de otros impactos, y con bajas afectaciones proyectadas del cambio climático presentan mayor probabilidad de sobrevivir con respecto a otros arrecifes. De esta forma, poder plantear escenarios donde se reduzca el riesgo de invertir recursos limitados en sitios donde los arrecifes tengan baja probabilidad de éxito durante las décadas venideras y su restauración sea más compleja, en gran parte por la susceptibilidad frente al cambio climático. En ese orden de ideas, los autores identificaron 50 BCUs para inversión en conservación bajo dos escenarios, máximo retorno y escenario equilibrado, este último representa el Portafolio idóneo de acuerdo con la presente investigación. Aquellas regiones proyectadas como las de más baja amenaza incluyen partes del Sudeste Asiático

(Filipinas, Borneo, Indonesia), de la Gran Barrera de Coral en Australia, de la Polinesia Francesa, de África Oriental, del Mar Rojo y del Caribe.

5.1. ALTERNATIVAS ADAPTATIVAS

A pesar de la adaptación que están teniendo los corales a los ambientes cambiantes, se presenta una acelerada pérdida de cobertura coralina, lo cual muestra que su capacidad natural de adaptación es sobrepasada por la velocidad del cambio climático. Este hallazgo ha motivado la búsqueda de nuevos enfoques de “evolución asistida” con el fin de incrementar la tolerancia térmica de los corales y disminuir la vulnerabilidad al blanqueamiento (Buerger *et al.*, 2020).

La implementación de técnicas y hallazgos recientes podrían contribuir en la recuperación y preservación de ecosistemas de arrecifes coralinos sometidos a grandes presiones naturales y antrópicas; la estructura genética de corales ubicados en regiones con temperaturas elevadas y con mayor tolerancia a estas condiciones, podría ser una vía de respuesta para corales localizados en zonas donde su tolerancia térmica es reducida, especialmente ante incrementos de temperatura ocasionados por el calentamiento global.

Corales como los del Golfo Pérsico/Arabe (PAG) sobreviven a temperaturas marinas extremas (media de verano $>34^{\circ}\text{C}$); para esclarecer si es una respuesta fisiológica adaptativa o genética, Smith *et al.*, (2017) estudiaron esta última en corales *Platygyra daedalea*, y sus algas simbióticas en el PAG y el vecino Golfo de Omán, a partir de marcadores nucleares. Encontrando que existe una divergencia genética de *Platygyra daedalea* en los arrecifes con condiciones térmicas extremas en el PAG en comparación con sus pares en el Golfo de Omán, adicional a esto la estructuración de las poblaciones de coral y sus simbiontes apunta que cada parte de esta sociedad puede contribuir a mayores umbrales de tolerancia ante fenómenos de blanqueamiento de los corales del PAG. Sin embargo la cantidad de genes responsables de la adaptación genética es reducida, lo cual representa una capacidad limitada para la exportación de dichas características naturales tolerantes a los arrecifes de otras zonas del Océano Índico que se encuentran bajo amenaza por el cambio climático.

Kirk *et al.*, (2018) estudiaron las señales genómicas y transcriptómicas de tolerancia térmica también en corales *Platygyra daedalea* en el PAG. Entre los resultados obtenidos se destaca que la tolerancia al calor es altamente heredable en esta población, lo cual sugiere un potencial adaptativo sucesional importante a condiciones térmicas elevadas. Basado principalmente en una amplia variación genética en la tolerancia térmica. De manera similar Buerger *et al.*, (2020) desarrollaron 10 cepas clonales de un endo-simbionte de microalgas de coral, buscando demostrar como estos simbiontes que prosperan bajo condiciones térmicas elevadas incrementan la tolerancia al blanqueamiento de los corales. Después de 4 años de estudios en el laboratorio, las 10 cepas desarrolladas habían logrado propagar su tolerancia térmica “in vitro”. Posteriormente, al ser reintroducidas en larvas hospedadoras de coral, 3 de los 10 endo-simbiontes lograron contribuir al aumento de la tolerancia al

blanqueamiento coralino. Con lo cual quedó demostrado que es posible desarrollar poblaciones de coral con mayor resiliencia climática a través de la evolución in vitro de sus endo-simbiontes de microalgas.

Los estudios de tolerancia térmica como el mencionado anteriormente requieren que las muestras representativas de coral sean trasladadas a instalaciones equipadas para tal fin, sin embargo, de acuerdo con lo informado por Hershberger (2020), la prueba de estrés térmico con resultados inmediatos puede ser realizada “in situ” a través del Sistema Automático para el Estudio del Blanqueamiento del Coral (CBASS), desarrollado por un equipo de estudiantes de posgrado de la Universidad King Abdullah de Ciencia y Tecnología (KAUST), y el cual consta de una serie de tanques donde los fragmentos de coral recolectados son introducidos para ser sometidos a diferentes temperaturas como parte del proceso experimental. La simplicidad de la prueba abriría la posibilidad de realizar una mayor cantidad de testeos para comparar directamente la tolerancia al calor de las colonias coralinas de diversas zonas del mundo.

Otros mecanismos que podrían favorecer la resistencia y protección de los corales y sus simbiontes incluyen proteínas de choque térmico inducibles que contribuyen en el replegamiento de proteínas celulares y estructurales denaturalizadas, producción de enzimas oxidativas las cuales inactivan los radicales de oxígeno dañinos, pigmentos de coral fluorescentes que reflejan y disipan la energía de la luz, adaptaciones fenotípicas de las zooxantelas y cambios adaptativos en sus poblaciones a temperaturas más elevadas (Coles & Brown, 2003).

6. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

La pérdida de coral y el descenso de la estructura física de los hábitats de los arrecifes representan un riesgo latente en la abundancia de peces de los arrecifes de coral, estos cambios en la abundancia y composición de los conjuntos de peces pueden traer consigo una serie de consecuencias para la función ecosistémica y la productividad de la pesca (Pratchett, *et al.*, 2014). Sin embargo, es poco realista pretender devolver cerca de su estado original muchos arrecifes de coral, por lo tanto, se requiere abrir la mente a nuevos enfoques más prácticos y funcionales para mantener o reconstruir el dominio de los corales (Graham *et al.*, 2014).

La restauración de los arrecifes de coral no sólo implica retornar a un estado cercano al que se encontraba previo a las perturbaciones que lo afectaron, sino que además busca reestablecer gran parte de los servicios ecosistémicos que presta. Por lo cual los beneficios que trae su restauración son percibidos como bienestar por parte de la sociedad (Sanjuan, 2016). En ese orden de ideas, las acciones de restauración posibilitan que servicios ecosistémicos como la provisión de alimentos, recursos para la industria farmacéutica y de construcción, regulación del ciclo del carbono y oxígeno, protección ante la erosión costera,

zonas de anidación, reproducción y guardería de juveniles de diferentes especies, además zonas para investigación y recreación, vuelvan a ser funcionales (Burke *et al.*, 2011).

Como respuesta al incremento de la degradación de los arrecifes, el creciente esfuerzo por la restauración se está centrando de manera extendida en los arrecifes de coral. Un ejemplo de lo anterior se ve reflejado en la India, que ante los impactos que pueden llegar a generar actividades antrópicas como la expansión portuaria en los arrecifes de coral, sumado a los cambios ambientales, surgen estudios como el reportado por Nanajkar *et al.*, (2019) en el cual resaltan la necesidad de realizar acciones holísticas de restauración de arrecifes de coral a largo plazo como un mecanismo vigente en la gestión de arrecifes.

En ese orden de ideas, Ladd & Shantz (2020) argumentaron a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica el potencial que puede tener la ecología trófica en los esfuerzos de restauración de arrecifes de coral, sin embargo tan sólo el 15% de las publicaciones sobre restauración tienen en cuenta interacciones tróficas. En Australia, en la Gran Barrera de Coral, se está investigando una serie de intervenciones no convencionales, como parte del Programa de Adaptación y Restauración de Arrecifes (RRAP), con el fin de ayudar a este importante ecosistema a resistir, reparar y recuperarse del cambio climático (Fidelman *et al.*, 2019). En el arrecife “Dairy Bull”, en la costa norte de Jamaica, Crabbe & James (2014) encontraron que la recuperación natural también puede ser efectiva después de una perturbación ambiental significativa; reportando un aumento de la cobertura de coral vivo de $13 \pm 5\%$ en 2006 a $31 \pm 7\%$ en 2008, mientras que las colonias de *Acropora cervicornis* de rápido crecimiento aumentaron de $2 \pm 2\%$ en 2006 a $22 \pm 7\%$ en 2008.

6.1. TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN DE CORALES

Hay dos enfoques que sobresalen en los esquemas de restauración, el primero es el trasplante directo de fragmentos/colonias de coral a arrecifes degradados, el segundo hace referencia a la jardinería de coral, como la técnica donde el trasplante de coral se realiza posterior a una fase intermedia de crianza, en la cual los corales son cultivados hasta obtener las dimensiones apropiadas (De la Cruz *et al.*, 2015; Rinkevich, 2014); aunque la tasa de supervivencia de los corales trasplantados varía sustancialmente y por ello la mortalidad de los corales se puede convertir en una limitante significativa para el trabajo de restauración (Moriarty *et al.*, 2020).

La restauración de arrecifes de coral en Singapur surgió bajo la necesidad de aumentar la cobertura de coral de los arrecifes degradados producto de la exposición a cinco décadas de incrementos en la sedimentación marina (Figura 2), y comenzar con el proceso de colonización de zonas que no cuentan con arrecifes. Los viveros de coral empleados en la restauración estaban compuestos de redes de malla elevadas que permitieron evitar la acumulación y asfixia por sedimentos de las crías de fragmentos de coral y juveniles, y así reducir la mortalidad (Lionel *et al.*, 2016).

En el Caribe, a mediados de la década de 1970, debido una enfermedad se redujo la abundancia en las poblaciones de coral cuerno de alce (*Acropora palmata*) en más del 95%, y dada su importancia ecológica, se han venido impulsando iniciativas de restauración; una de ellas fue llevada a cabo por Chamberland *et al.*, (2015) mediante larvas criadas a partir de gametos recolectados, las cuales se asentaron en sustratos arcillosos y se trasplantaron al arrecife dos semanas posterior al asentamiento.

La cría de larvas de coral como actividad en la restauración de arrecifes puede ser realizada “in situ”, tal como lo demostraron Linden *et al.*, (2019) al emplear un dispositivo llamado cajas de asentamiento de coral (CSB), las cuales tienen la facilidad de ser cortadas de tal forma que las superficies albergen colonos individuales para ser trasplantados, en el caso del presente estudio, especies de coral incubadoras como *Stylophora pistillata*. Al culminar el quinto mes en el vivero de media agua, se obtuvieron 120 colonias de propagación sexual de corales juveniles, a partir de aproximadamente 2045 planulae capturadas inicialmente. En relación a esto, Boch & Morse (2012) reportaron como emplear el método de propagación sexual puede contribuir con la restauración de corales *Acropora* spp, esto después de haber obtenido un total de 134 reclutas provenientes de los gametos de 4 colonias donantes.

En el mismo contexto, Calle-Triviño *et al.*, (2018) emplearon un programa de fertilización asistida a los gametos recolectados de seis colonias maduras localizadas en el sureste de República Dominicana, en dos periodos diferentes (septiembre de 2015 y agosto de 2016), para promover la recuperación en las poblaciones de *Acropora cervicornis*. Dentro de los resultados obtenidos se alcanzó una tasa de fertilización del 90%. Esto contribuye a incrementar la diversidad genética dentro de los viveros de coral.

Figura 2

Sedimentación avanzada en los arrecifes de coral de las islas costeras del sur de Singapur



Nota. Tomado de Lionel *et al.*, (2016).

En cuanto a la jardinería de corales, Shaish *et al.*, (2010) emplearon esta técnica en el coral *Montipora digitata* (Acroporidae) dada su alta capacidad de fragmentación, para la restauración de arrecifes en Bolinao, Filipinas, en una laguna poco profunda durante aproximadamente un año. Posteriormente trasplantaron las colonias de coral cultivadas en vivero a zonas de arrecifes sin cobertura. Al final, las buenas condiciones de crianza se vieron

reflejadas en las bajas tasas de desprendimiento, la reducida mortalidad y la baja decoloración.

La jardinería de corales también fue aplicada por Horoszowski-Fridman *et al.*, (2011) en Eilat (Mar Rojo, Israel), en 1400 colonias cultivadas en viveros de seis especies de coral ramificadas (*S. pistillata*, *P. damicornis*, *A. pharaonis*, *A. variabilis*, *A. valida*, y *A. humilis*), las cuales se trasplantaron a cinco zonas sin cobertura en un lugar conocido como Dekel Beach, Eilat; Horoszowski-Fridman *et al.*, (2015) evaluaron la fase de transplante de 554 colonias de corales cultivadas en vivero (Eilat) de dos especies ramificadas, *Stylophora pistillata* y *Pocillopora damicornis*. Al final, los trasplantes lograron un incremento de 2,5 a 3,3 veces en los volúmenes ecológicos coloniales, lo que significa mayor espacio obtenido para especies que residen en los corales.

También en Eilat, Rachmilovitz & Rinkevich (2017) estudiaron el uso de una herramienta de ingeniería ecológica denominada “2D Coral Preparative” (2D-CP) para cultivar diez colonias de coral (especies *Stylophora pistillata*, *Pocillopora damicornis* y *Cyphastrea* spp.) en vivero. Las unidades 2D-CP (Figura 3) utilizadas a manera de sustrato eran CD-ROM de plástico provenientes de residuos industriales, a los cuales se adhirieron los fragmentos de coral recolectados. A partir de los 6 a 7 meses muchas de las unidades 2D-CP estaban completamente cubiertas con tejidos de coral, y después de 12 meses los resultados mostraron altas tasas de supervivencia, por encima del 80% de estas unidades con tejidos de coral vivo.

Figura 3

Colocación de las unidades 2D-CP en el vivero de coral.



Nota. Tomado de Rachmilovitz & Rinkevich (2017).

Por otra parte, O'Donnell *et al.*, (2017) durante un año emplearon la jardinería de corales en los cayos de La Florida bajo dos esquemas, método de unión bentónica (bloque) (Figura 4a) y método de columna de agua suspendida (árbol) (Figura 4b), con el objetivo de comparar el crecimiento, el estado (afectación) y la supervivencia en corales de *Acropora cervicornis*.

Mientras que Bayraktarov *et al.*, (2020) hicieron una revisión sobre diferentes trabajos en restauración de arrecifes de coral en cinco países de América Latina, **Colombia**, Costa Rica,

República Dominicana, México y Puerto Rico, en los que destacaban las principales técnicas utilizadas: trasplante directo, el método de jardinería de corales, la microfragmentación o la propagación de larvas. Al respecto Rinkevich (2014) resalta como la jardinería se ha convertido en uno de los enfoques emergentes más promisorios en temas de restauración de corales; el método consta de dos fases: i) fase vivero, en aguas poco profundas donde se cultivan los corales, y ii) trasplante de colonias de viveros.

Figura 4

*Métodos de cultivo de coral *Acropora cervicornis* en vivero: a) método de unión bentónica (bloque). b) método de columna de agua suspendida (árbol).*



Nota. Tomado de O'Donnell *et al.* (2017).

Una alternativa en la restauración de arrecifes basado en el método de jardinería de corales es la ciencia ciudadana. Entre 2015 y 2017, 230 participantes del programa Rescue a Reef (RAR) trasplantaron más de 1300 corales cuerno de alce (*Acropora palmata*), demostrando que la contribución a la restauración de los arrecifes por parte de los científicos ciudadanos es significativa (Hesley *et al.*, 2017).

Otros autores como Morell & Torres (2019) desarrollaron la jardinería de corales “ex situ” a partir de la recolección de fragmentos de coral de oportunidad vivos del género *Pocillopora*, especies *Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans* para la restauración de arrecifes de coral de Bahía Culebra (Costa Rica). En laboratorio dividieron los fragmentos (aproximadamente 10 cm de longitud) de las colonias madre en partes más pequeñas entre 1-3 cm de alto y 0-5 cm de ancho, las cuales fueron adheridas a soportes de cerámica que a su vez se instalaron en rejillas de plástico dentro acuarios previamente preparados (Figura 5).

Después de tres meses evaluaron las tasas de crecimiento y supervivencia de ambas especies, registrando una supervivencia del 73% para *P. damicornis* y 94% para *P. elegans*, encontrando una relación directa entre el tamaño del fragmento y la supervivencia, puesto que cuanto más grande el fragmento mayor su supervivencia. Este estudio también resalta que el cultivo “ex situ” se convierte en una posibilidad viable para restaurar un arrecife en un periodo corto de tiempo, ya que el tiempo empleado dentro de laboratorio aceleró el proceso de crecimiento hasta 7 veces más que en su habitat natural, con una tasa de crecimiento de 1 cm/mes y 0.7 cm/mes para *P. damicornis* y *P. elegans*, respectivamente.

Figura 5

Colonias de corales *Pocillopora damicornis* y *Pocillopora elegans* en el ambiente de acuario.



Nota. Tomado de Morell & Torres (2019).

En relación a los corales de oportunidad, Tortolero-Langarica *et al.*, (2019) acudieron a la propagación directa de estos para la restauración ecológica a largo plazo de áreas de arrecifes coralinos dañados y degradados, en el Parque Nacional Islas Marietas, Pacífico Central Mexicano, a partir de fragmentos de coral de especies *Pocillopora* recolectados. Evaluaron parámetros de crecimiento de coral (cm/año), la tasa de adhesión (%), el volumen ecológico (cm³/año), e incluyeron la evaluación a largo plazo de la cobertura anual de coral vivo (%) y la producción de carbonato de calcio (kgCaCO₃/m²/año) por un periodo de 5 años (2013-2018). Entre los resultados se destacan el incremento a largo plazo de la cobertura de coral vivo pasando del 13 al 28% (+4% anual) con una producción acumulada de carbonato de 14.53 kgCaCO₃/año, y registros de una importante resistencia y recuperación al concluir periodos de anomalías térmicas.

Entre tanto, Hernández-Delgado *et al.*, (2014) demostraron como la rehabilitación ecológica con tecnología sencilla, fundamentada en los enfoques de cultivo de comunidad, cosecha y transplante de *Acropora cervicornis* en zonas anteriormente bombardeadas en las islas de Vieques, Puerto Rico, puede incrementar exitosamente la cobertura de coral.

7. ARRECIFES ARTIFICIALES: ENTORNO GLOBAL

Los arrecifes artificiales (AR) son una alternativa para conservar los ecosistemas marinos, contribuyen a disminuir la presión sobre los arrecifes naturales, generan espacios para nuevos asentamientos de vida submarina, traen beneficios económicos a la población local mediante el ecoturismo, dificultan la pesca de arrastre ilegal, entre otros (Del Toro-Rivera, 2001). Los AR presentan diferentes configuraciones: agregadores superficiales de aguas oceánicas, agregadores a media agua, y arrecifes de fondo, además parten de la conformación de estructuras básicas como módulos de hormigón armado, sistemas de paños y redes, barcos hundidos de madera o metal, láminas de PVC y de diferentes tipos de materiales (Luque *et al.*, (2001), así como el uso de elementos naturales reciclados: conchas de moluscos (*Vieiras*, *Azumapecten farreri*) (Liu *et al.*, 2017), conchas de mejillones (reemplazando el componente de agregados arena-grava del concreto) (Carral *et al.*, 2018).

Pueden ser clasificados según su uso o finalidad en (Ministerio de Medio Ambiente-Gobierno de España, 2008):

-*Arrecifes artificiales* destinados a actuar sobre el medio físico: AR de protección costera; AR destinados al turismo y ocio; AR polivalentes (protección costera, turismo y ocio); AR destinados a la creación de zonas de fondeo; AR para la protección de infraestructuras marinas.

-*Arrecifes artificiales* destinados a actuar sobre la biota: AR con fines de gestión pesquera; AR con fines netamente ecológicos.

- *Arrecifes artificiales* destinados a otros usos: AR con la finalidad de promover el buceo recreativo; AR con la finalidad de incentivar la pesca recreativa; AR para fortalecer el potencial educativo y científico. De acuerdo con Ramos (2002) hay una serie de etapas en la planificación, diseño y seguimiento de los AR, estas son: estudio de impacto, objetivo, diseño, distribución, seguimiento científico, evaluación y mejora del diseño.

Dentro de una investigación realizada por Chen *et al.* (2013), los autores concluyeron de acuerdo con los resultados obtenidos que el desarrollo de actividades recreativas dentro y alrededor de los AR podría brindar beneficios económicos importantes, al emplear el método de costo de viaje y el método de valoración contingente para estimar el valor recreativo de los AR en Penghu, Taiwán. Como fue reseñado anteriormente, el buceo, dentro de las actividades recreativas, puede llegar a afectar la estabilidad dentro de los arrecifes naturales, al dañar los corales que allí residen, razón por la cual Tynyakov *et al.*, (2017) llevaron a cabo una investigación sobre como la presencia de AR cerca a arrecifes naturales en las costas de Eilat (extremo norte del Mar Rojo) en Israel, podía disminuir la presión sobre estos últimos. A partir del seguimiento a las actividades de buceo recreativo en al menos 7 AR ubicados en las aguas costeras de Eilat, establecieron que más de un tercio del total de inmersiones se realizan en los AR, lo cual indica que este tipo de arrecifes puede captar la atención de los buzos de los arrecifes naturales, contribuyendo a reducir la sobrecarga de buceo.

A partir de 1962 y hasta comienzos de 1990, Estados Unidos y Japón eran los principales exponentes en investigación sobre AR, posteriormente investigadores de otros países como China, Australia, Italia, Brasil y Reino Unido se empezaron a involucrar en este tema, ampliando la cobertura en estudios de AR (Silva *et al.*, 2019). La evolución y el alcance que han tenido las diferentes investigaciones sobre AR se ven reflejadas desde el diseño y la implementación iniciales para mejorar las pesquerías, pasando a varios propósitos adicionales, particularmente centrándose en las variaciones en la estructura de la comunidad o la composición de los AR, sugiriendo que las investigaciones han migrado el enfoque exclusivo sobre el mejoramiento de las pesquerías como recurso a la rehabilitación de los ecosistemas marinos (Lee *et al.*, 2018).

En ese orden de ideas, los AR están en la capacidad de desempeñar roles en los que la conservación de la biodiversidad marina sea el punto focal, partiendo del redireccionamiento funcional de estructuras que no fueron diseñadas como AR, sin embargo gracias al

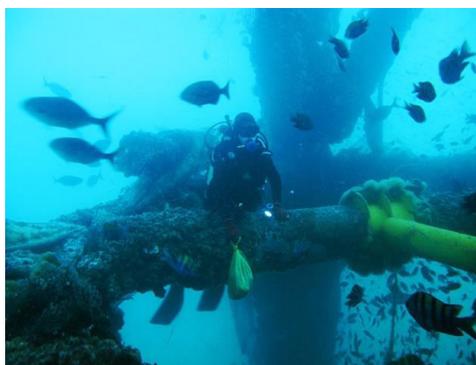
aprovechamiento de los recursos disponibles y al conocimiento de expertos, entre otros, es posible la reconversión. Al respecto, Hooker & Gonzáles (2012) evaluaron la importancia de tres plataformas petroleras como AR en Tumbes, norte del Perú, para la conservación de especies amenazadas y como centros de biodiversidad. En una plataforma conocida como “Albacora” reportaron la presencia de tres juveniles de mero guasa (*Epinephelus quinquefasciatus*), especie en grave peligro de extinción a nivel mundial de acuerdo con la UICN. En otra plataforma denominada “Corvina” (Figura 6) fueron registrados numerosos bancos de fortunos (*Seriola rivoliana*) y otros peces de importancia comercial, además de una considerable aglomeración de meros murique (*Mycteroperca xenarcha*), especie sobreexplotada en el Perú.

En un complejo de AR en el oeste del Golfo de México con fuerte representación de plataformas de petróleo y gas parcialmente desmontadas y hundidas, Ajemian *et al.*, (2015) emplearon vehículos operados a distancia (ROVs) para caracterizar las comunidades de peces asociadas. Uno de los principales resultados del estudio fue la posible identificación de un conjunto específico de especies de peces que habitan dichas estructuras y que no hubiera sido posible estudiar mediante técnicas como SCUBA o con palangres con cebo.

Los AR también pueden cumplir una doble función, en Corea del Sur para el año 2016, el gobierno de ese país instaló 80 estructuras de AR a lo largo de la Línea Límite del Norte (LLN), límite marítimo que abarca una región con altos índices de conflicto, y conocida como la Zona Desmilitarizada de Corea entre Corea del Norte y Corea del Sur. Estas estructuras, hechas en su gran mayoría de acero, y reforzadas en algunos casos con hormigón o piedra, hacen las veces de dispositivos para la conservación y extracción, pero de igual forma cumplen funciones de protección (equipadas con ganchos en la parte superior para cortar las redes de pesca de las embarcaciones comerciales chinas y norcoreanas) y delimitación (zonificación) (Sánchez, *et al.*, 2018).

Figura 6

Plataforma de perforación “Corvina” desempeñando la función de AR.



Nota. Tomado de Hooker & Gonzáles (2012).

Es necesario que los AR funcionen lo más cerca posible de los arrecifes naturales locales, si el objetivo es que actúen como hábitat sustituto de estos últimos (Komyakova *et al.*, 2019). Esto mismo fue demostrado por Wu *et al.*, (2019) al examinar los conjuntos de peces

bentónicos y macroinvertebrados de complejos de AR en Lidao (Mar Amarillo, China), localizados en aguas poco profundas, cercanas a la costa (9-11 m) y aguas marinas más profundas (20-30 m), con el objetivo de establecer si diferían de los arrecifes naturales cercanos a la costa y en alta mar. Al final, no se encontraron diferencias significativas en las características de los peces bentónicos y la fauna de macroinvertebrados entre ambas configuraciones de arrecifes en ambas profundidades.

Komyakov & Swearer (2019) realizaron una investigación sobre las preferencias en la selección de habitats de tres especies de peces de arrecife, *Trachinops caudimaculatus*, *Vincentia conspersa* y *Trinorfoklia clarkei*, mediante el reconocimiento de patrones de reclutamiento en tres habitats, dos AR (Reef Ball y AR diseñados a la medida) y arrecifes naturales localizados en la bahía de Port Phillip, Victoria (Australia). En líneas generales, el reclutamiento de *V. conspersa* fue casi tres veces mayor en los arrecifes Reef Ball con respecto a los otros dos habitats, por otro lado, el reclutamiento de *T. caudimaculatus* fue dos veces mayor en los arrecifes naturales en comparación con los dos AR, y en *T. clarkei* fue reclutada la misma cantidad en todos los habitats.

En otra investigación, Bulger *et al.*, (2019) estudiaron la composición de la comunidad de peces de fondo y del amenazado pez roca (*Sebastes spp.*) vinculados con 18 AR y naturales que abarcan la costa sur de la Columbia Británica en Canadá. Resultando en una elevada variabilidad en la abundancia (algunos con una abundancia relativa muy alta o baja) de los peces roca para los AR, mientras que en los arrecifes naturales la constante fueron abundancias intermedias. Por su parte, la diversidad de peces de fondo tuvo un comportamiento significativamente superior en los arrecifes naturales que en los AR.

La presencia de AR en alta mar es una opción para estudiar la composición de la infauna bentónica, las características de los sedimentos y el patrón de alimentación de peces demersales, tal como lo evaluaron Reeds *et al.*, (2018) en un AR de acero, con dimensiones de 12m x 16m x 12m (alto, largo, ancho) y un peso aproximado de 42 toneladas. Localizado a 1.5 km al sureste de South Head, en las afueras del puerto de Sydney (Australia), fue desarrollado para mejorar la pesca recreativa local. Al final, la “huella” bentónica efectiva del AR fue 15 veces mayor que su área actual. Yu *et al.*, (2015) encontraron que el despliegue de un AR en un área potencialmente afectada por la disminución de los recursos pesqueros, llegó a contribuir en el nivel de Clorofila a (Chl-a), alcanzando 2.93 mg/m² durante el periodo post-AR (2008-2012), siendo más elevado que el periodo pre-AR (2002-2007) donde el nivel fue de 2,37 mg/m². La biomasa del Necton tuvo un incremento entre 4,66 y 16,22 veces en comparación con el estudio previo al AR, y la diversidad de especies aumentó entre un 15% y un 23%.

En las islas costeras del sur de Singapur fueron instaladas unidades de AR de fibra de vidrio que impulsaron las probabilidades de éxito para el establecimiento de corales y favoreció prácticamente a 106 taxones de arrecifes, incluidos 29 géneros de escleractinianos después de 10 años. Estas unidades en forma de cúpula conocidas como Unidades de Mejoramiento

de Arrecifes (REU) permitieron minimizar la acumulacion de sedimentos (Figura 7) gracias al grado de inclinación empleado, al tiempo que los agujeros laterales facilitaron la circulación del agua a través de la estructura. En resumen las REU favorecieron la vida de los arrecifes gracias al mejoramiento de su diversidad y de los servicios ecosistémicos (Lionel *et al.*, 2016).

Figura 7

Unidades de Mejoramiento de Arrecifes (REU).



Nota. Tomado de Lionel *et al.*, (2016).

En otra región del continente Asiático, Ampou *et al.*, (2019) estudiaron las características iniciales del establecimiento de un mini parque de AR de coral en Samuh beach, Bali (Indonesia). El método utilizado se denomina MARRS (Mars Assited Reef Restoration System), y consta de una serie de pequeños marcos de acero unidos a manera de telaraña (Figura 8) a los que se unen los fragmentos de coral. En un periodo de tres meses (Julio-Octubre de 2018) se instalaron 761 unidades MARRS, que albergaban aproximadamente 10.600 fragmentos de coral. El estado de propagación de los corales fue registrado en Febrero de 2019, seleccionando al azar diez unidades MARRS se identificaron diez especies de coral duro del grupo *Scleractinia*; *Acropora formosa*, *A. hyacinthus*, *Pocillopora verucosa*, *P. damicornis*, *Psammocora sp*, *Symphyllia sp*, *Stylophora pistillata*, *Turbinaria sp*, *Echinopora sp* y *Favites sp*.

También en Indonesia, pero en Gosong Pramuka, Kepulauan Seribu (Yakarta), se realizó una investigación para estudiar el reclutamiento de corales en AR de bloques de hormigón en función de su posición, es decir expuestos al oleaje (área expuesta) y sin exposición (área protegida). Se registraron un total de 247 colonias de cuatro géneros diferentes, *Acropora*, *Porites*, *Montipora* y *Pavona*, siendo *Acropora* la más recurrente en ambas áreas. En el área expuesta el número de colonias fue mayor (210) que en el área protegida (37), así como la densidad de reclutamiento de coral, con 1.37 colonia/m² y 0.23 colonia/m² para el área expuesta y para el área protegida, respectivamente (Subhan *et al.*, 2019).

Por su parte, Cummings *et al.*, (2015) durante un periodo de 6 años hicieron una comparación de las tasas de crecimiento de 3 especies de coral del Caribe, *Acropora cervicornis*, *Acropora*

palmata y *Porites porites*, trasplantadas a un AR en inmediaciones de la isla Maiden, Antigua, con los valores reportados en la literatura para las mismas especies desarrolladas en arrecifes naturales en el Caribe. Los corales *A. palmata* y *P. porites* exhibieron tasas de crecimiento cercanas a los valores expresados en la literatura, mientras que la tasa de crecimiento promedio de *A. cervicornis* fue notablemente inferior que las tasas de crecimiento de la literatura.

Figura 8

Montaje del arrecife artificial MARRS.



Nota. Tomado de Ampou *et al.*, (2019).

El reclutamiento de especies marinas de importancia comercial en AR instalados estratégicamente puede traer beneficios económicos a las poblaciones locales. En relación a esto, Silva *et al.*, (2018) recolectaron datos desde noviembre de 2016 hasta mayo de 2017 mediante 60 entrevistas etnográficas con pescadores artesanales de la costa norte de Rio de Janeiro, buscando analizar la contribución de los AR a la biota marina con base el conocimiento ecológico local de los pescadores. Los cuales reportaron 25 especies asociadas con los AR, aunque después de la instalación de la estructura artificial aparecieron 15 especies. Las más frecuentes fueron la cabeza de oveja (*Archosargus probatocephalus*), el margate negro (*Anisotremus surinamensis*), la langosta (*Panulirus sp.*), la langosta del caribe (*Panulirus argus*) y el globo liso (*Lagocephalus laevigatus*). Además, los pescadores describieron en orden de importancia varias funciones ecológicas de los AR, como sitio de reproducción de especies (25.93%, n=21), incrementando el peso de los peces (18.5%, n=15), atrayendo peces (16.0%, n=13) y reducción de la pesca industrial (8.6%, n=7).

En un gran complejo de AR (compuesto por un remolcador y más de 4800 alcantarillas de hormigón) que está ubicado cerca a Port Mansfield (Texas), Golfo de México, Froehlich *et al.*, (2019) monitorearon los patrones de movimiento diarios de una especie de gran importancia comercial para la región, el pargo rojo (*Lutjanus campechanus*), como parte de una estrategia establecida para la ordenación pesquera. El estudio permitió identificar un extenso movimiento del pargo rojo, encontrando que los valores del área de distribución y del área central fueron superiores por más de 4 veces a los reportados en otros estudios sobre esta especie de pez.

Los beneficios potenciales tanto ecológicos como económicos mediante la plantación de AR, fueron estudiados por Susilo *et al.*, (2017) en zonas con fuertes presiones sobre los arrecifes naturales deteriorados de Trenggalek Regency, Java Oriental (Indonesia). Los análisis de resultados indicaron que los AR de hierro y hormigón fundido, con 9 m² aproximadamente de área de crecimiento coralino (0.36 m² por elemento, en total 26 desplegados) y una longitud de 8.3 m, están en la capacidad de producir beneficios directos mediante la producción de peces ornamentales, al igual que beneficios indirectos como habitat para otros tipos de peces, protección costera y sumideros de carbono por un valor económico aproximado de IDR 4.580.344,18 por año, alrededor de USD 326,08.

Por el contrario, en 3 distritos de pesca con influencia de AR en Terengganu, Malasia Peninsular, se pudo establecer a partir de una serie de encuestas estructuradas a 290 pescadores artesanales, que los ingresos producto de la pesca fueron sustancialmente inferiores en las áreas de AR, comparados con las áreas no AR (Islam *et al.*, 2014). Sin embargo, una investigación para clarificar si los AR desplegados a nivel mundial funcionan de forma similar a los arrecifes naturales, fue llevada a cabo por Paxton, *et al.* (2020), para esto realizaron una revisión de literatura y un meta-análisis sobre las métricas de la comunidad de peces en los AR del océano costero. A partir de un compendio de 39 estudios concluyeron que los AR albergan niveles de densidad de peces, biomasa, riqueza de especies, y diversidad comparables a los arrecifes naturales.

7.1. DESARROLLOS PARA LA CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE ARRECIFES ARTIFICIALES

Los avances tecnológicos y de conocimiento permiten estructuras a manera de AR con mejoras superlativas en su composición, funcionamiento y monitoreo; un ejemplo de ello es el análisis numérico de piezas modulares para la fabricación de AR a través de investigaciones como la realizada por Sánchez *et al.* (2015), en la cual buscaban hallar la configuración ideal de posoridad para la construcción de estructuras de protección costera que cumplieran una doble función, como disipadores de energía del oleaje actuante, y desempeñando el papel de AR.

Riera *et al.*, (2018) utilizaron la formación de biopelículas como herramienta para evaluar la eficiencia de los AR, y así conducir al desarrollo de un material ecológico para ser empleado en el diseño de las futuras generaciones de AR a partir de impresoras 3D de mayor capacidad. La impresión 3D también fue empleada por investigadores como Ly *et al.*, (2021), el objetivo era fabricar AR bajo seis formulaciones elaboradas con morteros de geopolímero o cemento CEM III y arenas recicladas (tres morteros de geopolímero+arenas recicladas, y los tres morteros restantes de cemento+arenas recicladas), que fueran compatibles con el ambiente circundante. Los AR (Figura 9) fueron dispuestos en el Océano Atlántico a lo largo de las costas británica, francesa, española y portuguesa. Se evaluó la colonización en las diferentes muestras de morteros por macro y microorganismos, y su durabilidad al cabo de 1, 3 y 6

meses de inmersión. Al final, ambos parámetros presentaron mejor comportamiento con cemento CEM III en comparación a los morteros configurados con geopolímeros.

Figura 9

Arrecife artificial (mortero) impreso en 3D



Nota. Tomado de Ly *et al.*, (2021).

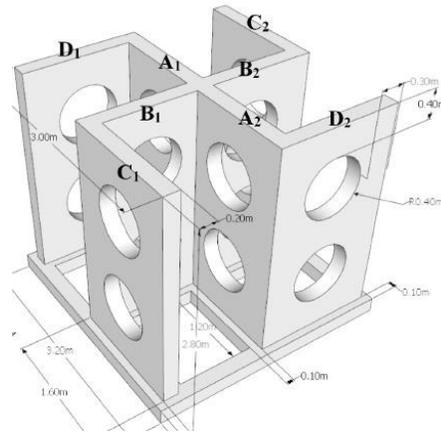
Por su parte, Yang *et al.*, (2018) verificaron a través de un estudio sobre la resistencia a la corrosión por ácido sulfúrico biogénico, como el nuevo hormigón de AR (NARC) exhibió menor grado de corrosión visual aparente y tasa de pérdida de masa en comparación con el hormigón de cemento ordinario Portland (OPCC). El NARC estaba compuesto por hormigón hecho de cemento sulfoaluminato, arena marina y agua de mar, y el OPCC por hormigón hecho de cemento Portland ordinario, arena de río y agua dulce.

La apertura de agujeros circulares es una alternativa habitual en el diseño de AR, Jiang *et al.*, (2020) investigaron el rendimiento de los AR de forma rotatoria (Figura 10), a partir de diferentes tamaños de orificios circulares empleando el método de dinámica de fluidos computacional (CFD) y el diseño de experimentos ortogonales. Este trabajo permitió establecer científicamente una metodología para seleccionar el diámetro de agujero para un AR.

La estructura también juega un papel principal en la configuración de los AR, al respecto, Werner *et al.*, (2011) realizaron un estudio para establecer la influencia que tiene la estructura del habitat de los AR en la composición del conjunto de peces en inmediaciones de la costa de Paraná, sur de Brasil. Determinaron que la mayor riqueza y abundancia de especies de peces estaban presentes en los bloques de arrecifes con mayor área y cantidad de agujeros (AR tipo pirámide y tipo cono, 33 agujeros cada uno).

Figura 10

Arrecife en forma de rotación. A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1 y D2 indican los diámetros de orificio de ocho hojas diferentes.



Nota. Tomado de Jiang *et al.*, (2020).

El asentamiento y la socavación pueden convertirse en un problema para el correcto funcionamiento de los AR, especialmente para aquellos que se encuentran localizados sobre materiales blandos o muy blandos (Yun & Kim, 2018). De acuerdo con esto, los autores mencionados investigaron las características de asentamiento y socavación del lecho marino en función de diferentes tipos de suelo (arcilla, limo y arena) que pueden localizarse en los fondos marinos de los mares cercanos a la península de Corea, los tipos de refuerzo (sin refuerzo, geomalla, estera de bambú con geomalla) y el área reforzada, a partir de una serie de pruebas de laboratorio que incluían la prueba de relación de rodamiento California (CBR), la prueba de asentamiento “large-size” y la prueba de canal de onda bidimensional. Los resultados mostraron que el AR no reforzado presentó mayor asentamiento y profundidad de socavación que el AR reforzado. Además, el AR reforzado con estera de bambú-geomalla (Figura 11) presentó mayor estabilidad que el de geomalla, gracias a la alta rigidez de flexión de la estera de bambú.

Figura 11

AR reforzado con estera de bambú con geomalla.



Nota. Tomado de Yun & Kim (2018).

Materiales diferentes a los tradicionales pueden ser una opción viable para la fabricación de estructuras de AR, como el implementado por López *et al.*, (2016), una clase de geotextil con arena en su interior para conformar un AR multifuncional en forma de “V”, localizado en un sector de Alicante (España), cuyo papel principal era proteger la costa de la continua regresión debido a la acción del oleaje, pero además convertirse en un centro de entretenimiento para practicar surf, y servir como hospedero de diferentes especies marinas gracias a su disposición dentro del agua.

La biotecnología puede ser una alternativa en el desarrollo o mejoramiento de los AR; Ivanov & Stabnikov (2017) estudiaron el comportamiento de tres métodos de recubrimiento biotecnológico de carbonato de calcio, este recubrimiento (Figura 12) puede ser empleado en superficies de hormigón, plástico o madera de los AR de coral, promoviendo la adhesión y crecimiento de larvas de coral y epibiota fotosintética. Esto ayudaría a acortar los tiempos de formación natural de los arrecifes de coral, puesto que la precipitación biomedida de carbonato de calcio del agua de mar es lenta. Al final, la precipitación de carbonato de calcio debido a la oxidación microbiana aeróbica de sales de calcio con ácidos orgánicos se convirtió en el método propuesto con mejores resultados.

Figura 12

*Planta de cactus *Arthroceurus spinosissimus*: a) antes del biorecubrimiento con carbonato de calcio. b) después del biorecubrimiento con carbonato de calcio. c) luego de 6 semanas de colonización superficial con microorganismos fotosintéticos.*



Nota. Tomado de Ivanov & Stabnikov (2017).

De forma similar, Vogler (2018) estudió el recubrimiento con carbonato de calcio, basándose a la Tecnología Biorock® en una investigación sobre la complejidad geométrica en los AR y su relación con el funcionamiento del arrecife. Esta Tecnología, a partir de una reacción electrolítica precipita minerales del agua de mar con el fin de acumular carbonato de calcio alrededor de estructuras metálicas.

En este caso el autor propuso dos prototipos con diseños innovadores que fueron lanzados y monitoreados durante seis años (Prototipo 1) y un año (Prototipo 2), en Gili Trawangan, Indonesia. El diseño de ambos prototipos se inspiró en la naturaleza, utilizando un algoritmo basado en los fractales del sistema Lindenmayer. El Prototipo 1 (Figura 13a) y el Prototipo 2 (Figura 13b) estaban compuestos por 100 piezas idénticas de chapa metálica de 1.5 mm de

espesor, y más de 350 de 2 mm de espesor, respectivamente. La principal diferencia entre los dos prototipos es que los componentes del Prototipo 2 son de diferente tamaño y geometría. Empleando fotogrametría submarina se monitoreó el Prototipo 1 durante cinco años y cinco meses obteniendo información acerca del estado de las estructuras piloto de acuerdo con etapas específicas, del crecimiento de los corales y la capa de carbonato de calcio. Como conclusión final, de acuerdo a los resultados alcanzados, la complejidad geométrica si tiene un impacto tanto en el desempeño funcional como en el estructural de los AR de coral.

Figura 13

Prototipos propuestos de AR: a) Prototipo 1 después de cinco años. b) Prototipo 2 con colonias de coral adheridas.



Nota. Tomado de Vogler (2018).

8. CONTEXTO COLOMBIANO

8.1. ANTECEDENTES

En Colombia, entre los años 1987 (junio) y 1988 (enero) se registraron por primera vez *Acropora cervicornis*, *Agaricia agaricites*, *Montastrea cavernosa*, *Diploria clivosa* e *Isophyllia sinuosa* en formaciones arrecifales en Bahía Portete, Guajira. Adicionalmente, entre octubre-noviembre de 1987 se reconoció un amplio fenómeno de blanqueamiento que afectó principalmente a *M. alcicornis*, *Porites astreoides* y *P. porites* (Solano, 1994).

En 1998 se dió inicio al desarrollo del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia-SIMAC, un programa interinstitucional liderado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), bajo el cual se estableció un protocolo específico con el fin de dar seguimiento temporal de las enfermedades coralinas (Gil-Agudelo *et al.*, 2009).

En 1999 se reportó que el “Arrecife”, la formación más desarrollada de la isla de Malpelo para ese entonces, parecía haber reducido su cobertura coralina viva en un 20% desde 1972 cuando se registraba un valor promedio del 65%. En el mismo estudio se registró por primera vez la aparición de enfermedades coralinas en el Pacífico colombiano, y parece corresponder

que la más frecuente cuyos ataques fueron observados en especies de *Pocillopora*, fue la enfermedad de “Banda blanca” (Garzón-Ferreira & Pinzón, 1999).

En los años 2004, 2005 y 2006 se monitorió una comunidad coralina aislada en San Andrés, comparando temporalmente la abundancia, cobertura y mortalidad parcial. No se encontraron diferencias significativas en riqueza, abundancia, cobertura, ni en área de mortalidad parcial. A pesar de ello, la comunidad si presentó variaciones en su composición con el ingreso de dos especies de coral (*Acropora cervicornis* y *Scolymia cubensis*) y la salida de otra dos (*Diploria clivosa* y *Siderastrea siderea*) (Jaramillo-González & Acosta, 2009).

Por un periodo de seis meses, durante el año 2005, fue evaluada la sobrevivencia, el crecimiento, la salud y el reclutamiento de los corales *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata* en el PNN Tayrona (en tres estaciones) y en el PNN Corales del Rosario y de San Bernardo (en dos estaciones). Se destaca la sobrevivencia, que en el PNN Corales del Rosario y de San Bernardo sufrió serias afectaciones por un episodio de blanqueamiento debido a las elevadas temperaturas (alcanzado 32,75°C) registradas en la zona, por lo cual, la muerte de las ramas muestreadas para *Acropora palmata* alcanzó el 100%, y el 54% para *Acropora cervicornis*. Mientras que en una de las estaciones del PNN Tayrona la sobrevivencia de las ramas muestreadas para *Acropora palmata* alcanzó el 100%, y en otra estación fue del 90% para *Acropora cervicornis* (Galvis & Molina, 2006).

En formaciones coralinas a nivel de comunidad, en las Islas del Rosario en el Caribe colombiano, se monitoreron dos estaciones del SIMAC, en dos ventanas temporales (largo plazo, 1998-2013 y corto plazo, 2013-2014), encontrando que los principales factores relacionados con la disminución de la cobertura coralina fueron los eventos extremos de temperatura superficial del mar, el caudal de descarga continental y la turbidez asociada (Vega, Bernal, & Zea, 2017).

Un caso excepcional, de acuerdo con los científicos, es la supervivencia de los corales de Varadero en la bahía de Cartagena. Estos corales “redescubiertos” en 2013 por la investigadora Valeria Pizano, se encuentran ubicados aproximadamente a 6 km al este de la boca principal del Canal del Dique, y a pesar de soportar un alto nivel de sedimentación, contaminación y escenarios cambiantes de luminosidad no reflejan estas condiciones en su estado actual, ya que cerca del 90% de las colonias se encuentran vivas y en buen estado, sin blanqueamiento y con presencia de organismos como los erizos negros que se creían desaparecidos desde la década de los 80. Uno de los investigadores del arrecife de Varadero señala que el área abarca aproximadamente 102 hectáreas que incluyen 14 habitats bentónicos, 32 especies de corales duros formadores de arrecifes, 26 especies de corales blandos, 5 de corales negros, 120 especies de peces y 39 invertebrados. Sin embargo, esta riqueza puede estar en riesgo por la posibilidad de construirse un canal alternativo de gran calado que llegaría a afectar en un 25% de manera directa y en un 50% de manera indirecta el arrecife coralino. Aún más, cuando hasta ahora los científicos están en el proceso de comprender cuál

o cuales han sido las claves adaptativas de los corales a condiciones adversas de luz, contaminación y turbidez del agua (BBC, 2018; SEMANA, 2018).

Entre los años 2012 y 2014 se realizaron en Colombia unos protocolos indicadores para las Áreas Marinas Protegidas (AMP), de la condición tendencia de áreas coralinas. Una de las metodologías de monitoreo estuvo dirigida a evaluar la cobertura de corales duros y de macroalgas frondosas, y tapete algal. Esto como parte de los compromisos suscritos por Colombia en el marco de los proyectos “Diseño e implementación del subsistema de áreas marinas protegidas en Colombia” y “Protección de la Biodiversidad en el Caribe suroccidental”, y partiendo de la experiencia obtenida en los últimos 15 años a través del SIMAC, la Red de Monitoreo de la Calidad de Aguas Marinas y Costeras (Redcam), y el Sistema de Información Pesquera (Sipein) (Rodríguez-Rincón *et al.*, 2014).

En 2015 fue publicado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en alianza con INVEMAR un portafolio sobre “Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia” con la finalidad de impulsar la consecución de los objetivos propuestos en la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia – PNAOCI y el Plan Nacional de Restauración-PNR. Como parte de los resultados se identificaron 278 áreas con potencial de restauración, entre ellas 7 áreas coralinas (4 en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, y las 3 restantes repartidas en los departamentos de Bolívar, Chocó y Valle del Cauca) (Gómez-Cubillos *et al.*, 2015).

Entre los años 2010 y 2017 se llevaron a cabo una serie de inmersiones en los alrededores de Isla Gorgona, Pacífico Tropical Oriental, buscando recolectar evidencias sobre el reclutamiento coralino producto de reproducción sexual. Dos hechos se destacan de los resultados obtenidos, el primero relacionado con la ausencia de reclutas en las placas de asentamiento empleadas con materiales como acrílico, cerámica, concreto, marmol e hilo de nylon trenzado y entretejido. Segundo, el reclutamiento de corales juveniles como resultado de la reproducción sexual tuvo lugar en 10 de los 19 sitios monitoreados, entre sustratos naturales de arrecifes de coral y sitios rocosos. Las dos especies coralinas más abundantes fueron *Porites panamensis* y *Pocillopora* sp (Muñoz *et al.*, 2018).

Para establecer un inventario sobre el estado del coral cuerno de alce (*Acropora palmata*), en 2017 se realizaron valoraciones ecológicas en dos ubicaciones del Caribe colombiano con características disímiles; Isla Fuerte (Córdoba) e Isla Aguja en el PNN Tayrona (Magdalena). Se encontró que el porcentaje de cobertura de coral vivo alcanzó el 33.4% en Isla Fuerte y 60.3% en Isla Aguja, esta última presentó mayor incidencia en lesiones por enfermedades como White pox y Banda blanca (Manjarrés, 2018).

8.2. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN COLOMBIA

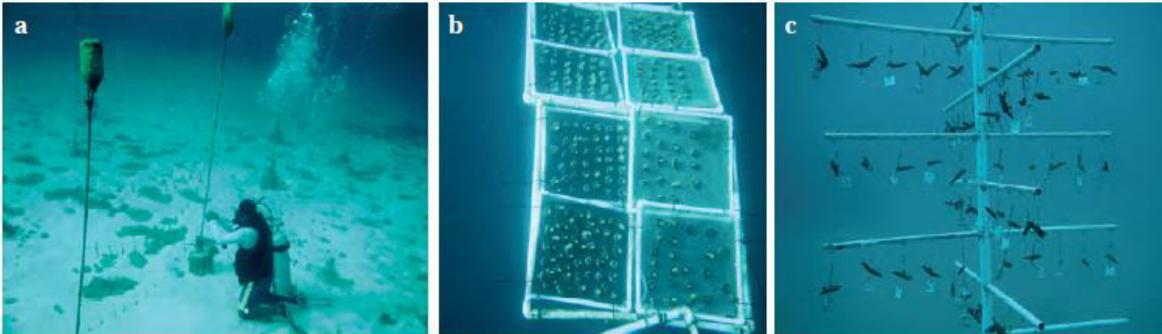
Las técnicas de restauración ecológica activa para arrecifes coralinos más utilizadas en Colombia y el Caribe, fueron reseñadas por Bernal (2018), y como estas pueden ser una herramienta de conservación y desarrollo socioeconómico en el Manejo Integrado de Zonas Marino Costeras. Las técnicas son: instalación de arrecifes artificiales (AR), trasplante de fragmentos de coral y guarderías de coral. Por otra parte, el mismo autor realizó una adaptación dirigida a los arrecifes de coral del Caribe colombiano de las trece fases propuestas por Vargas (2007) como base para la estructuración de proyectos de restauración ecológica.

Una de las primeras experiencias en restauración ecológica de arrecifes de coral en Colombia mediante el empleo de guarderías y utilizando métodos sugeridos por investigadores nacionales e internacionales tuvo lugar en tres Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC); PNN Old Providence, PNN Tayrona y PNN Corales del Rosario y de San Bernardo. Una de las metas del trabajo era evaluar la viabilidad como estrategia de manejo de las metodologías utilizadas en la restauración (incremento de la cobertura de coral vivo en los arrecifes) de zonas con arrecifes coralinos degradados, previamente identificadas dentro de los PNN señalados, y sujetas a diferentes presiones tanto naturales como antrópicas.

Para esto se instalaron guarderías de coral del género *Acropora*, contemplando la propagación asexual (fragmentación) para tal actividad, en dos sistemas piloto diferentes: a) tipo “tendedero” (Figura 14a) en los PNN Old Providence, Tayrona y PNN Corales, y b) tipo “bandejas a media agua” (Figura 14b) llevadas a cabo en el PNN Tayrona; posteriormente fueron instalados dispositivos tipo “arbolito” (Figura 14c) en el PNN Tayrona, pero no hicieron parte de las evaluaciones iniciales. En 2010 el PNN Old Providence inició con la primera etapa del piloto con dos guarderías tipo “tendedero”, una para cada especie de *Acropora* (*A. cervicornis* y *A. palmata*), alcanzando una tasa de supervivencia al finalizar esta etapa del 98% para *Acropora palmata* y 92% para *Acropora cervicornis*, en 2011 se realizaron los trasplantes de las colonias de ambas especies.

Figura 14

Tipos de guardería implantadas en los Parques Naturales del Caribe Colombiano: a) Tipo tendadero. b) Bandeja a media agua. c) Arbolito.



Nota- Tomado de Franke-Ante *et al.*, (2014).

En el PNN Tayrona, hacia finales de 2009, se establecieron dos guarderías con ambas especies de *Acropora*, las evaluaciones de los primeros ensayos permitieron observar que la supervivencia para las dos especies fue del 90%, ya en el año 2014 realizaron un transplante de *Acropora palmata* en un sitio conocido como Piedra Ahogada en el interior de la Bahía Gayraca (Santa Marta). Finalmente el ensayo piloto en el PNN Corales del Rosario y de San Bernardo se realizó en 2011 iniciando con la instalación de una guardería para *Acropora cervicornis*, dicha fase tuvo una duración de un año y cuatro meses, dando como resultado una supervivencia del 100% en las colonias (Franke-Ante *et al.*, 2014).

También en el PNN Tayrona, se implementó un tipo de guardería de coral a media agua para la cría de fragmentos de *Montastraea cavernosa* y *Acropora palmata*, en la bahía de Gayraca, como propuesta para un acercamiento hacia la restauración coralina. Evaluaron durante un periodo de cuatro meses la supervivencia, el estado de salud y el crecimiento de 40 fragmentos por especie seleccionados al azar. El método de guardería aplicado constó de seis módulos cuadrados tipo bandeja de PVC (con malla interna), articulados mediante abrazaderas plásticas, y ancladas al fondo a través de un sistema de cuerdas, además de boyas plásticas que las mantenían a media agua. Los fragmentos de oportunidad obtenidos de *A. palmata* y provenientes directamente de la zona basal de las colonias donantes de *M. cavernosa* se fijaron a un sustrato individual de cemento (tipo galleta) que posteriormente fue adherido a cada bandeja (Figura 15). Entre los resultados obtenidos se destaca que la supervivencia en *A. palmata* fue del 95.08% y 90.79% para el primer y tercer mes, respectivamente, mientras que en *M. cavernosa* esta fue del 47.99% para el primer mes y del 38.42% para el tercero. Por otra parte el sobrecrecimiento algal se convirtió en la afectación más recurrente en la salud de los fragmentos de coral vivos (García, 2013).

Figura 15

Pins de cemento ubicados en las bandejas, y con los fragmentos de coral fijados.



Nota. Tomado de García (2013).

En Isla Fuerte, Caribe Colombiano, se llevó a cabo una investigación donde se evaluaron la supervivencia y el crecimiento de esquejes de *A. palmata* mediante dos técnicas de restauración, “in situ” (dentro del arrecife) y “ex situ” (fuera del arrecife). Se utilizaron en cada zona dos tipos de guarderías, cuadrantes de malla plástica a los cuales se sujetaron sustratos de cemento tipo “galleta” con su respectivo esqueje de coral, y cuerdas colgantes dispuestas en los bordes de la estructura que sostiene los cuadrantes. Transcurridos tres meses, la zona “ex situ” mostró la mayor supervivencia, con 68.3% para cuerdas y 50% para galletas. En la zona “in situ” la supervivencia estuvo por debajo del 40%, alcanzando el 38.3% para cuerdas y 36.7% para galletas. Por el contrario, el crecimiento bajo los dos sistemas de guardería fue mayor en la zona “in situ”, con un promedio de 3.0 y 3.3 cm³ para galletas y cuerdas, respectivamente. Mientras que en la zona “ex situ” los promedios totales fueron de 2.7 cm³ para cuerdas y 2.3 cm³ para galletas (Casas, 2017).

Zárate *et al.*, (2019) emplearon guarderías de coral para evaluar cinco morfotipos de *Acropora palmata* en la isla San Martín de Pajarales, PNN Corales del Rosario y de San Bernardo. Las guarderías utilizadas fueron de tipo colgante en estructura de árbol con varillas intercaladas de forma perpendicular, cada varilla con diez huecos sostenía los fragmentos de coral mediante amarres de nylon. Se evaluaron la supervivencia, el crecimiento (lineal y volumen ecológico) y el estado de salud. Los resultados mostraron comportamientos similares para ambos tipos de crecimiento en todos los morfotipos, se presentaron supervivencias altas de todos los fragmentos, oscilando entre el 90-100%, y la mortalidad parcial fue expresada por el relativamente bajo sobrecrecimiento algal.

Otro estudio similar con guardería colgante tipo árbol fue llevado a cabo por Rodríguez (2018), donde además de evaluar la supervivencia, el crecimiento (lineal y volumen ecológico) y el estado de salud en la fase de cultivo de fragmentos de coral *Acropora palmata* en guarderías ubicadas en el PNN Corales del Rosario y de San Bernardo durante un año, realizaron las mismas valoraciones por un periodo de 10 meses (abarcando las épocas climáticas lluviosa y seca) posterior a su trasplante sobre colonias muertas en la barrera norte

de la Isla Tambito dentro del Parque. Reportando altas tasas de supervivencia y crecimiento mensuales tanto en guardería como en trasplante. Adicionalmente, este estudio resalta la ventaja que tiene el uso de guarderías colgantes-verticales tipo árbol, ya que estas permiten mejor uso de la columna vertical de agua, reduciendo considerablemente la fricción y haciéndola menos susceptible a daños por efecto del oleaje.

Por otra parte, el cultivo y el asentamiento de larvas de coral con fines de restauración arrecifal podría verse beneficiado gracias a los desarrollos realizados por dos profesores de Diseño Industrial de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Fueron cuatro dispositivos los creados y patentados; un “acuario para el cultivo artificial de corales” empleado para contener agua, albergar y mantener vivas las larvas de coral en el medio acuático, también como transporte de forma segura de las mismas para su estudio en laboratorio, reclutamiento y reproducción; un sistema de “trampas de sedimento y asentamiento de larvas de coral en ambientes arrecifales someros” el cual sirve para medir la cantidad de partículas de sedimento suspendidas y resuspendidas en el medio marino para establecer la afectación en la salud de los corales, además permite medir la fijación de larvas de coral (Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2015);

También desarrollaron un “dispositivo guardería sumergible para el cultivo artificial de corales en arrecifes someros” el cual va a permitir el crecimiento modular de las larvas de coral; y un “dispositivo robótico sumergible para captura de imagen” que mejorará la calidad fotográfica y el acceso a zonas de mayor complejidad, así como la optimización del recurso humano (Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2019). Adicionalmente, desarrollaron un sustrato para el asentamiento de larvas de coral, patentado bajo el nombre “sustrato cerámico estructurado en placas de alto-bajo relieve y doble cara para el asentamiento de larvas de coral”. Los sustratos compuestos por elementos cálcico y arcillosos vienen en tres modelos diferentes de placas que se pueden acoplar a trampas y acuarios.

Involucrar a las comunidades que se benefician directa e indirectamente de los servicios ecosistémicos que prestan los arrecifes de coral en proyectos de restauración, genera ventajas tanto ecológicas como sociales. Es así como pescadores locales de San Andrés y Providencia participan activamente del “Programa Participativo de Rehabilitación de Arrecifes de Coral a Gran Escala en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina”, a través de la siembra, el mantenimiento y monitoreo de las guarderías (Figura 16), además del posterior trasplante de corales de cuatro especies distintas, entre ellas *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata*. Las ganancias económicas recibidas por los pescadores provienen de recursos privados, amparados por el modelo de compensación de huella de carbono, programa BANCO2, siendo este modelo el pionero para la compensación ambiental marina (MONGABAY, 2018).

Un avance importante en términos de restauración de arrecifes de coral está teniendo Colombia mediante el proyecto “Ensayos de reproducción sexual y crias de coral” donde se plantea documentar el proceso de reproducción, fertilización y embiogénesis de las especies

coralinas del Caribe colombiano, y finalmente promover la restauración a través del reclutamiento regulado en arrecifes degradados. Entre las acciones a destacar durante el año 2019 se realizaron tres inmersiones nocturnas con el fin de coleccionar gametos de colonias de *A. cervicornis*, *A. palmata*, *Diploria labyrinthiformis* y *O. faveolata*, entre otras (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2019)

Figura 16

Mantenimiento de guarderías de coral por parte de pescadores locales.



Nota. Tomado de MONGABAY (2018).

8.3. ARRECIFES ARTIFICIALES: ENTORNO COLOMBIANO

En el año 1996 se creó el programa Diáspora, una iniciativa fomentada por Ecopetrol S.A., en asocio con entes locales y regionales, con el objetivo de recuperar la biodiversidad marina y la productividad pesquera en áreas con fuerte degradación. Se emplearon materiales reutilizados, para el caso particular tubería de acero en desuso proveniente del transporte de hidrocarburos, con la cual se construyeron AR a lo largo del Golfo de Morrosquillo, Caribe Colombiano. Fue a partir del año 2006 que el proyecto inició con la construcción e instalación de 20 AR en la denominada DIÁSPORA Fase I en los municipios de San Antero, Coveñas y Tolú. Los resultados de esta primera Fase fueron bastante prometedores en el sentido que los AR presentaron en promedio el doble de captura por unidad de esfuerzo respecto a los caladeros tradicionales de pesca, arrecifes naturales, estuarios y otros AR (0.62 kg/hora/pescador vs 0.31 kg/hora/pescador), adicional a esto se observó una alta diversidad de organismos en los AR del Programa (81 especies de peces, 19 de macroinvertebrados móviles y al menos 128 especies de organismos sésiles y epifauna), así como la presencia de especies amenazadas y de preocupación menor como el mero guasa *Epinephelus itajara*, los pargos *Lutjanus analis* y *L. cyanopterus*, el bagre *Ariopsis bonillai*, entre otras (Delgadillo-G *et al.*, 2010).

La Fase II o DIÁSPORA Fase II fue ejecutada entre los años 2010 y 2014, donde se instalaron 30 nuevos AR, siendo señalizados los sitios de su instalación mediante boyas, en el año 2017. DIÁSPORA Fase III contemplaba la construcción y fondeo de 50 AR, instalando 5 AR entre diciembre de 2017 y parte de 2018, construidos con artefactos navales en desuso, como las antiguas monoboyas TLU1 y TLU3 y sus respectivas barcazas de alivio, y el pontón del

Golfo de Morrosquillo, todos estos empleados en el Terminal Marítimo de Ecopetrol en Coveñas (Benítez-Piñeros, 2018).

En la Bahía de Pozos Colorados (Golfo de Salamanca), Caribe colombiano, Ecopetrol S.A. en alianza con instituciones privadas y gubernamentales, desplegaron durante el año 2013 en un área de 137 ha un complejo de seis AR provenientes de materiales de oportunidad como el acero usado anteriormente para el transporte de petróleo. Esta iniciativa buscaba impactar de forma positiva la conservación de la biodiversidad y la gestión del recurso pesquero de la región de Santa Marta. Los seis AR tuvieron un diseño cubico, con marcos de 4.5 x 45 x 4.5 m, tres de los cuales presentaron una configuración con tubos diagonales cruzados entre el marco principal (Figura 17a), y los otros tres con ocho tubos verticales ubicados en la parte central del marco (Figura 17b). Algunas de las tuberías fueron perforadas con orificios de 5 y 20 cm de diámetro. Después de un año y medio de instalados los AR registraron 86 especies de peces, 36 macroinvertebrados móviles (i.e. camarones, cangrejos, caracoles, pulpos, gusanos, erizos, pepinos) y 14 phyla de biota sésil y epifauna (i.e. algas, esponjas, corales, ostras, entre otros), que representan por lo menos 73 especies. Destacando la estancia de importantes especies comerciales, ecológicas y en peligro de extinción (MoAm, 2015; Delgadillo-G & Toro, 2018).

Figura 17

AR dispuestos en la Bahía de Pozos Colorados: a) Módulo de cubo diagonal. b) Módulo de cubo vertical.



Nota. Tomado de Delgadillo-G & Toro (2018).

El desarrollo de AR en Colombia a dirigido esfuerzos hacia la búsqueda de nuevos materiales de fabricación que potencien la viabilidad y funcionalidad de estas estructuras. Al respecto, Bedoya (2015) evaluó el efecto de agregados reciclados y cenizas de carbón en la durabilidad de un mortero ecológico para ser aplicado en AR. Los agregados reciclados provenían de los escombros de demolición de diferentes edificios y construcciones de la ciudad de Medellín, al igual que las cenizas de carbón, los otros materiales empleados fueron cemento Portland gris tipo 1, agregados naturales y arena estandarizada. Se emplearon diferentes combinaciones y porcentajes con los materiales previamente mencionados para la fabricación de los morteros. Estos fueron diseñados de forma cilíndrica y sujetos a una base circular, para posteriormente ser expuestos a las condiciones reales del medio marino en el Golfo de Morrosquillo (Sucre), Caribe colombiano, durante siete meses.

Al final de las evaluaciones se resaltan varios aspectos, uno de ellos es la conveniencia de utilizar los materiales propuestos como los agregados reciclados y las cenizas de carbón en las mezclas de mortero ecológico para fines constructivos de estructuras como los AR, ya que cumplen con las condiciones de durabilidad y resistencia necesarias, en parte gracias a la influencia de la ceniza que ayuda a mejorar el desempeño mecánico y la durabilidad de la matriz cementante, además los agregados reciclados podrían convertirse en una fuente adicional de Ca para los organismos colonizadores como los corales. Partiendo de esto, los morteros propuestos con la inclusión del 70% de ceniza de carbón y 100% de agregados reciclados satisfacen los requerimientos de soportar los ataques del medio marino, el biodeterioro y continuar conservando sus propiedades de estabilidad.

En otra investigación similar, Bedoya-Gutiérrez *et al.*, (2016) desarrollaron un tipo de mortero como sustrato, también para la fabricación de AR. Para su elaboración, emplearon cemento Portland gris tipo I y agregados procedentes de residuos de cerámica de platos (tipo bizcocho) que cuentan con una microestructura estable gracias al proceso de cocción a elevada temperatura. Se generaron dos placas trapecoidales de mortero (Figura 18), las cuales fueron expuestas durante once meses a las condiciones marinas de Bajo Grande (Isla Palma), Caribe colombiano. Al final se reportó una colonización por organismos de aproximadamente el 30% de su superficie, no se observaron alteraciones en la estructura interna de las placas, y tampoco se evidenciaron efectos negativos sobre la biota marina circundante.

Figura 18

Montaje de las placas trapecoidales de mortero.



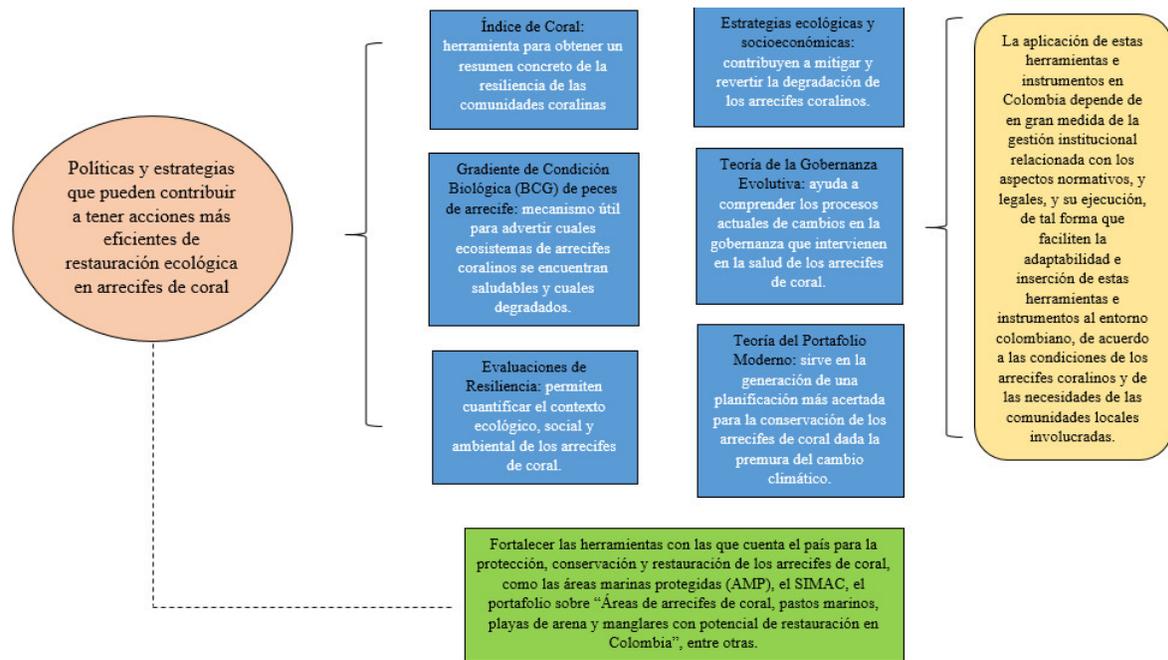
Nota. Tomado de Bedoya-Gutiérrez *et al.*, (2016).

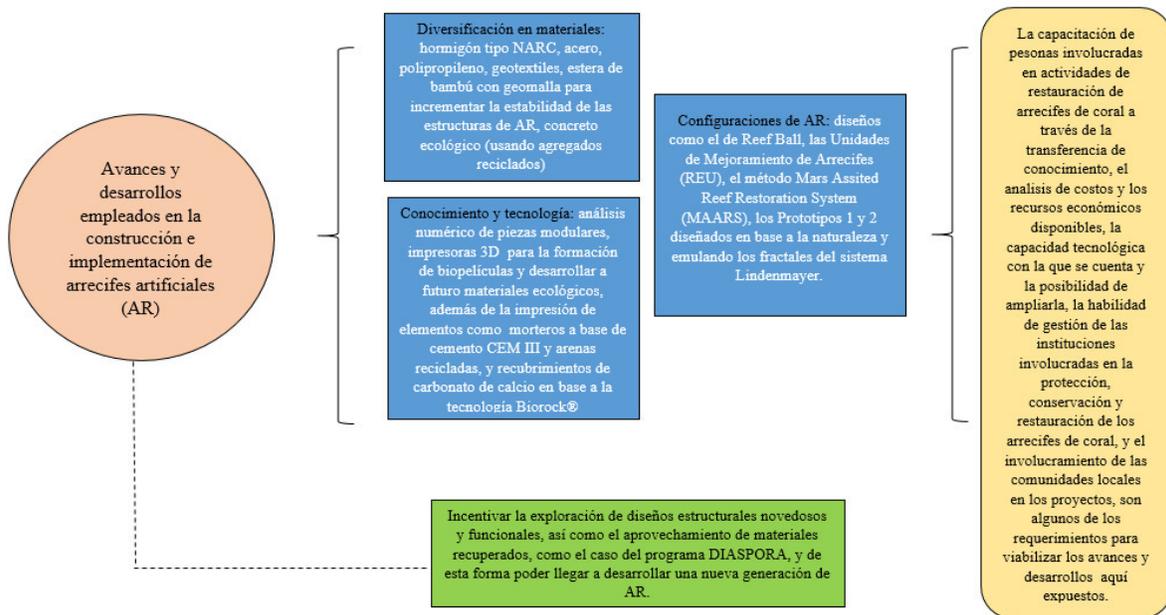
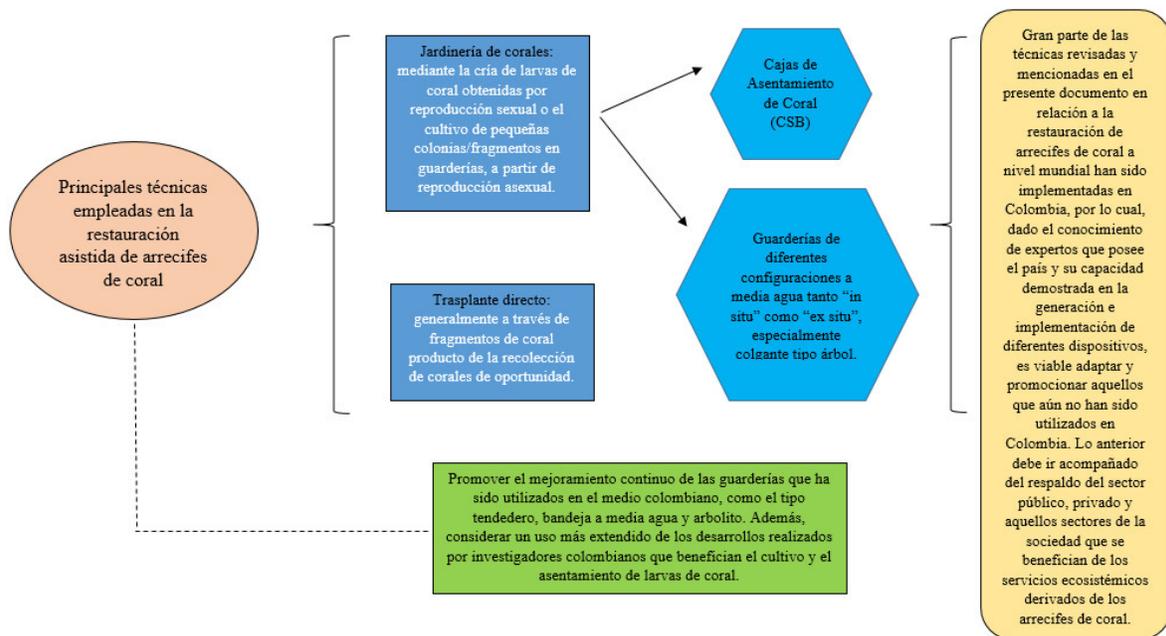
Por su parte, Diaz-Castillo *et al.*, (2014) seleccionaron y analizaron una serie de materiales como posibles insumos para la construcción de AR. Para ello tuvieron en cuenta criterios como facilidad de mecanizado, buenas propiedades mecánicas, coexistencia con el ecosistema, bajo impacto ambiental y costos reducidos. Fueron seis los materiales estudiados: acero inoxidable AISI 304, polivinil cloruro rígido (PVC), polipropileno, cerámica, concreto, coral muerto *Agaricia tenuifolia* extraído del PNN Corales del Rosario

y de San Bernardo. Durante un periodo de quince días se simularon condiciones naturales en el que los arrecifes se desarrollan, llevando a acelerar los fenómenos presentes en el mar como condiciones de agitación (corrientes) a 100 rpm y temperatura sostenida de 40°C, en agua de mar preparada. De acuerdo con los resultados obtenidos del experimento para cada material, se llegó a la conclusión que los materiales factibles para la construcción de AR son el acero inoxidable AISI 304, el polipropileno, la cerámica y el concreto. Vale la pena señalar que el PVC no fue incluido, ya que los autores en base a otros estudios reportaron como la presencia de ciertos aditivos (organometálicos) tóxicos, a pesar de su poca significancia en ese material, podrían migrar al medio marino causando daños a las especies que lo habitan.

9. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta una síntesis de los principales resultados obtenidos en relación a los objetivos específicos planteados, y que responden al objetivo general del trabajo.





10. DISCUSIÓN

El presente trabajo pretendió abordar los principales aspectos relacionados con la importancia ecológica, social y económica de los arrecifes de coral, las problemáticas de origen natural y antrópico que los afectan, las alternativas más sobresalientes a nivel mundial en términos de su restauración y de sus servicios ecosistémicos, así como las estrategias, herramientas y políticas encaminadas a aumentar su protección y resiliencia, permitiendo potenciar acciones futuras de restauración, a partir de una acertada planificación para

enfrentar los desafíos actuales como el cambio climático, la pérdida de hábitats, el aumento de la contaminación y la sobreexplotación de los recursos,.

La implementación de los proyectos e investigaciones señaladas en el presente documento a nivel local demuestran que Colombia tiene el potencial de asimilar y aplicar buena parte de las técnicas, metodologías, tecnologías y conocimiento desarrollados en otras regiones a nivel mundial, que a su vez les ha permitido avanzar en temas de protección y restauración de arrecifes de coral con importantes índices de éxito.

Por lo cual, Colombia podría abrir la posibilidad de implementar políticas y estrategias fortalecidas de gestión como el uso del Índice de Coral, el Gradiente de Condición Biológica, las evaluaciones de resiliencia, las estrategias ecológicas y socioeconómicas, la Teoría de la Gobernanza Evolutiva y la Teoría del Portafolio Moderno que apoyen la conservación y la resiliencia de los ecosistemas de arrecifes de coral degradados, además potencien su restauración ecológica, de acuerdo con las condiciones locales (Caribe continental, Caribe insular y Pacífico) propias del arrecife y su capacidad de interactuar efectivamente con factores clave como la comunidad, la gobernanza y la economía, entre otros.

Mejorar los mecanismos existentes que buscan promover la protección, conservación y explotación sostenible de los recursos naturales presentes en los arrecifes de coral, como las áreas marinas protegidas (AMP), el SIMAC, el portafolio sobre “Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia” y la capacidad de carga turística en las zonas de buceo recreativo con presencia de arrecifes coralinos.

Impulsar las investigaciones y desarrollos que buscan incrementar la resistencia de los corales al enfrentar eventos naturales y antrópicos (aumento de la contaminación, la acidificación oceánica y el calentamiento global que acentúa la frecuencia de los blanqueamientos masivos de coral) como la tolerancia térmica de los corales (estudio de su estructura genética), y de sus endo-simbiontes de microalgas. Adoptar herramientas con tecnología útil para monitorear cambios en la salud, composición y estructura de los corales como el uso de inteligencia artificial a través de la fotografía digital submarina.

Como se pudo evidenciar en este documento, Colombia cuenta con diversos trabajos que buscan aportar desde diferentes enfoques a la restauración ecológica de arrecifes de coral, basados en opciones prácticas como el trasplante directo de fragmentos de coral a través de la recolección de corales de oportunidad, la jardinería de corales mediante la cría de larvas de coral obtenidas por reproducción sexual o el cultivo de pequeñas colonias/fragmentos a partir de reproducción asexual. Por otra parte, habría que validar la posibilidad de replicar aspectos inmersos en las técnicas mencionadas del contexto global al entorno colombiano. Como las cajas de asentamiento de coral (CSB) “in situ”, fertilización asistida a gametos recolectados, guarderías de diferentes configuraciones a media agua tanto “in situ” como “ex

situ”, especialmente colgante tipo árbol gracias a las ventajas estructurales que ofrece en las condiciones cambiantes del medio marino.

Masificar el uso de los dispositivos creados por investigadores colombianos para fijar y mantener vivas las larvas de coral, permitir su crecimiento modular, cuantificar la cantidad de partículas de sedimento suspendidas y resuspendidas en el medio marino para establecer la afectación en la salud de los corales.

De acuerdo con lo expuesto, probablemente el área que cuenta con menor dinamismo en Colombia es el desarrollo e implementación de AR. Para ayudar a la resiliencia y recuperación de los arrecifes naturales, así como restarles presión dada la sobreexplotación de sus recursos, aplicar diseños como el de Reef Ball, las Unidades de Mejoramiento de Arrecifes (REU), el método Mars Assited Reef Restoration System (MAARS), los Prototipos 1 y 2 diseñados en base a la naturaleza y emulando los fractales del sistema Lindenmayer, así como impulsar el aprovechamiento de materiales en desuso que pueden ser recuperados y puestos a disposición como AR (caso del programa DIASPORA de ECOPEPETROL en tuberías de acero para transporte de hidrocarburos, y artefactos navales), entre otros, son una opción que puede además traer beneficios socioeconómicos para las regiones involucradas en los proyectos de restauración.

De la mano con la diversificación en materiales como hormigón tipo NARC, acero, polipropileno, geotextiles, estera de bambú con geomalla para incrementar la estabilidad de las estructuras de AR, concreto ecológico (usando agregados reciclados), etc. Con la posibilidad de involucrar no sólo a las comunidades locales asesoradas por entidades y organizaciones especializadas en economía circular, sino a la sociedad en general, que a través de este modelo puede desempeñar un papel clave en el aprovechamiento de recursos disponibles y así evitar dilapidar los recursos naturales, obteniendo además materia prima recuperada y funcional, por ejemplo plástico (polipropileno) no contaminante, aluminio y neumáticos, que pueden desempeñar un rol importante en la construcción de la nueva generación de AR. También debería tenerse en cuenta la implementación de los avances en el mejoramiento de los AR, como el análisis numérico de piezas modulares, el uso de impresoras 3D de alta capacidad en diferentes materiales, la formación de biopelículas para desarrollar a futuro materiales ecológicos y recubrimientos de carbonato de calcio en base a la tecnología Biorock®.

Ante el riesgo que cada día supone la pérdida progresiva de los servicios ecosistémicos de provisión (recursos pesqueros, genéticos, farmacéuticos, entre otros), regulación (protección contra desastres naturales como tormentas tropicales, y contra la erosión en las playas), y culturales (buceo y pesca recreativa, educación ambiental, sentido de pertenencia y disfrute paisajístico) que prestan los arrecifes de coral, y de los cuales depende una buena parte de la población mundial, incluyendo Colombia que tiene presencia tanto en el Mar Caribe como el Océano Pacífico (con 12 de los 32 departamentos que poseen zona marino costera), es imprescindible que las técnicas tradicionales y las alternativas en términos de restauración

de corales aquí expuestas y a las que haya lugar, sean tenidas en cuenta para su gestión e implementación por parte de los diferentes actores involucrados en estos procesos, como el gobierno nacional, el gobierno local, las entidades estatales (Corporaciones), la empresa privada, la comunidad académica/científica y no menos importante las comunidades locales.

11. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los trabajos y desarrollos expuestos en este documento sobre las estrategias y políticas que pueden contribuir a tener procesos más eficientes de restauración ecológica en arrecifes de coral, las técnicas empleadas para la restauración de estos, y avances en la construcción de arrecifes artificiales, se concluye que esta diversificación en investigaciones puede contribuir a lograr acciones de conservación y restauración de arrecifes de coral mucho más efectivas, y con mejores adaptaciones a los cambios acelerados de las condiciones medio ambientales, causados por fenómenos como el calentamiento global y la acidificación oceánica.

Para que puedan surtir efecto las medidas tomadas en términos de restauración, es necesario mitigar progresivamente los tensionantes antrópicos sobre los ecosistemas de arrecifes de coral, como la contaminación por microplásticos y otras sustancias tóxicas para el medio marino, los aportes excesivos de materia orgánica, la sedimentación o resuspensión de partículas por dragados inadecuados, los aportes en aumento de CO₂ atmosférico, entre otros, que limitan la recuperación natural de los arrecifes de coral, y por ende dificultan que la restauración asistida pueda cumplir a cabalidad con su función.

El presente documento refleja como los ecosistemas de arrecifes de coral requieren una atención especial, ya que su degradación y pérdida estarían complicando la subsistencia de millones de personas en el mundo que dependen directa e indirectamente de los servicios ecosistémicos que ofrecen, por ello es imperante que los esfuerzos en restaurar gran parte de estos servicios se basen en métodos y procedimientos científicos como los señalados en este trabajo.

Potenciar la resiliencia natural de ecosistemas como los arrecifes de coral puede convertirse en un mecanismo favorable pensando en acciones futuras de restauración ecológica, ya que disminuiría la necesidad de invertir recursos al tener un ecosistema menos deteriorado y posiblemente se reduciría el tiempo requerido para llevar a cabo dichas acciones, lo cual traería beneficios tanto ecológicos como sociales.

Es importante ejecutar un proceso de validación de las metodologías y procedimientos de restauración en arrecifes de coral que incluyen técnicas, materiales y otros ítems particulares, realizados en diferentes regiones a nivel mundial, para ser incluidos en contextos locales donde pueden coexistir tanto similitudes como diferencias con respecto a las condiciones del ecosistema donde inicialmente se implementaron las medidas restaurativas.

Los arrecifes artificiales pueden ser una solución no solo de las problemáticas asociadas con la degradación de los arrecifes naturales por actividades como la sobreexplotación pesquera

y el buceo indiscriminado, sino como elementos de protección costera, zonificación, investigación científica y educación ambiental.

Los avances en el mejoramiento de los materiales constructivos de los arrecifes artificiales contribuyen a minimizar el uso de elementos con sustancias nocivas que puedan afectar los componentes del medio marino, además de otorgar mayor durabilidad y resistencia ante las condiciones cambiantes de este.

Colombia, al tener una región de importancia mundial en biodiversidad como la Reserva de Biósfera Seaflower, declarada en el año 2000 por la UNESCO, y localizada en el Archipiélago de San Andrés y Santa Catalina, está en la obligación de proteger mediante acciones de conservación y restauración los servicios ecosistémicos que prestan los arrecifes de coral, así como el patrimonio natural y cultural.

El género *Acropora* cuenta con un número considerable de investigaciones en Colombia en proyectos de jardinería de coral con fines de restauración respecto a otros géneros de corales, esto demuestra la importancia que tiene este género en las funciones, estructura y composición de los arrecifes, y como su desaparición podría tener un efecto irreversible en estos importantes ecosistemas.

El trabajo mancomunado del sector público, la empresa privada y las comunidades locales puede traer una serie de beneficios a nivel ecológico, económico y social en relación con las actividades requeridas para planificar, ejecutar y dar seguimiento a proyectos de restauración en arrecifes de coral.

12. RECOMENDACIONES

Incentivar en Colombia la aplicación de los desarrollos con mayor relevancia a nivel mundial relacionados con la restauración de arrecifes de coral, y que pueden ser adaptados en el entorno colombiano, además alentar sobre las investigaciones en estos temas a los profesionales, estudiantes y comunidad científica de diferentes disciplinas que puedan aportar en este rubro.

Asegurarse de investigar más sobre las limitaciones e implicaciones que puede tener el uso del PVC en el desarrollo de arrecifes artificiales e instalación de guarderías de coral, dados algunos componentes (aditivos) nocivos que tienen, y que pueden llegar a afectar los organismos que habitan el medio marino en zonas de arrecifes de coral, por lo cual se recomienda acudir a materiales alternativos como el polipropileno, el concreto ecológico, el acero y materiales reciclados.

Involucrar otros géneros de corales además de *Acropora* en investigaciones colombianas sobre restauración de arrecifes de coral, ya que podrían proporcionar ventajas aún desconocidas por la ciencia relacionadas con mayor capacidad de resiliencia y recuperación de los ecosistemas arrecifales tanto a eventos cotidianos como extremos.

Se deberían realizar capacitaciones con mayor frecuencia en torno a la protección, conservación y restauración de los arrecifes de coral por parte de las comunidades involucradas que perciben directa o indirectamente sus beneficios, a través de los servicios ecosistémicos que proporcionan, en actividades como talleres educativos y de capacitación, jornadas de limpieza, en la instalación, mantenimiento y monitoreo de guarderías de coral, y posterior trasplante de colonias a arrecifes degradados, entre otros.

Colombia cuenta con herramientas que ayudan a proteger hasta cierto punto ecosistemas vulnerables a las perturbaciones naturales y antrópicas como los arrecifes de coral, sin embargo, dadas las circunstancias actuales tan apremiantes en relación a una posible desaparición de estos proveedores de servicios ecosistémicos, sería importante promover políticas más asertivas, aplicables y monitoreables que contribuyan a mitigar este fenómeno.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Abaya, L. M., Wiegner, T. N., Beets, J. P., Colbert, S. L., Carlson, K. M., & Kramer, L. (2018). Spatial distribution of sewage pollution on a Hawaiian coral reef. *Marine Pollution Bulletin*, *130*, 335-347. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.03.028
- Ajemian, M. J., Wetz, J. J., Shipley-Lozano, B., & Stunz, G. W. (2015). Rapid assessment of fish communities on submerged oil and gas platform reefs using remotely operated vehicles. *Fisheries Research*, *167*, 143-155. doi:10.1016/j.fishres.2015.02.011
- Albright, R., & Cooley, S. (2019). A review of interventions proposed to abate impacts of ocean acidification on coral reefs. *Regional Studies in Marine Science*, *29*. doi:10.1016/j.rsma.2019.100612
- Allemand, D., & Osborn, D. (2019). Ocean acidification impacts on coral reefs: From sciences to solutions. *Regional Studies in Marine Science*, *28*. doi:10.1016/j.rsma.2019.100558
- Ampou, E., Hutasoit, P., Janetski, N., Yusuf, S., Damar, A., Petta, C., & Hutahaeon, A. (2019). Implementation of coral propagation for coral reef garden in Nusa Dua, Bali. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *370*. doi:10.1088/1755-1315/370/1/012080
- Andersson, A. J., Venn, A. A., Pendleton, L., Brathwaite, A., Camp, E. F., Cooley, S., . . . Manfrino, C. (2019). Ecological and socioeconomic strategies to sustain Caribbean coral reefs in a high-CO2 world. *Regional Studies in Marine Science*, *29*. doi:10.1016/j.rsma.2019.100677
- Bayraktarov, E., Banaszak, A., Montoya, P., Kleypas, J., Arias, E., Blanco, M., . . . Garcia, S. (2020). Coral reef restoration efforts in Latin American countries and territories. doi:10.1101/2020.02.16.950998

- BBC. (25 de Agosto de 2018). *El arrecife de coral de Colombia que le da esperanzas al mundo tras sobrevivir contra todo pronóstico*. Recuperado el 5 de Enero de 2021, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45262252>
- Bedoya, M. A. (2015). *Efecto de los agregados reciclados y cenizas de carbón en la durabilidad de un mortero ecológico para su aplicación en Arrecifes Artificiales*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales, Medellín.
- Bedoya-Gutiérrez, M. A., Tobón, J. I., Correa-Herrera, T., & Correa-Rendón, J. D. (2016). Biological and physicochemical evaluation of mortar as substrate for manufacturing artificial reef. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 40, 55-63. doi:10.15446/rbct.n40.55818
- Bellwood, D. R., Pratchett, M. S., Morrison, T. H., Gurney, G. G., Hughes, T. P., Álvarez-Romero, J. G., . . . Tebbett, S. B. (2019). Coral reef conservation in the Anthropocene: Confronting spatial mismatches and prioritizing functions. *Biological Conservation*, 236, 604-615. doi:10.1016/j.biocon.2019.05.056
- Benítez-Piñeros, K. (01 de 02 de 2018). *Golfo de Morrosquillo completará 102 arrecifes artificiales gracias al Grupo Ecopetrol*. Obtenido de LA REPÚBLICA: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/golfo-de-morrosquillo-completara-102-arrecifes-artificiales-gracias-al-grupo-ecopetrol-2594699>
- Bernal, J. D. (2018). *RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE ARRECIFES DE CORAL COMO UNA HERRAMIENTA DE APROVECHAMIENTO Y MANEJO INTEGRADO DE ZONAS MARINO-COSTERAS PARA EL CARIBE COLOMBIANO*. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Bogotá.
- Bessell-Browne, P., Negri, A. P., Fisher, R., Clode, P. L., Duckworth, A., & Jones, R. (2017). Impacts of turbidity on corals: The relative importance of light limitation and suspended sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 117(2), 161-170. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.01.050
- Beyer, H., Kennedy, E., Beger, M., Chen, C., Cinner, J., Darling, E., . . . Runtz, R. (2018). Risk-sensitive planning for conserving coral reefs under rapid climate change. *Conservation Letters*, 11(17). doi:10.1111/conl.12587
- Boch, C. A., & Morse, A. N. (2012). Testing the effectiveness of direct propagation techniques for coral restoration of *Acropora* spp. *Ecological Engineering*, 40, 11-17. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.12.026
- Bradley, P., Jessup, B., Pittman, S. J., Jeffrey, C. F., Ault, J. S., Carrubba, L., . . . Smith, T. B. (2020). Development of a reef fish biological condition gradient model with quantitative decision rules for the protection and restoration of coral reef ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 159. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111387
- Buerger, P., Alvarez-Roa, C., Coppin, C. W., Pearce, S. L., Chakravarti, L. J., Oakeshott, J. G., . . . Van Oppen, M. J. (2020). Heat-evolved microalgal symbionts increase coral bleaching tolerance. *Science Advances*, 6(20). doi:10.1126/sciadv.aba2498

- Bulger, D. S., Volpe, J. P., & Fisher, J. T. (2019). Differences in fish communities on natural versus artificial temperate reefs, groundfish conservation applications in British Columbia. *Marine Environmental Research*, 152. doi:10.1016/j.marenvres.2019.104788
- Burke, L., & Maidens, J. (2005). *Reefs at Risk in the Caribbean*. World Resources Institute, Washington D.C.
- Burke, L., Reytar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2011). *Reefs at Risk Revisited*. Washington D.C.
- Burt, J., & Bauman, A. (2019). Suppressed coral settlement following mass bleaching in the southern Persian/Arabian Gulf. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23(2), 1-9. doi:10.1080/14634988.2019.1676024
- Caamal, E., Alva, C., González-González, A., Ibarra-Navarro, R., & Canul-Díaz, D. (2019). DETECCIÓN TEMPRANA DE AFECTACIONES POR PÉRDIDA DE TEJIDO EN CORALES DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA CON INFLUENCIA EN ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC, QUINTANA ROO, MÉXICO. doi:10.13140/RG.2.2.11476.04481
- Calle-Triviño, J., Cortés-Useche, C., Sellares-Blasco, R. I., & Arias-González, J. E. (2018). Assisted fertilization of threatened Staghorn Coral to complement the restoration of nurseries in Southeastern Dominican Republic. *Regional Studies in Marine Science*, 18, 129-134. doi:10.1016/j.rsma.2018.02.002
- Carral, L., Alvarez-Feal, J. C., Tarrío-Saavedra, J., Rodríguez, M. J., & Fraguera, J. Á. (2018). Social interest in developing a green modular artificial reef structure in concrete for the ecosystems of the Galician rías. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1881-1898. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.252
- Casas, D. C. (2017). *SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE ESQUEJES DE ACROPORA PALMATA EN DOS TECNICAS DE RESTAURACION, IN SITU Y EX SITU EN ISLA FUERTE (CARIBE COLOMBIANO)*. Tesis de maestría, PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES, Bogotá.
- Chamberland, V. F., Vermeij, M., Brittsan, M., Carl, M., Schick, M., Snowden, S., . . . Petersen, D. (2015). Restoration of critically endangered elkhorn coral (*Acropora palmata*) populations using larvae reared from wild-caught gametes. *Global Ecology and Conservation*, 4, 526-537. doi:10.1016/j.gecco.2015.10.005
- Chen, J.-L., Chuang, C.-T., Jan, R.-Q., Liu, L.-C., & Jan, M.-S. (2013). Recreational Benefits of Ecosystem Services on and around Artificial Reefs: A Case Study in Penghu, Taiwan. *Ocean & Coastal Management*, 85, 58-64. doi:10.1016/j.ocecoaman.2013.09.005
- Chow, M. H., Tsang, R., Lam, E., & Ang, P. (2016). Quantifying the degree of coral bleaching using digital photographic technique. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 479, 60-68. doi:10.1016/j.jembe.2016.03.003
- Coles, S. L., & Brown, B. E. (2003). Coral bleaching — capacity for acclimatization and adaptation. *Advances in Marine Biology*, 46, 183-223. doi:10.1016/S0065-2881(03)46004-5

- Collin, A., Nadaoka, K., & Bernardo, L. (2015). Mapping the Socio-Economic and Ecological Resilience of Japanese Coral Reefscapes across a Decade. *International Journal of Geo-Information*, 4, 900-927. doi:10.3390/ijgi4020900
- Comte, A., & Pendleton, L. H. (2018). Management strategies for coral reefs and people under global environmental change: 25 years of scientific research. *Journal of Environmental Management*, 209, 462-474. doi:10.1016/j.jenvman.2017.12.051
- Crabbe, C., & James, M. (2014). Evidence of initial coral community recovery at Discovery Bay on Jamaica's North Coast. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 346-349.
- Cropp, R., & Norbury, J. (2020). The potential for coral reefs to adapt to a changing climate - an eco-evolutionary modelling perspective. *Ecological Modelling*, 426. doi:10.1016/j.ecolmodel.2020.109038
- Cummings, K., Zuke, A., DeStasio, B., & Krumholz, J. (2015). Coral Growth Assessment of an Established Artificial Reef in Antigua. *Ecological Restoration*, 33(1), 90-95. doi:10.3368/er.33.1.90
- Dalton, S. J., Carroll, A. G., Sampayo, E. R., Harrison, P. L., Entwistle, K., Huang, Z., . . . Diamond, S. L. (2020). Successive marine heatwaves cause disproportionate coral bleaching during a fast phase transition from El Niño to La Niña. *Science of The Total Environment*, 715. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136951
- De la Cruz, D., Rinkevich, B., Gomez, E., & Yap, H. (2015). Assessing an abridged nursery phase for slow growing corals used in coral restoration. *Ecological Engineering*, 84, 408-415. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.09.042
- De, K., Nanajkar, M., Mote, S., & Ingole, B. (2020). Coral damage by recreational diving activities in a Marine Protected Area of India: Unaccountability leading to 'tragedy of the not so commons'. *Marine Pollution Bulletin*, 155. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111190
- Del Toro-Rivera, R. (2 de Agosto de 2001). *ARRECIFES ARTIFICIALES "Una nueva forma de conservación de ecosistemas marinos"*. Obtenido de Artificial Reefs: <https://www.artificialreefs.org/ScientificReports/artificialreefbenefitsen espanol.pdf>
- Delgadillo-G, O., & Toro, N. (2018). An integrative artificial reef project for conservation and coastal management in the Colombian Caribbean. *American Fisheries Society Symposium*, 86, 215-234.
- Delgadillo-G, O., Delgado, F., Henríquez, R., García, L., Ruiz-Álvarez, T., Zamora-Guzmán, A., . . . Perdomo-Ramos, S. (2010). Avances y desafíos del Programa Diáspora: arrecifes artificiales en el Golfo de Morrosquillo, Caribe Colombiano. *Conference: XIV Seminario de Ciencias y Tecnologías del Mar - SENALMAR*. 21, págs. 561-565. Santa Marta: Serie de Publicaciones Especiales de Invemar.
- Diaz-Castillo, M., Medinaa, L., Alvarez, F. A., Miranda, L., Romero, D., Henao-Castro, A., & Romero, D. (2014). Selección de materiales para la construcción de arrecifes artificiales. *XXVII Congreso Interamericano y Colombiano de Ingeniería Química*, (págs. 1-6). Cartagena.

- Elise, S., Urbina-Barreto, I., Pinel, R., Mahamadaly, V., Bureau, S., Penin, L., . . . Bruggemann, H. (2019). Assessing key ecosystem functions through soundscapes: A new perspective from coral reefs. *Ecological Indicators*, *107*. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105623
- Evans, R. D., Wilson, S. K., Fisher, R., Ryan, N. M., Babcock, R., Blakeway, D., . . . Thomson, D. P. (2020). Early recovery dynamics of turbid coral reefs after recurring bleaching events. *Journal of Environmental Management*, *268*. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110666
- Ferrigno, F., Bianchi, C., Lasagna, R., Morri, C., Russo, G., & Sandulli, R. (2016). Corals in high diversity reefs resist human impact. *Ecological Indicators*, *70*, 106-113. doi:10.1016/j.ecolind.2016.05.050
- Fidelman, P., McGrath, C., Newlands, M., Dobbs, K., Jago, B., & Hussey, K. (2019). Regulatory implications of coral reef restoration and adaptation under a changing climate. *Environmental Science & Policy*, *100*, 221-229. doi:10.1016/j.envsci.2019.04.016
- Fine, M., Cinar, M., Voolstra, C., Safa, A., Rinkevich, B., Laffoley, D., . . . Allemand, D. (2019). Coral reefs of the Red Sea — Challenges and potential solutions. *Regional Studies in Marine Science*, *25*. doi:10.1016/j.rsma.2018.100498
- Fonseca, V., & García, D. (2019). *Análisis geográfico de la pérdida de cobertura coralina en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo*. Trabajo de grado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Programa de Ingeniería Geográfica y Ambiental, Bogotá, D.C.
- Franke-Ante, R., Zarza, E., Cano-Correa, M., Wong-Lubo, J. A., & Hernández, E. (2014). Aportes a la consolidación de un proceso regional para la conservación de arrecifes coralinos: ensayos para la estandarización de metodologías para el repoblamiento de especies amenazadas del género *Acropora* en tres Parques Nacionales Naturales del Caribe. *Biota Colombiana*, *15*(2), 114-131.
- Froehlich, C., Garcia, A., & Kline, R. (2019). Daily movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*) on a large artificial reef. *Fisheries Research*, *209*, 49-57. doi:10.1016/j.fishres.2018.09.006
- Galvis, I., & Molina, B. (2006). *Sobrevivencia, crecimiento, salud y reclutamiento de Acropora palmata (Lamarck, 1816) y Acropora cervicornis (Lamarck, 1816) en El Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT) y en El Parque Nacional Natural Corales del Rosario en San Bernardo (PNNCRSB)*. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Biología Marina, Santa Marta.
- García, A. L. (2013). *CRÍA DE FRAGMENTOS DE ACROPORA PALMATA Y MONTASTRAEA CAVERNOSA EN UNA GUARDERÍA A MEDIA AGUA EN LA BAHÍA DE GAYRACA (PARQUE NACIONAL NATURAL TAYRONA) COMO APROXIMACIÓN HACIA LA RESTAURACIÓN CORALINA*. Trabajo de grado, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Bogotá.

- Garzón-Ferreira, J., & Pinzón, J. H. (1999). EVALUACION RAPIDA DE ESTRUCTURA Y SALUD DE LAS FORMACIONES CORALINAS DE LA ISLA DE MALPELO (PACIFICO COLOMBIANO). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 28(1), 137-154.
- Gil-Agudelo, D. L., Navas-Camacho, R., Rodríguez-Ramírez, A., Reyes-Nivia, M. C., Bejarano, S., Garzón-Ferreira, J., & Smith, G. W. (2009). ENFERMEDADES CORALINAS Y SU INVESTIGACIÓN EN LOS ARRECIFES COLOMBIANOS. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 38(2), 189-224.
- Giraldo, A. (2007). *Estado actual de los corales Acropora cervicornis (Lamarck,1816), Acropora palmata (Lamarck,1816) y Diploria labyrinthiformis (Linnaeus, 1758) en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo*. Trabajo de grado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Biología Marina, Bogotá D.C.
- Glynn, P. W. (1990). Coral Mortality and Disturbances to Coral Reefs in the Tropical Eastern Pacific. *Elsevier Oceanography Series*, 52, 55-126. doi:10.1016/S0422-9894(08)70033-3
- Gómez-Cubillos, C., Licero, L., Perdomo, L., Rodríguez, A., Romero, D., Ballesteros-Contreras, D., . . . Ricaurte, C. (2015). *Portafolio "Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia"*. INVEMAR-MADS. Santa Marta: Serie de Publicaciones Generales del Invemar No.79.
- Graham, N., Cinner, J. E., Norström, A. V., & Nyström, M. (2014). Coral reefs as novel ecosystems: embracing new futures. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 9-14. doi:10.1016/j.cosust.2013.11.023
- Gurney, G. G., Darling, E. S., Jupiter, S. D., Mangubhai, S., McClanahan, T. R., Lestari, P., . . . Holmes, K. E. (2019). Implementing a social-ecological systems framework for conservation monitoring: lessons from a multi-country coral reef program. *Biological Conservation*, 240. doi:10.1016/j.biocon.2019.108298
- Hall, E. R., DeGroot, B. C., & Fine, M. (2015). Lesion recovery of two scleractinian corals under low pH conditions: Implications for restoration efforts. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 321-326. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.08.030
- Hall-Spencer, J., Milazzo, M., Agostini, S., & Harvey, B. (2018). Ocean acidification drives community shifts towards simplified non-calcified habitats in a subtropical-temperate transition zone. *Scientific Reports*, 8(1). doi:10.1038/s41598-018-29251-7
- Hattam, C., Evans, L., Morrissey, K., Hooper, T., Young, K., Khalid, F., . . . Hughes, A. (2020). Building resilience in practice to support coral communities in the Western Indian Ocean. *Environmental Science & Policy*, 106, 182-190. doi:10.1016/j.envsci.2020.02.006
- Hernández, A. J., Urcelay, A., & Pastor, J. (2002). Evaluación de la resiliencia en ecosistemas terrestres degradados encaminada a la restauración ecológica. En U. d. Valencia (Ed.), *II Reunión Española de Ciencia de Sistemas RECS II*, (págs. 1-8).
- Hernández-Delgado, E. A., Montañez-Acuña, A., Otaño-Cruz, A., & Suleimán-Ramos, S. E. (2014). Bomb-cratered coral reefs in Puerto Rico, the untold story about a novel habitat: from reef

- destruction to community-based ecological rehabilitation. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 350-367.
- Hershberger, S. (2020). Nueva prueba de estrés para el coral. *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, 10. Obtenido de <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/los-reyes-del-bosque-809/nueva-prueba-de-estrés-para-el-coral-19046>
- Hesley, D., Burdeno, D., Drury, C., Schopmeyer, S., & Lirman, D. (2017). Citizen science benefits coral reef restoration activities. *Journal for Nature Conservation*, 40, 94-99. doi:10.1016/j.jnc.2017.09.001
- Hilmi, N., Osborn, D., Acar, S., Bambridge, T., Chlous, F., Cinar, M., . . . Pascal, N. (2019). Socio-economic tools to mitigate the impacts of ocean acidification on economies and communities reliant on coral reefs — a framework for prioritization. *Regional Studies in Marine Science*, 28. doi:10.1016/j.rsma.2019.100559
- Hilmi, N., Safa, A., Sumalia, U. R., & Cinar, M. C. (2017). Coral reefs management and decision making tools. *Ocean & Coastal Management*, 146, 60-66. doi:10.1016/j.ocecoaman.2017.06.006
- Hoegh-Guldberg, O., Kennedy, E., Beyer, H. L., McClennen, C., & Possingham, H. P. (2018). Securing a Long-term Future for Coral Reefs. *Trends in Ecology & Evolution*, 33(12), 936-944. doi:10.1016/j.tree.2018.09.006
- Hoegh-Guldberg, O., Pendleton, L., & Kaup, A. (2019). People and the changing nature of coral reefs. *Regional Studies in Marine Science*, 30. doi:10.1016/j.rsma.2019.100699
- Hooker, Y., & Gonzales, A. (2012). Las plataformas petroleras (Tumbes, Perú) como centros de biodiversidad y conservación de especies amenazadas y recursos hidrobiológicos. En J. Blanco (Ed.), *Plataformas petroleras marinas como arrecifes artificiales y su implicancia en la pesca artesanal en la zona de Tumbes* (pág. 171).
- Horoszowski-Fridman, Y. B., Izhaki, I., & Rinkevich, B. (2011). Engineering of coral reef larval supply through transplantation of nursery-farmed gravid colonies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 399(2), 162-166. doi:10.1016/j.jembe.2011.01.005
- Horoszowski-Fridman, Y., Brêthes, J. C., Rahmani, N., & Rinkevich, B. (2015). Marine silviculture: Incorporating ecosystem engineering properties into reef restoration acts. *Ecological Engineering*, 82, 201-213. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.04.104
- Huang, W., Chen, M., Song, B., Deng, J., Shen, M., Chen, Q., . . . Liang, J. (2020). Microplastics in the coral reefs and their potential impacts on corals: A mini-review. *Science of The Total Environment*. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143112
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B., . . . Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546, 82-90. doi:10.1038/nature22901

- IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA. (2017). *Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC)*. Bogotá D.C.
- Intel. (4 de Abril de 2020). *Usando la Inteligencia Artificial para salvar arrecifes de corales*. Recuperado el 27 de diciembre de 2020, de <https://newsroom.intel.la/news/usando-la-inteligencia-artificial-para-salvar-arrecifes-de-corales/#gs.qy6fbk>
- Islam, G., Noh, K., Sidique, S., & Noh, A. (2014). Economic impact of artificial reefs: A case study of small scale fishers in Terengganu, Peninsular Malaysia. *Fisheries Research*, *151*, 122-129. doi:10.1016/j.fishres.2013.10.018
- Ivanov, V., & Stabnikov, V. (2017). Calcite/aragonite-biocoated artificial coral reefs for marine parks. *AIMS Environmental Science*, *4*(4), 586-595. doi:10.3934/environsci.2017.4.586
- Jaramillo-González, J., & Acosta, A. (2009). COMPARACIÓN TEMPORAL EN LA ESTRUCTURA DE UNA COMUNIDAD CORALINA EN PRIMEROS ESTADOS DE SUCESIÓN, ISLA DE SAN ANDRÉS, COLOMBIA. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, *38*(2), 29-53.
- Jiang, Z., Liang, Z., Zhu, L., Guo, Z., & Tang, Y. (2020). Effect of hole diameter of rotary-shaped artificial reef on flow field. *Ocean Engineering*, *197*. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.106917
- Kennington, R. (2018). Science and the management of coral reefs. *Marine Pollution Bulletin*, *136*, 508-515. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.09.046
- Kirk, N., Howells, E., Abrego, D., Burt, J., & Meyer, E. (2018). Genomic and transcriptomic signals of thermal tolerance in heat-tolerant corals (*Platygyra daedalea*) of the Arabian/Persian Gulf. *Molecular Ecology*, *27*(24). doi:10.1111/mec.14934
- Komyakov, V., & Swearer, S. E. (2019). Contrasting patterns in habitat selection and recruitment of temperate reef fishes among natural and artificial reefs. *Marine Environmental Research*, *143*, 71–81. doi:10.1016/j.marenvres.2018.11.005
- Komyakova, V., Chamberlain, D., Jones, G. P., & Swearer, S. E. (2019). Assessing the performance of artificial reefs as substitute habitat for temperate reef fishes: Implications for reef design and placement. *Science of The Total Environment*, *668*, 139-152. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.357
- Lacambra, C., Lozano, C., Alonso, D., & Fontalvo, M. (2003). *Amenazas naturales y antrópicas en las zonas costeras colombianas*. Serie de documentos generales de INVEMAR No. 15.
- Ladd, M. C., & Shantz, A. A. (2020). Trophic interactions in coral reef restoration: A review. *Food Webs*, *24*. doi:10.1016/j.fooweb.2020.e00149
- Lam, V. W., Chavanich, S., Djoundourian, S., Dupont, S., Gaill, F., Holzer, G., . . . Hall-Spencer, J. M. (2019). Dealing with the effects of ocean acidification on coral reefs in the Indian Ocean and Asia. *Regional Studies in Marine Science*, *28*. doi:10.1016/j.rsma.2019.100560

- Lebrec, M., Stefanski, S., Gates, R., Acar, S., Golbuu, Y., Claudel-Rusin, A., . . . Swarzenski, P. W. (2019). Ocean acidification impacts in select Pacific Basin coral reef ecosystems. *Regional Studies in Marine Science*, 28. doi:10.1016/j.rsma.2019.100584
- Lee, M. O., Otake, S., & Kim, J. K. (2018). Transition of artificial reefs (ARs) research and its prospects. *Ocean & Coastal Management*, 154, 55-65. doi:doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.010
- Leenhardt, P., Stelzenmüller, V., Pascal, N., Nikolaus, W., Aubanel, A., Bambridge, T., . . . Claudet, J. (2017). Exploring social-ecological dynamics of a coral reef resource system using participatory modeling and empirical data. *Marine Policy*, 78, 90-97. doi:10.1016/j.marpol.2017.01.014
- Linden, B., Vermeij, M. J., & Rinkevich, B. (2019). The coral settlement box: A simple device to produce coral stock from brooded coral larvae entirely in situ. *Ecological Engineering*, 132, 115-119. doi:10.1016/j.ecoleng.2019.04.012
- Lionel, C. S., Huang, D., Toh, K. B., Sam, S. Q., Kikuzawa, Y. P., Toh, T. C., . . . Kee, N. (2020). Responses of urban reef corals during the 2016 mass bleaching event,. *Marine Pollution Bulletin*, 154. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111111
- Lionel, C. S., Toh, T. C., & Chou, L. M. (2016). Coral restoration in Singapore's sediment-challenged sea. *Regional Studies in Marine Science*, 8(3), 422-429. doi:10.1016/j.rsma.2016.05.005
- Liu, G., Li, W.-T., & Zhanga, X. (2017). Assessment of the benthic macrofauna in an artificial shell reef zone in Shuangdao Bay, Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 114, 778-785. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.11.004
- López, I., Tinoco, H., Aragonés, L., & García-Barba, J. (2016). The multifunctional artificial reef and its role in the defence of the Mediterranean coast. *Science of The Total Environment*, 550, 910-923. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.180
- Luque, A., Falcón, M., Ramos, A., Sosa, P. A., & Martínez, E. (2001). Arrecifes artificiales y pecios. En *Plan Insular de Ordenación de Gran Canaria*.
- Ly, O., Yoris-Nobile, A., Sebaibi, N., Blanco-Fernandez, E., Boutouil, M., Castro-Fresno, D., . . . Sousa-Pinto, I. (2021). Optimisation of 3D printed concrete for artificial reefs: Biofouling and mechanical analysis. *Construction and Building Materials*, 272. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121649
- Madin, J. ., Hoogenboom, M. O., Connolly, S. R., Darling, E. S., Falster, D. S., Huang, D., . . . Baird, A. H. (2016). A Trait-Based Approach to Advance Coral Reef Science. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 419-428. doi:10.1016/j.tree.2016.02.012
- Manjarrés, O. M. (2018). *Acropora palmata, valoración ecológica en dos sistemas contrastantes en el Caribe colombiano*. Trabajo de grado, Universidad Magdalena, Facultad de Ciencias Básicas, Santa Marta.
- McClanahan, T. R. (2020). Wilderness and conservation policies needed to avoid a coral reef fisheries crisis. *Marine Policy*, 119. doi:10.1016/j.marpol.2020.104022

- McLeod, E., Anthony, K. R., Mumby, P. J., Maynard, J., Beeden, R., Graham, N. A., . . . Marshall, P. (2019). The future of resilience-based management in coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 233, 291-301. doi:10.1016/j.jenvman.2018.11.034
- McLeod, E., Shaver, C. E., Beger, M., Koss, J., & Grimsditch, G. (2020). Using resilience assessments to inform the management and conservation of coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 277. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111384
- Ministerio de Medio Ambiente-Gobierno de España. (2008). *Guía Metodológica para la Instalación de Arrecifes Artificiales*. (C. d. Ambiente, Ed.)
- MoAm. (2015). *Arrecifes artificiales en la Bahía de Pozos Colorados. Biodiversidad, conservación y fortalecimiento socio-económico*. Publicación Institucional, Acuerdo de Cooperación No 002 Ecopetrol, Universidad del Magdalena, MoAm Monitoreos Ambientales, Santa Marta.
- MONGABAY. (13 de Diciembre de 2018). *Colombia: trasplantes masivos de corales podrían restaurar la cobertura coralina muerta del Caribe*. Recuperado el 5 de Enero de 2021, de <https://es.mongabay.com/2018/12/oceanos-trasplante-de-corales-en-el-caribe/>
- Morell, M., & Torres, J. (2019). *Cultivo "ex situ" para la restauración de arrecifes de coral del género Pocillopora (Bahía Culebra, Costa Rica)*. Trabajo de grado, Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir, Facultad de Veterinaria y Ciencias Experimentales, Valencia.
- Moriarty, T., Leggat, W., Huggett, M., & Ainsworth, T. (2020). Coral Disease Causes, Consequences, and Risk within Coral Restoration. *Trends in Microbiology*. doi:10.1016/j.tim.2020.06.002
- Morrison, T. H., Adger, N., Barnett, J., Brown, K., Possingham, H., & Hughes, T. (2020). Advancing Coral Reef Governance into the Anthropocene. *One Earth*, 2(1), 64-74. doi:10.1016/j.oneear.2019.12.014
- Muallil, R. N., Deocadez, M. R., Martinez, R. J., Campos, W. L., Mamauag, S. S., Nañola, C. L., & Aliño, P. M. (2019). Effectiveness of small locally-managed marine protected areas for coral reef fisheries management in the Philippines. *Ocean & Coastal Management*, 179. doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.104831
- Muller, E. M., Sartor, C., Alcaraz, N. I., & van Woesik, R. (2020). Spatial Epidemiology of the Stony-Coral-Tissue-Loss Disease in Florida. *Frontiers in Marine Science*, 7, 163. doi:10.3389/fmars.2020.00163
- Muñiz, C. G., & Gio, F. R. (2016). Conservación y restauración en arrecifes de coral. *CIENCIAS*, 60-71.
- Muñoz, C. G., Jaramillo-González, J., & Zapata, F. A. (2018). Evidencia de reclutamiento coralino producto de reproducción sexual, en Isla Gorgona, Pacífico Tropical Oriental. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 47(2), 97-110. doi:10.25268/bimc.invemar.2018.47.2.749
- Nanajkar, M., De, K., & Ingole, B. (2019). Coral reef restoration - A way forward to offset the coastal development impacts on Indian coral reefs. *Marine Pollution Bulletin*, 149. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110504

- Narciso-Ortiz, L., Vargas-García, K., Vázquez-Larios, A., Quiñones-Muñoz, T., Hernández-Martínez, R., & Lizardi-Jiménez, M. (2020). Coral reefs and watersheds of the Gulf of Mexico in Veracruz: Hydrocarbon pollution data and bioremediation proposal. *Regional Studies in Marine Science*, 35. doi:10.1016/j.rsma.2020.101155
- O'Donnell, K. E., Lohr, K. E., Bartels, E., & Patterson, J. T. (2017). Evaluation of staghorn coral (*Acropora cervicornis*, Lamarck 1816) production techniques in an ocean-based nursery with consideration of coral genotype. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 53-58. doi:10.1016/j.jembe.2016.11.013
- Paradis, B. T., Henry, R. P., & Chadwick, N. E. (2019). Compound effects of thermal stress and tissue abrasion on photosynthesis and respiration in the reef-building coral *Acropora cervicornis* (Lamarck, 1816). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 521. doi:10.1016/j.jembe.2019.151222
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (31 de Octubre de 2019). *Avanza el proyecto de reproducción sexual y cría de larvas de corales en el Parque Nacional Natural Los Corales del Rosario y de San Bernardo*. Recuperado el 12 de 1 de 2021, de <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/avanza-el-proyecto-de-reproduccion-sexual-y-cria-de-larvas-de-corales-en-el-parque-nacional-natural-los-corales-del-rosario-y-de-san-bernardo/>
- Patterson, J., Jeyasanta, K. I., Sathish, N., Patterson, J., & Booth, A. M. (2020). Microplastic and heavy metal distributions in an Indian coral reef ecosystem. *Science of The Total Environment*, 744. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140706
- Patti, T. B., Fobert, E. K., Reeves, S. E., & Da Silva, K. B. (2020). Spatial distribution of microplastics around an inhabited coral island in the Maldives, Indian Ocean. *Science of The Total Environment*, 748. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141263
- Paxton, A. B., Shertzer, K. W., Bacheler, N. M., Kellison, G. T., Riley, K. L., & Taylor, J. C. (2020). Meta-Analysis Reveals Artificial Reefs Can Be Effective Tools for Fish Community Enhancement but Are Not One-Size-Fits-All. *Frontiers in Marine Science*, 7, 282. doi:10.3389/fmars.2020.00282
- Pinilla, G. G., & Ulloa, G. (2007). *Efectos ecológicos de la derivación de aguas y sedimentos hacia la bahía de Barbacoas*. Convenio Interadministrativo. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/3490/1/Estudio_Ecol%C3%B3gico_de_la_derivaci%C3%B3n_de_aguas_y_sedimentos_del_Canal_del_Dique_hacia_la_bah%C3%ADa_de_Barbacoas.pdf
- Pratchett, M. S., Hoey, A. S., & Wilson, S. K. (2014). Reef degradation and the loss of critical ecosystem goods and services provided by coral reef fishes. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 37-43. doi:10.1016/j.cosust.2013.11.022
- Rachmilovitz, E. N., & Rinkevich, B. (2017). Tiling the reef – Exploring the first step of an ecological engineering tool that may promote phase-shift reversals in coral reefs. *Ecological Engineering*, 105, 150-161. doi:10.1016/j.ecoleng.2017.04.038

- Ramos, A. A. (2002). Arrecifes artificiales como medidas de restauración de hábitats marinos costeros. . *Ecosistemas*.
- Reeds, K. A., Smith, J. A., Suthers, I. M., & Johnston, E. L. (2018). An ecological halo surrounding a large offshore artificial reef: Sediments, infauna, and fish foraging. *Marine Environmental Research*, 141, 30-38. doi:10.1016/j.marenvres.2018.07.011
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P., & Wilke, T. (2018). Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution*, 237, 955-960. doi:10.1016/j.envpol.2017.11.006
- Riera, E., Lamy, D., Goulard, C., Francour, P., & Hubas, C. (2018). Biofilm monitoring as a tool to assess the efficiency of artificial reefs as substrates: Toward 3D printed reefs. *Ecological Engineering*, 120, 230-237. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.06.005
- Rinkevich, B. (2014). Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead to sustainable reefs? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 28-36. doi:10.1016/j.cosust.2013.11.018
- Rodríguez, L. S. (2018). *Evaluación del cultivo y trasplante de fragmentos del coral Acropora palmata provenientes de guarderías en el Parque Nacional Corales del Rosario y San Bernardo*. Tesis de maestría, Universidad del Magdalena, Facultad de Ingeniería.
- Rodriguez-Rincón, A., Navarrete-Ramirez, S., Gómez-López, D., & Navas-Camacho, R. (2014). *Protocolo Indicador Condición Tendencia Áreas Coralinas (ICTAC). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Invemar, GEF y PNUD. Santa Marta: Serie de Publicaciones Generales del Invemar No 66.
- Roff, G., & Mumby, P. J. (2012). Global disparity in the resilience of coral reefs. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(7), 404-413. doi:10.1016/j.tree.2012.04.007
- Rojas-Higuera, P. J., & Pabón-Caicedo, J. D. (2015). Sobre el calentamiento y la acidificación del océano mundial y su posible expresión en el medio marino costero colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(151), 201-217. doi:10.18257/raccefyn.135
- Romero, Y. (2018). EFECTO DE LA SEDIMENTACION EN EL DESARROLLO DE LOS ARRECIFES CORALINOS. *Revista de Investigación Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 42-49.
- Ross, A. M. (2014). Genet and reef position effects in out-planting of nursery-grown *Acropora cervicornis* (Scleractinia:Acroporidae) in Montego Bay, Jamaica. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 318-329.
- Sánchez, A., Valiente, J., & Valiente, G. (2018). Metrópolis de arrecifes. Geopolítica del urbanismo submarino surcoreano. *ARQ (Santiago)*(99), 60-69. doi:10.4067/S0717-69962018000200060
- Sánchez, G., Mendoza, E., & Silva, R. (2015). Análisis numérico de piezas modulares para fabricar arrecifes artificiales. *IX Congreso Internacional de la Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera A.C.* Veracruz.

- Sanjuan, L. (2016). *Valoración Económica de la Conservación de Arrecifes Coralinos Enfocada en los Jóvenes*. Trabajo de grado, Univerisdad de los Andes, Bogotá.
- Santander, L., & Propin, E. (2009). Impactos ambientales del turismo de buceo en arrecifes artificiales. *Cuadernos de Turismo*, 24, 208 - 222.
- Schlüter, A., Vance, C., & Ferse, S. (2020). Coral reefs and the slow emergence of institutional structures for a glocal land- and sea-based collective dilemma. *Marine Policy*, 112. doi:10.1016/j.marpol.2019.04.009
- SEMANA. (8 de Febrero de 2018). *SEMANA SOSTENIBLE*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de La milagrosa supervivencia de los corales de Varadero en la bahía de Cartagena: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/cartagena-corales-de-varadero/41248>
- Shaish, L., Levy, G., Katzir, G., & Rinkevich, B. (2010). Employing a highly fragmented, weedy coral species in reef restoration. *Ecological Engineering*, 36(10), 1424-1432. doi:10.1016/j.ecoleng.2010.06.022
- Sharma, D., & Ravindran, C. (2020). Diseases and pathogens of marine invertebrate corals in Indian reefs. *Journal of Invertebrate Pathology*, 173. doi:10.1016/j.jip.2020.107373
- Silva, J., Antunes, C., Madeira, A. P., & Rosental, I. (2018). Artisanal fisheries and artificial reefs on the southeast coast of Brazil: Contributions to research and management. *Ocean & Coastal Management*, 163, 372-382. doi:10.1016/j.ocecoaman.2018.07.018
- Silva, J., Juliano, I., & Love, M. (2019). Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs. *Marine Environmental Research*, 145, 81-96. doi:10.1016/j.marenvres.2019.01.010
- Sisney, M. A., Cummins, R. H., & Wolfe, C. R. (2018). Incidence of black band disease, brown band disease, and white syndrome in branching corals on the Great Barrier Reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 214, 1-9. doi:10.1016/j.ecss.2018.09.005
- Smith, E., Hume, B., Delaney, P., Wiedenmann, J., & Burt, J. (2017). Genetic structure of coral-Symbiodinium symbioses on the world's warmest reefs. *PLoS ONE*, 12(6). doi:10.1371/journal.pone.0180169
- Solano, O. D. (1994). CORALES, FORMACIONES ARRECIFALES Y BLANQUEAMIENTO DE 1987 EN BAHÍA PORTETE (GUAJIRA, COLOMBIA). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 23(1), 149-163.
- Speare, K. E., Duran, A., Miller, M. W., & Burkepile, D. E. (2019). Sediment associated with algal turfs inhibits the settlement of two endangered coral species. *Marine Pollution Bulletin*, 144, 189-195. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.04.066
- Subhan, B., Hudhayani, N., Ervina, A., Santoso, P., Arafat, D., Khairudi, D., . . . Madduppa, H. (2019). Coral recruitment on concrete blocks at Gosong Pramuka, Kepulauan Seribu, Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 404. doi:10.1088/1755-1315/404/1/012045

- Susilo, E., Purwanti, P., & Fattah, M. (2017). ANALYSIS ON ECONOMICAL AND ECOLOGICAL POTENTIAL BENEFITS OF ARTIFICIAL CORAL REEFS PLANTING ACTIVITIES. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 72(12), 268-273. doi:10.18551/rjoas.2017-12.37
- Tan, F., Yang, H., Xu, X., Fang, Z., Xu, H. S., Zhang, X., . . . Hengxiang, L. (2020). Microplastic pollution around remote uninhabited coral reefs of Nansha Islands, South China Sea. *Science of The Total Environment*, 725. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138383
- Thompson, A., Martin, K., & Logan, M. (2020). Development of the coral index, a summary of coral reef resilience as a guide for management. *Journal of Environmental Management*, 271. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111038
- Tortolero-Langarica, J., Rodríguez-Troncoso, A., Cupul-Magaña, A., Alarcón-Ortega, L., & Santiago-Valentín, J. D. (2019). Accelerated recovery of calcium carbonate production in coral reefs using low-tech ecological restoration. *Ecological Engineering*, 128, 89-97. doi:10.1016/j.ecoleng.2019.01.002
- Tynyakov, J., Rousseau, M., Chen, M., Figus, O., Belhassen, Y., & Shashar, N. (2017). Artificial reefs as a means of spreading diving pressure in a coral reef. *Ocean & Coastal Management*, 149, 159-164. doi:10.1016/j.ocecoaman.2017.10.008
- Universidad Jorge Tadeo Lozano. (13 de Febrero de 2015). *Dos patentes de Modelo de Utilidad han sido concedidas a Utadeo*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/home/1/dos-patentes-de-modelo-de-utilidad-han-sido-concedidas-utadeo>
- Universidad Jorge Tadeo Lozano. (2 de Febrero de 2019). *SIC otorga dos patentes a Utadeo por dispositivos que ayudan a la conservación y estudio de los corales*. Recuperado el 4 de Enero de 2021, de <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/expeditio/264566/sic-otorga-dos-patentes-utadeo-por-dispositivos-que-ayudan-la-conservacion-y-estudio-de-los-corales>
- Vanguardia. (5 de Octubre de 2017). *En San Andrés siembran corales para restaurar sus arrecifes*. Obtenido de <https://www.vanguardia.com/colombia/en-san-andres-siembran-corales-para-restaurar-sus-arrecifes-AGVL411717>
- Vega, J., Bernal, G., & Zea, S. (2017). EFECTOS DE EVENTOS OCEÁNICOS EXTREMOS EN FORMACIONES CORALINAS DE ISLAS DEL ROSARIO, CARIBE COLOMBIANO Effect of extreme oceanic events in the coral formations of Islas del Rosario, Colombian Caribbean. *CICIMAR Océánides*, 32(1), 25-38.
- Vogler, V. (2018). *Geometry studies of artificial coral reefs (Studien zur Geometrie von künstlichen Korallenriffen in der Balisee)*. Tesis doctoral, Múnich.
- Weil, E., Hernández-Delgado, E., Gonzalez, M., Williams, S., Suleimán-Ramos, S., Figuerola, M., & Metz-Estrella, T. (2019). Spread of the new coral disease "SCTLD" into the Caribbean: implications for Puerto Rico. *REEF ENCOUNTER* , 34(1), 38-43.

- Werner, C., Félix-Hackradt, F., & García-Charton, J. A. (2011). Influence of habitat structure on fish assemblage of an artificial reef in southern. *Marine Environmental Research*, 72, 235-247. doi:10.1016/j.marenvres.2011.09.006
- Williams, D. E., Miller, M. W., Bright, A. J., Pausch, R. E., & Valdivia, A. (2017). Thermal stress exposure, bleaching response, and mortality in the threatened coral *Acropora palmata*. *Marine Pollution Bulletin*, 124(1), 189-197. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.07.001
- Wu, Z., Tweedley, J. R., Loneragan, N. R., & Zhang, X. (2019). Artificial reefs can mimic natural habitats for fish and macroinvertebrates in temperate coastal waters of the Yellow Sea. *Ecological Engineering*, 139. doi:10.1016/j.ecoleng.2019.08.009
- Yang, Y., Ji, T., Lin, X., Chen, C., & Yang, Z. (2018). Biogenic sulfuric acid corrosion resistance of new artificial reef concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 33–41. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.007
- Yu, Y., Chen, P., Tang, D., & Qin, C. (2015). Ecological effects of artificial reefs in Daya Bay of China observed from satellite and in situ measurements. *Advances in Space Research*, 55(9), 2315-2324. doi:10.1016/j.asr.2015.02.001
- Yun, D.-H., & Kim, Y.-T. (2018). Experimental study on settlement and scour characteristics of artificial reef with different reinforcement type and soil type. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(4), 48-454. doi:10.1016/j.geotexmem.2018.04.005
- Zárate, J. C., Jáuregui, G. A., & Rojas, J. A. (2019). Evaluación de morfotipos de coral *Acropora cervicornis* en guarderías colgantes para restauración. *Revista Mutis*, 9(1), 9-19. doi:10.21789/22561498.1452