Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en CIENCIAS DEL AGUA

EVALUACIÓN DE LA ICTIOFAUNA ASOCIADA A ARRECIFES ARTIFICIALES EN EL PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN Y PUNTA NIZUC, QUINTANA ROO, MÉXICO

Tesis que presenta

YASMÍN GONZÁLEZ REYES

En opción al título de

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se regirán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Yasmín González Reyes

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA

RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Yasmín González Reyes titulado "**Evaluación de la ictiofauna asociada a arrecifes artificiales en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, Quintana Roo, México"** fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la Línea de Sostenibilidad de Ecosistemas Acuáticos, en el Laboratorio de Ecología y Biodiversidad de Organismos Acuáticos del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. José Adán Caballero Vázquez, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente

Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México, a 19 de octubre, 2022

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de esta investigación (Número de becario: 1035097).

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán CICY, Unidad de Ciencias del Agua y al Laboratorio de Laboratorio de Ecología y Biodiversidad de Organismos Acuáticos (LEBOA) por la formación y apoyo brindado en la realización de mi tesis.

Al Dr. José Adán Caballero Vázquez por aceptar dirigir mi tesis, apoyo, enseñanzas y oportunidades que me brindó a lo largo del trabajo de investigación.

Al Dr. Juan Jacobo Schmitter Soto por aceptar ser mi revisor, por su tiempo y sugerencias que fueron fundamentales para este trabajo de investigación.

Al Dr. Gilberto Acosta González, por sus aportaciones en el documento de investigación.

Al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa por las revisiones a lo largo del trabajo de investigación.

A la Dra. Jazmín Deneb Ortigosa por aceptar ser mi asesora y su tiempo dedicado.

Al Dr. Antonio Almazán por sus consejos y enseñanzas a lo largo de la maestría.

Al personal técnico académico del CICY, el M. en C. Jorge Peniche por todo su apoyo, enseñanzas y ayuda en la identificación de peces y el M. en C. Benjamín Delgado (Gino) por su apoyo en las salidas de campo. Les agradezco su tiempo y valiosos consejos que me brindaron a lo largo de la maestría.

Al personal del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc que fue fundamental para la realización de esta investigación. A José Arturo González González, Bernardo Elías Caamal Madrigal, Donny Esteban Canul Díaz y Esteban Roberto Ibarra Navarro. Les agradezco su apoyo y logística en las actividades de campo.

A mis compañeros y amigos de maestría por todo su apoyo durante el proceso, Dino, Brianda, Juan Carlos, Andrés, Gerry, Yessenia, José Carlos y Jaime.

A toda mi familia y amigos, especialmente a mi mamá, hermana, tía Martha, abuelos Sabina y Ramón por su apoyo incondicional durante todas las etapas de mi vida.

A Beto, Hachi, Haru y Grumpy que nunca me dejaron sola durante todo el proceso, sin ustedes nunca hubiera logrado esta meta.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mi mamá y mi abuelita. A pesar de la distancia siempre estuvieron presentes en todos mis pensamientos.

A la mar por ayudarme a sanar.

Índice de Tablas

Tabla 1.3 Características cualitativas y cuantitativas de los arrecifes artificiales presentes en el Parque Nacional. 23

Tabla 2.3 Lista sistemática con la abundancia y gremios tróficos (GR) de los peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional. 24

Tabla 3.3 Gremios tróficos presentes en arrecifes artificiales del Parque Nacional 31

Tabla 4.3 Gremios presentes por tipo de arrecife artificial en el Parque Nacional 33

Tabla 5.3 Índices ecológicos de equidad, diversidad de Shannon-Wiener y riqueza obtenido en los sitios de estudio. 35

Tabla 6.3 Similitud entre los arrecifes artificiales del Parque Nacional 35

Tabla 7.3 Cobertura por grupo morfo funcional en los arrecifes artificiales del Parque Nacional. 36

Tabla 8.3 Porcentajes de los tipos de sustrato presentes en los arrecifes artificiales del Parque Nacional. 39

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de arrecifes (modificado de Santamaría-Reyes *et al*., 2019). 2
Figura 2. Diferentes estructuras utilizadas para el diseño y construcción de arrecifes artificiales (tomado de Lemoine *et al*., 2019). 2
Figura 3.2 Ubicación de la zona de estudio, Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (tomado de CONANP, 2016). 10
Figura 4.2 Ubicación de los arrecifes artificiales dentro del Parque Nacional. 12
Figura 5.2 Disposición de cuadrante sobre arrecife artificial. 14
Figura 6.3 Esquematización de los diferentes tipos de arrecifes artificiales presentes en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. 18
Figura 7.3 Sitios de refugio para peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional y evidencia de alimentación de peces. 19
Figura 8.3 Zona de viveros para reproducción de corales en la zona de Isla Mujeres 19
Figura 9.3 Vista superior del Museo Subacuático en Isla Mujeres. 20
Figura 10.3 Sitio de Reef ball © con presencia de *Acropora cervicornis* en Sac Bajo. 20
Figura 11.3 Pez ángel reina *Holacanthus ciliaris* buscando refugio dentro de un Reef Ball ©. 21
Figura 12.3 Casco del buque cañonero C-55 “Juan de la Barrera” 21
Figura 13.3 Barco hundido en Isla Mujeres 22
Figura 14.3 Barco hundido en Punta Sam. 23
Figura 15.3 Especies con mayor abundancia en los sitios del Parque Nacional. 29
Figura 17.3 Análisis de Correspondencia Múltiple Gremios vs Tipos de arrecife artificial (AA). 31
Figura 18.3 Dendograma para la clasificación de ocho arrecifes artificiales con base en los registros de abundancia de la ictiofauna presente. 32
Figura 19.3. Análisis de Correspondencia Múltiple para Gremios vs Tipos de arrecife artificial (AA). 33
Figura 20.3 Análisis de Correspondencia Múltiple para Gremios vs Tipos de arrecife artificial (AA). 34
Figura 21.3 Grupos morfo funcionales en los arrecifes artificiales del Parque Nacional. 36
Figura 22.3. Cobertura de sustrato desnudo en los sitios del Parque Nacional. 37
Figura 23.3 Cobertura de algas en los sitios del Parque Nacional 37
Figura 24.3 Cobertura de otros invertebrados en los sitios del Parque Nacional. 38
Figura 25.3 Cobertura de corales en los sitios del Parque Nacional. 38
Figura 26.3 Diversidad de Shannon en función del porcentaje de cobertura de cada tipo de grupo morfo funcional. 39
Figura 27.3 Figura del índice de diversidad Shannon-Wiener vs tipo de sustrato. 40

Índice general

INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO 1 4
ANTECEDENTES 4
Justificación 8
Hipótesis 8
Objetivo general 8
Objetivos particulares 9
CAPÍTULO 2 10
ÁREA DE ESTUDIO 10
Materiales y métodos 13
CAPÍTULO 3 18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 18
Discusión 40
Conclusiones 49
Recomendaciones 49
Bibliografía 50

Resumen

En los últimos años se han implementado estrategias para mitigar el impacto que existe sobre los arrecifes de coral, una de ellas es la instalación de arrecifes artificiales, los cuales influyen positivamente sobre procesos físicos, biológicos y socioeconómicos. Sin embargo, a pesar de los beneficios que proporcionan son pocos los estudios que presentan una descripción detallada de su composición y fauna asociada. En la presente investigación se determina la composición y abundancia de la ictiofauna asociada a arrecifes artificiales en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, realizando un muestreo en cada sitio, con un total de ocho muestreos en el periodo marzo 2021-marzo 2022. Para la obtención de datos se empleó la técnica de buzo errante, la cual consiste en nadar de forma aleatoria por el sitio durante 45 min. Se determinaron los principales descriptores ecológicos: riqueza Margalef (D'), diversidad Shannon-Wiener (H') y equidad Pielou (J). Adicionalmente se realizó un Análisis de Correspondencia Múltiple (ACM) para determinar las asociaciones de peces entre los tipos de arrecifes artificiales. Dentro del Parque Nacional se identificaron cuatro tipos de arrecifes artificiales: Reef ball ©, Vivero, Esculturas del Museo Subacuático y Barcos hundidos. Se registraron un total de 6003 peces, representados en 98 especies, pertenecientes a 32 familias y 56 géneros. Las familias más representativas fueron: Labridae con 14 especies, Haemulidae, con 11 especies, Pomacentridae, con 10, Lutjanidae, con ocho, y Pomacanthidae con siete. No se registraron diferencias significativas en las abundancias de peces. Los sitios con presencia de Reef ball © mostraron los valores más altos de diversidad (H'= 3.5 bit/ind), riqueza (D´= 5.81) y equidad (J=5.93). Estudios comparativos que incluyan la evaluación y eficiencia de diferentes diseños de arrecifes artificiales son escasos para en el Caribe mexicano es por ello que investigaciones como la presente son importantes para entender el funcionamiento y desarrollo ecológico que se da en diferentes arrecifes artificiales de la región, donde su investigación es una prioridad, debido a la influencia que tiene el turismo sobre los impactos en los ecosistemas marinos. Se propone impulsar de forma eficiente y con sustento el uso de arrecifes artificiales complejos para actividades turísticas.

Palabras clave: Diversidad, Peces, Caribe mexicano.

Abstract

In recent years, strategies have been implemented to mitigate the impact on coral reefs, one of them is the installation of artificial reefs, which positively influence physical, biological and socioeconomic processes. However, despite the benefits they provide, few studies present a detailed description of their composition of their associated fauna. In the present investigation, the composition and abundance of the ichthyofauna associated with artificial reefs in the Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc are determined. Eight samplings were carried out between March 2021 and March 2022. The roving-diver technique was used, which consists of swimming randomly around the site for 45 min. The main ecological descriptors were determined, Margalef richness (D'), Shannon diversity (H') and Pielou evenness (J'). On the other hand, a Multiple Correspondence Analysis (MCA) was carried out to determine the associations of fish between the types of artificial reefs. Within the National Park, four types of artificial reefs were identified: Reef Ball ©, Nursery, Sculptures of the Underwater Museum, and Sunken Ships. A total of 6003 fish were recorded, in 99 species, 32 families and 56 genera. The most representative families were Labridae, with 14 species; Haemulidae, with 11; Pomacentridae, with 10; Lutjanidae, with eight; andand Pomacanthidae, with seven. No significant differences were recorded in the abundances of fish. Sites with Reef Ball © showed the highest values of diversity (H'= 3.5 bit/ind), richness (D'= 5.81) and equity (J=5.93). The reefs of the National Park presented different shapes, sizes, construction materials, number of cavities, and associations of invertebrates. Comparative studies that evaluate the efficiency of different artificial reef designs are scarce in the Mexican Caribbean, in spite of growing tourism and its impact on marine ecosystems. It is proposed to efficiently and sustainably promote the use of complex artificial reefs for tourist activities, and thus release the existing pressure about ecosystems.

Keywords: Diversity, Fish, Mexican Caribbean

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos tropicales y subtropicales formados por el crecimiento constante de colonias de pólipos. Éstos acumulan restos calcáreos y forman estructuras complejas. Los arrecifes de coral sostienen una alta diversidad de peces y el 25% de todas las especies marinas. Sin embargo, su área ocupa tan solo el 1% del total de los océanos (Pérez-Cervantes *et al*., 2017; McField *et al*., 2020).

La importancia de los arrecifes de coral no solo radica en su biodiversidad; proveen además bienes y servicios ecosistémicos para el bienestar social y económico de millones de personas. Entre ellos se encuentran la formación y conservación de playas, pesquerías de subsistencia (Pérez-Cervantes *et al.,* 2017), barreras naturales ante fenómenos meteorológicos, entre otros.

En la actualidad, el constante crecimiento de las poblaciones costeras ha causado que los efectos antrópicos sean cada vez mayores sobre estos ecosistemas (Castro y Huber, 2007). Ejemplo de ello son el cambio de uso del suelo, introducción de especies invasoras, contaminación, cambio climático, deterioro de la calidad del agua, aumento de enfermedades en corales, entre otros (Mancera-Pineda *et al*., 2013; Jackson *et al*., 2014). Por ello, es importante realizar monitoreos para determinar la condición y el estado de salud de sus comunidades (Green y Bellwood, 2009; McField *et al.,* 2020).

En los últimos años se han implementado estrategias para mitigar el impacto que existe sobre los arrecifes de coral, tales como programas de conservación, creación de áreas naturales protegidas, reglamentación, delimitación de zonas de uso recreativo y construcción de arrecifes artificiales (Santamaría-Reyes *et al*., 2019). Estos últimos se definen como estructuras de origen natural o antropogénico que se disponen de manera intencional sobre el fondo marino para imitar algunas características de los arrecifes naturales, tales como brindar refugio, zonas de alimentación, protección, regeneración, concentración, reproducción, aumento de poblaciones de recursos vivos y de esa forma influir positivamente sobre procesos físicos, biológicos y socioeconómicos alrededor de los recursos marinos (Convenio de Londres y Protocolo PNUMA, 1996; Seaman y Jensen *et al*., 2000; Delgadillo *et al*., 2004; Shin *et al*., 2014; Sreekanth *et al*., 2017). Estos arrecifes se encuentran dentro de la clasificación propuesta por Santamaría-Reyes *et al*. (2019) (Figura 1). Son relevantes debido al alto deterioro y reducción que enfrentan los arrecifes coralinos (Pizarro *et al*., 2014; Darling *et al*., 2017).

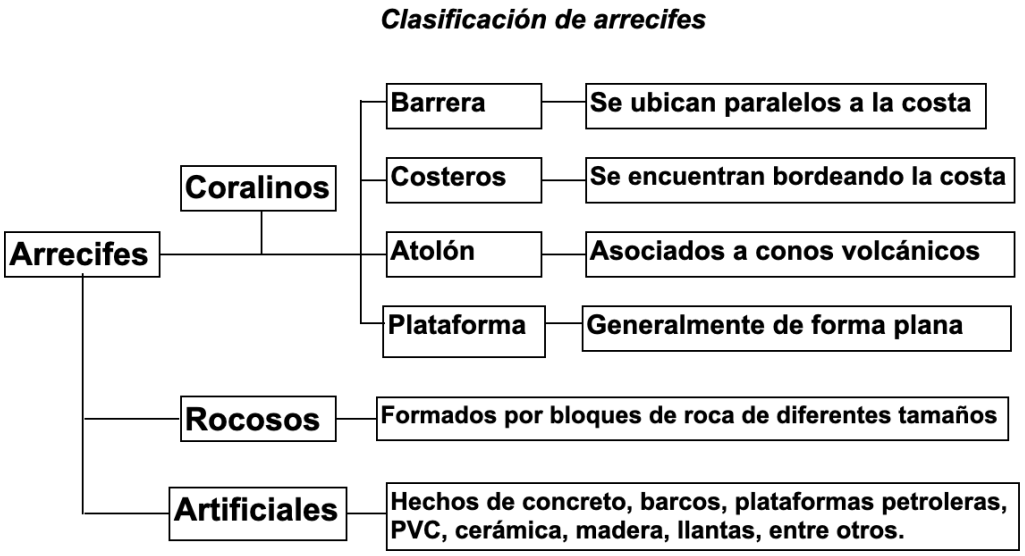

Figura 1. Clasificación de arrecifes (modificado de Santamaría-Reyes *et al*., 2019).

Existe una amplia variedad de materiales empleados en la construcción de arrecifes artificiales: concreto, cerámica, madera, material industrial obsoleto, llantas, plataformas, distintos tipos de plástico, policloruro de vinilo, roca, metal, entre otros (Florisson *et al*., 2018; Lee *et al*., 2018; Lemoine *et al*., 2019) (Figura 2).

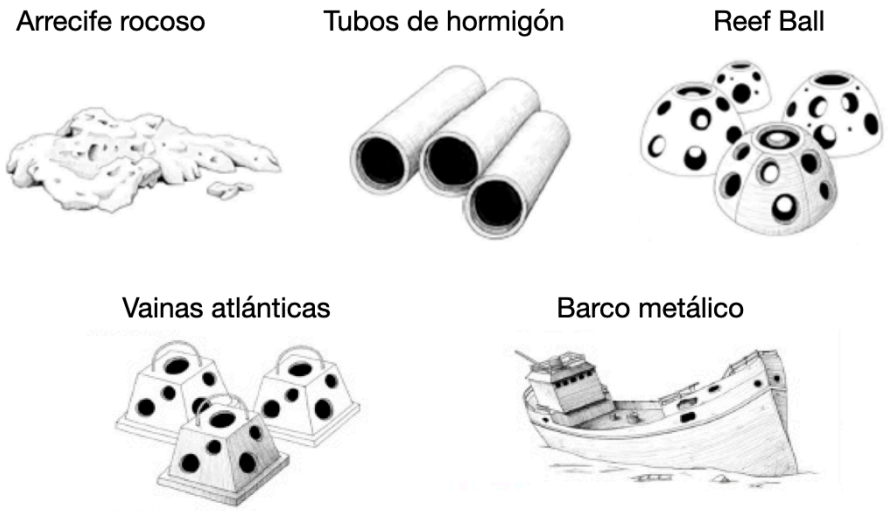

Figura 2. Diferentes estructuras utilizadas para el diseño y construcción de arrecifes artificiales (tomado de Lemoine *et al*., 2019).

Al colocar estructuras artificiales de formas variadas y funcionales, se estima que se generará un incremento en la diversidad y complejidad biológica que coloniza dichas estructuras. Al incrementar las áreas para productores primarios aumentará, en consecuencia, el flujo de energía en la red trófica del sitio (Lukens y Selberg, 2004; Precht, 2006).

Por otra parte, los estudios sobre arrecifes artificiales comenzaron en 1962 (Silva-Lima *et al*., 2019) y mantienen una tendencia creciente en el siglo XXI. Sin embargo, son pocos los trabajos que presentan descripciones generales y que analicen el desarrollo de las comunidades de peces en el tiempo, desde la colocación del arrecife (Paxton *et al*., 2018). La mayoría de los estudios en sistemas artificiales analizan si las comunidades de peces en estos sistemas convergen con las comunidades de arrecifes de coral (Koeck *et al*., 2014; Becker *et al*., 2017).

CAPÍTULO 1
ANTECEDENTES

Estudios sobre arrecifes artificiales en Oceanía, Asia y Europa

Los primeros estudios basados en la capacidad de reserva de la ictiofauna asociada con estructuras artificiales y la atracción potencial de especies clave se realizaron en la década de los 1960's en Japón (Ogawa, 1968).

Stanley y Wilson (2000) realizaron la evaluación de las comunidades de peces asociadas a dos plataformas gaseras localizadas en el mar Adriático central durante tres temporadas (primavera, verano y otoño). Registraron un total de 45 especies de peces y diferencias en las comunidades de peces entre las temporadas de muestreo.

Baine (2001) revisó 249 estudios sobre arrecifes artificiales, donde comprobó la funcionalidad de dichos arrecifes y si cumplían con el objetivo por el que fueron colocados. Los investigadores encontraron que el 15% de los trabajos cumplieron con el objetivo de funcionalidad del arrecife artificial y detalló que, por lo general, en estos estudios no se presenta información relevante para hacer una evaluación detallada y precisa del arrecife.

Baine (2001) y Perkol-Finkel *et al.* (2006) señalaron que la abundancia de organismos dependientes de arrecifes artificiales puede estar vinculada a la variedad de factores que influyen sobre los arrecifes artificiales como el diseño, distancia con el arrecife natural, diferencias en la edad de los arrecifes y tamaño de hábitats.

Brown (2005) estudió la colonización de la epifauna de distintos tipos de arrecifes artificiales, hechos de madera tratada con preservativos, caucho, acero y PVC, costa oeste de Escocia. La estructura de las comunidades epifaunales fue significativamente diferente entre cada uno de los materiales. El PVC, el caucho y la madera tratada fueron las estructuras con la mayor diversidad de especies debido a que estos materiales proporcionaron un alto grado de complejidad al habitat.

Ushiama *et al.* (2016) describen los efectos del material del sustrato y la orientación de la superficie en comunidades epibénticas para el desarrollo de un arrecife artificial en el sur de Australia. Descubrieron que la composición y abundancia de especies de las asociaciones epibentónicas difirieron según el material del sustrato de asentamiento (Poli-metacrilato de metilo>arena>madera>acero) y la orientación de la superficie (hacia arriba>vertical>hacia abajo). Refieren que esto podría influir en las comunidades de peces al ser consumidores directos del epibentos.

Florisson *et al*. (2018) realizaron una comparación de la ictiofauna entre dos arrecifes, en el suroeste de Australia. Registraron un total de 44 especies, con mayor abundancia de las

familias Priacanthidae, Labridae y Carangidae. El índice de diversidad de Simpson entre arrecifes indicó valores más altos en invierno que en verano y la abundancia total fue cuatro veces mayor en verano que en invierno. Los autores encontraron que los efectos temporales influyeron más en la estructuración de las comunidades de peces.

Silva-Lima *et al*. (2019) revisaron 620 estudios en todo el mundo sobre arrecifes artificiales para examinar tendencias a largo plazo en la investigación desde 1962 hasta 2018. Registraron que las publicaciones sobre arrecifes artificiales se han concentrado en investigar la estructura de las poblaciones y comunidades marinas evaluando nuevos diseños técnicos y materiales para la construcción de hábitats artificiales. Sin embargo, mencionaron que hay aspectos que merecen más atención en la investigación, como el uso de materiales inertes alternativos, evaluación y mitigación del impacto ambiental.

Finalmente, Komyakova *et al.* (2019) evaluaron la ictiofauna presente en tres diferentes tipos de arrecifes en Australia: naturales, Reef Ball © (RB) y arrecifes artificiales de diseño especializado (CDAR). Encontraron diferencias significativas entre los tres tipos de arrecifes. La estructura de la comunidad de peces varió según el año, la ubicación y tipo de arrecife. Los arrecifes naturales mostraron densidades más altas, seguido de CDAR y RB. Sin embargo, los CDAR respaldaron comunidades de peces dos veces más ricas.

Estudios sobre arrecifes artificiales en el continente americano

Bohnsack *et al*. (1991) caracterizaron las comunidades de peces en arrecifes artificiales y naturales ubicados en Florida, en el noroeste del Golfo de México. Registraron 43 especies de peces, de los cuales, más del 50% corresponden a las familias Carangidae y Scombridae a diferencia de los peces de la familia Labridae, Pomacentridae y Serranidae, que dominanen los arrecifes artificiales. El trabajo evidenció que la abundancia y diversidad de especies fueron más bajas a profundidades menores mientras que, a mayor rugosidad del hábitat y mayor volumen de los arrecifes, la talla de los peces atraídos fue mayor. Los arrecifes de coral presentaron mayor riqueza de especies; sin embargo, estos fueron dominados por una sola familia (Pomacentridae) con más del 50%.

Carr y Hixon (1997) compararon la tasa de colonización y comunidades de peces en arrecifes naturales y artificiales (bloques de hormigón) de similar tamaño, edad y aislamiento en Bahamas. Registraron 38 especies de peces en ambos tipos de arrecife, de las cuales tres se encontraron permanentemente en arrecifes naturales y cuatro en arrecifes artificiales. La riqueza de especies fue mayor en los arrecifes naturales en todo el período de muestreo; sin embargo, no encontraron diferencias en la composición de especies.

Simón *et al*. (2011) estudiaron dos arrecifes artificiales y dos arrecifes naturales rocosos en Brasil, para evaluar si los peces son atraídos o producidos en los arrecifes artificiales. Se enfocaron en cuatro géneros *Caranx, Haemulon, Lutjanus* y *Mycteroperca*. Encontraron evidencias tanto de la producción como de la atracción que generan los arrecifes artificiales hacia los peces; registraron una alta abundancia de reclutas de *Haemulon aurolineatum* y una alta concentración de adultos de *Mycteroperca* sp. y *Lutjanus* sp. en dichas estructuras, la cual contrasta con los arrecifes naturales donde se encontraron bajas abundancias de estos géneros, la diferencia radica en la atracción potencial que ofrecen los arrecifes artificiales a los organismos, proporcionando amplias entradas que las utilizan como refugios.

Lemoine *et al*. (2019) evaluaron el rendimiento ecológico a través de los peces asociados a cuatro tipos de arrecifes artificiales (barcos de metal y tres tipos de módulos de hormigón con formas diferentes) en arrecifes de Carolina del Norte, Estados Unidos. El estudio se centró en la relación de cada uno de los tipos de arrecife artificial, así como con el hábitat natural adyacente (arrecife rocoso). Registraron diferencias entre las comunidades de peces, según el tipo de arrecifes artificiales y la complejidad estructural. Los arrecifes construidos con hormigón funcionaron de manera similar con arrecifes rocosos, presentando valores similares de abundancia, biomasa y composición. Por otra parte, los barcos hundidos mostraron diferencias en las comunidades de peces al presentar mayor abundancia de organismos. Los autores mencionan que las diferencias y patrones pueden estar relacionadas con la huella y complejidad de las esctructuras de los arrecifes artificiales y naturales.

Hylkema *et al.* (2020) compararon las comunidades de peces en tres diferentes diseños de arrecifes artificiales RB ©, Layer Cakes (LC) y pilas de rocas en las Antillas Menores. Observaron un total de 2102 peces de 48 especies durante 130 censos y determinaron que las estructuras que proporcionaron mayor número de espacios de refugio presentan los valores más altos de abundancia de peces; LC y RB ©. La abundancia de peces varía según el diseño.

Paxton *et al.* (2020) evaluaron un estudio para determinar las poblaciones de grandes depredadores asociados a 14 arrecifes artificiales y su comparación con 16 arrecifes naturales en la costa este de Estados Unidos. Encontraron un total de 27 especies, entre las cuales dominaban familias como Belonidae, Carangidae, Dasyatidae, Haemulidae y Lutjanidae. El estudio reveló que los depredadores asociados a arrecifes artificiales presentaban 4.3 poblaciones más densas que en arrecifes naturales, además de presentar mayor abundancia y biomasa. Concluyeron que la morfología, altura y relieve vertical de los arrecifes artificiales

se asocian con una alta densidad de depredadores en arrecifes artificiales, siendo los barcos los arrecifes con densidades más altas de depredadores, 11 veces mayores que en arrecifes construidos de hormigón.

Hylkema *et al*. (2021) revisaron literatura sobre arrecifes artificiales en el Caribe para realizar descripciones generales. Los materiales más utilizados fueron metal y hormigón; sin embargo, ninguno de estos arrecifes fue monitoreado para conocer el desarrollo de la comunidad béntica. Concluyen asímismo que no existen descripciones generales disponibles sobre los arrecifes artificiales del Caribe.

Estudios en arrecifes artificiales en México

Ferreira *et al.* (2005) evaluaron la colonización de refugios artificiales por peces en Punta Palmar, Yucatán, donde sumergieron 64 arrecifes artificiales (Lo-Pro RB) a profundidades de 2, 4, 6 y 8 m. Encontraron 46 especies de peces, siendo Lutjanidae, Haemulidae y Ephippidae las más abundantes. Así mismo, determinaron que a mayor profundidad hay una mayor diversidad de especies.

Santander *et al.* (2012) realizaron una evaluación del impacto ambiental de arrecifes artificiales para uso turístico en Cozumel, México. Se introdujeron 52 estructuras tipo Arrecife fractal artificial (AFA) en aguas someras de PlayaVilla Blanca. A partir de la instalación, en dos semanas observaron recubrimiento de productores primarios, dando lugar a una inmediata colonización de peces principalmente *Acanthurus tractus, A. coeruleus, Bothus ocellatus, Haemulon flavolineatum*, *H. melanurum* y *Pomacanthus paru*. Los autores registraron que esnorquelistas y buzos se han dirigido a las estructuras para realizar actividades turísticas. Mencionan que a corto, mediano y largo plazo, se esperaría que la concentración de vida marina aumentará a partir de la presencia inicial e inmediata de especies pioneras.

Marenter (2014) menciona que en el Caribe mexicano, se ha implementado la construcción e instalación de arrecifes artificiales con estructuras de varios diseños, incluidos el tipo RB, entre otros diseños, con éxito en repoblación y crecimiento de vida marina sobre su superficie y por ende eficacia como zona de refugio de peces.

Dentro del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc se han registrado 170 especies de peces arrecifales y marinos, con riquezas promedio de 46 ± 11 especies, predominando peces bentófagos y herbívoros. Las unidades y subunidades arrecifales del Parque Nacional presentan presentan condiciones generales de tipo regular a malo. Hasta 2015 se han colocado un total de 529 esculturas en 125 hábitats artificiales (CONANP, 2016).

Por último, Santamaría-Reyes *et al*. (2019) elaboraron una lista comparativa de diversos países considerando objetivos e impacto de la colocación de arrecifes artificiales. El análisis determinó que en México se utilizan en su mayoría para generar alternativas de negocios, buceo, aumentar la superficie cubierta con arrecifes artificiales, protección de hábitat marino y para fines de reclutamiento de fauna e investigación.

Justificación

El Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc alberga una alta variedad de comunidades marinas, distribuidas en diferentes ecosistemas. Sin embargo, los ecosistemas de la región muestran signos de degradación ambiental importante. Por ello, se han implementado estrategias de restauración y mitigación como los arrecifes artificiales, para reducir los impactos en los ecosistemas marinos. El monitoreo de la ictiofauna de este tipo de arrecifes y la descripción detallada de éstos, podrían impulsar de una forma más eficiente diferentes actividades como buceo y snórquel en los sitios ya que se desconoce con detalle las especies que habitan en estos arrecifes de la región.

No obstante, y a pesar de los beneficios que proporcionan los arrecifes artificiales, son pocos los estudios que presentan descripciones y comparaciones entre los diferentes tipos de arrecifes artificiales y la fauna asociada (Hylkema *et al.,* 2020), y debido a las amenazas y degradación constante que enfrentan los arrecifes de coral, la instalación de arrecifes artificiales se considerará cada vez más como alternativa funcional (Hylkema *et al.,* 2021). Por lo cual, esta investigación se propone contribuir con conocimiento para reducir el vacío de información existente.

Hipótesis

Se espera encontrar mayor diversidad, riqueza y abundancia en las comunidades de peces asociados a arrecifes artificiales de tipo Reef ball © y barcos hundidos, ya que son arrecifes artificiales más complejos y que presentan un mayor número de espacios para refugio de organismos.

Objetivo general

Determinar la composición y abundancia de la ictiofauna asociada a los tipos de arrecifes artificiales en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, zona norte de Quintana Roo.

Objetivos particulares

- Realizar la descripción general de los arrecifes artificiales presentes en el Parque Nacional.
- Determinar la estructura comunitaria de los peces asociados a los tipos de arrecifes artificiales en diferentes sitios del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, Quintana Roo.
- Determinar si existen diferencias en las comunidades de peces presentes en el Parque Nacional.

CAPÍTULO 2
ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc se decretó como Parque Marino el 19 de julio de 1996 y fue recategorizado como Parque Nacional el 7 de junio del 2000. Se divide en tres polígonos, uno perteneciente al municipio Isla Mujeres y dos al municipio de Benito Juárez (Cancún). La superficie total es de 8673 hectáreas y es administrado por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2016) (Figura 3.2).

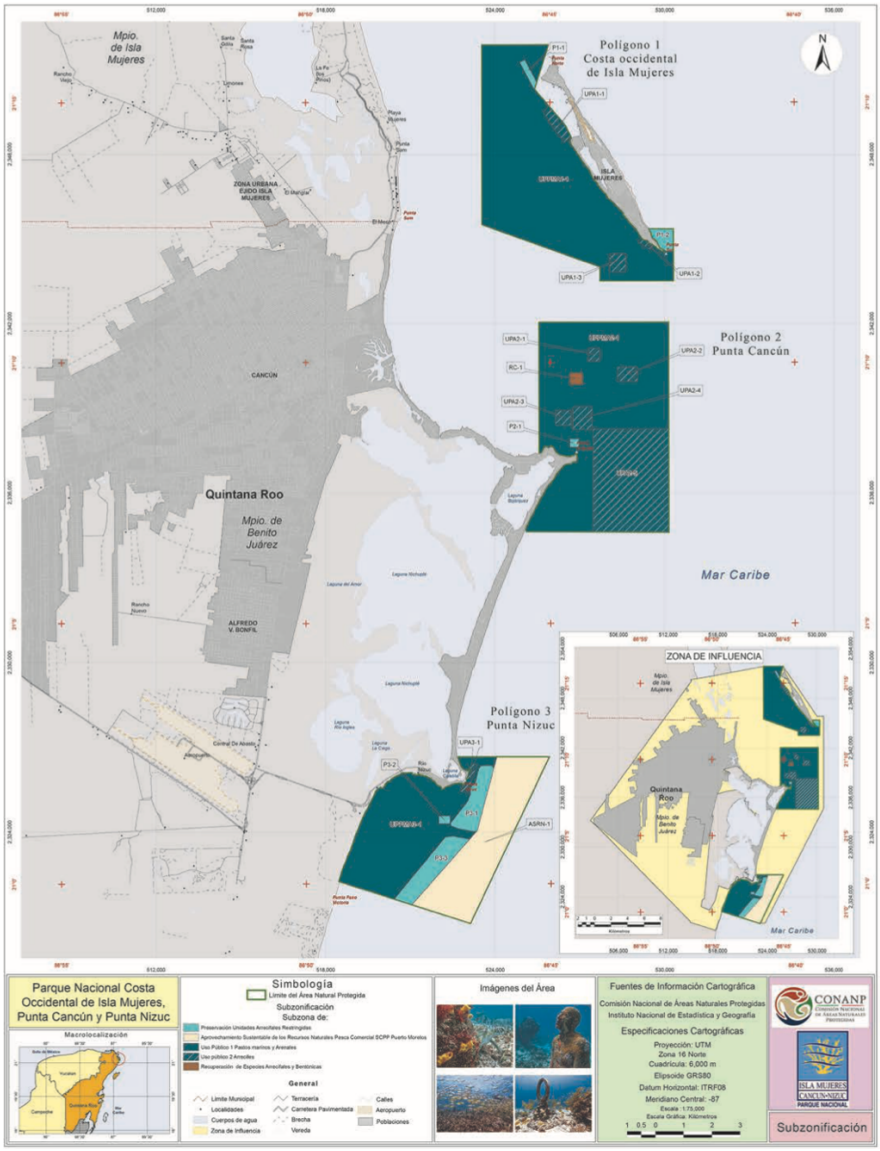

Figura 3.2 Ubicación de la zona de estudio, Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (tomado de CONANP, 2016).

El clima que presenta la región es cálido subhúmedo, con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno. La temperatura superficial del agua es de alrededor de 28 ºC durante el verano y de 24 º C durante el invierno (CONANP, 2016).

La salinidad en la plataforma noreste de Quintana Roo es de 35 a 36 partes por mil (CONANP, 2016). Con relación a la batimetría, el piso marino desciende a profundidades sobre los 400 m a distancias menores de 10 km de la línea de costa (CONANP, 2016).

La corriente de Yucatán con aguas oligotróficas y cálidas, fluye frente a la costa de Quintana Roo y acelera su velocidad entre la península y el extremo occidental de Cuba. La marea de la región es semidiurna y la altura de la ola significante media anual para Cancún es de 2 m. (SECTUR, 2013).

Muestreo

Los muestreos se realizaron en ocho sitios dentro del Parque Nacional realizando un monitoreo en cada sitio, en el periodo marzo 2021-marzo 2022: 1. Punta Nizuc-Museo Subacuático (PN), 2. Isla Mujeres-Vivero, (VI), 3. Isla Mujeres-Museo Subacuático (IMU), 4. Isla Mujeres-Sac Bajo (SB), 5. Isla Mujeres-Manchones, (IMA), 6. Ex cañonero C-55, (C-55), 7. Barco Isla Mujeres, (BI) y Barco Punta Sam (BPS) (Figura 4.2).

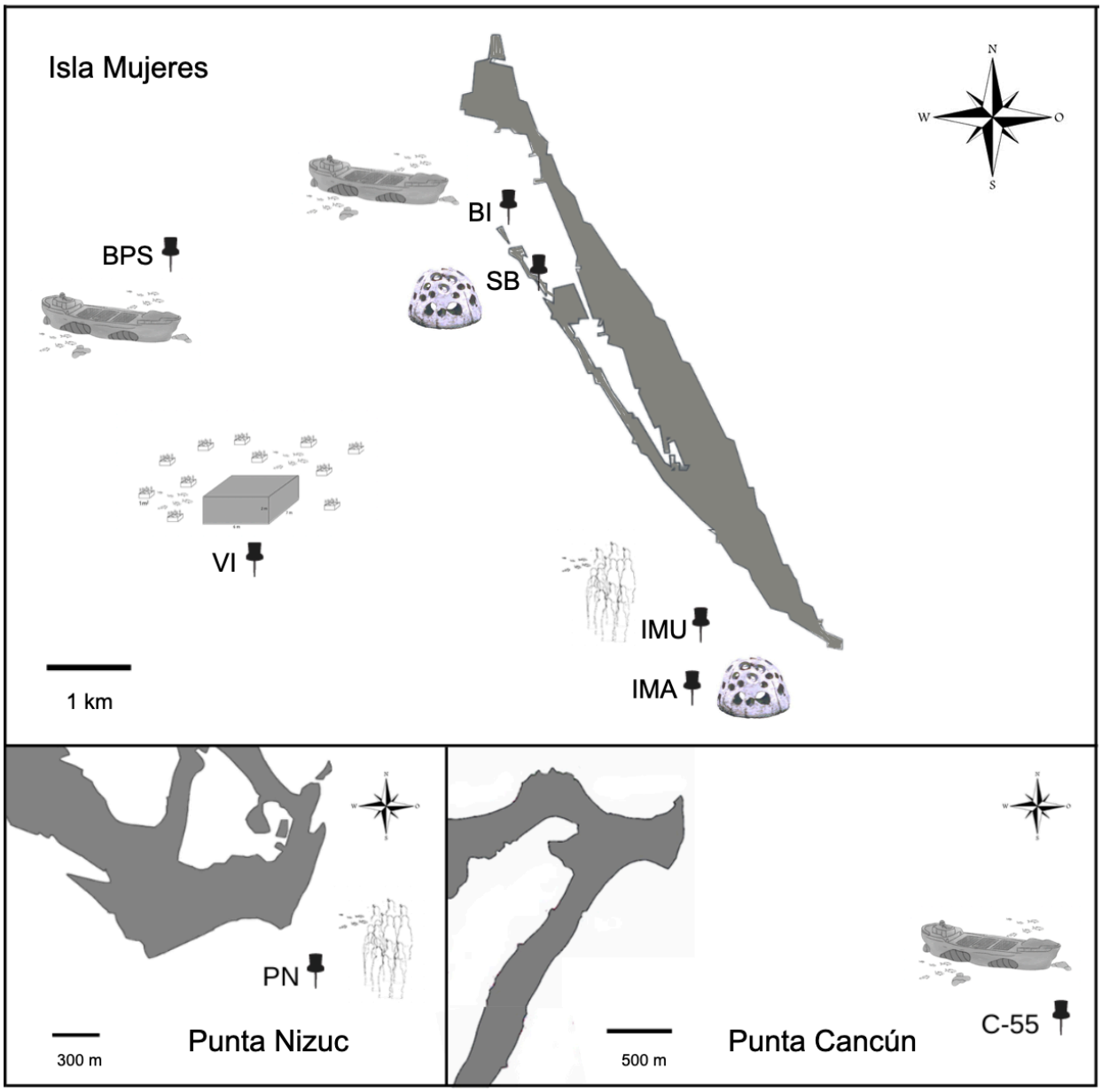

Figura 4.2 Ubicación de los arrecifes artificiales dentro del Parque Nacional.

Materiales y métodos

Composición y abundancia de la ictiofauna

En la presente investigación, se utilizó la técnica de buceo errante (Schmitt *et al*., 1993) la cual consiste en que un buzo nade de manera aleatoria por el sitio arrecifal registrando todos los peces que observe durante 45 minutos. Florisson (2018) determinó que este tiempo de inmersión es suficiente para registrar ≥ 95% de la riqueza, abundancia y diversidad de peces en arrecifes artificiales. Se buscó entre salientes, agujeros, cuevas, rocas y fisuras, ya que se ha registrado que arrecifes artificiales con un alto número de oquedades presentan una mayor abundancia de peces (Gratwicke y Speight 2005).

Grupos morfo funcionales y de sustrato

Se consideraron los porcentajes de cobertura de componentes bióticos (organismos epibénticos) y abióticos que recubrían a los arrecifes artificiales. Para esto se consideraron grupos morfo funcionales (González-Gándara y Salas-Pérez 2019), tomando en cuenta los parámetros para el levantamiento de datos básico bentoso, de acuerdo con los criterios de la Evaluación Rápida de Arrecifes del Atlántico y Golfo (AGRRA). En función de los objetivos de la investigación para este trabajo fueron: Corales (LC), Algas (AL), Otros invertebrados (OI) y Sustrato desnudo (SD).

Así mismo, se registró el sustrato adyacente a los arrecifes artificiales; arena y pastos marinos, pues se ha documentado que los arrecifes artificiales que han sido instalados sobre lechos de pastos marinos albergan una mayor abundancia de peces a diferencia de los instalados en zonas de arena desnuda (Yeager *et al.*, 2011).

Se empleó el método modificado del AGRRA para monitoreo básico de bentos, utilizando un cuadrante de 25 x 25 cm para registrar las coberturas de los grupos morfo funcionales LC, AL, OI y SD. La disposición de las esculturas artificiales del Museo Subacuático no permite utilizar como modalidad de muestreo el uso de transecto de banda, por lo que los cuadrantes se dispusieron de manera aleatoria sobre los arrecifes artificiales (Figura 5.2). Para cada tipo de arrecife artificial se realizó el mismo número de unidades de muestreo (10).

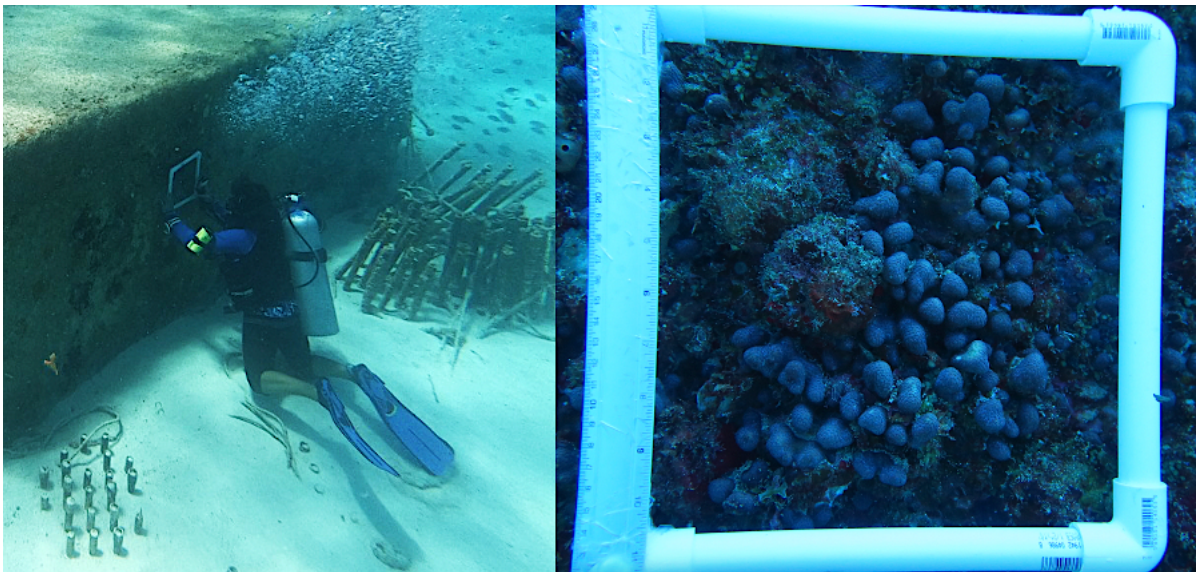

Figura 5.2 Disposición de cuadrante sobre arrecife artificial.

Para el buceo se utilizó equipo autónomo SCUBA y snórquel para sitios de baja profundidad (<2m). Durante los muestreos se anotaron los datos esenciales para cada sitio (especies de peces, abundancia, fecha, sitio, hora y profundidad). Todos los datos obtenidos se registraron en una tablilla de acrílico.

Para conocer la distancia a la costa se revisaron imágenes satelitales de Google Earth © utilizando la herramienta de regla. Respecto al tiempo de instalación de los arrecifes artificiales (edad) se obtuvo de los registros y documentos del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Identificación de las especies y clasificación de la ictiofauna

La identificación de peces se realizó in situ en los censos errantes; de igual manera, se tomaron fotografías y videos de los organismos para corroborar las especies de difícil identificación en campo. La identificación de las especies fue al nivel taxonómico más bajo posible, utilizando referencias especializadas (Humann y De Loach, 2011).

De acuerdo con los hábitos alimenticios de los peces se determinaron cinco gremios tróficos de acuerdo a la clasificación propuesta por Padilla-Souza (2006).

- Bentófagos (B): Se alimentan de cangrejos, camarones, anélidos, gasterópodos, estomatópodos y peces.
- Herbívoros (H): Presentan una diera a base de algas y pastos marinos.

- Ictiófagos (I): Se alimentan de peces.
- Omnívoros (O): Consumen algas, anélidos, peces, copépodos, gasterópodos, antozoos, tunicados, cangrejos, esponjas, equinodermos.

- Planctófagos (P): Se alimentan de cangrejos, camarones, estomatópodos, zoantarios, peces y huevos de peces que se encuentran en el plancton.

La información de los hábitos alimenticios se obtuvo de FishBase (Froese y Pauly, 2021) y de Peces Costeros del Gran Caribe (Robertson *et al.*, 2019).

En cada sitio de muestreo se registraron los valores de temperatura utilizando una sonda multiparamétrica Hanna ® HI98195.

Las variables de tendencia central, deviación estándar y gráficos de caja y bigote para cada sitio de muestreo se obtuvieron en RStudio.

Análisis estadísticos

Para garantizar la representatividad de los datos se usaron curvas de acumulación, las cuales proporcionan el número de especies acumuladas en función del esfuerzo de muestreo. La riqueza aumenta hasta alcanzar un máximo de especies y se estabilizará en una asíntota (Escalante-Espinosa, 2003). Se utilizó el modelo no paramétrico Chao 1, al ser un estimador basado en abundancias (Escalante-Espinosa, 2003), se calculó mediante el programa EstimateS versión 8.2.

$$Chao1 = S + \frac{L^2}{2M}$$

Donde:

S= número de especies observadas en una muestra

L= especies únicas

M= especies que se presentan específicamente en dos muestras

Para determinar que los muestreos fueron exhaustivos se calculó la proporción inventariada total de la fauna, dividiendo el número de especies observado sobre el predicho (Jiménez-Valverde y Hortal, 2003); este valor en función de porcentaje se considera adecuado cuando presenta un valor igual o mayor al 80% (Lobo, 2008).

Riqueza de Margalef:

$$D' = \frac{S-1}{Ln\ N}$$

En donde:

S= Número total de especies en la muestra.

N= Número total de individuos en la muestra.

Valores menores a 2 indican una baja riqueza de especies y valores cercanos a 5 o superiores indican una riqueza de especies alta (Mora-Donjuán *et al.,* 2017).

Índice de diversidad de Shannon:

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} PilnPi$$

En donde:

P_i= Es la probabilidad de una especie de su presencia en la muestra.

El índice de Shannon-Wiener varía de a 1 a 5 (Margalef, 1972), se interpretan valores menores a 2 como diversidad baja, de 2.1 a 3 media y mayores a 3 diversidad alta (Mora-Donjuán *et al.,* 2017).

Equidad de Pielou:

$$J' = \frac{H'}{Ln\ S}$$

En donde:

H'= Índice de diversidad de Shannon.

S= Número total de especies en la muestra.

Los valores de este índice varían de 0 a 1, el valor de 1 corresponde a sitios donde todas las especies fueron igualmente abundantes y el de 0 a extrema disparidad en la abundancia de cada especie (Valdez *et al.* 2018). Los análisis de diversidad se realizaron en el programa PAST 4.03

Se calculó el índice de similitud de Sørensen (IS). El índice se base en datos de ausencia-presencia de las especies en cada comunidad (Pequeño-Ledezma, 2017):

$$IS = \frac{2c}{a+b} * 100$$

Donde:

a= Número de especies encontradas en la comunidad a

b=Número de especies encontradas en la comunidad b

c=número de especies compartidas entre ambas comunidades

Se realizó el modelo Cluster (MC), para obtener clasificaciones por conglomerados de los arrecifes artificiales. El modelo tiene como base principal del análisis una matriz de distancias, teniendo un rango de variación arbitrario, pero cuanto menor es, mayor similitud existe entre las variables. Para estimarlo se utilizó la ecuación de distancias euclidianas, utilizando la estrategia de amalgamiento por enlazamiento completo (Hair *et al*., 1999). Los análisis se realizaron con el software STATISTICA (8).

Para determinar diferencias en las variables de la ictiofauna y del ambiente entre los tipos de arrecifes artificiales se planteó un análisis de la varianza de un factor. Sin embargo, como no se cumplieron los supuestos de normalidad para todas las variables de este estudio (prueba de Shapiro-Wilks, $p < 0.05$), se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Todas las pruebas y gráficos se realizaron en el programa R-Studio (Versión 1.4).

Para establecer asociaciones entre gremios, sitios, grupos morfo funcionales y tipos de arrecife artificial se realizó un Análisis de Correspondencia Múltiple (ACM); esta es una técnica descriptiva de análisis multivariado que analiza gráficamente las relaciones de dependencia o independencia de un conjunto de variables categóricas (Ferreira *et al*., 2014), cuyo propósito es transformar similitudes o preferencias en distancias representadas en un espacio multidimensional agrupando las variables que presenten mayor correlación (Hair *et al.*, 1999). Es útil en trabajos donde son pocas o inexistentes las hipótesis previas de las poblaciones o agrupaciones (Fernández, 2002). El análisis fue realizado con el software STATISTICA (8).

CAPÍTULO 3
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registraron diferentes tipos de arrecifes artificiales, los cuales fueron: A) estatuas del museo subacuático, B) zona de viveros para reproducción de corales, C) Reef Ball © y D) Barcos hundidos (Figura 6.3).

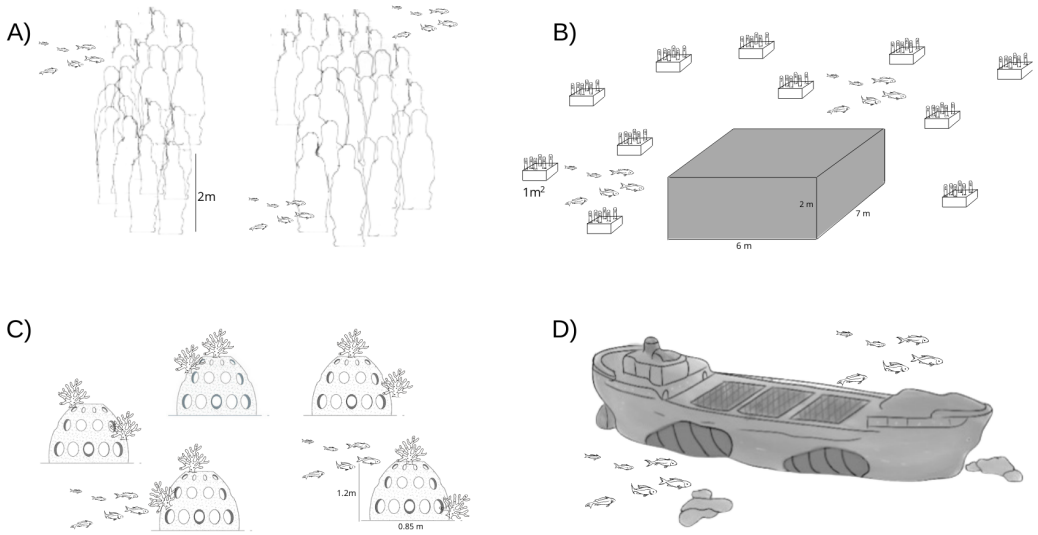

Figura 6.3 Esquematización de los diferentes tipos de arrecifes artificiales presentes en el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.

Caracterización de sitios de muestreo

Punta Nizuc (PN): La zona de arrecifes artificiales forma parte del Museo Subacuático en PN (21°01'42.7" N, 86°46'45.5" W), se conforma de un conglomerado de 10 esculturas con una separación entre ellas de 5 a 10 m, tres de ellas presentaron sitios de refugio para peces y en otras esculturas se detectaron huellas dentales de peces (Figura 7.3). Las esculturas se encuentras instaladas en zonas de arenales y pastos marinos.

Figura 7.3 Sitios de refugio para peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional y evidencia de alimentación de peces.

Isla Mujeres (VI): La zona de viveros en Isla Mujeres (21°12'32.8" N, 86°46'45.4" W), consta de una plancha de hormigón de 84 m^2 rodeado de 50 viveros aproximadamente para reproducción de corales elaborados de PVC, con un área aproximada de 1m^2. El bloque principal de hormigón fue instalado sobre un arenal (Figura 8.3).

Figura 8.3 Zona de viveros para reproducción de corales en la zona de Isla Mujeres

Isla Mujeres (IMU): La zona de arrecifes artificiales del museo subacuático en Isla Mujeres (21°12'4.9" N, 86°43'35.6" W) consta de 454 estructuras (Figura 9.3). Las esculturas fueron instaladas sobre un arenal. Entre las estructuras hay una distancia promedio de 50 cm a 1m.

Figura 9.3 Vista superior del Museo Subacuático en Isla Mujeres.

Isla Mujeres Sac Bajo (SB): La zona con Reef ball ® en Sac Bajo (21° 14' 18" N, 86°44'39.5" W) presentó un conglomerado de 12 estructuras con longitud en la base de 1.2 y altura de 0.85 m del modelo Pallet ball. Los RB presentaron un alto porcentaje de cobertura de *Acropora cervicornis* (Figura 10.3). Fueron instalados en una zona de abundante pasto marino.

Figura 10.3 Sitio de Reef ball © con presencia de *Acropora cervicornis* en Sac Bajo.

Isla Mujeres Manchones (IMA): La zona de RB en Manchones (21° 11’ 39.6” N, 86°43’37.7” W) presentó un conglomerado de 10 estructuras con longitud en la base de 1.2 y altura de 0.85 m. del modelo Pallet ball (Figura 11.3).

Figura 11.3 Pez ángel reina *Holacanthus ciliaris* buscando refugio dentro de un Reef Ball ©.

Buque ex cañonero (C-55): El cañonero “Juan de la Barrera” se localiza en el polígono de Punta Cancún (21° 07’ 12.9” N, 86° 42’ 42.6” W) con una longitud aproximada de 20 m y una altura de 3 m aproximadamente. Para el hundimiento del barco únicamente se utilizó el casco de metal que fue instalado en una zona de arenales (Figura 12.3).

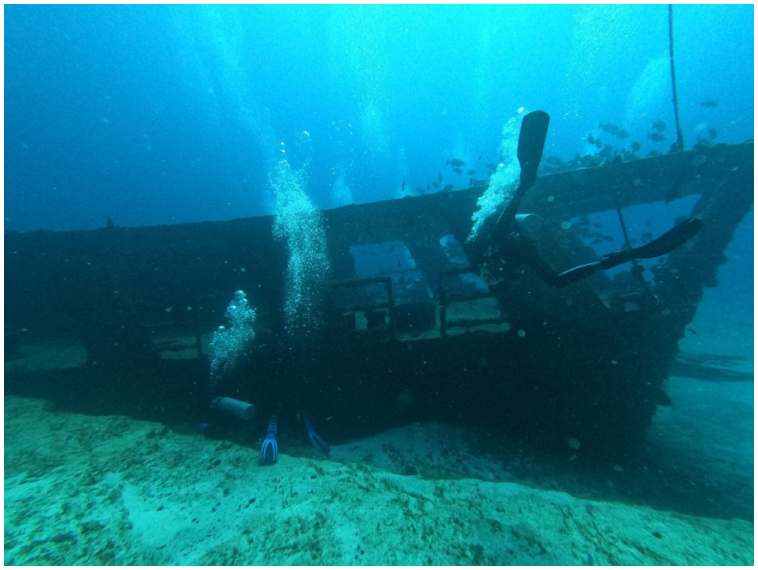

Figura 12.3 Casco del buque cañonero C-55 “Juan de la Barrera”

Barco Isla Mujeres (BI): El barco hundido en Isla Mujeres (21° 14’ 43.8” N, 86° 44’ 51.8” W) se instaló en consecuencia al hundimiento del mismo posterior al paso del huracán “Wilma”. Presenta una longitud aproximada de 10 m y una altura de 2 m aproximadamente (Figura 13.3). Para el hundimiento del barco únicamente se utilizó el casco, elaborado de metal.

Figura 13.3 Barco hundido en Isla Mujeres

Barco Punta Sam (BPS): El barco hundido en Punta Sam (21° 14’ 28.64” N, 86° 47’ 22.73” W) se instaló a consecuencia del huracán “Roxana”. Presenta una longitud aproximada de 16 m y una altura de 3 m aproximadamente. Para el hundimiento del barco únicamente se utilizó el casco, elaborado de metal (Figura 14.3).

Figura 14.3 Barco hundido en Punta Sam.

Las características específicas de los arrecifes artificiales del Parque Nacional se presentan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Características cualitativas y cuantitativas de los arrecifes artificiales presentes en el Parque Nacional.

Tipo de AA	Sitios	Prof.	Material	No. de oquedades	Año instalación	Sitio turístico	Distancia a la costa
Esculturas	PN	4.5 m	Hormigón y fibra de vidrio	0-5	2009	Sí	284.71 m.
Vivero	VI	5.6 m	Hormigón y PVC	0	1998	No	2532.7 m
Esculturas	IMU	7.5 m	Hormigón y fibra de vidrio	0	2010	Sí	978.2 m
Reef ball ®	SB	3 m	Hormigón y cemento tipo marino	17-24	2005	Sí	41.3 m
Reef ball ®	IMA	9.5 m	Hormigón y cemento tipo marino	17-25	2005	No	1684.6 m
Barco	C-55	23.4 m	Metal	<30	2000	Sí	3360.2 m
Barco	BI	2.3 m	Metal	10 -15	2005	Sí	66.8 m
Barco	BPS	4.2 m	Metal	10-15	1995	Sí	1222.4 m

Estructura comunitaria de los peces presentes en el Parque Nacional

Se registraron un total de 6003 organismos en 98 especies de 32 familias y 56 géneros (Tabla 2.3). Las familias más representativas fueron: Labridae con 14 especies; Haemulidae, con 11 especies; Pomacentridae, con 10; Lutjanidae, con ocho y Pomacanthidae con siete.

Tabla 2.3 Lista sistemática con la abundancia y gremios tróficos (GR) de los peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Clase Chondrichthyes	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS	GR
Infraclase Elasmobranchii									
Orden Orectolobiformes									
Familia Ginglymostomatidae									
1. *Ginglymostoma cirratum* (Bonnaterre, 1788)		1			1				B
Orden Myliobatiformes									
Familia Urotrygonidae									
2. Urobatis jamaicensis (Cuvier, 1816)			2						B
Familia Myliobatidae									
3. Aetobatus narinari (Euphrasen, 1790)						4			B
Clase Osteichthyes									
Subclase Actinopterygii									
Orden Anguilliformes									
Familia Muraenidae									
4. Gymnothorax funebris Ranzani, 1839					1	1	1		B
5. Gymnothorax moringa (Cuvier, 1829)		1							B
Orden Holocentriformes									
Familia Holocentridae									
6. Holocentrus adscensionis (Osbeck, 1765)				3	7				B
7. Neoniphon vexillarium Poey, 1860					9				B
Order Gobiiformes									
Familia Gobiidae									
8. Coryphopterus glaucofraenum						13			B
Familia Grammatidae									
9. Gramma loreto Poey, 1868	3					1			P
Familia Pomacentridae									
10. Abudefduf saxatilis (Linnaeus, 1758)	25	77	41	14	35	33	23	394	O
11. Azurina cyanea (Poey, 1860)					36	7			P
12. Azurina multilineata (Guichenot, 1853)					8				P
13. Chromis insolata (Cuvier, 1830)			1			7			P
14. Microspathodon chrysurus (Cuvier, 1830)				6				23	O
15. Stegastes adustus (Troschel, 1865)			14				27		H

Continuación Tabla 2.3 Lista sistemática con la abundancia y gremios tróficos (GR) de los peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Familia Pomacentridae	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS	GR
16. Stegastes diencaeus (Jordan & Rutter, 1897)				7					H
17. Stegastes leucostictus (Müller & Troschel, 1848)	5		9		6				H
18. Stegastes partitus (Poey, 1868)	16				15	30		8	H
19. Stegastes planifrons (Cuvier, 1830)		8	14	8				35	H
Orden Blenniiformes									
Familia Chaenopsidae									
20. Acanthemblemaria aspera (Longley, 1927)		9							P
21. Emblemaria sp.	18								P
Orden Beloniformes									
Familia Belonidae									
22. Strongylura notata (Poey, 1860)							10		I
Orden Labriformes									
Familia Labridae									
23. Bodianus parrae (Bloch & Schneider, 1801)						12			P
24. Bodianus pulchellus (Poey, 1860)			2						P
25. Bodianus rufus (Linnaeus, 1758)	4			8	4	35		14	B
26. Halichoeres bivittatus (Bloch, 1791)		14		33	15				B
27. Halichoeres garnoti (Valenciennes, 1839)				13	9	16			B
28. Lachnolaimus maximus (Walbaum, 1792)				1	2				B
29. Scarus coelestinus (Valenciennes, 1840)					7				H
30. Scarus iseri Bloch, 1789	16		20	21	9		8		H
31. Scarus vetula (Bloch & Schneider, 1801)			18				16		H
32. Sparisoma aurofrenatum (Valenciennes, 1840)						18	25		H
33. Sparisoma chrysopterum (Bloch & Schneider, 1801)	3			31	31			6	H
34. Sparisoma rubripinne (Valenciennes, 1839)	9	10						6	H
35. Sparisoma viride (Bonnaterre, 1788)				28	13		9	4	H
36. Thalassoma bifasciatum (Bloch, 1971)	41	10	50	25	29	53	27		B
Orden Perciformes									
Familia Gerreidae									
37. Gerres cinereus (Walbaum, 1792)	36								B
Familia Mullidae									
38. Mulloidichthys martinicus (Cuvier, 1829)	2		8		6	37	3		O
39. Pseudupeneus maculatus (Bloch, 1793)				4	6	5			B
Familia Kyphosidae									
40. Kyphosus sectatrix (Linnaeus, 1758)						92		31	H

Continuación Tabla 2.3 Lista sistemática con la abundancia y gremios tróficos (GR) de los peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Familia Epinephelidae	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS	GR
41. Cephalopholis cruentata (Lacepède, 1802)			3		5	8			B
42. Cephalopholis fulva (Linnaeus, 1758)						4			B
43. Mycteroperca bonaci (Poey, 1860)	1								B
Familia Grammistidae									
44. Rypthicus saponaceus (Bloch & Schneider, 1801)			4						B
Familia Serranidae									
45. Serranus tigrinus (Bloch, 1790)						1			B
Familia Haemulidae									
46. Anisotremus surinamensis (Bloch, 1791)		2							B
47. Anisotremus virginicus (Linnaeus, 1758)	8	9	11	13	13	21		4	B
48. Haemulon aurolineatum (Cuvier, 1830)						143			B
49. Haemulon carbonarium (Poey, 1860)	9			12	16	47			B
50. Haemulon chrysargyreum (Günther, 1859)				18					B
51. Haemulon flavolineatum (Desmarest, 1823)	29	20	26	56	36	331	106		B
52. Haemulon macrostomum (Günther, 1859)			5						B
53. Haemulon melanurum (Linnaeus, 1758)		21						29	B
54. Haemulon parra (Desmarest, 1823)						375	29	19	B
55. Haemulon plumierii (Lacepède, 1801)	11	11	17	11	12		146	166	B
56. Haemulon sciurus (Shaw, 1803)	50	11	29	36	15	126	189	147	B
Familia Lutjanidae									
57. Lutjanus analis (Cuvier, 1828)			10			2			B
58. Lutjanus apodus (Walbaum, 1792)	3		19			3	40	15	B
59. Lutjanus buccanella (Cuvier, 1828)						16			B
60. Lutjanus cyanopterus (Cuvier, 1828)	1					1			B
61. Lutjanus griseus (Linnaeus, 1756	25	111	14	20	26	1	49	20	B
62. Lutjanus mahogoni (Cuvier, 1828)	33		30						I
63. Lutjanus synagris (Linnaeus, 1758)							5	3	B
64. Ocyurus chrysurus (Bloch, 1791)	5	16	16	29	27	4	4		O
Familia Cirrhitidae									
65. Amblycirrhitus pinos (Mowbray, 1927)						1			B
Orden Scorpaeniformes									
Familia Scorpaenidae									
66. Pterois volitans (Linnaeus, 1758)					1	2	1		I
67. Scorpaena plumieri (Bloch, 1789)			2						B

Continuación Tabla 2.3 Lista sistemática con la abundancia y gremios tróficos (GR) de los peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Order Acanthuriformes	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS	GR
Familia Acanthuridae									
68. Acanthurus chirurgus (Bloch, 1787)		19	19				3	8	H
69. Acanthurus coeruleus (Schneider, 1801)	7	30	33	22	28	83	6	18	H
70. Acanthurus tractus (Poey, 1860)	19		14	15	19	36			H
Familia Chaetodontidae									
71. Chaetodon capistratus (Linnaeus, 1758)		1	6	10	7	4	2		B
72. Chaetodon sedentarius (Poey, 1860)						8			B
73. Chaetodon ocellatus (Bloch, 1787)		5		8	9		4		B
Familia Pomacanthidae									
74. Centropyge argi (Woods & Kanazawa, 1951)						6			H
75. Holacanthus bermudensis (Goode, 1876)			3		2				O
76. Holacanthus ciliaris (Linnaeus, 1758)		5	6	3	6	1		6	O
77. Holacanthus tricolor (Bloch, 1795)						2			O
78. Pomacanthus arcuatus (Linnaeus, 1758)			5						O
79. Pomacanthus paru (Bloch, 1787)		1		5	3	2			O
Familia Sciaenidae									
80. Equetus punctatus (Bloch & Schneider, 1801)					11			1	B
81. Pareques acuminatus (Bloch & Schneider, 1801)								3	B
82. Pareques umbrosus (Jordan & Eigenmann, 1889)								1	B
Orden Tetraodontiformes									
Familia Monacanthidae									
83. Cantherhines pullus (Ranzani, 1842)					5				O
84. Lactophrys triqueter (Linnaeus, 1758)					5				B
Familia Tetraodontidae									
85. Canthigaster rostrata (Bloch, 1782)	4		16	15	7	18	10		O
Familia Balistidae									
86. Balistes capriscus (Gmelin, 1789)								1	B
Familia Diodontidae									
87. Diodon hystrix (Linnaeus, 1758)		1						1	B
Familia Ostraciidae									
88. Acanthostracion polygonius (Poey, 1876)			1						B
89. Acanthostracion quadricornis (Linnaeus, 1758)					2				O

Continuación Tabla 2.3 Lista sistemática con la abundancia y gremios tróficos (GR) de los peces en arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Orden Spariformes	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS	GR
Familia Sparidae									
90. Calamus bajonado (Bloch & Schneider, 1801)				4	7				B
91. Calamus calamus (Valenciennes, 1830)			9	12	8				B
92. *Calamus* sp.				10	6				B
Orden Carangiformes									
Familia Carangidae									
93. Caranx bartholomaei (Cuvier, 1833)			7						I
94. Caranx crysos (Mitchill, 1815)		82							I
95. Caranx latus (Agassiz, 1831)				20	6	1			B
96. Caranx ruber (Bloch, 1793)		77	9			26	12		I
97. Trachinotus falcatus (Linnaeus, 1758)		15							B
Orden Istiophoriformes									
Familia Sphyraenidae									
98. Sphyraena barracuda (Edwards, 1771)		3		26			1	123	I
Total	**383**	**570**	**493**	**547**	**531**	**1637**	**756**	**1086**	

Se registraron cuatro especies presentes en todos los sitios: *Abudefduf saxatilis, Haemulon sciurus, Lutjanus griseus* y *Acanthurus coeruleus.* Las especies con mayor abundancia fueron: *A. saxatilis* (10.6 %), *H. sciurus* (9.65%), *H. parra* (7%) y *H. plumieri* (6.5%). La familia con mayor abundancia de organismos fue Haemulidae. No existieron diferencias significativas en las abundancias de los sitios (p=0.485).

Por sitios, las especies con mayor abundancia en los arrecifes artificiales se presentan en la Figura 15.3.

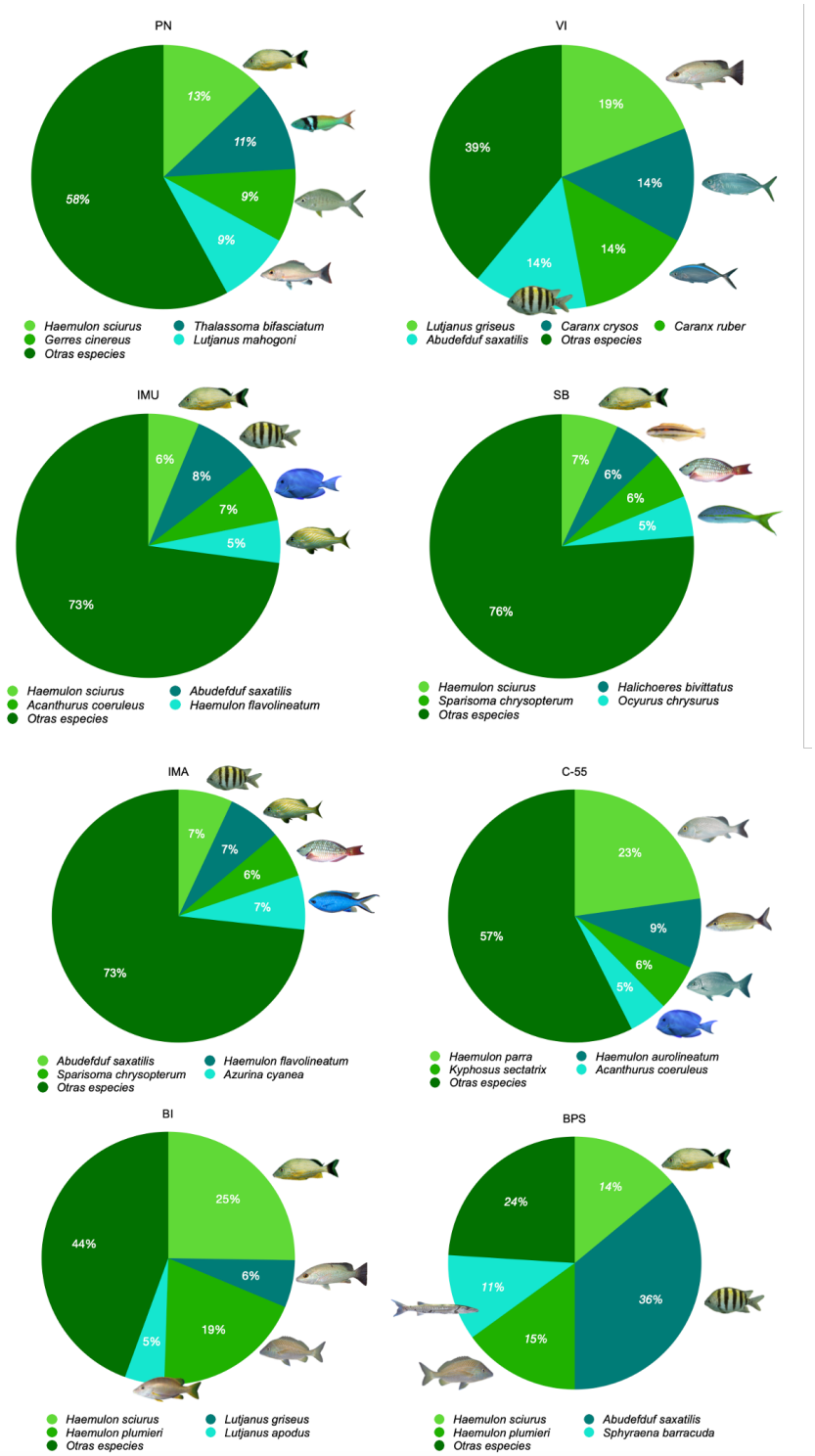

Figura 15.3 Especies con mayor abundancia en los sitios del Parque Nacional.

Riqueza y estimadores no paramétricos

La riqueza observada en el Parque Nacional fue de 98 especies. La estimación de la curva de acumulación de especies (Figura 16.3) para riqueza de especies Chao 1 fue de 101 especies, alcanzando la asíntota a partir del séptimo muestreo. La proporción inventariada total de la ictiofauna se consideró adecuado con un 97%.

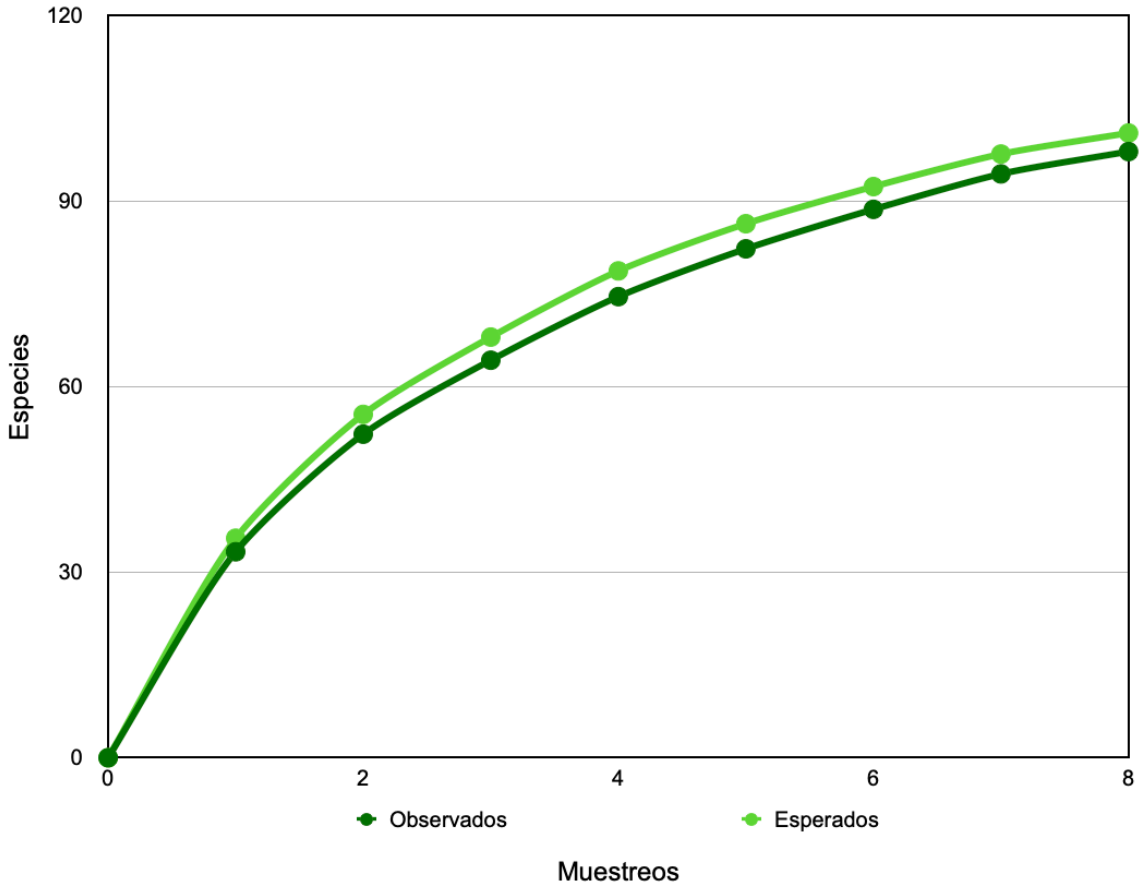

Figura 16.3 Curva de rarefacción de la riqueza de especies en el Parque Nacional.

Gremios tróficos de la ictiofauna

El gremio trófico mejor representado fueron los bentófagos, con 54 especies, seguido de herbívoros 17, omnívoros 12, planctófagos ocho e ictiófagos con siete. (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Gremios tróficos presentes en arrecifes artificiales del Parque Nacional

	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS
Bentófagos	12	15	16	20	25	25	11	14
Herbívoros	7	4	8	7	8	6	7	8
Ictiófagos	1	3	3	1	1	2	4	1
Omnívoros	4	4	7	6	9	7	4	3
Planctófagos	2	1	2	0	2	4	0	0
Total	26	27	36	34	45	44	26	26

Se determinó que todos los arrecifes artificiales del Parque Nacional presentaron una mayor asociación a peces bentófagos, seguido de herbívoros y omnívoros respectivamente. Por otra parte, los peces ictiófagos y panctófagos fueron los que mostraron menor asociación con los arrecifes artificiales del Parque Nacional, (Figura 17.3).

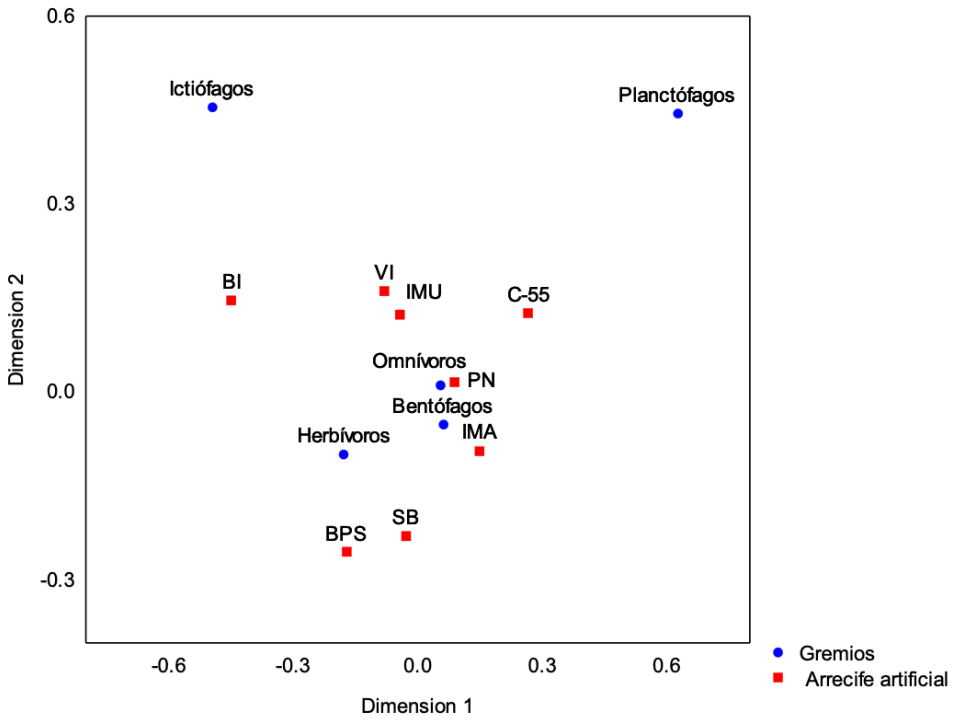

Figura 17.3 Análisis de Correspondencia Múltiple Gremios vs Tipos de arrecife artificial (AA).

Análisis de agrupamiento (clúster)

Para los arrecifes artificiales del Parque Nacional el análisis arrojó dos conglomerados, el primero (C1), quedaron clasificados C-55, IMA, SB, IMU. De acuerdo con la matriz Z, estos son similares porque los registros de las abundancias y riquezas de peces fueron las más altas del estudio; opuesto a lo arrojado en el análisis de conglomerados dos (C2), donde quedaron

clasificados los VI, BI, BPS y PN y de acuerdo con la matriz Z, fueron similares porque los registros de las abundancias y riquezas de peces fueron bajas, (Figura 18.3).

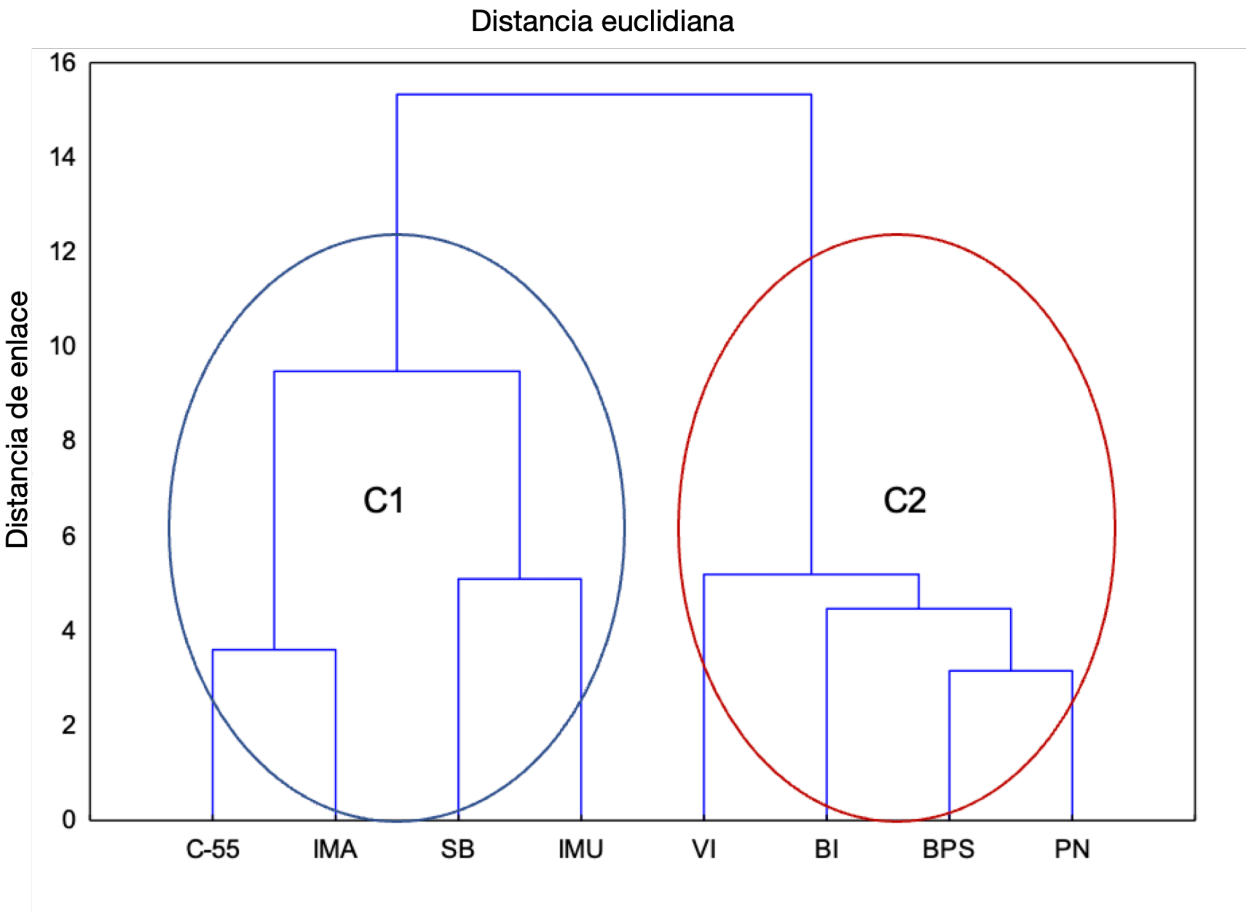

Figura 18.3 Dendograma para la clasificación de ocho arrecifes artificiales con base en los registros de abundancia de la ictiofauna presente.

Por tipo de arrecife artificial, se presentan en la Tabla 4.3 los gremios en los arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Tabla 4.3 Gremios presentes por tipo de arrecife artificial en el Parque Nacional

	Reef ball	Vivero	MUSA	Barcos
Bentófagos	26	15	22	34
Herbívoros	10	4	11	14
Ictiófagos	2	3	3	4
Omnívoros	10	4	7	8
Planctófagos	2	1	4	4
Total	50	27	47	64

Las asociaciones entre estos gremios y los tipos de arrecifes artificiales se ilustran en la Figura 19.3.

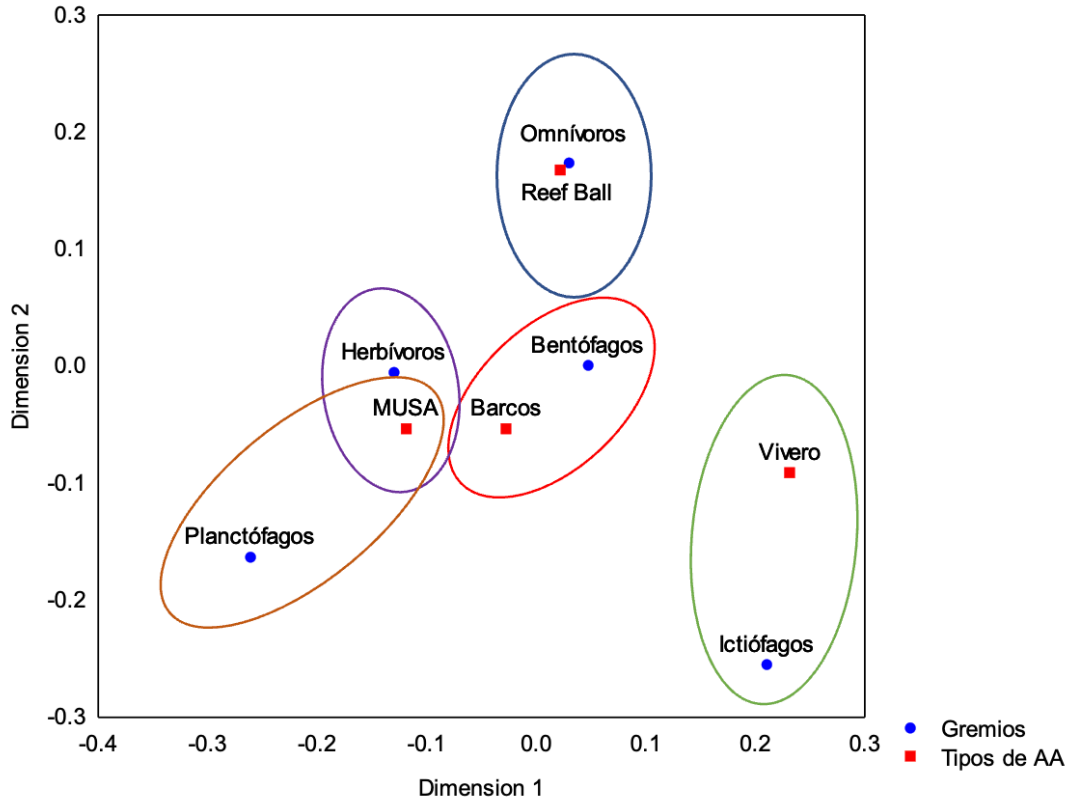

Figura 19.3. Análisis de Correspondencia Múltiple para Gremios vs Tipos de arrecife artificial (AA).

El ACM determinó que los RB presentan mayor afinidad con peces omnívoros, VI con inctiógafos, MUSA con herbívoros y planctófagos y por último los barcos con bentófagos.

Análisis de agrupamiento (Clúster)

Para los tipos de arrecifes artificiales del Parque Nacional arrojó dos conglomerados, el primero (C1), quedó clasificado únicamente el vivero, siendo el arrecife artificial con menor riqueza y abundancia de peces; para el conglomerado dos (C2) se agruparon los Barcos, MUSA y Reef ball; de acuerdo con la matriz Z, fueron similares porque los registros de las abundancias y riquezas de peces fueron altas. La similitud más grande fue para MUSA y Reef ball (Figura 20.3).

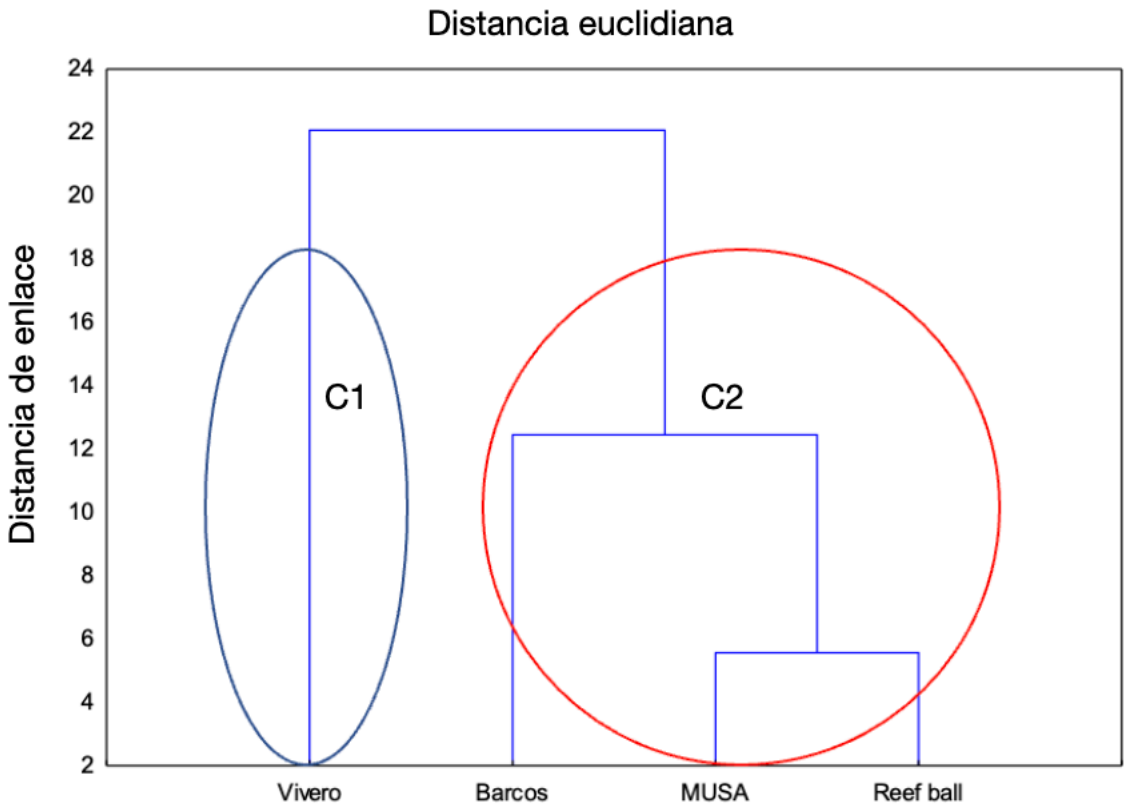

Figura 20.3 Análisis de Correspondencia Múltiple para Gremios vs Tipos de arrecife artificial (AA).

Índices ecológicos

IMA fue el sitio con mayor diversidad y riqueza. El sitio que presentó los valores más altos de equidad fue SB (Tabla 5.3).

Tabla 5.3 Índices ecológicos de equidad, diversidad de Shannon-Wiener y riqueza obtenido en los sitios de estudio.

	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS
Diversidad (H´)	2.86	2.60	3.3	3.28	3.5	2.66	2.43	2.14
Riqueza (D´)	4.20	4.09	5.6	5.23	7.0	5.81	3.77	3.57
Equidad (J)	0.87	0.79	0.9	0.93	0.9	0.70	0.75	0.65

Los valores del índice de Sørensen se presentan en la Tabla 6.3

Tabla 6.3 Similitud entre los arrecifes artificiales del Parque Nacional

	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS
PN	38%	48%	43%	45%	43%	46%	42%
VI		44%	46%	39%	34%	49%	45%
IMU			46%%	47%	45%	55%	32%
SB				73%	46%	43%	40%
IMA					56%	45%	34%
C-55						46%	31%
BI							38%

Los valores determinaron que los sitios con mayor similitud son: SB y IMA ambos sitios presentan estructuras de tipo RB y PN-IMU sitios con estatuas del Museo Subacuático. Por otra parte, los sitios con menor similitud fueron PN-VI difiriendo en el tipo de arrecife artificial

Descripción grupos morfo funcionales

Se registraron cuatro grupos morfo funcionales: Sustrato desnudo (SD), Otros invertebrados (OI), Corales (LC) y Algas (AL), (Figura 21.3, Tabla 7.3).

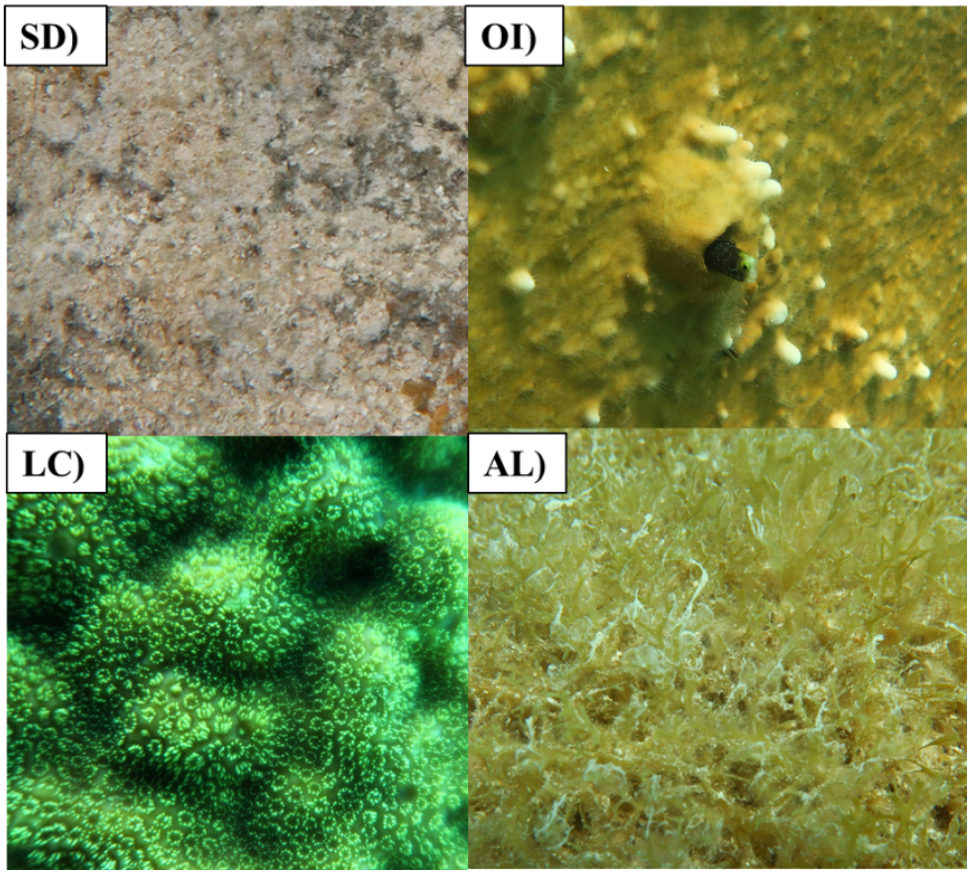

Figura 21.3 Grupos morfo funcionales en los arrecifes artificiales del Parque Nacional.

Tabla 7.3 Cobertura por grupo morfo funcional en los arrecifes artificiales del Parque Nacional.

	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	IB	BPS
Corales	9%	3%	9%	45%	21%	8%	14%	13%
Algas	33%	84%	41%	17%	26%	37%	6%	32%
Otros invertebrados	35%	13%	49%	13%	50%	54%	41%	29%
Sustrato desnudo	23%	1%	1%	25%	3%	1%	39%	26%

Para ningún tipo de sustrato (Figuras 22.3, 23.3, 24.3 y 25.3), existieron diferencias significativas entre los sitios (p= 0.129, 0.421, 0.170, 0.160).

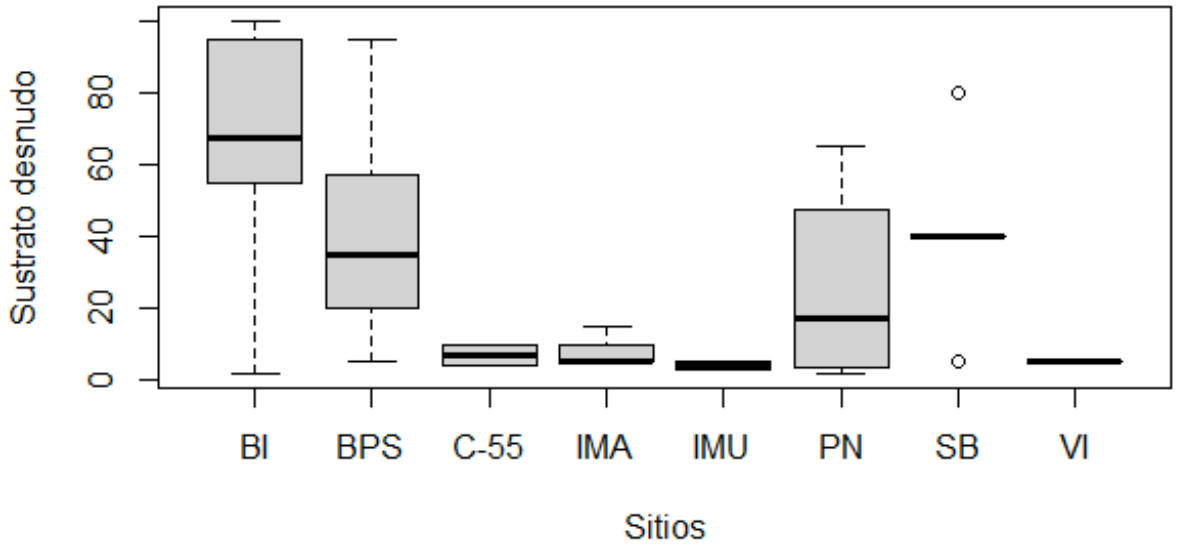

Figura 22.3. Cobertura de sustrato desnudo en los sitios del Parque Nacional.

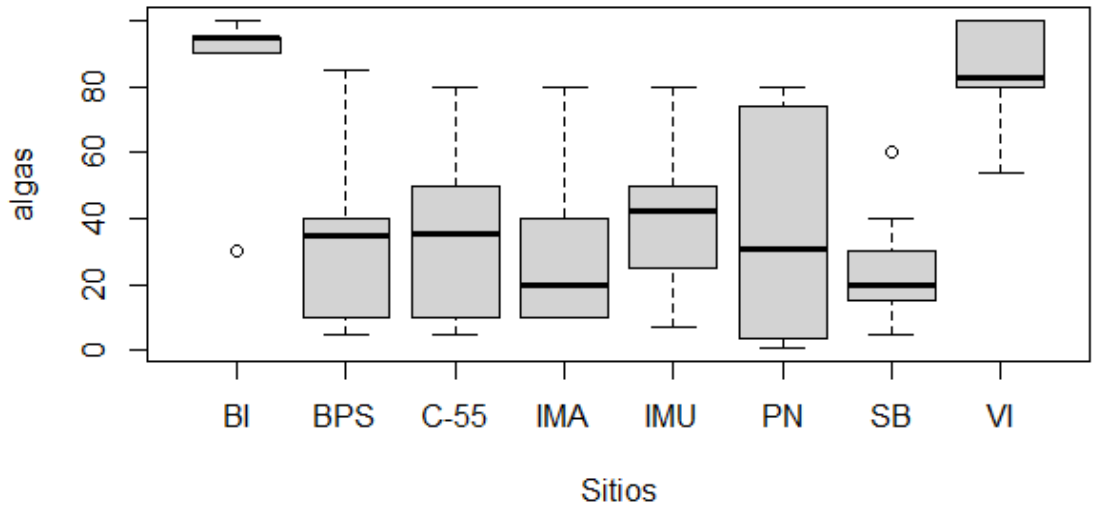

Figura 23.3 Cobertura de algas en los sitios del Parque Nacional

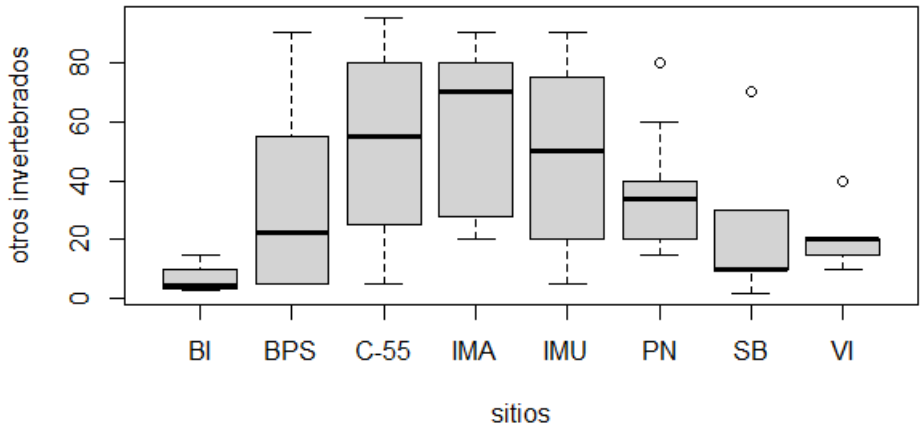

Figura 24.3 Cobertura de otros invertebrados en los sitios del Parque Nacional.

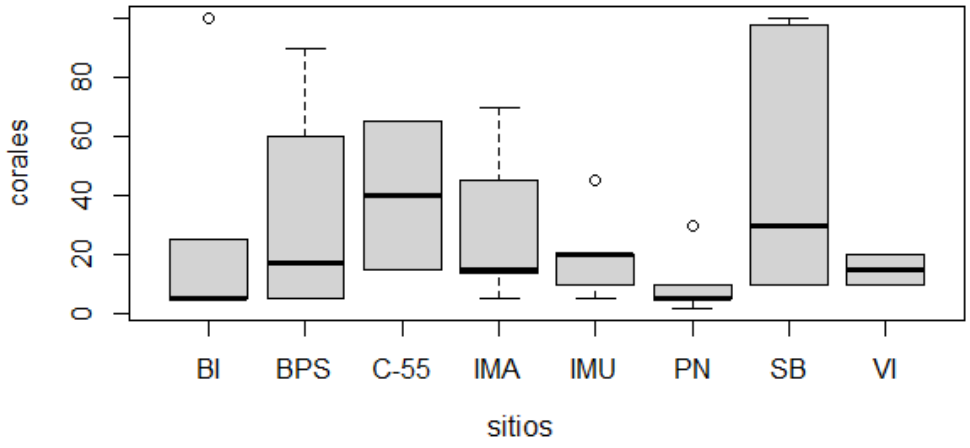

Figura 25.3 Cobertura de corales en los sitios del Parque Nacional.

La relación entre los grupos morfo funcionales y la diversidad en los ocho sitios de muestreo se presentan en la Figura 26.3

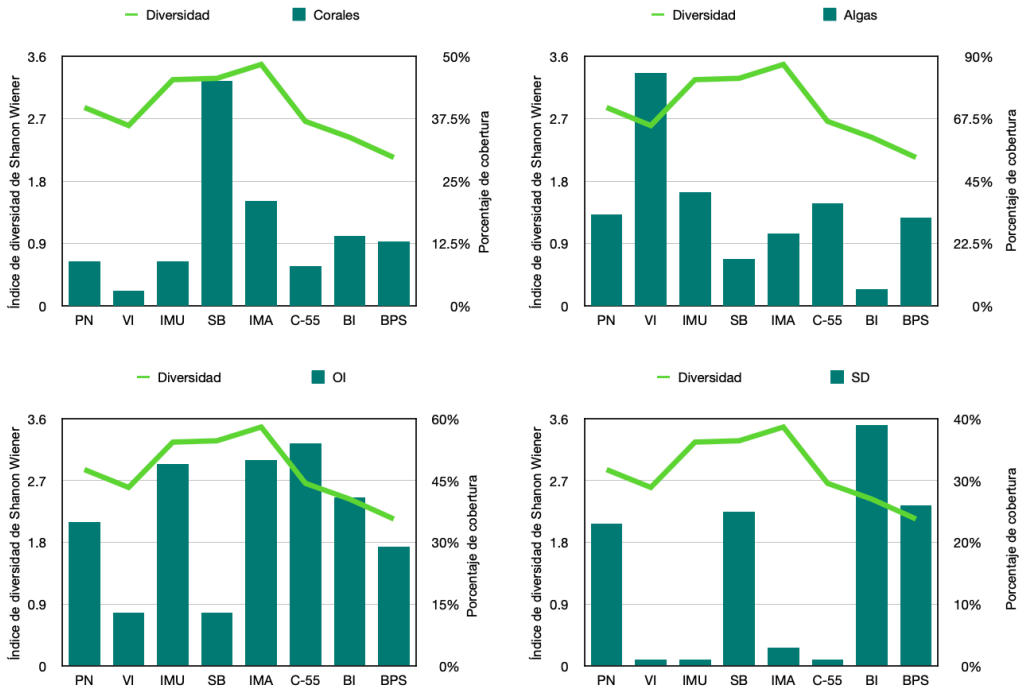

Figura 26.3 Diversidad de Shannon en función del porcentaje de cobertura de cada tipo de grupo morfo funcional.

Sustratos alrededor de las estructuras artificiales

Se registraron dos principales sustratos en torno a las estructuras artificiales: arena y pastos marinos, localizados en el área adyacente a los arrecifes artificiales. Para PN, VI y IMU el sustrato dominante fue la arena. Por su parte, en SB e IMA fueron los pastos marinos (Tabla 8.3, Figura 27.3).

Tabla 8.3 Porcentajes de los tipos de sustrato presentes en los arrecifes artificiales del Parque Nacional.

	PN	VI	IMU	SB	IMA	C-55	BI	BPS
Arena	80	100	90	5	30	100	30	100
Pastos marinos	20	0	10	95	70	0	70	0

Se realizaron gráficos de doble eje para conocer la relación entre los sustratos y el índice de diversidad en los ocho sitios de muestreo. Las barras representan el valor del porcentaje de cobertura del tipo de sustrato. La línea indica la diversidad (H´) para cada sitio de muestreo.

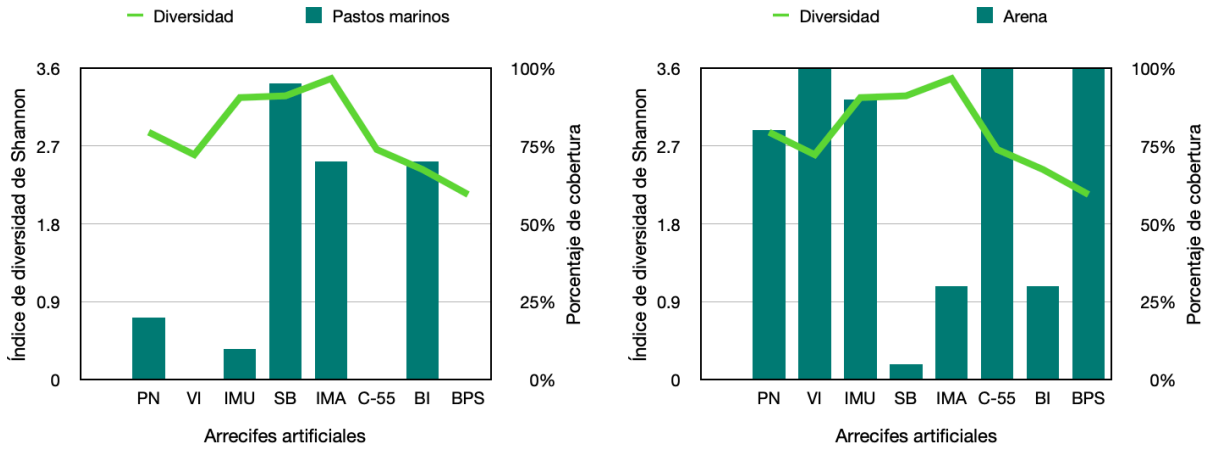

Figura 27.3 Figura del índice de diversidad Shannon-Wiener vs tipo de sustrato.

Discusión

No hay estudios comparativos que incluyan la evaluación y eficiencia de reclutamiento de diferentes diseños de arrecifes artificiales en el Caribe (Hylkema *et al*., 2020). Es por ello que investigaciones como la presente son indispensables para conocer el funcionamiento y desarrollo ecológico sobre los diferentes arrecifes artificiales de la región y deberían ser prioridad para su investigación con los crecientes impactos en los ecosistemas marinos.

Características de los diferentes arrecifes artificiales en el Parque Nacional

Los arrecifes artificiales de tipo Reef Ball © mostraron los valores más altos de diversidad, riqueza y equidad. Estos arrecifes presentaron un alto número de oquedades entre los diferentes tipos de arrecifes artificiales en este estudio, lo que proporcionó a los peces seguridad y refugio. Jordan *et al.* (2005) indican que la instalación de módulos pequeños y ampliamente espaciados soportarían conjuntos de peces más diversos y abundantes; tal como lo observado en los arrecifes artificiales de tipo RB en el Parque Nacional. Así mismo, existe evidencia de que los arrecifes artificiales con un mayor número de oquedades podrían facilitar el paso de la luz solar, favoreciendo la circulación de nutrientes (Carral *et al*., 2022).

Lemoine *et al.* (2019) mencionan que los patrones de abundancia pueden estar relacionados con la complejidad estructural. Los arrecifes artificiales del Parque Nacional presentaron diferentes formas, tamaños, materiales de construcción, número de oquedades, y asociación de diferentes grupos de invertebrados. Lo anterior aumenta la complejidad estructural de los arrecifes artificiales otorgando zonas de refugio, alimentación y hábitats de crianza para las especies de peces. Alam *et al.* (2018) indican que la adición de conchas de moluscos daría soporte adicional y complejidad a estructuras artificiales elaboradas de hormigón como los RB; dentro del Parque Nacional personal de la CONANP ha instalado fragmentos de *Acropora cervicornis* y pedacería de conchas en estos arrecifes, lo que les confiere una mayor complejidad estructural y resistencia.

Los barcos hundidos presentaron los valores de abundancia más altos en el estudio; esto puede estar asociado a que el área total de los barcos es mayor comparada con otros arrecifes artificiales del Parque Nacional (20 m x 3 m), por lo que representaría un área de refugio más grande para peces, con diferentes formas, tamaños y huecos. Paxton *et al.* (2018) indican que los barcos hundidos presentan una complejidad estructural sustancialmente mayor que en otros tipos de arrecife artificial como los de módulos de hormigón e incluso de arrecifes rocosos. Sin embargo, para determinar que los barcos hundidos del Parque Nacional son más complejos se tendrían que realizar técnicas como Digital Reef Rugosity (DRR) (Lemoine *et al.,* 2019).

Los barcos hundidos analizados en este estudio presentaron una clara afinidad con especies bentófagas y existe evidencia de que los barcos hundidos son llamativos para depredadores y peces grandes (Paxton *et al.,* 2020), sobre todo cuando son más profundos (Yeager *et al.,* 2011). Dentro del Parque Nacional el sitio con mayor abundancia de peces fue el barco C-55, siendo el sitio más profundo del estudio, alejado de la costa y aislado, Jordan *et al.* (2005) indican que la distancia de aislamiento de un arrecife artificial puede alterar la estructura comunitaria de los peces (abundancia y riqueza), teniendo una tendencia que al aumentar la distancia de aislamiento, aumenta la abundancia de peces; por lo anterior se debe considerar la disposición, tamaño y aislamiento de los arrecifes artificiales como atributos importantes para explicar la estructura comunitaria de peces. Así mismo, en el barco C-55 se observaron grandes cardúmenes de familias bentófagas como Haemulidae, Kyphosidae y Acanthuridae merodeando la estructura artificial.

Las estatuas del Museo Subacuático no presentaron en general oquedades. Sin embargo, se encontraron dispuestas en solitario y en conglomerado (estatuas estrechamente espaciadas). La disposición en conglomerado facilitó zonas de refugio y alimentación para peces herbívoros, a diferencia de las estatuas que se encontraron en solitario. Por ello, se podría optar la instalación de conglomerados para imitar las funciones de protección y refugio que proporcionan las oquedades.

La antigüedad de los arrecifes artificiales es un indicador importante a considerar en estudios de diversidad biológica de especies, ya que la colonización de especies pioneras trae como consecuencia la presencia de peces en los arrecifes artificiales (Santander *et al.*, 2012). Por lo anterior se esperaría que, a mayor tiempo, mayor complejidad del hábitat y abundancia de peces. En el caso del Parque Nacional se tienen arrecifes artificiales de hasta 27 años de antigüedad. Sin embargo, los sitios más diversos en el estudio comprenden arrecifes artificiales de 12 a 17 años, por lo que no en todos los casos la edad del arrecife será determinante para una alta abundancia o diversidad de especies. Brown *et al.* (2005) refieren que es probable que los efectos a largo plazo de la composición del sustrato sean insignificantes durante largos períodos de tiempo y es factible que diferentes materiales de construcción soporten conjuntos similares siempre y cuando los propios materiales permanezcan en condiciones estables. Es importante mencionar que personal del Parque Nacional hace limpieza de fauna epibéntica asociada a las estructuras en ciertos periodos del año, particularmente para los arrecifes artificiales que presentan corales como los RB. Eliminar especies competidoras como algas y esponjas traería consigo condiciones estables y similares entre los arrecifes artificiales.

En este estudio el sitio con la mayor diversidad de especies presentó escasa o nula actividad turística. Sin embargo, seis de los ocho sitios de muestreo son considerados como destinos atractivos para turistas. En México, el turismo genera importantes alteraciones en los procesos ecológicos (Guzmán-Chávez 2016) y en el Caribe mexicano la práctica de buceo es una actividad común que representa impactos directos sobre los arrecifes de coral, aunado a la limitada experiencia promedio de los turistas practicantes de actividades acuáticas como buceo o snórquel (Santander-Botello y Propin Frejomil 2009). Particularmente, el MUSA no sólo tiene un valor ecológico, también representa un valor socio cultural, Higgins *et al*. (2022) mencionan que el despliegue de este tipo de arrecifes se consideran exitosos y que aumentan la conciencia sobre la disminución de arrecifes de coral entre los turistas. El MUSA del Parque

Nacional se considera el museo subacuático más grande del mundo y promueve la conservación de la vida marina, mostrando la relación entre el arte y la ciencia (SIC, 2022). Por ello, al tener la evidencia que los arrecifes artificiales albergan una amplia diversidad de organismos se podría dirigir el turismo hacia estos arrecifes y con ello disminuir el impacto directo de los turistas sobre los arrecifes de coral de la región, teniendo en consideración que las unidades y subunidades arrecifales del Parque Nacional presentan en su mayoría condiciones regulares y malas (CONANP, 2016).

Lo anterior genera la necesidad de estudiar el impacto directo del turismo sobre cada uno de los diferentes arrecifes artificiales del Parque Nacional en diferentes temporadas del año y determinar si esto afecta directamente a la abundancia, riqueza y diversidad de especies.

Grupos morfofuncionales

Ushiama *et al.* (2016) señalan que, de acuerdo al material de sustrato y orientación se tendrán diferencias en el crecimiento y diversidad epibéntica, afectando probablemente el conjunto de arrecifes artificiales, incluidos peces. Sin embargo, en los grupos morfo funcionales de los diferentes tipos de arrecifes artificiales del Parque Nacional no se encontraron diferencias significativas del mismo grupo morfofuncional. No obstante, existen sitios con ausencia de corales, algas, invertebrados y sustrato desnudo. La diferencia podría radicar en el método de muestreo y la clasificación propuesta, ya que para esta investigación sólo se consideraron cuatro grupos morfo funcionales y las discrepancias pueden estar relacionadas con la toma de muestra, ya que se realizaron de manera aleatoria y en todas las direcciones de la estructura artificial (vertical, horizontal y lateral). No obstante, los arrecifes artificiales que presentaron mayor similitud entre ellos fueron C-55, IMA, SB e IMU, estos se caracterizaron por presentar coberturas altas de organismos epibénticos, corales y algas, a diferencia de otros que presentaron un mayor porcentaje de sustrato desnudo. Carral *et al.* (2022) sugieren que los planos horizontales de arrecifes artificiales favorecen el crecimiento de algas al percibir mejor la luz solar y con ello el asentamiento de otras especies; por esta razón se sugiere realizar el monitoreo en una sola dirección o en su caso tomar en cuenta las mismas direcciones de muestreo para los diferentes tipos de arrecifes artificialesLos arrecifes artificiales que presentaron mayor similitud entre ellos fueron C-55, IMA, SB e IMU, estos se caracterizaron por presentar coberturas altas de organismos epibénticos, corales y algas, a diferencia de otros que presentaron un mayor porcentaje de sustrato desnudo. Lo anterior les confirió

complejidad y proporcionó refugio y alimento para los peces que presentaron valores más altos de abundancia y diversidad.

Se observó un efecto positivo de los grupos morfo funcionales corales y otros invertebrados en la diversidad de especies de peces, presentando valores más altos, a diferencia del sustrato desnudo con los valores más bajos de diversidad asociada. Lo anterior refleja que arrecifes artificiales con mayor porcentaje de fauna epibéntica asociada estaría directamente relacionado con una mayor diversidad y abundancia de peces.

Un porcentaje alto de cobertura coralina en arrecifes artificiales del Parque Nacional tiene un impacto positivo en la diversidad de especies, siendo Sac Bajo e Isla Mujeres-Manchones los sitios con valores más altos para las dos variables. Para las algas, el sitio con mayor cobertura lo fue Vivero, un sitio que se caracterizó por presentar uno de los valores más bajos de diversidad dentro del Parque Nacional. Lo anterior podría estar relacionado a que el área del vivero sólo presentaba una estructura cuadrada elaborada de hormigón con escasa epifauna y baja complejidad estructural.

Los invertebrados en los arrecifes artificiales representaron el grupo con mayor cobertura en la mayoría de sitios (PN, IMU, IMA, C-55, BI y BPS), lo que refleja una asociación positiva entre arrecifes artificiales y epifauna de invertebrados marinos, siendo los dominantes esponjas y corales de fuego; estos últimos sirvieron de refugio para especies crípticas de peces. El sustrato desnudo se encontró asociado con baja diversidad, riqueza y equidad de especies. Las áreas desnudas en los arrecifes artificiales no representarían atracción para los peces, ya que muchas veces se alimentan de lo que se encuentra asociado a ellas.

Los arrecifes artificiales que fueron asentados en sitios con pastos marinos mostraron valores altos de riqueza, diversidad y abundancia de peces. A diferencia de los sitios donde se establecieron en arenales, se ha mencionado (Yeager *et al.,* 2011; Layman *et al.,* 2016) que la heterogeneidad y flujo de nutrientes que otorga el establecimiento de arrecifes artificiales en praderas de pastos marinos está relacionado directamente con una mayor abundancia de peces a diferencia de los instalados en zonas de arena desnuda. Para futuras instalaciones de arrecifes artificiales, sería adecuado tener en consideración la cercanía a praderas de pastos marinos por todos los beneficios que representan, instalándose en arenales cercanos a ellos.

Especies representativas de los arrecifes artificiales

Las especies registradas en esta investigación superan en número las reportadas por otros autores (Bohsnack *et al*., 1991; Carr y Hixon, 1997; Ferreira *et al*., 2005; Hylkema *et al*., 2020). La diferencia podría radicar en las estrategias de muestreo, ya que actualmente no se tiene una metodología precisa para cada uno de ellos y estas son modificadas a consideración de los objetivos de cada investigador; la técnica de buceo errante tiende a resaltar en una mayor riqueza de especies, por la revisión de todas las cuevas, fisuras y grietas de los arrecifes artificiales por lo que resulta una técnica adecuada para el estudio y comparación de este tipo de arrecifes.

Se evidenciaron mordeduras de peces en las estatuas del Museo Subacuático (Figura 7). Las familias Labridae y Acanthuridae tienen una actividad de pastoreo intensa (Cheal *et al.,* 2010) y ambas fueron representativas en el sitio. Por el tipo de mordedura y morfología dentaria se sospecha que especies de la subfamilia Scarinae se alimentan directamente de las algas que crecen sobre las estructuras artificiales, al ser especies raspadoras, a diferencia de la familia Acanthuridae que son picoteadores (Green y Bellwood, 2009). Ambos grupos son importantes para la sobrevivencia de los arrecifes de coral al regular el crecimiento, reproducción y sobrevivencia de algas (López-Jiménez *et al*., 2020). Ecológicamente, los arrecifes artificiales representarían sitios importantes de pastoreo para especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010, como lo son las especies de la subfamilia Scarinae. Así mismo, teniendo en consideración que actualmente las especies herbívoras clave de las familias Labridae y Acanthuridae están disminuyendo debido a la degradación de la cobertura de coral (Jackson *et al.,* 2014). La evidencia anterior y los resultados obtenidos del ACM confirman que los peces herbívoros presentan una mayor relación con estructuras del Museo Subacuático, con presencia considerable de algas.

Dentro de las especies de la lista taxonómica se encontraron depredadores como el tiburón gata y la barracuda, esta última conocida por ser transeúnte (Walter y Patterson, 2001), que se mueve localmente entre hábitats (O'Toole *et al*., 2011). En arrecifes artificiales uno de los depredadores presente con mayor frecuencia es la barracuda, Paxton *et al.* (2020) la encontraron con una elevada incidencia en su estudio. Dentro del Parque Nacional las barracudas fueron observadas merodeando en un sitio de muestreo (Barco Punta Sam). En ambos trabajos las barracudas fueron abundantes en barcos hundidos y la evidencia indica

que los barcos son los arrecifes artificiales con densidades más altas de depredadores (Paxton *et al*., 2020).

El tiburón gata fue registrado en dos ocasiones descansando a un costado de los arrecifes artificiales, Paxton *et al*. (2020) lo observaron con baja frecuencia, pero siempre asociados a arrecifes artificiales, indicando que eran más complejos que los arrecifes naturales aledaños. Lo anterior sugiere que los arrecifes artificiales representan zonas de refugio para depredadores. No obstante, se tendría que evaluar la complejidad estructural de los arrecifes naturales del Parque Nacional y compararlos con los arrecifes artificiales para determinar si es éste el factor que atrae con mayor frecuencia a los organismos.

La familia Haemulidae representó el 40% de la abundancia de peces en todo el estudio; esta familia es abundante en arrecifes artificiales (Lemoine *et al.,* 2019) con presencia variable de pastos marinos (Yeager *et al.,* 2011), lo que indicaría que el sustrato no resulta relevante en la preferencia de hábitat de esta familia. En relación, los arrecifes artificiales proporcionan alimento y refugio para especies presa (Heck *et al.*, 2003); es por ello que son de gran atracción para depredadores activos como los haemúlidos. La alta abundancia de esta familia es muy importante, ya que uno de los objetivos de la instalación de arrecifes artificiales en el Parque Nacional es la atracción de turistas para desviar la presión a arrecifes artificiales y las especies de la familia Haemulidae son abundantes y vistosas en arrecifes artificiales y naufragios (Uyarra *et al*., 2009).

Los Reef Ball © mostraron una fuerte asociación con omnívoras y bentófagas. Este tipo de arrecifes mostraron porcentajes altos de invertebrados marinos y al estar asociados a pastos marinos albergan mayores densidades de invertebrados bénticos, con más alimento para las especies bentófagos (Yeager *et al.*, 2011). Los arrecifes artificiales del Parque Nacional albergaron un alto porcentaje de peces bentófagos y en arrecifes artificiales de este tipo los peces pequeños e invertebrados proporcionan una mayor base de forraje para consumidores secundarios, lo que sirve para soportar densidades más altas de peces de la familia Lutjanidae y Haemulidae (Yeager *et al.,* 2011).

El potencial de alojamiento de especies en arrecifes artificiales es alto dentro del Parque Nacional, por ello sirven adecuadamente para reducir la presión que ejerce el turismo hacia los arrecifes naturales y con ello evitar fragmentaciones de hábitat por parte de los turistas.

Materiales de construcción en arrecifes artificiales

El material que presentó valores más altos de asociación de especies ícticas y epibénticas fue el hormigón. Es el material más utilizado en la creación de arrecifes artificiales (Baine 2001) y que tiene propiedades similares a la arenisca (Ushiama *et al.*, 2016). Sin embargo, es importante considerar diversos factores en la construcción de los arrecifes artificiales dependiendo los objetivos de la implementación. Baine (2001) destaca como primer factor la importancia de la complejidad del diseño, configuración del arrecife, tamaño, volumen y área.

Lemoine *et al.* (2019) señalan que el hormigón resulta la alternativa más apropiada para restauración del hábitat, ya que es similar a arrecifes rocosos, lo que repercute directamente en la abundancia y composición de especies. Así mismo los arrecifes artificiales construidos con hormigón son química y físicamente resistentes a las condiciones marinas. Lukens y Selberg (2004) observan pueden causar variaciones sólo menores de pH en el agua marina (Matsunaga *et al.,* 2009). Las características anteriores nos ayudan a constatar la efectividad de los arrecifes artificiales elaborados con hormigón y las alternativas adicionales que les podrían brindar un mejor funcionamiento y atracción de especies. En el caso de los arrecifes artificiales prensentes en el parque nacional a excepción de los barcos, todos fueron construidos con hormigón, mostrando valores diferentes en abundancia, diversidad y riqueza, por lo que las diferencias en los índices estarían relacionados a la complejidad de los arrecifes artificiales.

Se tiene el registro que los arrecifes artificiales construidos con metal como los barcos hundidos, presentan una menor abundancia de epibiota (Anderson y Underwood, 1994; Brown *et al.,* 2005; Ushiama *et al.,* 2016). En los barcos hundidos del Parque Nacional no se siguió ese patrón, ya que únicamente en BI se presentó un alto porcentaje de sustrato desnudo. Las discrepancias podrían radicar en que los barcos del Parque Nacional tienen una mayor edad comparadas con los analizados por dichos autores, en el cual el enfoque está relacionado con epifauna inicial, tres meses después del asentamiento. Por ello resulta importante realizar estos estudios donde se evalúan las comunidades asociadas a arrecifes artificiales con mayor edad como el presente estudio, además de la evaluación de procesos físicos, químicos y degradación de los materiales.

La variabilidad de formas, tamaños, materiales, refugios y epifauna asociada a los arrecifes artificiales ayuda a la colonización de especies crípticas. El método de muestreo facilitó la

exploración de grietas y espacios reducidos. Schmitt *et al.* (2002) señalan que el método aumenta la riqueza, abundancia y frecuencia de avistamiento en comparación con la técnica de transecto. En este estudio se registraron especies crípticas como *Acanthemblemaria aspera*, *Emblemaria* sp. y *Coryphopterus* sp.; algunas de ellas fueron observadas dentro de las oquedades de corales de fuego que cubrían las estructuras artificiales, por lo que un porcentaje alto de epifauna proporcionaría mayor alimento y microhábitats para estas especies. Estudios como el presente podrían ayudar a dirigir el estudio de estas especies en arrecifes artificiales y contribuir con información de especies crípticas.

Conclusiones

- La presente investigación es la primera sobre la ictiofauna presente y su comparación entre diversos tipos de arrecifes artificiales en el Caribe mexicano y aporta información para impulsar el uso de arrecifes artificiales como una alternativa para liberar la presión existente sobre arrecifes naturales adyacentes.
- Los arrecifes artificiales elaborados con hormigón albergaron mayor diversidad, riqueza y equidad de especies de peces que los arrecifes artificiales de otros materiales.
- No se registraron diferencias significativas entre la abundancia de peces en los diferentes tipos de arrecifes artificiales; no obstante, los barcos hundidos fueron los que presentaron mayor abundancia de peces.
- La instalación de arrecifes artificiales presenta mayores valores de abundancia y diversidad de especies cuando se instalan cerca de ambientes con existencia de pastos marinos.
- Los arrecifes artificiales representan una excelente medida de resguardo para especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010, por lo que su implementación favorecería a la recuperación de sus poblaciones.
- Los arrecifes artificiales representan excelentes sitios alternativos para el buceo y snorquel al encontrar una alta diversidad de especies atractivas para turistas.

Recomendaciones

- Se recomienda un monitoreo en los arrecifes artificiales para generar información de largo plazo y entender mejor forma su funcionamiento.
- Para futura creación e implementación de arrecifes artificiales se sugiere aumentar la complejidad estructural por medio de la adición de pedacería de conchas y fragmentos de corales.
- Se recomienda la implementación activa de arrecifes artificiales en el Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, como una medida eficiente para reducir la presión sobre los arrecifes naturales.

Bibliografía

Alam, S., Veedu, J. Ghasan, T. (2018) Experimental analysis on strength and durability of concrete by partially exchanging fine aggregate with oyster shell. IJCRT. 6 (2), 2320-2882.

Almada-Villela, P. C., Sale, P. F., Gold-Bouchot, G. Kjerfve, B. (2003) Manual de métodos para el Programa de Monitoreo Sinóptico del SAM. Ciudad de Belice: Proyecto para el Sistema Arrecifal Mesoamericano. Documento técnico. 158p.

Álvarez-Filip, L., Gill, J. A., Dulvy, N. K. (2011) Complex reef architecture supports more small-bodied fishes and longer food chains Caribbean reefs. Ecosphere. 2 (10), 118.

Ambrose, R. F. (1994) Mitigating the effects of a coastal power plant on a kelp forest community: rationale and requirements for an artificial reef. Bull. Mar. Sci. 694-708.

Anderson, M. J. Underwood, A. J. (1994) Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 184, 217-36.

Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) (2015) A Guide to Methods and Training Materials. 60p.

Baine, M. (2001) Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. Ocean Coast. Manag. 44 (3-4), 241-259.

Becker, A., Taylor, M. D. Lowry, M. B. (2017) Monitoring of reef associated and pelagic fish communities on Australia's first purpose built offshore artificial reef. ICES J. Mar. Sci. 74, 277-285.

Bohnsack, J. A. Bannerot, S. P. (1991) A stationary Visual census technique for quantitatively assessing community structure of coral reef fishes. National Oceanic and Atmospheric Administration, Springfield. 41, 1-15.

Brown, C. J. (2005) Epifaunal colonization of the Loch Linnhe artificial reef: influence of substratum on epifaunal assemblage structure. Biofouling. 21, 73-85.

Castro, P. Huber, M. E. (2007) Biología Marina. 6ta edición. McGraw-Hill Interamericana, Madrid. 514p.

Carr, M. Hixon, M. (1997) Artificial Reefs: The Importance of Comparisons with Natural Reefs. Fisheries. 22, 7.

Carral, L., Lamas, M. I., Cartelle Barros, J. J., López, I. Carballo, R. (2022) Proposed Conceptual Framework to Design Artificial Reefs Based on Particular Ecosystem Ecol. Traits. Biol. 11, 680.

Cheal, A. J., MacNeil. M., Cripps, E., Emslie, M., Jonker, M., Schaf-Felke, B., Sweatman, H. (2010) Coral-macroalgal phase shifts or reef resilience: links with diversity and functional roles of herbivorous fishes on the Great Barrier Reef. Coral Reefs. 29,1005-1015.

Clarke, K. R. Gorley, R. N. (2006) PRIMER v6: User manual/Tutorial. PRIMER-E Ltd. Plymouth Marine Laboratory. 190p.

Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). (2010) Uso potencial y regulación de arrecifes artificiales en México. México. 32p.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016) Programa de Manejo Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. Ciudad de México. México. 234p.

Convenio de Londres y Protocolo PNUMA. (1996) Directrices para la colocación de arrecifes artificiales. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 102p.

Darling, E. S., Graham, N. A. J., Januchowski-Hartley, F. A., Nash, K. L., Pratchett, M. S. Wilson, S. K. (2017) Relationships between structural complexity, coral traits, and reef fish assemblages. Coral Reefs. 36 (2), 561-575.

Delgadillo, O. C. García y Correa, J. (2004) Dinámica temporal de la asociación de peces en dos arrecifes artificiales del golfo de Morrosquillo, Caribe colombiano. Act. Biol. 26 (81), 120-131.

Escalante-Espinosa, T. (2003) ¿Cuántas especies hay? Los estimadores no paramétricos de Chao. El. 52, 53-56.

Fernández, F. J. (2002) El uso del Análisis de Correspondencia Simple (ACS) como ayuda en la interpretación del dato en arqueología. Un caso de estudio Boletín Antropológico. 20(55), 687-713.

Ferreira, M., Colás-Marrufo, T., Tuz-Sulub, A., Pérez Renán, X. Brulé T. A. (2005) Evaluación preliminar de la colonización de refugios artificiales por peces en punta palmar, Yucatán, México. Proceedings of the Gulf Caribbean Fisheries Institute 56th Annual Meeting. 487-504.

Florisson, J. H., Tweedley J. R., Walker, T. H. E. Chaplin, J. A. (2018). Reef Vision: a citizen science program for monitoring the fish faunas of artificial reefs. Fish. Res. 296-308.

Froese, R. Pauly, D. (2021) FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org. Revisado el 20 de abril del 2021.

González-Gándara, C. Salas-Pérez, J. J. (2009) Caracterización del sustrato bentónico del arrecife Tuxpan, Veracruz, México, con énfasis en la comunidad de corales escleractinios. Rev. Biol. Mar. Oc. 54(3), 259-271.

Graham, J. E., Alexander, T. J., Lefcheck, J. S., Bates, A. E., Kininmonth, S. J., Thomson, R. J., Duffy, J. E., Costello, M. J. Stuart-Smith, R.D. (2017) Abundance and local-scale processes contribute to multiphyla gradients in global marine diversity. Sci. adv.1-12.

Gratwicke, B. Speight, M. R. (2005) Effects of habitat complexity on Caribbean marine fish assemblages. Mar. Ecol. Prog. Ser. 292, 301-310.

Green, A. L. Bellwood, D. R. (2009) Monitoring functional groups of herbivorous reef fishes as indicators of coral reef resilience. A practical guide for coral reef managers in the Asia Pacific region. IUCN working group on Climate Change and Coral Reefs. IUCN, Gland. 70p.

Guzmán-Chávez, M. G. (2016) El impacto del turismo en la conservación de la biodiversidad en San Luis Potosí. Soc. Amb. 11, 148-159.

Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. Black. W. C. (1999) Multivariate data analysis. Nueva Jersey. Prentice Hall. 814 pp.

Heck, K. L. J., Hays, G. Orth, R. J. (2003) Critical evaluation of the nursery role hypothesis for seagrass meadows. Mar. Ecol. Prog. Ser. 253, 123-136.

Hernández-Velasco, A., Caamal, J., Suárez, A., Pérez-Alarcón, F. Fulton, S. (2018) Protocolo de Monitoreo para Reservas Marinas. Com. Bio. Guaymas, Sonora. 36p.

Higgins, E., Metaxas, A. Scheibling, R. E. (2022) A systematic review of artificial reefs as platforms for coral reef research and conservation. Front. Mar. Sci. (7), 282.

Humann, P. DeLoach, N. (2011) Reef Creature identification: Florida, Caribbean, Bahamas. 5a ed. Jacksonville, Florida: New World Publications. 548p.

Hylkema, A., Debrot, A. O., Osinga, R., Bron, P. S., Heesink, D. B., Izioka, A. K. Murk, A. J. (2020) Fish assemblages of three common artificial reef designs during early colonization. Ecol. Eng. 157.

Hylkema, A., Hakkaart, Q. C. A., Reid, C. B., Osinga R., Murk, A. J. Debrot, A. O. (2021) Artificial reefs in the Caribbean: A need for comprehensive monitoring and integration into marine management plans. Ocean Coast Manag. 209 (1), 105672.

Jackson, J. B., Donovan, M. K., Cramer, K. Lam, V. (2014) Status and trends of Caribbean coral reefs: 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network. Switzerland: Global Coral Reef Monitoring Network. 65-99.

Jordan, L. K. B., Gilliam, D. S. Spieler, R. E. (2005) Reef fish assemblage structure affected by small-scale spacing and size variations of artificial patch reefs. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 326 (2), 170-186.

Koeck, B., Tessier, A., Brind'Amour, A., Pastor, J., Bijaoui, B., Dalias, N., Astruch, P., Saragoni, G. Lenfant, P. (2014) Functional differences between fish communities on artificial and natural reefs: a case study along the French Catalan coast. Aquat. Biol. 20, 219–234.

Komyakova, V., Chamberlain, D., Jones, G. P. Stephen, E. S. (2019) Assessing the performance of artificial reefs as substitute habitat for temperate reef fishes: Implications for reef design and placement. Sci. Total Environ. (668), 139-152.

Lee, M. O., Otake, S. Kim, J. K. (2018) Transition of artificial reefs (ARs) research and its prospects. Ocean Coast Manag. 154,55-65.

Layman, C. A., Allgeier, J. E. Montaña, C. G. (2016) Mechanistic evidence of enhanced production on artificial reefs: a case study in a Bahamian seagrass ecosystem. Ecol. Eng. 95, 574-579.

Lemoine, H. R., Paxton, A. B., Anisfeld, S. C., Rosemond, R. C. Peterson, C. H. (2019) Selecting the optimal artificial reefs to achieve fish habitat enhancement goals. Biol. Conserv. 238p.

López-Jiménez, I. T., Flórez-Leiva, L. Quan-Young, L. I. (2020) Influencia de la herbívora sobre la interacción alga-coral en un arrecife coralino de bahía Capurganá, Caribe colombiano. Rev. biol. trop. 68(3), 729-742.

Lukens, R. R. Selberg C. (2004). Guidelines for Marine Artificial Reef Materials. 2a Ed. Ocean Springs, Miss. and Washington, D.C. GSMFC. 198p.

Mancera-Pineda, J. E., Gavio, B. Lasso-Zapata, J. (2013). Principales amenazas a la biodiversidad marina. Act. Biol. 35 (99),11–133.

Marenter. (2014) Aplicaciones diversas de Arrecifes Artificiales a base de elementos de Concreto tipo Reef Ball. Revisado el 15 de abril de 2020. 10p. https://www.artificialreefs.org/ScientificReports/Aplicaciones%20Diversas%20de%20%20Arrecifes%20Artificiales.htm

Margalef, R. (1972) Homage to E. Hutchison, or why is there an upper limit to diversity. Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences. 44, 21-235.

Matsunaga, H., Tanishiki, K. Tsuzimoto, K. (2009) Environment-friendly block, "ferroform," made from steel slag. Technical Report. 13, 53–57.

McField, M., Kramer, P., Giró-Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N. Rueda-Flores, M. (2020) Mesoamerican reef report card. Evaluation of ecosystem health, 36p.

Mora-Donjuán, C. A., Burbano-Vargas, N. O., Méndez-Osorio, C. Castro-Rojas, D. F. (2017) Evaluación de la biodiversidad y caracterización estructural de un Bosque de Encino (Quercus) en la Sierra Madre del Sur, México. Rev. For. Meso. Kurú. 14(35), 68-75.

Ogawa, Y. (1968) Experiments on the attractiveness of artificial reefs for marine fishes-VIII. Attraction of young yellow tail to the model fish reefs. SSJJ. 34,169-176.

O'Toole, A. C., Danylchuk, A. J., Goldberg, T. L., Suski, C. D., Philipp, D. P. Brooks, E. (2011) Spatial ecology and residency patterns of adult great barracuda (*Sphyraena barracuda*) in coastal waters of The Bahamas. Mar. Biol. 158, 2227–2237.

Paddack, M. J., Reynolds, J. D., Aguilar, C., Appeldoorn, R. S., Beets, J., Burkett, E. W., Chittaro, P. M., Clarke, K., Esteves, R., Fonseca, A. C., Forrester, G. E., Friedlander, A. M., García-Sais, J., González Sansón, G., Jordan,L. K. B., McClellan, D. B., Miller, M. W.., Molloy, P. P., Mumby, P. J., Nagelkerken, I., Nemeth, M., Navas-Camacho, R., Pitt, J., Polunin, N. V. C., Reyes Nivia, M. C., Robertson, D. R., Rodríguez-Ramírez, A., Salas, E., Smith, S. R., Spieler, R. E., Steele, M. A., Williams, I. D., Wormald, C. L., Watkinson, A. R Côté, I. M. (2009) Recent region-wide declines in Caribbean reef fish abundance. Curr. Biol. 19 (7), 590-595.

Paxton, A. B., Revels, L. W., Rosemond, R. C., Van Hoeck, R. V., Lemoine, H. R., Taylor, J. C. Peterson, C. H. (2018) Convergence of fish community structure between a newly deployed and an established artificial reef along a five-month trajectory. Ecol. Eng. 123,185-192.

Paxton, A. B., Newton, E. A., Adler, A. M., Van Hoeck, R. V., Iversen, E. S., Taylor, J. C., Peterson, C. H. Silliman, B. R. (2020) Artificial habitats host elevated densities of large reef-associated predators. PLoS One 2:15 (9).

Perkol-Finkel, S., Miloh, T., Zilman, G., Benayahu, S.I. Benayahu, Y. (2006) Floating and fixed artificial reefs: the effect of substratum motion on benthic communities. Mar. Ecol. Prog. Ser. 317:9-20.

Pérez-Cervantes, E., Navarro-Espinoza, E., Estrada-Saldívar, N. A., Espinosa-Andrade, N., Melo-Merino, S. M., Rivas-Soto, M. Álvarez-Filip, L. (2017) Estado de conservación de los arrecifes de coral de la Península de Yucatán. Greenpeace. UNAM. 24p.

Pequeño-Ledezma, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A. Molina-Guerra, V. M. (2017) Análisis estructural de dos áreas del matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. Mad. y Bos. 23(1), 121-132.

Pizarro, V., Carrillo, V. García-Rueda, A. (2014) Revisión y estado del arte de la restauración ecológica de arrecifes coralinos. Biot. Col. 15,113-127.

Precht, W. F. (2006). Coral reef restoration handbook. Taylor y Francis. 366p.

Robertson, D. R., Peña, E. A., Posada, J. M. Claro, R. (2019) Peces Costeros del Gran Caribe: sistema de Información en línea. Versión 2.0 Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá.

SAGARPA. (2010) Caracterización oceanográfica y pronóstico de la variabilidad de los mares mexicanos y de algunas regiones marinas y su aplicación a la pesca y acuacultura. Mazatlán, Sinaloa. 83p.

Santamaría-Reyes, J. A., Zamora Torres, A. I. García-García, J. O. (2019) Los arrecifes artificiales en la Cuenca del Pacífico: Una revisión de su utilización y resultados. PORTES. 16(25), 161-178.

Santander, L. C., López-Mejía, M., Mejía-Ortiz, L. M. Gallegos-Jiménez, O. (2012) Evaluación del impacto ambiental de arrecifes artificiales para uso turístico en Cozumel, México, Invest. Cien. AUG. 56,18-26.

Santander-Botello L. C. Propin Frejomil. (2009) Impacto ambiental del turismo de buceo en arrecifes de coral. Cuad. Tur. 24, 207-227.

Seaman, Jr. W. Jensen, A. (2000) Purposes and practices of artificial reef evaluation. 1-19. En: Seaman Jr., W. Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats. CRC Press, Boca Ratón. 246p.

SECTUR. (2013) Estudio de la vulnerabilidad y programa de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático en diez destinos turísticos estratégicos, así como propuesta de un sistema de alerta temprana a eventos hidrometeorológicos extremos. Modelo hidrodinámico, Cancún. 49p.

Shin, P. K. S., Cheung, S. G., Tsang, T. Y. Wai, H.Y. (2014). Ecology of artificial reefs in the subtropics. Adv. Mar. Biol. (68) 1-63.

SIC, Sistema de información cultural de México. (2022). https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=museo&table_id=1438. Revisado el 20 de septiembre del 2022.

Silva-Lima, J., Zalmon, I. R. Love, M. (2019) Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs. Ocean Coast Manag. 154, 55-65.

Simón, T., Pinheiro, H. T. Joyeux, J. C. (2011) Target fishes on artificial reefs: evidences of impacts over nearby natural environments. Sci. Total Environ. 409, 4579-4584.

Schmitt, E. F., Semmens, B. X. Sullivan, K. M. (1993) Research Applications of Volunteer Generated Coral Reef Fish Surveys. Coral Gables: The Nature Conservancy and the University of Miami, Department of Biology Report, 38.

Sreekanth, G., Manju, L. Singh-Pratap, N. (2017) Can artificial reefs really enhance the inshore fishery resources along Indian Coast A critical review. Proc. Natl. Acad. Sci. 24-26.

Stanley, D. R. Wilson D. A. (2000) Variation in the density and species composition of fishes associated with three petroleum platforms using dual beam hydroacoustics. Fish. Res. 47,161-172.

Suyatna, I., Saptura, N. A. Eryati, R. (2019) Fish colonization of the artificial reef at Gusung Batu Lampe Muara Badak, Kutai Kartanegara, East Kalimantan, Indonesia: a preliminary study. 8: 40.

Ushiama, S., Smith, J. A., Suthers, I. M., Lowry, M. Johnston, E. L. (2016) The effects of substratum material and surface orientation on the developing epibenthic community on a designed artificial reef. Biofouling. 32, 1049-1060.

Uyarra, M. C., Watkinson, A. R. Cote, I. M. (2009) Managing dive tourism for the sustainable use of coral reefs: validating diver perception of attractive site features. Env. Man. 43(1), 1-16.

Váldez, M. C. G., Guzmán, L. M. A., Valdés G. A., Forougbakhch, P. R., Alvarado, V., M. A. Rocha E. A. (2018) Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. Rev. biol. trop. 66(4), 1674-1682.

Walter I. J. G. Patterson W. F. (2001) Movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*), greater amberjack (*Seriola dumerili*), and gray triggerfish (*Balistes capriscus*) in the Gulf of Mexico and the utility of marine reserves as management tools. Proc. Annu. Gulf Caribb. (52). 686–99.

Yeager, L. A., Layman, C. A. Allgeier, J. E. (2011) Effects of habitat heterogeneity at multiple spatial scales on fish community assembly. Oec. 167 (1),157.