

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Funcionalidad física de los arrecifes de coral en el Pacífico
mexicano (Bahía de Los Ángeles, Bahía de La Paz, Bahía de
Banderas y Bahías de Huatulco)**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestra en Ciencias

Presenta:

Claudia Rebeca Navarrete Torices

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Claudia Rebeca Navarrete Torices

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Director de tesis

Dra. Ma. Elena Solana Arellano

Dra. María Clara Arteaga Uribe



Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Claudia Rebeca Navarrete Torices** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ecología Marina.

Funcionalidad física de los arrecifes de coral en el Pacífico mexicano (Bahía de Los Ángeles, Bahía de La Paz, Bahía de Banderas y Bahías de Huatulco)

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Director de tesis

Los corales son la base en la estructura y funcionamiento de los arrecifes. Sin embargo, en las últimas décadas, estos ecosistemas han sufrido un deterioro debido a presiones naturales, antrópicas y factores de gran escala como el cambio climático. En general, la cobertura de corales ha disminuido y aunque en algunos casos se ha observado su recuperación, la caracterización de la funcionalidad de la estructura física de los sistemas ha sido escasamente explorada. El presente trabajo evalúa la funcionalidad física de los arrecifes de coral en cuatro áreas a lo largo del Pacífico mexicano, empleando el Índice Funcional Arrecifal (IFA). El IFA considera la tasa de calcificación, la complejidad estructural y la abundancia de las especies de coral de en cada sitio; los valores que el índice puede adquirir varían de cero a uno, son valores cercanos a cero refieren a un arrecife con baja funcionalidad, mientras que los valores cercanos a uno indican un arrecife con alta funcionalidad. La cobertura coralina promedio de las cuatro áreas fue $35.62 \pm 15.01\%$, siendo Bahías de Huatulco (BH) quien presentó la mayor cobertura coralina con $55.61 \pm 21.94\%$, mientras que Bahía de Los Ángeles (BLA) tuvo la menor cobertura coralina ($17.16 \pm 0.08\%$). El IFA promedio de las áreas fue de 0.54 ± 0.12 , y con base en el indicador, BH tuvo una mayor funcionalidad con un IFA de 0.68 ± 0.09 , mientras que BLA tuvo una menor funcionalidad (0.34 ± 0.08). Los corales del género *Pocillopora* fueron los que mayor IFA aportaron en la mayoría de los sitios excepto en BLA que es representada por *Porites panamensis*. El coral con mayor coeficiente funcional (CF) fue *Pocillopora grandis* con 0.81, perteneciente a Bahía de Banderas (BB) y por ende fue el coral que mayor contribuyó al IFA en el área. El valor del IFA de 0.68 a lo largo del Pacífico mexicano, nos indica que tiene una alta complejidad estructural, debido a la forma de los corales *Pocillopora* que son clave para la permanencia de los arrecifes del área.

Palabras clave: Corales, *Pocillopora*, Índice de función arrecifal, Pacífico mexicano

Abstract of the thesis presented by **Claudia Rebeca Navarrete Torices** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Physical functionality of coral reefs in the mexican Pacific (Bahía de Los Ángeles, Bahía de La Paz, Bahía de Banderas y Bahías de Huatulco)

Abstract approved by:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Thesis Director

Corals are the basis for the structure and functioning of reefs. However, in recent decades, these ecosystems have suffered deterioration due to natural and anthropogenic pressures and large-scale factors such as climate change. In general, coral cover has decreased and although in some cases their recovery has been observed, the characterization of the functionality of the physical structure of the systems has been barely explored. This study evaluates the physical functionality of coral reefs in four areas along the Mexican Pacific, using the Reef Functional Index (IFA). The IFA considers the calcification rate, structural complexity, and abundance of coral species at each site; The values that the index can acquire vary from zero to one, values close to zero refer to a reef with low functionality, while values close to one indicate a reef with high functionality. The average coral cover of the four areas was $35.62 \pm 15.01\%$, with Bahías de Huatulco (BH) having the highest coral cover with $55.61 \pm 21.94\%$, while Bahía de Los Ángeles (BLA) had the lowest coral cover ($17.16 \pm 0.08\%$). The average IFA of the areas was 0.54 ± 0.12 , and based on the indicator, BH had higher functionality with an IFA of 0.68 ± 0.09 , while BLA had lower functionality (0.34 ± 0.08). Corals of the genus *Pocillopora* were the ones that contributed the highest IFA in most of the sites except in BLA, which is represented by *Porites panamensis*. The coral with the highest functional coefficient (CF) was *Pocillopora grandis* with 0.81, belonging to Bahía de Banderas (BB) and therefore was the coral that contributed the greatest to the IFA in the area. The IFA value of 0.68 along the Mexican Pacific indicates that it has a high structural complexity, due to the shape of the *Pocillopora* corals that are key to the permanence of the reefs in the area.

Keywords: Corals, *Pocillopora*, mexican Pacific, Reef Functional Index

Dedicatoria

A mi padre

Por su infinita presencia

A mi madre

Por su apoyo incondicional

A mi abue Margarita

Por la música que llevamos dentro

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por permitirme realizar mis estudios de posgrado en su institución y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado para el estudio del posgrado (CVU 794431).

A mi director, el Dr. Rafael Andrés Cabral Tena por haberme dirigido, orientado y sobre todo por haber depositado toda su confianza en mí para la primera salida de campo desde el día cero. Gracias por tu infinita paciencia y enfoque en las clases y reuniones. Gracias por los ánimos y las risas en salidas de campo, congresos, cursos y demás, en donde se han acumulado una serie de anécdotas merecedoras de contar a las siguientes generaciones. Gracias por recibirme, porque en estos dos años continué aprendiendo tanto de la academia como personalmente, con todo lo que se fue presentando.

A la Dra. Ma. Elena Solana Arellano, gracias por el apoyo brindado, por los comentarios en todos los avances. Gracias por sus valiosas recomendaciones, las pequeñas pláticas y por apoyar al emprendimiento de una estudiante sin beca.

A la Dra. María Clara Arteaga Uribe, gracias por sus valiosas recomendaciones y a sus atinadas observaciones que le daban sentido al trabajo de investigación. Gracias por las sugerencias que me ayudaron a acabar el escrito y por tomarse el tiempo de estar presente en los avances, así fuera en línea.

A mis colegas del laboratorio de EPZC-ARBIOLAB, por los ánimos en este recorrido de dos años. Por las posadas, congresos, y partidos de corales del norte que amenizaban toda la chamba.

A mis amigos, los más perreadores, los más chismosos, los más incontrolables, los más ruidosos, los más viajeros, los más mamados, los más dramáticos, los más bebedores, los más deportistas, los más “¿cómo les caería?”, los más clonazepam, los más “pasame el contacto de tu psicólogo”. Andrea, Wankwadlos, Jasivi (yo si te puse amiga), Mario, Denia, Maucito y Clau (por orden de aparición porque si no me sacan del grupo), gracias amigos por estar presentes en esta etapa de mi vida. Gracias por las incontables historias, a las idas al Irish, a la birria, a los globos, a los chismes y a las mentadas. Gracias amigos por la confianza, por mostrarse tal cual son porque ahora puedo referirme también a ustedes como mis amigos los más excepcionales.

A mi familia paceña, que nunca han quitado el dedo del renglón conmigo, gracias porque a pesar de la distancia y a mis cortas visitas a La Paz podíamos vernos aunque sea para actualizar el chisme.

A mi socia de emprendimiento, Eve, gracias, porque ese pequeño negocio de burritos nos hizo recordar que todo lo podemos. Gracias a Paty, que fue la idea ganadora para que esto iniciara y que junto con Marina pasamos las tardes trabajando con grandes pláticas.

A Torio, Yaya y Arya, que como tía luchona me tocó cuidarlos pero realmente ellos me ayudaron a mi salud mental.

Gracias totales

.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	6
1.3 Hipótesis.....	7
1.4 Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.1. Objetivos específicos.....	7
Capítulo 2. Metodología.....	8
2.1 Área de estudio	8
2.2 Trabajo de campo.....	11
2.3 Análisis de datos.....	11
Capítulo 3. Resultados	14
3.1 Descripción del coeficiente funcional	14
3.2 Contribución por especie al índice de función arrecifal.....	15

3.3	Cobertura coralina	17
3.4	Contribución a la cobertura coralina por especie	18
3.5	Índice de Función Arrecifal.....	19
3.6	Contribución al IFA por especie	21
Capítulo 4. Discusión.....		22
4.1	Coeficientes Funcionales.....	22
4.2	Análisis multidimensional de atributos morfo-funcionales	22
4.3	Cobertura Coralina	23
4.4	Índice de función arrecifal.....	26
Capítulo 5. Conclusiones		28
Literatura citada		29
Anexos.....		36

Lista de figuras

Figura	Página
1. Mapa de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. Bahía de Los Ángeles (BLA), Bahía de La Paz (BLP), Bahía de Banderas (BB) y Bahías de Huatulco (BH).	8
2. Mapa de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. Bahía de Los Ángeles (a), Bahía de La Paz (b), Bahía de Banderas (c) y Bahías de Huatulco (d).	10
3. Ordenamiento MDS por especie de todas las localidades. Los números 1, 2, 3 y 4 corresponden a BLA, BLP, BB y BH, respectivamente. Las especies <i>Porites panamensis</i> (Pp), <i>Pavona gigantea</i> (Pgi), <i>Pavona clavus</i> (Pcl), <i>Pavona varians</i> (Pva), <i>Psammocora stellata</i> (Ps), <i>Pocillopora capitata</i> (Pca), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pd), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pm), <i>Pocillopora effusus</i> (Pe), <i>Pocillopora grandis</i> (Pgr) y <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pv). Las variables altura (H), índice de rugosidad (IR) y tasa de calcificación con el símbolo triangular negro.	15
4. Aproximación al gráfico del MDS de las especies de todas las localidades. Los números 1, 2, 3 y 4 corresponden a BLA, BLP, BB y BH, respectivamente. Las especies <i>Porites panamensis</i> (Pp), <i>Pavona gigantea</i> (Pgi), <i>Pavona clavus</i> (Pcl), <i>Pavona varians</i> (Pva), <i>Psammocora stellata</i> (Ps), <i>Pocillopora capitata</i> (Pca), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pd), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pm), <i>Pocillopora effusus</i> (Pe), <i>Pocillopora grandis</i> (Pgr) y <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pv). Las variables altura (H), índice de rugosidad (IR) y tasa de calcificación con el símbolo triangular negro. ..	16
5. Cobertura coralina promedio de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano de norte a sur. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Barras de error representan a la desviación estándar y los valores por encima de las barras son el promedio de la cobertura total de las localidades.	17
6. Mapa de la variación espacial de cobertura coralina de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. BLA (Bahía de Los Ángeles), BLP (Bahía de La Paz), BB (Bahía de Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Los números en el círculo son los valores de cobertura de cada bahía.	18
7. Cobertura coralina promedio de las localidades muestreadas. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Las especies de coral son: <i>Pocillopora capitata</i> (Pcap), <i>Pocillopora damicornis</i> (Pdam), <i>Pocillopora meandrina</i> (Pmea), <i>Pocillopora verrucosa</i> (Pver), <i>Pavona gigantea</i> (Pgig), <i>Psammocora stellata</i> (Pste), <i>Pavona clavus</i> (Pcla), <i>Pocillopora effusus</i> (Peff), <i>Pocillopora grandis</i> (Pgra), <i>Pocillopora varians</i> (Pvar) y <i>Porites panamensis</i> (Ppan). Barras de error son la desviación estándar.	19
8. Valores del Índice de Función Arrecifal de las localidades muestreadas. a lo largo del Pacífico mexicano de norte a sur. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Barras de error representan a la desviación estándar y los valores por encima de las barras son el promedio del IFA total de las localidades.	20
9. Mapa de la variación espacial del Índice de Función Arrecifal de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. BLA (Bahía de Los Ángeles), BLP (Bahía de La Paz), BB (Bahía de Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Los números en el círculo son los valores de cobertura de cada bahía.	20

10. Valores del Índice de Función Arrecifal de las localidades muestreadas. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Las especies de coral son: *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pavona gigantea* (Pgig), *Psammocora stellata* (Pste), *Pavona clavus* (Pcla), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora grandis* (Pgra), *Pocillopora varians* (Pvar) y *Porites panamensis* (Ppan). Barras de error son la desviación estándar..... 21

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Altura (promedio \pm desviación estándar), índice de rugosidad (promedio \pm desviación estándar), tasa de calcificación y coeficientes funcionales (CF) de las especies de coral de cada localidad. * N=1.....	14
2. Valores la altura, índice de rugosidad y tasa de calcificación estandarizados de las especies de cada localidad.....	36
3. Cobertura coralina (promedio \pm desviación estándar) e Índice de función arrecifal (promedio \pm desviación estándar) de cada localidad (n=135).....	37
4. Análisis post hoc para diferencia de medianas de la cobertura coralina entre las localidades. Los numero en rojo indican los valores menores a una $p < 0.05$	38
5. Contribución a la cobertura coralina por especie de cada localidad. Bahía de Los Ángeles (BLA), Bahía de La Paz (BLP), Bahía de Banderas (BB) y Bahías de Huatulco (BH).....	39
6. Análisis post hoc para diferencia de medianas del índice de Función Arrecifal entre las localidades.....	40
7. Contribución de IFA por especie de cada localidad. Bahía de Los Ángeles (BLA), Bahía de La Paz (BLP), Bahía de Banderas (BB) y Bahías de Huatulco (BH).	41

Capítulo 1. Introducción

Los arrecifes coralinos son uno de los ecosistemas con mayor biodiversidad en el mar. Estos ecosistemas albergan una riqueza estimada de 172 mil a más de 9 millones de especies en todo el mundo (Plaisance et al., 2011). Los corales constructores de arrecifes desempeñan un papel primario en la estructura y función del arrecife (Molina-Luna, 2013), ya que, debido a su capacidad para depositar carbonato de calcio como parte de la formación de su esqueleto, contribuyen con la formación de estructuras tridimensionales complejas (Cabral-Tena et al., 2018). Los arrecifes de coral proveen hábitat y refugio a una amplia gama de organismos asociados que juegan un rol importante en el flujo de materia y energía de las redes tróficas de los arrecifes (Plaisance et al., 2011; Paz-García et al., 2015; Tortolero-Langarica et al., 2017a; Calderón-Aguilera et al., 2021). De igual manera, los arrecifes de coral ofrecen servicios ecosistémicos de gran valor a las comunidades humanas costeras. Estos servicios pueden ser sociales, culturales o económicos como, por ejemplo, los recursos pesqueros (Reyes-Bonilla et al., 2014). Además, los arrecifes de coral dan protección a la línea de costa contra el oleaje y los daños que pueden causar las tormentas y los huracanes (Perera-Valderrama et al., 2020). Asimismo, proporcionan arena, dando origen a playas que atraen diferentes actividades; el turismo costero, por ejemplo, genera aproximadamente \$36 billones de dólares anualmente a nivel mundial (Martínez et al., 2007; Spalding et al., 2017).

En las últimas décadas, los arrecifes coralinos se han deteriorado debido a eventos naturales como los huracanes o a eventos como la acidificación del océano y el calentamiento global; lo que ha provocado una disminución en la cobertura coralina y cambios en los ensamblajes de sus comunidades (Álvarez-Filip et al., 2013; Olán-González 2018). Dichos eventos y, en conjunto con las presiones humanas locales, han provocado una disminución en la capacidad de resiliencia de los arrecifes de coral para hacer frente al cambio climático (Perera-Valderrama et al., 2020).

Dada la importancia de la pérdida de cobertura de coral en el mundo, diversos estudios se han orientado a evaluar el estado de salud de los ecosistemas arrecifales por medio de la abundancia o cobertura de coral vivo (Selig y Bruno, 2010). No obstante, la cobertura coralina como única métrica podría no reflejar el verdadero estado de salud de los arrecifes coralinos ya que no se considera el potencial físico del arrecife, que está dado por la capacidad de los corales constructores de arrecifes (Cabral-Tena et al., 2018). De manera que algunos estudios recientes han integrado los atributos ecológicos de los corales que son clave para la persistencia de los arrecifes y que pueden verse afectados por la abundancia de cada especie de coral (Medellín-Maldonado et al., 2016; Darling et al., 2019). Los atributos funcionales que determinan

la capacidad de las comunidades coralinas para crear estructuras tridimensionales complejas mediante la precipitación de carbonato de calcio establecerán la funcionalidad física de los arrecifes de coral (González-Barrios et al., 2021).

La evaluación de los atributos funcionales asociados a la funcionalidad física nos ayuda a entender el desempeño de las especies de coral, su función en el ecosistema (Mouillot et al., 2013) y las diferentes respuestas de los arrecifes coralinos ante los impactos naturales o antropogénicos (Mouillot et al., 2014). González-Barrios y Álvarez-Filip (2018), propusieron el Índice de Funcionalidad Arrecifal (IFA) con el cual se evalúa la funcionalidad física de los arrecifes coralinos y que está delimitada por tres atributos de cada especie de coral: la abundancia (cobertura), la complejidad estructural (altura, diámetro y rugosidad) y la tasa de calcificación (extensión y densidad del esqueleto) de las especies de coral (Álvarez-Filip et al., 2013; Cabral-Tena et al., 2018; González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018).

Los arrecifes en el que predominan las especies de coral con complejidad estructural alta y que presentan tasas de crecimiento altas son comunidades más diversas y mantienen la estructura funcional de las comunidades a través del tiempo (Graham & Nash, 2013). Por otro lado, en los arrecifes en los que se presenta una menor diversidad de especies de coral, después de una perturbación, las especies constructoras de arrecifes pueden ser reemplazadas por especies oportunistas, disminuyendo inicialmente la cobertura coralina para después convertirse en una comunidad dominada por macroalgas o algas coralinas incrustantes que no contribuyen primordialmente a la acreción arrecifal, es decir al crecimiento vertical del arrecife (Cabral-Tena et al. 2023), lo que perjudica al funcionamiento del arrecife (Bellwood et al., 2004; Álvarez-Filip et al., 2013). Por ejemplo, en el Caribe, en donde los corales del género *Acropora* han sido reemplazados por corales de los géneros *Porites* y *Agaricia*, se ha comprometido la funcionalidad del arrecife al reducir la producción de carbonato de calcio y disminuir la complejidad topográfica del arrecife que aportaban las especies constructoras (Álvarez-Filip et al., 2013).

En el Pacífico Oriental Tropical (POT), que se extiende desde el mar de Cortez hacia el sur hasta Ecuador (Cortés, 2003), se presentan comunidades coralinas que se caracterizan por ser agrupaciones periféricas y aisladas, están separadas de las comunidades de las islas del Pacífico central, presentan poco desarrollo arrecifal y están dominados por pocos géneros de coral (*Pocillopora*, *Pavona* y *Porites*) (Baums et al., 2012). Por lo que, bajo un escenario de calentamiento global y acidificación en el océano, la estructura física de los corales podría verse afectada con blanqueamiento coralino, disminución del crecimiento del esqueleto y de la tasa de calcificación (Rojas-Higuera y Pabón-Caicedo, 2015); y en consecuencia los arrecifes de coral del POT podrían colapsar debido a estas limitaciones y presentar una lenta recuperación en su actividad

reproductiva y de reclutamiento (Romero-Torres et al., 2020). En el POT, los corales del género *Pocillopora* presentan un crecimiento con tasas de calcificación y extensión altas en contraste con los corales masivos como los corales del género *Pavona* y *Porites* (Manzello, 2010, Tortolero-Langarica et al., 2017a, Norzagaray-López et al., 2019).

En el Pacífico mexicano, los arrecifes de coral se caracterizan por presentar arrecifes pequeños con baja diversidad de especies, generalmente dominados por especies del género *Pocillopora* (>90%) y con una menor contribución de los corales del género *Pavona* (<5%) y *Porites* (<1%) (Medellín-Maldonado et al., 2016; López-Pérez et al., 2019). Considerando que los sistemas coralinos del Pacífico mexicano tienen una menor riqueza de especies de coral y, por lo tanto, una baja funcionalidad, la disminución en la abundancia coralina podría generar cambios en la dominancia de las especies de coral y alterar las funciones ecológicas de la comunidad coralina (Cabral-Tena et al., 2018; 2020).

De manera particular, los corales del género *Pocillopora* tienen una ventaja frente a otras especies en el Pacífico mexicano, debido a que presentan una estructura ramificada y una alta tasa de calcificación (Manzello, 2010; Norzagaray-López et al., 2019). Sin embargo, los cambios en las condiciones ambientales podrían verse reflejadas en los parámetros de crecimiento (e.g. extensión y densidad) de los corales *Pocillopora* en cada sitio (Medellín-Maldonado et al., 2016). Además de comprometer la complejidad estructural del ecosistema, afectaría a largo plazo la composición de la comunidad de los arrecifes de coral (Álvarez-Filip et al., 2013).

1.1 Antecedentes

Los estudios sobre la pérdida de cobertura coralina a nivel local y global son escasos por lo que se dificulta conocer el estado de salud de los arrecifes. Bruno y Selig (2007), realizaron el primer análisis a escala regional y a largo plazo de los eventos de mortalidad masiva de corales en 2667 arrecifes de coral submareal que se realizaron entre 1968 y 2004 en el Indo-Pacífico. En el estudio se muestra que la cobertura media de coral en el Indo-Pacífico se redujo del 42.5% a principios de la década de 1980 a 22.1% en el año 2003. Siendo, los eventos de blanqueamiento masivo de corales que causaron la mortalidad de los corales, particularmente en los años 1998, 1999 y 2002. En el Golfo de California, Reyes-Bonilla y López-Pérez (2009) estimaron los cambios en la acreción de carbonatos de los corales a partir de eventos de El Niño de 1982-1983, teniendo en cuenta que los factores bióticos son importantes en la supervivencia y evolución de los arrecifes de coral. Se encontró que los sitios de Cabo Pulmo, Bahía Chileno y Bahía San

Gabriel presentaron los valores más altos de depósito de carbonatos (20.7, 15.2 y 13.5 kg CaCO₃ m⁻² año⁻¹, respectivamente), mientras que Isla Cerralvo es el sitio con el valor más bajo que deposita 0.6 kg CaCO₃ m⁻² año⁻¹; la heterogeneidad de producción de carbonatos en el golfo de California es atribuida a la composición de la comunidad, la cobertura coralina y la dimensión del arrecife. Dado que los registros históricos de producción de carbonatos en los corales datan de 1987 únicamente para Cabo Pulmo, calcularon que este arrecife que tiene 150 ha contribuye entre 13.482 y 31.023 toneladas de CaCO₃ ha⁻¹ año⁻¹ pero que ha disminuido a causa de las perturbaciones a través de los años.

Asimismo, Norzagaray-López et al. (2013), determinaron los parámetros de crecimiento de *Porites panamensis*, como la densidad del esqueleto de coral y su extensión en tres comunidades arrecifales del Pacífico mexicano. La comparación de densidad esquelética entre los sitios fue similar (≈ 1.22 g CaCO₃ cm⁻³) pero la tasa de crecimiento presentó variaciones entre 0.34 a 0.95 cm año⁻¹, siendo las Islas Marietas el sitio con menor aporte. También establecieron los valores de producción de CaCO₃ para esta especie, siendo Cabo Pulmo el sitio con mayor producción (0.21 ± 0.24 kg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹), seguido de Bahía de los Ángeles (producción puntual de 0.20 kg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹) e Isas Marietas (0.17 ± 0.16 kg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹). Los autores mencionan que *P. panamensis* presenta una baja producción de CaCO₃ caracterizada por una reducida tasa de calcificación y cobertura coralina; y que el principal factor en las diferentes tasas de crecimiento es la morfología de las colonias de coral que presentan un crecimiento tipo submasivo e incrustante.

Medellín-Maldonado et al. (2016), determinaron los parámetros de crecimiento coralino de las principales especies constructoras de arrecifes del sur del Pacífico. Para los corales ramificados, *Pocillopora damicornis* fue la especie que presentó el valor promedio más alto de densidad más alto (1.78 g CaCO₃ cm⁻³) y un crecimiento en extensión de 2.94 cm año⁻¹, lo que resulta en una tasa de calcificación de 5.23 g CaCO₃ cm⁻² año⁻¹, la más alta registrada para el género. El coral *Porites panamensis* tuvo los valores más bajos en densidad (1.12 g CaCO₃ cm⁻³), extensión (0.31 cm año⁻¹) y calcificación (0.34 g CaCO₃ cm⁻² año⁻¹), mientras que *Pavona varians* tuvo una densidad de 1.04 g CaCO₃ cm⁻³, una extensión de 0.43 cm año⁻¹ y una calcificación de 0.45 g CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Observaron que en los años de mayor extensión de cada colonia, se tuvo el valor más alto de calcificación, por lo que se sugiere que las colonias de *P. panamensis*, *P. lobata*, *P. gigantea* y *P. varians* que se desarrollan en la costa del Pacífico del sur de México invierten la mayoría de sus recursos en extender su crecimiento para ocupar una mayor área.

Por otro lado, el identificar las especies que dominan en las comunidades coralinas es imprescindible para conocer cómo funcionan los arrecifes coralinos. Álvarez-Filip et al. (2013), desarrollaron modelos con

cuatro géneros de corales; dos de ellos importantes en la construcción arrecifal (*Acropora* y *Orbicella*) y los otros dos géneros altamente competitivos (*Porites* y *Agaricia*), en el estudio, se exploró la reorganización del ensamblaje coralino que soportará el funcionamiento del arrecife ante futuros escenarios cambiantes. Ante la pérdida de las especies constructoras de arrecife como fue el caso del coral *Acropora* y su reemplazo por especies oportunistas (*Porites* y *Agaricia*) resultó en una pérdida de 56% del potencial de calcificación de la comunidad tras solo siete años después del suceso. Siendo la riqueza de especies una forma de prevenir o retrasar el colapso de los arrecifes coralinos en ecosistemas diversos, debido a que algunas especies pueden cumplir las diferentes propiedades funcionales dando estabilidad al arrecife a largo plazo.

Los estudios basados en atributos son cada vez más adecuados para comparar la riqueza o composición de las especies y para la comprensión mecánica de su ensamblaje. Particularmente para corales, Darling et al. (2012), realizaron una clasificación de estrategias de vida basada en atributos ecológicos de los corales escleractínios. Se evaluaron 847 especies (101 del Atlántico y Caribe, y 746 del Indo-Pacífico) y 11 atributos que influyen en la dinámica de la población (por ejemplo, forma de crecimiento, formación solitaria o colonial, tamaño de la colonia). Con ello, identificaron cuatro estrategias de historia de vida de las especies de coral a nivel global: competitivas, oportunistas, tolerantes al estrés y generalistas.

Aunado a estas investigaciones, recientemente se propuso un método para estimar la contribución específica de los corales a la funcionalidad física de un arrecife. González-Barrios y Álvarez-Filip (2018) implementaron el índice de funcionalidad arrecifal (IFA) con tres atributos principales en la dinámica ecológica de los arrecifes de coral: la tasa de calcificación, la complejidad morfológica y la cobertura coralina de cada especie presente en el sistema. El análisis de cobertura coralina se llevó a cabo en 190 sitios del arrecife mesoamericano del Atlántico y con 47 especies de corales constructores de arrecifes, pero únicamente el 4% de los sitios se encontraba en un estado funcional alto (IFA= >0.62) y en el 40% de los sitios dominaban corales masivos y foliosos, pero en condiciones funcionalmente dañadas y desfavorables (IFA= <0.47). Los autores proponen el IFA como herramienta para evaluar el impacto funcional de la composición de la comunidad coralina (como la pérdida de determinadas especies clave) y para estimar la historia del funcionamiento de los arrecifes ante factores de estrés

En el sur del Pacífico mexicano, Cabral Tena et al. (2020) estimaron la contribución funcional específica de los corales en arrecifes de Huatulco, Oaxaca, mediante el Índice de Función Arrecifal (IFA) para explorar el potencial funcional de los arrecifes. Las especies con mayor cobertura relativa >40% fueron *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora verrucosa* y *Pocillopora capitata* mientras que las especies con menor cobertura

relativa de <10% fueron *Porites panamensis* y *Pavona gigantea*. Los autores señalan que la presencia de especies del género *Pocillopora* son de gran importancia en las comunidades arrecifales ya que contribuyen a la acreción arrecifal, así como para el funcionamiento de los arrecifes coralinos en el Pacífico Oriental Tropical, pero se encuentran afectados ante las perturbaciones.

Finalmente, González-Barrios y colaboradores (2021) realizaron un análisis para observar la variación de la funcionalidad física de 56 arrecifes en el Caribe mexicano y los cambios de la cobertura coralina entre el 2005 y el 2018. Los autores observaron que tanto a nivel regional y en la mayoría de los arrecifes analizados, tanto la cobertura coralina como la funcionalidad física de los arrecifes aumentaron, pero a ritmos diferentes. La cobertura media de coral aumentó 60% en el período de 13 años mientras que el valor medio del IFA aumentó solo 13%, debido a que el incremento de la cobertura coralina fue dominado por especies de coral con poca acreción arrecifal, que, por aquellas especies con estructuras tridimensionales, las cuales contribuyen mayormente al ensamblaje de los arrecifes coralinos. Por lo que, se resalta la importancia identificar las estrategias de vida de las especies de coral para comprender la dinámica funcional de los arrecifes.

1.2 Justificación

Los arrecifes coralinos proveen de numerosos servicios ecosistémicos de gran valor ecológico y económico. Su importancia se atribuye a la complejidad estructural que poseen los corales arrecifales, ya que, debido a su capacidad de formar estructuras tridimensionales de carbonato de calcio como parte de su crecimiento, contribuyen al desarrollo de hábitats y, por lo tanto, a definir la composición de las comunidades arrecifales. No obstante, los estudios en donde se identifiquen cuáles son los componentes morfológicos de las especies de coral que contribuyen a la funcionalidad física del ensamblaje son pocos. Este trabajo evaluará la funcionalidad física que se presenta a lo largo de cuatro áreas con presencia de arrecifes coralinos en el Pacífico mexicano y, siendo uno de los primeros estudios a esta escala espacial, supondrá un avance significativo en la comprensión de estos importantes ecosistemas. Estas localidades fueron seleccionadas debido a sus condiciones ambientales contrastantes, ensamblajes de especies coralinas y su cobertura en general. Además, las zonas seleccionadas son representativas de las formaciones arrecifales más importantes del Pacífico mexicano, lo que permitirá, a su vez, evaluar la función geoecológica potencial de los arrecifes coralinos costeros de esta área. Así mismo, se pretende obtener más información sobre el Índice de Función Arrecifal, ya que esta herramienta nos ayudará a

conocer el estado de salud de los arrecifes y generar una línea base para futuras políticas de conservación y gestión adecuadas.

1.3 Hipótesis

Dado que la funcionalidad física (FF) de los arrecifes de coral depende de los atributos de cobertura, complejidad y la tasa calcificación de los corales, así como de la configuración del ensamblaje, se espera que el índice de función arrecifal (IFA) tenga un valor alto en donde dominen los arrecifes de coral con mayor cobertura, complejidad y calcificación. Dado que los corales del género *Pocillopora* presentan un coeficiente funcional (CF) alto debido a su alta, complejidad y tasa de calcificación, y debido a que al Sur del Pacífico mexicano (Pm) hay mayor abundancia de corales *Pocillopora*, se espera que, en nuestras áreas estudiadas (BLA, BLP, BB y BH) al Sur del Pm se presente un IFA mayor.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la funcionalidad física de los arrecifes del Pacífico mexicano (Bahía de Los Ángeles, Bahía de La Paz, Bahía de Banderas y Bahías Huatulco)

1.4.1. Objetivos específicos

- Describir el índice funcional arrecifal (IFA) de los arrecifes del Pacífico mexicano
- Determinar si se presenta un patrón (tendencia) espacial de funcionalidad física a lo largo del Pacífico mexicano
- Determinar cuáles son los corales escleractínios que contribuyen en mayor medida a la funcionalidad física

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en arrecifes coralinos y rocosos localizados en el Pacífico mexicano, que se encuentran distribuidos desde Bahía de Los Ángeles (31° 1' N, 113° 3' O), Baja California, hasta la sección norte del Golfo de Tehuantepec, Oaxaca (16° N, 95° O) (Reyes-Bonilla y López-Pérez, 2009). El Pacífico mexicano presenta una plataforma continental angosta, no obstante, se han asentado arrecifes coralinos de tamaño pequeño y distribuidos en parches y agregaciones densas (Carpizo-Ituarte et al., 2011).

En general, los arrecifes del Pacífico mexicano se encuentran en aguas someras con profundidades hasta los 25 metros (Reyes Bonilla, 2003) y presentan mareas diurnas mixtas con oleaje fuerte, a excepción de los lugares como caletas o bahías que presentan protección (Kessler 2006).

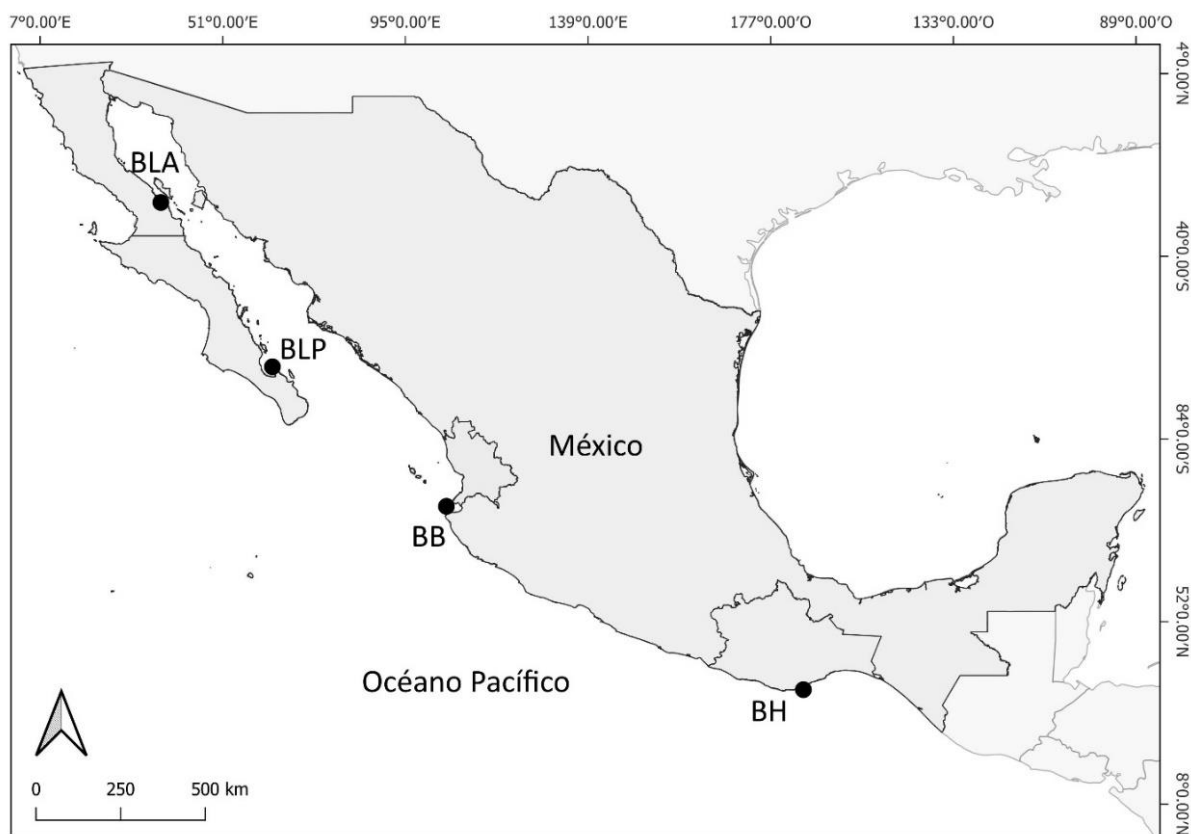


Figura 1 Mapa de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. Bahía de Los Ángeles (BLA), Bahía de La Paz (BLP), Bahía de Banderas (BB) y Bahías de Huatulco (BH).

Debido a que las localidades muestreadas (Bahía de Los Ángeles, Bahía de La Paz, Bahía de Banderas y Bahías de Huatulco) presentan una amplia variedad de geomorfología y condiciones oceanográficas distintas; las características y composiciones de los arrecifes coralinos se describirán por separado de Norte a Sur.

Bahía de Los Ángeles (BLA). La Reserva de la Biósfera de Bahía de los Ángeles, Canales de Ballenas y de Salsipuedes (Fig. 2a) se localiza en el estado de Baja California (28.9° N, -113.1° W) en la costa noroccidental del Golfo de California (DOF, 2007a). Se caracteriza por ser una región con grandes islas adyacentes y con fuertes corrientes de marea. Presenta cambios extremos de temperatura superficial del mar durante verano de 14 a $<30^{\circ}\text{C}$, con una salinidad promedio de 35.4 UPS y debido a su estructura de hábitat y características oceanográficas, en esta localidad no hay arrecifes coralinos ya que el agua es muy productiva, turbia y ácida en época de surgencias, sin embargo, existen zonas de arrecife rocoso con presencia de comunidades coralinas dominadas por *Porites panamensis* (Danemann y Ezcurra, 2008).

Bahía de La Paz (BLP). El Parque Nacional Zona Marina del Archipiélago de Espíritu Santo (PNZMAES) se ubica al oriente de la bahía de La Paz dentro del Golfo de California, Baja California Sur ($24^{\circ}24'$, $24^{\circ}36'$ N; $110^{\circ}18'$, $110^{\circ}27'$ O). Este archipiélago se certificó en la Lista Verde de Áreas Protegidas y Conservadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en 2008 (Ortega-Rubio et al., 2019). Está conformado por las islas mayores Espíritu Santo y La Partida, y por islas menores llamadas La Ballena, Los Islotes, Isla El Gallo y La Gallina (González-Medina, 2004). En 2007 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Decreto por el que se declara área natural protegida, con la categoría de Parque Nacional exclusivamente la Zona Marina del Archipiélago de Espíritu Santo (DOF, 2007b). La temperatura de la superficie del mar posee dos temporadas muy marcadas a lo largo del año, con temperatura máxima de 30°C en verano y temperatura mínima promedio de 20°C en invierno (CONANP, 2001). La salinidad presenta variaciones en los primeros metros de profundidad entre 35.74 y 34.9 partes por mil (CONANP, 2014). Las mareas en la bahía de La Paz son de carácter semidiurno relacionadas a las oscilaciones del Golfo de California y del Océano Pacífico; en la bahía, el reflujos entre la pleamar y la bajamar es el más intenso, ocasionando corrientes de mareas fuertes, mayores que las observadas en el flujo (González-Medina, 2004) (Fig. 2b)

Bahía de Banderas (BB). El Parque Nacional Islas Marietas (PNIM) se encuentran ubicadas a 9.5 km al suroeste de la costa de Punta Mita en el estado de Nayarit ($20^{\circ}42'$ N, $105^{\circ}34'$ O). Este archipiélago ha sido declarado sitio RAMSAR en 2004 y Reserva de la Biosfera en el 2008 por la UNESCO (CONANP, 2007). Está conformada por la Islas Redonda e Isla Larga, dos islotes llamados El Moro y la Corbeteña, así como de un

par de rocas llamadas La Ampolla y Los Morros Cuates. Las aguas circundantes tienen una profundidad máxima de 60 metros y la temperatura superficial del agua varía de 22.2 °C a 34.4 °C (García-Hernández, 2014). Presenta una salinidad entre 36 y 30.2 UPS y el régimen de mareas es de tipo semidiurno mixto, con un intervalo de 1.42 m durante mareas vivas (CONANP, 2007) (Fig. 2c).

Bahías de Huatulco (BH). El Parque Nacional Huatulco (PNH) se localiza en la parte central de la costa de Oaxaca (15 °39' y 15 °47' N, 96 °06' y 96 °15' O). La zona costera de Oaxaca se encuentra bajo la influencia de la piscina de agua cálida del Pacífico oriental caracterizada por altas temperaturas de 28° C (oscilaciones térmicas anuales de < 2° C), una salinidad superficial promedio de 34 UPS (López-Pérez et al., 2014) y las mareas son mixtas predominantemente semidiurnas (CONANP, 2003). La fuente de variación oceanográfica interanual más importante es el evento de El Niño, caracterizado por el incremento de la profundidad de la termoclina y nutriclina que impacta negativamente la productividad primaria de la zona (López-Pérez et al., 2014) (Fig. 2d).

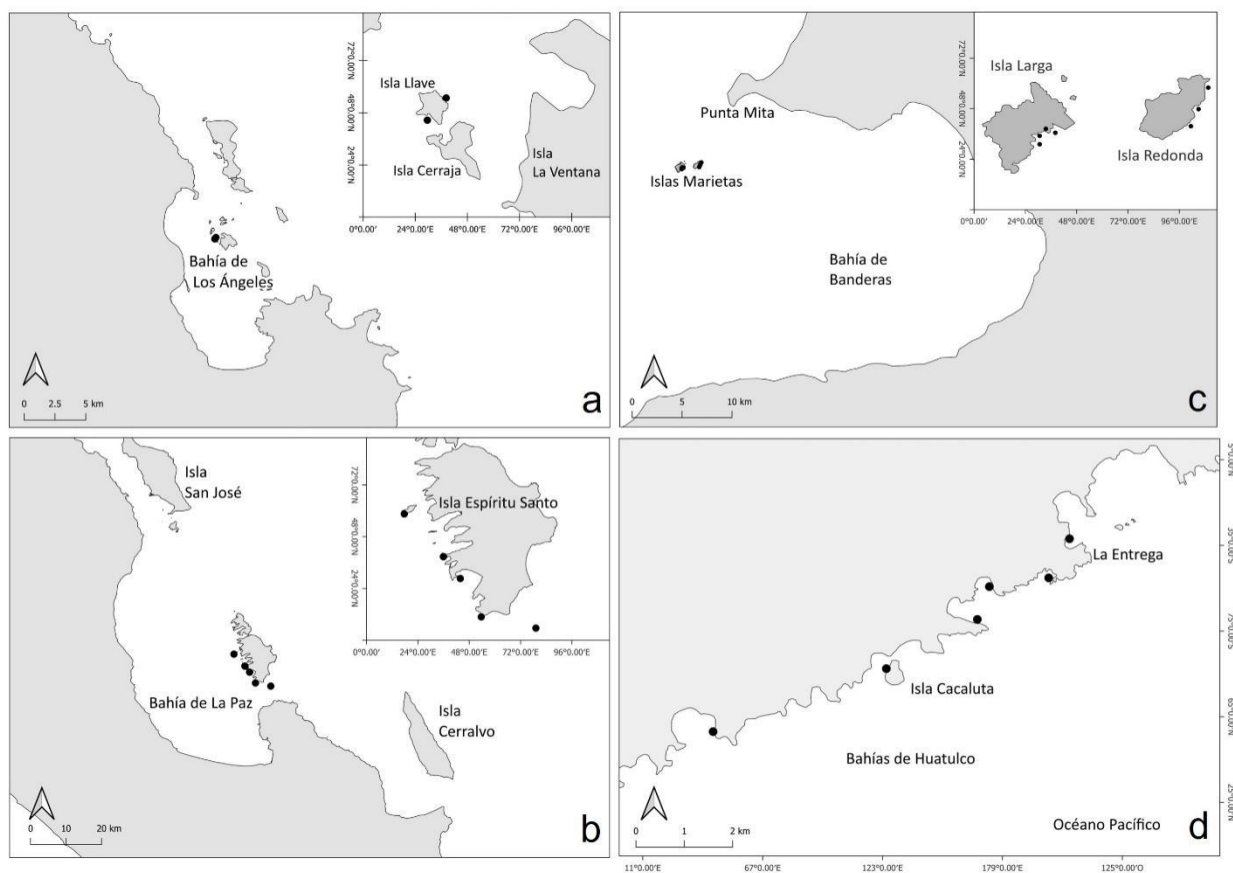


Figura 2 Mapa de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. Bahía de Los Ángeles (a), Bahía de La Paz (b), Bahía de Banderas (c) y Bahías de Huatulco (d).

2.2 Trabajo de campo

Para determinar la cobertura coralina se realizaron censos submarinos en cuatro localidades a lo largo del Pacífico mexicano: Bahía de Los Ángeles, Bahía de La Paz, Bahía de Banderas y Bahías de Huatulco en septiembre y octubre del 2021. Se realizaron transectos de banda de 25 m de largo x 2 m de ancho, paralelos a la costa (de 5 a 12 transectos por localidad con una distancia de ~5 m entre ellos) a una profundidad máxima de nueve metros. En total se realizaron 135 transectos: 10 transectos en BLA, 66 transectos en BLP, 30 transectos en BB y 29 transectos en BH. El porcentaje de cobertura de coral en BLA, BLP y BB se registró utilizando seis cuadrantes (1 m²) por transecto, colocados a una distancia de ~4 m, mientras que para BH se registró mediante el método de transecto punto intercepto (PIT por sus siglas en inglés) marcado cada 0.25 cm. A partir de lo anterior, se obtuvo el promedio del porcentaje de cobertura de coral por transecto de cada localidad, lo que corresponde a la unidad experimental de este estudio.

2.3 Análisis de datos

La complejidad estructural de las colonias coralinas se determinó con base en el índice de rugosidad (IR) y la altura de cada colonia. Siguiendo la metodología de Álvarez-Filip et al. (2011), se utilizó una cadena de bola del número 9 y una cinta métrica para seguir el contorno del coral, y se calculó la relación de la longitud del contorno del principio hasta el final de la colonia (Vmin) entre la distancia lineal del diámetro mayor de la colonia (Dmayor):

$$IR = \frac{Vmin}{Dmayor} \quad (1)$$

Considerando que, dependiendo de la forma del coral, el índice de rugosidad tendrá un mayor valor en colonias ramificadas debido a una mayor superficie que le proveen las ramificaciones, en comparación con las colonias de tipo masivo.

En cada sitio se midió de manera aleatoria la altura de las colonias de coral cercanas al transecto con una cinta métrica: para BLA fueron 36 colonias de *Porites panamensis* (Verrill, 1866); para BLP fueron 24 colonias de *Porites panamensis*, una colonia de *Pavona gigantea* (Verrill, 1869), de *Pocillopora capitata* (Verrill, 1864) se tomaron los datos de Martínez-Ávila (2022), 15 colonias de *Pocillopora damicornis*

(Linnaeus, 1758), 16 colonias de *Pocillopora meandrina* (Dana, 1846), 103 colonias de *Pocillopora verrucosa* (Ellis & Solander, 1786) y una colonia de *Psammocora stellata* (Verrill, 1866). Para BB fueron 20 colonias de *Porites panamensis*, 20 colonias de *Pavona clavus* (Dana, 1846), nueve colonias de *Pavona gigantea*, ocho colonias de *Pocillopora capitata*, dos colonias de *Pocillopora damicornis*, 13 colonias de *Pocillopora effusus* (Veron, 2000), dos colonias de *Pocillopora grandis* (Dana, 1846), 9 colonias de *Pocillopora meandrina* y 13 colonias de *Pocillopora verrucosa*. Para BH los datos de todas las especies, *Porites panamensis*, *Pavona gigantea*, *Pocillopora capitata*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora grandis*, *Pocillopora verrucosa*, *Pavona varians* (Verrill, 1864), se tomaron de Cabral-Tena et al. (2020) a excepción de *Pocillopora effusus* que se obtuvo de los datos de BB.

La tasa de calcificación ($\text{kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de cada especie de coral se obtuvo de la información publicada de la tasa de extensión (cm año^{-1}) y la densidad del esqueleto del coral (g cm^{-3}). (*P. verrucosa*, *P. capitata*, *P. meandrina* y *P. damicornis* (Medellín-Maldonado et al., 2016; Tortolero-Langarica et al., 2017b), *P. gigantea* (Tortolero-Langarica et al., 2017b), *P. panamensis* (Cabral-Tena et al., 2013) y *P. stellata* (Bezy et al., 2006; Norzagaray-López et al., 2017). (Anexo A, Tabla 1)

El cálculo que realizaron los autores fue siguiendo la metodología de González-Barrios & Álvarez-Filip (2018), para el caso de los corales ramificados se estimó de acuerdo con el tipo de crecimiento cilíndrico y para los corales masivos e incrustantes se estimó de acuerdo con el grupo parabole.

Para el cálculo del Coeficiente Funcional (CF), las variables se estandarizaron debido a que las variables tienen diferentes unidades y ordenes de magnitudes, la rugosidad, la altura y la tasa de calcificación de cada especie se estandarizaron por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Estandarización} = \frac{(x - \text{valor mínimo})}{(\text{valor máximo} - \text{valor mínimo})} \quad (2)$$

Dónde x es el valor de cada una de las variables para cada especie (la altura, el índice de rugosidad y la calcificación) (Tabla 1).

Consecutivamente, se obtuvo el Coeficiente Funcional (CF) de cada especie, al promediar las tres variables estandarizadas de cada especie (Anexo B, Tabla 2). Este coeficiente es particular de cada especie, el cual le confiere un valor dependiendo de los atributos anteriormente calculados.

El Índice de Función Arrecifal (IFA) se calculó según lo propuesto por González-Barrios & Álvarez-Filip (2018), que integra las variables anteriormente mencionadas (cobertura coralina, la altura, la rugosidad y la tasa de calcificación de las especies de coral). El IFA es la sumatoria de los productos de la cobertura coralina (Cc_i), multiplicada por el Coeficiente Funcional (CF_i) de cada especie de coral, por medio de la ecuación:

$$\text{IFA} = \sum i \left(\frac{Cc_i}{100} \right) CF_i \quad (3)$$

Para facilitar la interpretación de los datos, se obtuvo la raíz cuarta del IFA por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{IFA (raiz)} = \text{IFA}^{1/4} \quad (4)$$

El IFA puede oscilar entre cero y uno: un valor cercano a cero representa un arrecife con una baja funcionalidad, mientras que un valor cercano a uno representa un arrecife con una alta funcionalidad.

Se realizaron pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Tras verificar los supuestos, y al no cumplirlos se realizó un análisis de Kruskal Wallis para determinar si hay diferencias en las medianas de la cobertura coralina y el IFA de las localidades de muestreo; en caso de que existieran diferencias, se realizó una prueba Tukey como análisis Post-hoc. Además, se llevó a cabo un análisis de escalamiento multidimensional métrico (MDS), para evidenciar el grado de similitud entre las especies de coral de cada localidad y los atributos de altura, índice de rugosidad y tasa de calcificación (Guerrero y Ramírez, 2002). Los análisis estadísticos se realizaron mediante el programa Statistica v7.1.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Descripción del coeficiente funcional

La especie de coral que presentó el coeficiente funcional (CF) mayor fue *Pocillopora grandis* con 0.81, seguido de *Pocillopora capitata* y *Pocillopora verrucosa* con un CF de 0.72; las tres especies se encuentran en Bahía de Banderas y fueron las que presentaron los mayores CF. El coral *Porites panamensis* fue la especie que presentó el menor CF (0.07) en Bahías de Huatulco (Tabla 1).

Tabla 1 Altura (promedio \pm desviación estándar), índice de rugosidad (promedio \pm desviación estándar), tasa de calcificación y coeficientes funcionales (CF) de las especies de coral de cada localidad. * N=1

Localidad	Especie	Altura (cm)	Índice de Rugosidad (IR)	Tasa de Calcificación (kg CaCO ₃ m ⁻² año ⁻¹)	Coefficiente funcional (CF)
Bahía de Los Ángeles	<i>Porites panamensis</i>	11.69 \pm 11.69	2.14 \pm 0.79	0.70	0.11
Bahía de La Paz	<i>Pavona gigantea</i>	20*	1.63*	14.75	0.31
	<i>Pocillopora capitata</i>	20 \pm 6.61	3.27 \pm 0.66	19.74	0.51
	<i>Pocillopora damicornis</i>	18.60 \pm 5.40	2.16 \pm 0.30	16.29	0.36
	<i>Pocillopora meandrina</i>	17.13 \pm 5.78	2.15 \pm 0.41	15.43	0.34
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	17.32 \pm 6.26	2.03 \pm 0.39	21.16	0.41
	<i>Porites panamensis</i>	6.44 \pm 4.41	1.87 \pm 0.44	1.12	0.06
	<i>Psammocora stellata</i>	4*	1.40*	14.25	0.18
Bahía Banderas	<i>Pavona clavus</i>	24 \pm 10	1.81 \pm 0.47	12.79	0.32
	<i>Pavona gigantea</i>	58 \pm 32	2.72 \pm 0.47	8.50	0.55
	<i>Pocillopora capitata</i>	19 \pm 7	5.26 \pm 0.93	23.28	0.72
	<i>Pocillopora damicornis</i>	24 \pm 0	3.04 \pm 0.24	24.97	0.58
	<i>Pocillopora effusus</i>	10 \pm 5	1.61 \pm 1.03	24.85	0.38
	<i>Pocillopora grandis</i>	28 \pm 7	5.38 \pm 0.95	25.44	0.81
	<i>Pocillopora meandrina</i>	21 \pm 0.1	3.86 \pm 1.51	12.59	0.47
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	18 \pm 9	4.99 \pm 2	25.70	0.72
	<i>Porites panamensis</i>	9 \pm 5	1.59 \pm 0.29	3.66	0.09
Bahías de Huatulco	<i>Pavona gigantea</i>	24.45 \pm 12.51	1.97 \pm 0.48	11.30	0.32
	<i>Pavona varians</i>	17.50 \pm 8.66	1.45 \pm 0.13	4.50	0.14
	<i>Pocillopora capitata</i>	16.69 \pm 3.77	3.41 \pm 1.06	17.61	0.47
	<i>Pocillopora damicornis</i>	16.23 \pm 5.84	2.87 \pm 0.82	17.17	0.42
	<i>Pocillopora meandrina</i>	15 \pm 3.98	3.75 \pm 0.81	15.60	0.46
	<i>Pocillopora effusus</i>	10 \pm 5	1.61 \pm 1.03	24.85	0.38
	<i>Pocillopora grandis</i>	16.21 \pm 5.4	3.25 \pm 0.73	17.45	0.45
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	16.93 \pm 6.6	2.95 \pm 0.69	19.44	0.46
	<i>Porites panamensis</i>	6.67 \pm 3.77	1.59 \pm 0.59	3.40	0.07

En el caso de la tercera agrupación, se observa que los corales del género *Pocillopora* se asociaron a la altura y el índice de rugosidad (grupo inferior izquierdo). Por otro lado, los corales *Psammocora stellata* de BLP y *Pavona gigantea* de BB se observaron distantes al resto de las especies y de los atributos (Fig. 3). Así mismo, el análisis mostró inicialmente un valor de estrés de 0.158330 y al finalizar un valor de 0.062116, con un valor de estrés final de 0.030313, la disminución en el esfuerzo del análisis es un buen indicador de que el ordenamiento no arroja falsas inferencias.

Con una aproximación al gráfico del MDS se observó que los corales *P. meandrina*, *P. damicornis* y *P. gigantea* de BLP presentaron una mayor similitud a los corales *Pocillopora meandrina* y *P. damicornis*, *P. grandis* y *P. capitata* de BH. Además, por la corta distancia euclidiana entre las especies y las variables altura e índice de rugosidad podría asociarse a las características únicas del género *Pocillopora* que les confiere un valor alto en dichos atributos. (Fig. 4, Tabla 1).

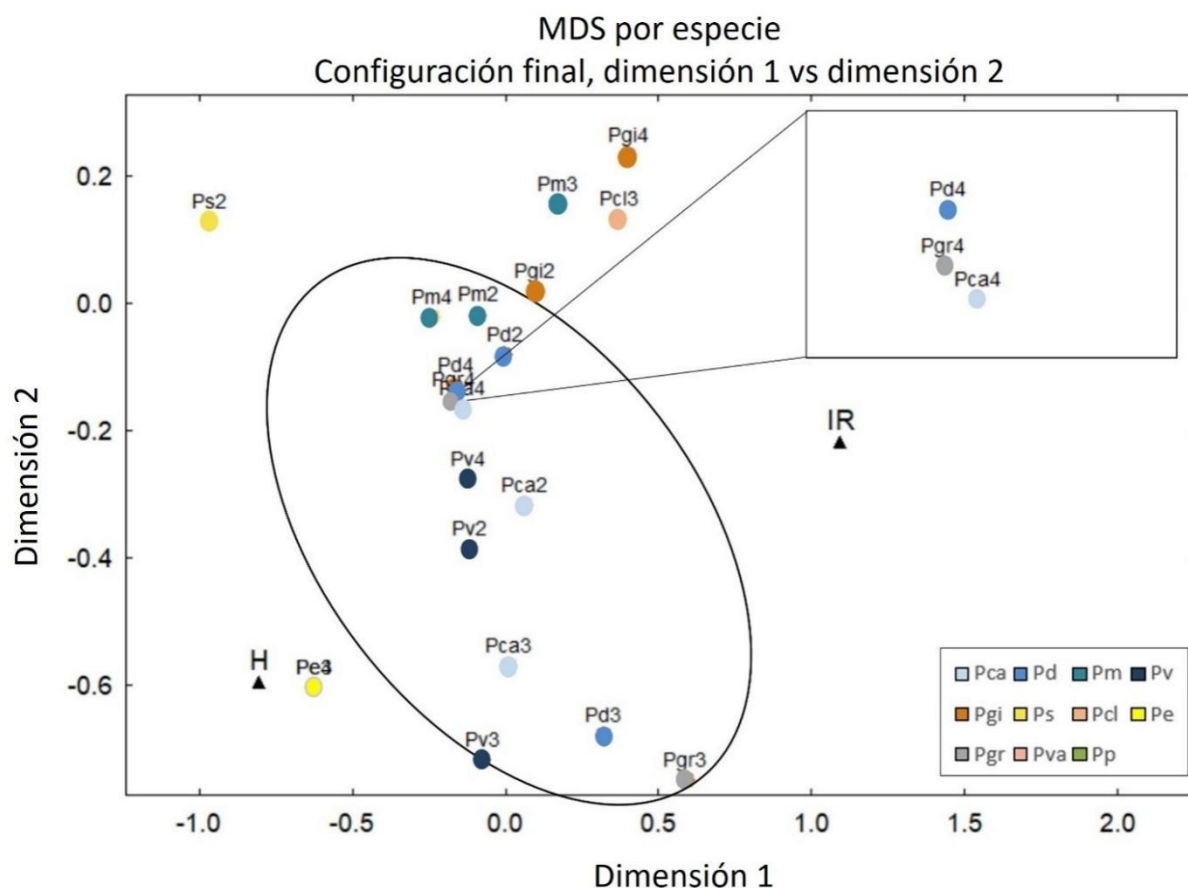


Figura 4 Aproximación al gráfico del MDS de las especies de todas las localidades. Los números 1, 2, 3 y 4 corresponden a BLA, BLP, BB y BH, respectivamente. Las especies *Porites panamensis* (Pp), *Pavona gigantea* (Pgi), *Pavona clavus* (Pcl), *Pavona varians* (Pva), *Psammocora stellata* (Ps), *Pocillopora capitata* (Pca), *Pocillopora damicornis* (Pd), *Pocillopora meandrina* (Pm), *Pocillopora effusus* (Pe), *Pocillopora grandis* (Pgr) y *Pocillopora verrucosa* (Pv). Las variables altura (H), índice de rugosidad (IR) y tasa de calcificación con el símbolo triangular negro.

3.3 Cobertura coralina

La cobertura coralina promedio de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano fue de 35.62 ± 15.01 % (promedio \pm desviación estándar). Bahías de Huatulco fue la localidad que presentó la mayor cobertura coralina con 55.61 ± 21.94 %, mientras que Bahía de Los Ángeles fue la localidad con menor cobertura de coral con 17.16 ± 0.08 % (Figura 5, Anexo B).

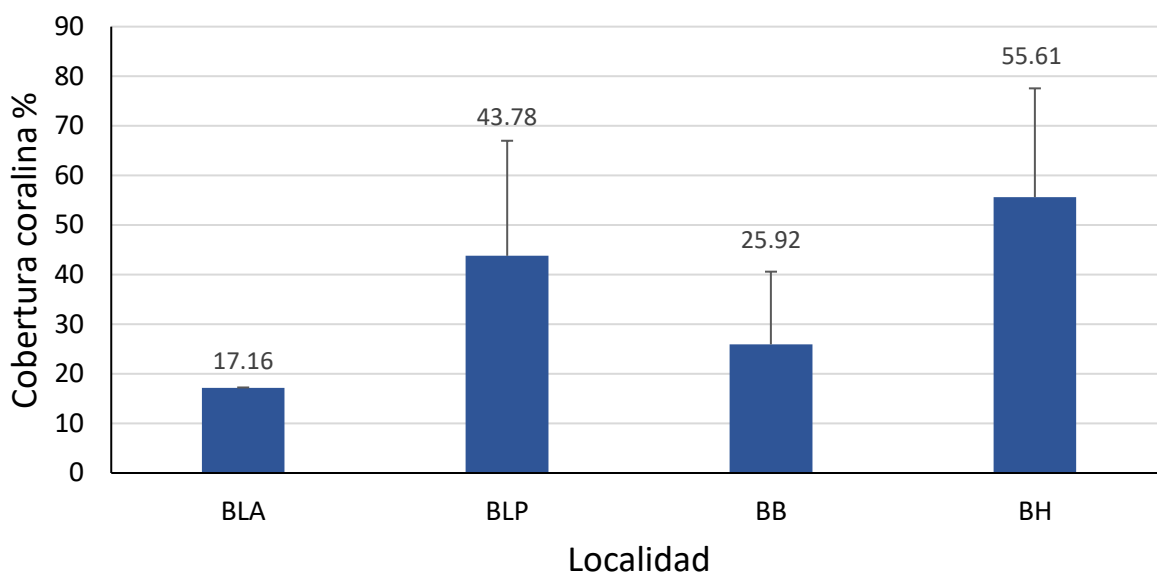


Figura 5 Cobertura coralina promedio de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano de norte a sur. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Barras de error representan a la desviación estándar y los valores por encima de las barras son el promedio de la cobertura total de las localidades.

Los resultados del análisis de Kruskal Wallis ($p < 0.05$, $H = (3, N=135) = 25.98380$) indicaron que existen diferencias significativas en las medianas de la cobertura de coral entre las localidades muestreadas. Las localidades que tuvieron diferencias estadísticas con una $p < 0.05$ fueron: Bahía de los Ángeles respecto a Bahía de la Paz ($p = 0.010088$) y Bahías de Huatulco ($p = 0.000489$); Bahía de la Paz respecto a Bahía de Banderas ($p = 0.014863$) y Bahía de Banderas es diferente a Bahías de Huatulco ($p = 0.000359$) (Anexo C).

En cuanto al análisis espacial, se observó que la cobertura menor se presentó en BLA, siendo el sitio más norteño, seguido de BB, BLP y, la cobertura más alta se registró en BH en el sur del Pacífico mexicano (Fig. 6).

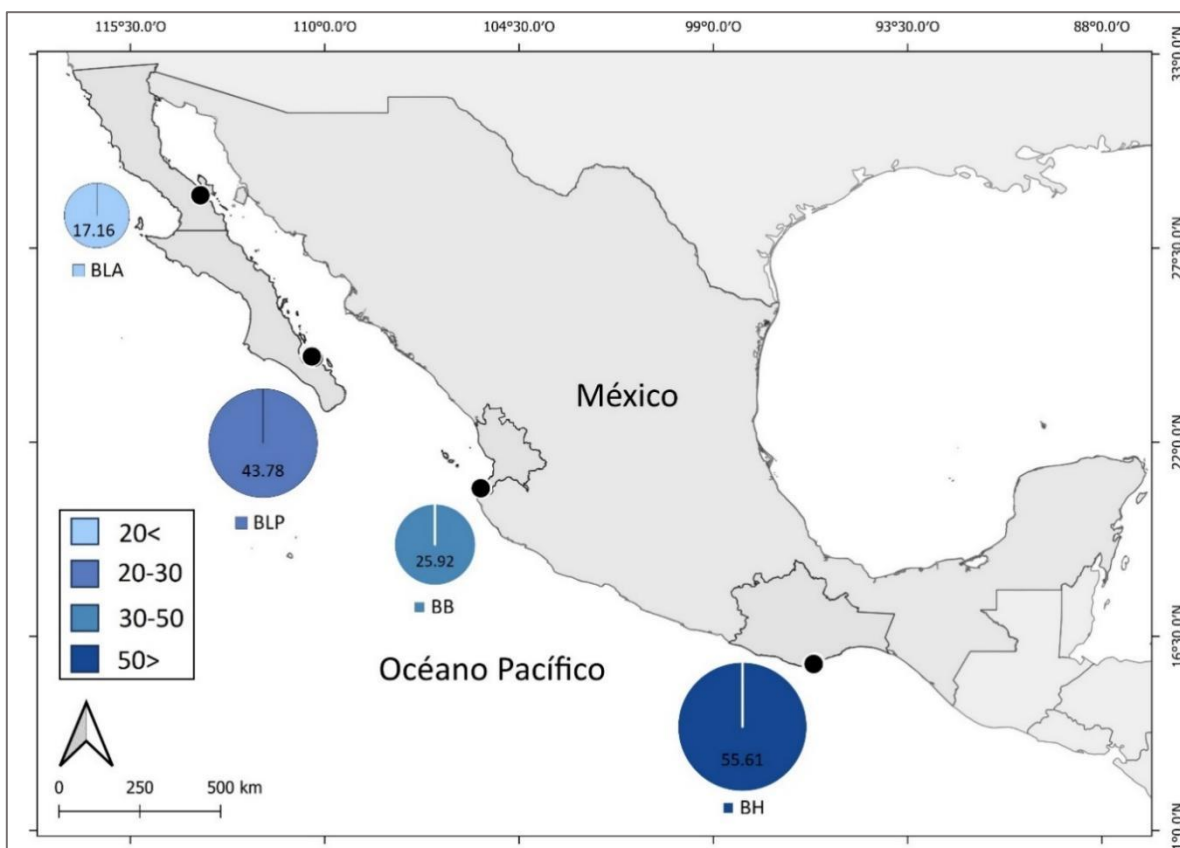


Figura 6 Mapa de la variación espacial de cobertura coralina de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. BLA (Bahía de Los Ángeles), BLP (Bahía de La Paz), BB (Bahía de Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Los números en el círculo son los valores de cobertura de cada bahía.

3.4 Contribución a la cobertura coralina por especie

La especie de coral que contribuyó al total a la cobertura coralina en BLA fue *Porites panamensis* (17.16 %) siendo la única especie presente en la bahía. La especie que contribuyó en mayor medida a la cobertura coralina de BLP fue *P. meandrina* con 12.07 %, seguido de *P. damicornis* y *P. verrucosa* con 10.49 % y 10.38%, respectivamente. La especie que contribuyó en mayor medida a la cobertura coralina de BB fue *P. verrucosa* con 12.07 %, seguido de *P. capitata* con 7.57 % y *P. damicornis* y *P. gigantea* con 20.6 %.

Para BH las especies que contribuyeron en mayor medida a la cobertura coralina de la localidad fueron *P. verrucosa*, *P. damicornis* y *P. gigantea* con 26.45 %, 20.66 % y 3.69%, respectivamente (Fig. 7, anexo D).

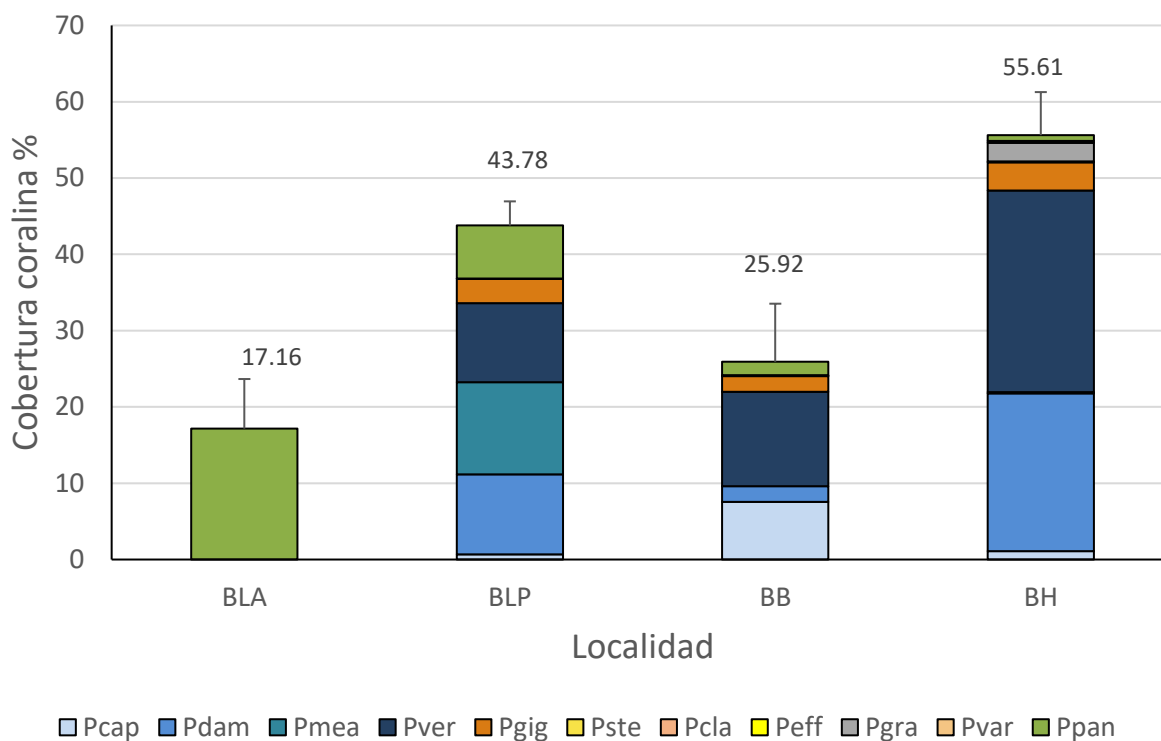


Figura 7 Cobertura coralina promedio de las localidades muestreadas. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Las especies de coral son: *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pavona gigantea* (Pgig), *Psammocora stellata* (Pste), *Pavona clavus* (Pcla), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora grandis* (Pgra), *Pocillopora varians* (Pvar) y *Porites panamensis* (Ppan). Barras de error son la desviación estándar.

3.5 Índice de Función Arrecifal

El índice de Función Arrecifal (IFA) promedio de las localidades muestreadas fue de 0.54 ± 0.12 (promedio \pm desviación estándar). Así mismo, Bahías de Huatulco fue la localidad que presentó el mayor IFA con 0.68 ± 0.09 y Bahía de Los Ángeles presentó el menor valor de IFA con 0.34 ± 0.08 (Figura 8; Anexo B).

Los resultados del análisis de Kruskal Wallis ($p < 0.05$, $H(3, N=135) = 32.00150$) indicaron que hay diferencias significativas en las medianas del IFA de las localidades muestreadas. Las localidades estadísticamente diferentes con una $p < 0.05$ fueron: Bahía de Los Ángeles respecto a Bahía de la Paz ($p = 0.001215$), Bahía Banderas ($p = 0.000423$) y Bahías Huatulco ($p = 0.000000$); y Bahía de La Paz es diferente a Bahías de Huatulco (0.003942) (Anexo E).

En cuanto al análisis espacial, el índice de función arrecifal (IFA), incrementó hacia el sur del Pacífico mexicano (Fig. 9).

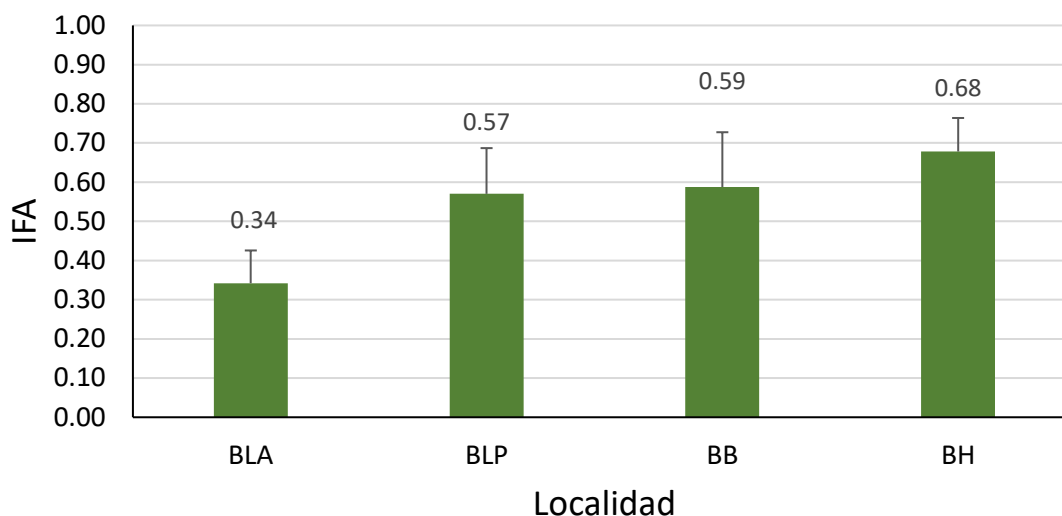


Figura 8 Valores del Índice de Función Arrecifal de las localidades muestreadas, a lo largo del Pacífico mexicano de norte a sur. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Barras de error representan a la desviación estándar y los valores por encima de las barras son el promedio del IFA total de las localidades.

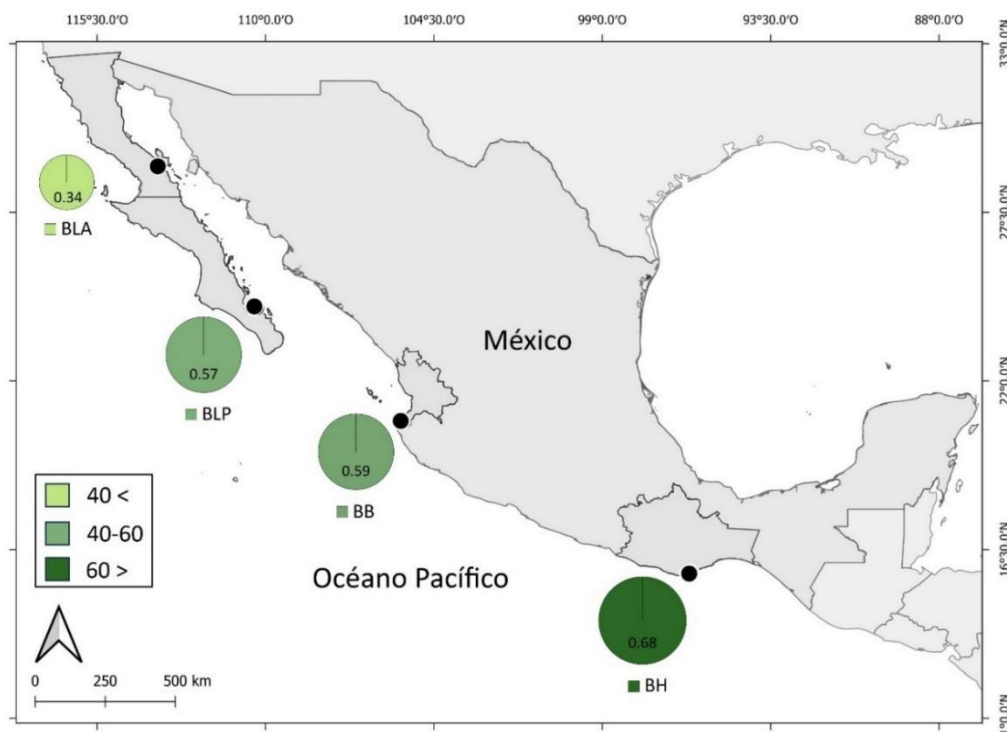


Figura 9 Mapa de la variación espacial del Índice de Función Arrecifal de las localidades muestreadas a lo largo del Pacífico mexicano. BLA (Bahía de Los Ángeles), BLP (Bahía de La Paz), BB (Bahía de Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Los números en el círculo son los valores de cobertura de cada bahía.

3.6 Contribución al IFA por especie

La especie de coral que contribuyó al IFA total de BLA fue *Porites panamensis* (0.34) siendo la única especie presente en la bahía. La especie que contribuyó en mayor medida al IFA de BLP fue *P. verrucosa* con 0.19, seguido de *P. damicornis* con 0.15 y *P. meandrina* con 0.12. La especie que contribuyó en mayor medida al IFA en BB fue *P. verrucosa* con 0.35, seguido de *P. capitata* con 0.15 y *P. gigantea* con 0.08. Para BH las especies que contribuyeron en mayor medida en el IFA de la localidad fueron *P. verrucosa* con 0.35, *P. damicornis* 0.22 y *P. gigantea* y *P. grandis* con 0.04 (Fig. 10; Anexo F).

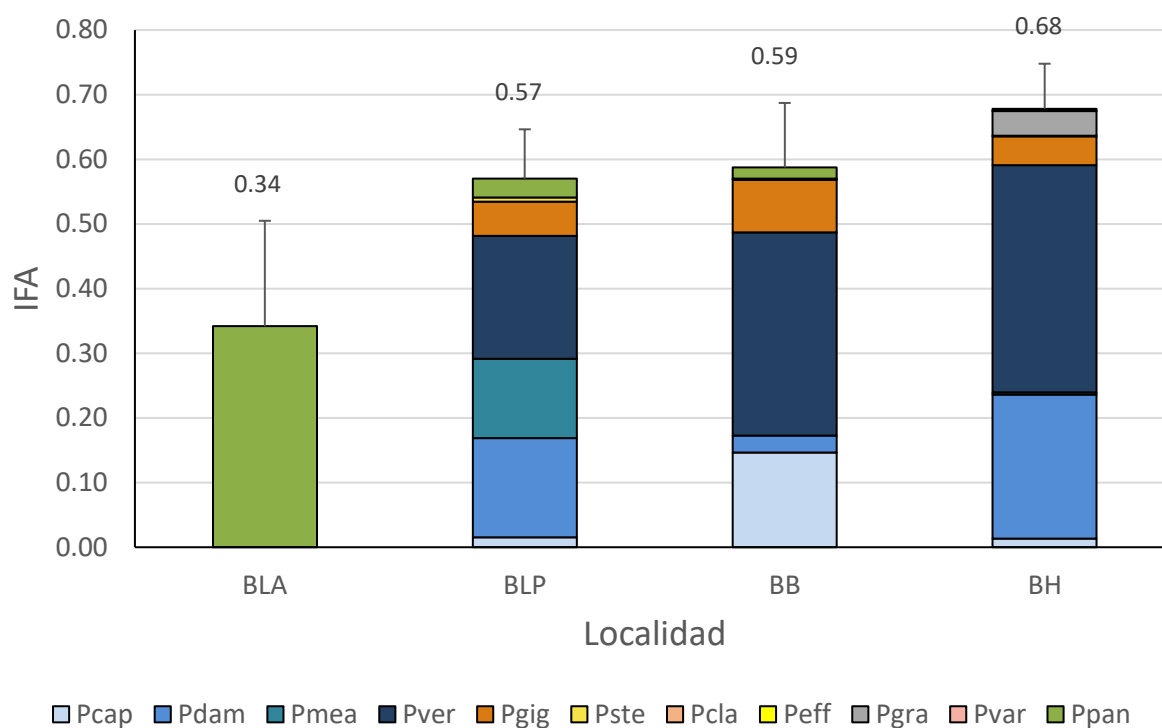


Figura 10 Valores del Índice de Función Arrecifal de las localidades muestreadas. BLA (Bahía de los Ángeles), BLP (Bahía de la Paz), BB (Bahía Banderas) y BH (Bahías de Huatulco). Las especies de coral son: *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pavona gigantea* (Pgig), *Psammocora stellata* (Pste), *Pavona clavus* (Pcla), *Pocillopora effusus* (Peff), *Pocillopora grandis* (Pgra), *Pocillopora varians* (Pvar) y *Porites panamensis* (Ppan). Barras de error son la desviación estándar.

Capítulo 4. Discusión

4.1 Coeficientes Funcionales

En este estudio, las especies del género *Pocillopora* son las que presentaron los mayores coeficientes funcionales (CF), en las localidades de BLP, BB y BH, resaltando su importancia en la región al ser las especies de coral constructoras de arrecifes más abundantes, con gran complejidad estructural y con tasas de crecimiento altas en el Pacífico mexicano y a lo largo del Pacífico Oriental Tropical (POT) (López-Pérez et al., 2019; Cabral-Tena et al., 2020). Enseguida, el género *Pavona* presentó un CF elevado en contraste con las otras especies de crecimiento masivo, esto resalta ya que, a pesar de que la especie tiene valores de rugosidad y calcificación por debajo de los *Pocillopora*, su CF es resultado de su altura (Navarrete-Torices et al., 2023), lo que le confiere un CF medio entre las especies. En cuanto a *Psammocora* y *Porites*, fueron los géneros de coral con los CF más bajos, no obstante, *Porites* es un coral masivo que estuvo presente en todas las localidades. Estos resultados coinciden con lo reportado en Huatulco (Cabral-Tena et al., 2020), donde a pesar de tener una composición de especies diferente en los arrecifes de las cuatro localidades muestreadas en el presente estudio, presenta un patrón en el que *Pocillopora* presenta un CF alto, *Pavona* medio y *Psammocora* y *Porites* bajo.

4.2 Análisis multidimensional de atributos morfo-funcionales

El análisis de ordenamiento (MDS) mostró un agrupamiento por género de acuerdo la similitud que tienen con los valores presentes en los diferentes rasgos morfológicos de los corales. La asociación más prominente está dada por el género *Pocillopora*, cuyos corales se encuentran cercanos a la altura y al índice de rugosidad (Fig. 4), reflejando la complejidad estructural que aportan, y se traduce en los valores altos de CF (Tabla 1). Este análisis concuerda con el análisis realizado por Cabral-Tena et al., (2020), donde los Pocillopóridos, al presentar una estructura ramificada, un rápido crecimiento y una alta tasa de calcificación (Manzello, 2010; Norzagaray-López et al., 2019), obtienen una ventaja competitiva sobre las demás especies a largo plazo (Glynn et al., 2017, López-Pérez, 2017), en comparación con especies de corales masivas que contribuyen en menor medida la estructura del arrecife (Glynn & Ault, 2000). Además cabe señalar que, los corales del género *Pocillopora*, en específico *P. verrucosa*, son los corales más abundantes en todas las localidades (Reyes-Bonilla et al., 2013; Cabral-Tena et al., 2020), a excepción de

BLA (Fig. 7); esto puede atribuirse a su habilidad de recuperación ante el estrés térmico (debido a su asociación con *Symbiodinium* clado D), y a su capacidad de reproducirse por fragmentación, lo que les permite dispersar sus ramas y aumentar su competitividad al colonizar nuevos sitios (López-Pérez et al., 2007; Lajeunesse et al., 2010; Romero-Torres et al., 2020).

Por otro lado, los corales del género *Pavona* muestran una proximidad con el índice de rugosidad, ya que, como se mencionó anteriormente, podría relacionarse a que tienen un CF medio, debido a sus valores de las variables (Fig. 3). En lo que respecta a la cercanía con la tasa de calcificación, se ha observado que estos corales presentan altos valores de calcificación en años donde invierten mayor recurso para su extensión del esqueleto (Tortolero-Langarica et al. 2020). La estrategia de crecimiento de las especies masivas permite que compitan por espacio frente a las especies ramificadas, ganando una mayor área en un menor tiempo (Medellín-Maldonado et al., 2016).

En el caso de los corales del género *Porites*, en este estudio se observa una asociación con a la tasa de calcificación, esto podría relacionarse a que generalmente estos son los corales que presentan bajas tasas de calcificación (Chapa-Balcorta et al. 2015). En Cabral-Tena et al. (2020), si bien los autores presentaron un análisis de PCA, obtuvieron que *P. Panamensis* se correlaciona inversamente con la tasa de calcificación, rugosidad y altura, es decir, contribuyen escasamente a la funcionalidad física del arrecife. El gradiente latitudinal (desde el golfo de California hasta Colombia) en donde se desarrolla *P. panamensis* (Fig. 1) presenta diversas características oceanográficas debido a la influencia de las diferentes masas de agua a las cuales se encuentran expuestas (Norzagaray-López et al. 2014). Esto sugiere que la alta variabilidad de los parámetros de crecimiento de esta especie se debe principalmente a la respuesta de esta especie ante las diferentes condiciones oceanográficas locales o regionales en las distintas latitudes donde se desarrolla (Trejo-Estrada, 2020).

4.3 Cobertura Coralina

En el presente estudio se observa que el Parque Nacional de Huatulco (PNH) destaca por tener la mayor cobertura coralina, alcanzando un 55.61 % de coral vivo (Fig. 6), lo cual se aproxima a lo reportado por Glynn y Leyte-Morales, (1997) para esta localidad. Los arrecifes de Huatulco son considerados como uno de los sitios con mayor desarrollo arrecifal debido a que se encuentra en un área de surgencia que limita con el Golfo de Tehuantepec (Glynn et al., 2001). Estos arrecifes generalmente se encuentran en áreas

protegidas ante corrientes oceanográficas (Fig. 2d) con una cobertura de coral vivo entre el 20% y el 50% (Glynn et al., 2001).

La Bahía de La Paz presentó una cobertura coralina promedio de 43.78 % (Fig. 6), un valor menor del >50 % que podría derivarse de la proximidad del área monitoreada (isla Espíritu Santo) al canal de San Lorenzo (Fig. 2b); presentando vientos intensos que favorecen la generación de una capa de mezcla, así como la entrada de corrientes marinas que ocasionan la remoción de nutrientes, y, por ende, promueve el incremento de la productividad en las zonas cercanas (Guzmán-Méndez, 2009). Estas condiciones generan alta turbidez en el resultando en condiciones poco propicias para el desarrollo de los corales en el golfo de California (Reyes-Bonilla, 2001).

Por su parte, Bahía de Banderas mostró una cobertura coralina de 25.92 % (Fig. 6). Esta menor cobertura (en contraste con BH y BLP) puede deberse a que la región se caracteriza por ser una zona de transición oceanográfica donde interactúan la Corriente de California y la Corriente Costera de Costa Rica, formando la Corriente Nor-ecuatorial. Esta zona experimenta cambios estacionales en la temperatura de la superficie del mar (TSM), así como la presencia de surgencias y fluctuaciones en la salinidad (Troncoso-Rodríguez et al., 2023). Además, la combinación de factores locales como surgencias, ondas internas, huracanes, entre otros, junto con los efectos de los eventos ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) que generan condiciones de estrés (ya sea por altas temperaturas durante El Niño o bajas temperaturas durante La Niña) el cambio climático y la acidificación del océano, comprometen la supervivencia de las comunidades coralinas del área (Rodríguez & Tortolero 2015). El estrés continuo vuelve susceptible a los corales de BB, inhibiendo el crecimiento de estos, lo que conlleva a una disminución en la resistencia estructural, al aumento de la bioerosión coralina, causando una mayor vulnerabilidad al daño, la exposición y la capacidad de adaptación de los corales (Reyna-Fabián et al., 2018; Rodríguez & Tortolero 2015).

Finalmente, Bahía de los Ángeles, la localidad con menor cobertura coralina promedio de este trabajo (17.16 %) (Fig. 6), se caracteriza por tener condiciones ambientales subóptimas para el desarrollo de los corales (Cabral-Tena et al. 2013). La presencia de procesos de surgencia aumenta la concentración de nutrientes disueltos en el agua y de carbono inorgánico disuelto, lo que reduce el pH y el estado de saturación de la aragonita (Ω_{arag}). Además, existen cambios estacionales marcados en la TSM, que varía desde los 13° C en invierno hasta 30°C en verano (Trejo-Estrada, 2020). La baja cobertura coralina de esta localidad es sostenida por una única especie: el coral *P. panamensis*, con alta resistencia a condiciones estresantes debido a su alta plasticidad morfológica y fisiológica, es decir, la capacidad de modificar su

morfología ante diferentes factores ambientales lo que se refleja en su alto CF de esta localidad (Tabla 1) (Paz-García et al., 2009).

En el Pacífico mexicano se observa una mayor cobertura coralina en áreas someras, lo cual es característico de los arrecifes en el POT; debido a las diferencias batimétricas de los procesos físicos como el oleaje, la sedimentación y principalmente la cantidad de luz, que favorecen la abundancia de *Pocillopora spp.* (Reyes-Bonilla et al., 2013) y con ello una mayor cobertura de coral cerca de la superficie (McCulloch et al. 2003, Iglesias-Prieto et al. 2004; Reyes-Bonilla et al., 2013). Por otro lado, la abundancia de los corales disminuye en aguas más profundas y tienden a estar dominadas por especies de crecimiento lento que permite tener una mayor densidad de esqueleto y por lo tanto menor probabilidad de fragmentación como es el caso de *Pavona* y *Porites* (Reyes-Bonilla et al., 2013). Además, las perturbaciones naturales relativamente frecuentes y severas, con una alta variabilidad interanual, contribuyen a las fluctuaciones en la cobertura coralina (Glynn et al., 2001). Estas perturbaciones van desde eventos estacionales de afloramiento hasta floraciones de plancton y condiciones de alta turbidez, huracanes, temperaturas extremas altas y bajas ENOS, hasta brotes de erizos de mar que conducen a un intenso pastoreo y bioerosión (Glynn et al., 2001).

En cuanto a la presencia de *Pavona* en BLP, BB y BH (Fig. 7), a pesar de que estas poblaciones están genéticamente aisladas (lo que los hace vulnerable a perturbaciones locales) (Santiago-Valentín et al., 2015), se ha observado que esta especie es menos afectada por el ambiente, incluso en áreas con altas corrientes y turbidez y hay pocos casos de blanqueamiento (Saavedra-Sotelo, 2007). Asimismo, la presencia de *Porites* en todas las localidades de estudio se debe además a que es el coral más abundante en el centro y norte del Golfo de California, así como se observa en la mayoría de las comunidades coralinas del Pacífico mexicano (Paz-García et al., 2009). Al encontrarse en diferentes condiciones ambientales incluso desfavorables, le confiere una plasticidad capaz de responder ante escenarios de estrés que varían a lo largo del tiempo y el espacio (Cabral-Tena et al., 2020).

Cabe mencionar que los corales *Pavona gigantea* y *Porites panamensis* presentan varias ventajas sobre las especies de *Pocillopora*, ya que, a pesar de que tienen bajas tasas de calcificación, son más resistentes a los periodos de estrés térmico y menos frágiles con respecto a la dinámica del agua, como el oleaje. Estos beneficios confieren una mayor longevidad a las colonias de coral, que construyen estructuras arrecifales duras que prevalecen durante largos periodos y sobreviven a condiciones extremas. En consecuencia, ambas especies se están convirtiendo en importantes contribuyentes al mantenimiento a largo plazo de las comunidades de arrecifes de coral en el Pacífico oriental tropical (Tortolero-Langarica et al., 2017).

4.4 Índice de función arrecifal

El Índice de Función Arrecifal (IFA) en Bahías de Huatulco registró un valor de 0.68 ± 0.09 (Fig. 8), cercano al reportado por Cabral-Tena et al., 2020, que fue de 0.71 ± 0.10 para la misma localidad. Destacaron a *P. damicornis*, *P. verrucosa* y *P. capitata* como las especies que más contribuyeron al IFA (>70%), lo cual coincide con nuestros resultados, donde *P. verrucosa* y *P. damicornis* son los principales corales que aportan a la bahía (>50%) (Fig. 10). Aunque este valor es ligeramente inferior al reportado en Huatulco, los corales del género *Pocillopora* predominan en el Pacífico Oriental Tropical (POT) debido a sus ventajas competitivas, como un rápido crecimiento, alta tasa de crecimiento y reproducción asexual elevada (Martínez-Ávila, 2022). Esto los posiciona como un grupo crucial para el funcionamiento físico de los arrecifes en el sur del Pacífico mexicano (Cabral-Tena et al., 2020). Asimismo, Cabral-Tena et al., 2020, presentaron en su estudio un modelo de permutación que indica que los arrecifes se encuentran cerca de su máximo potencial funcional debido a la dominancia de especies con altos valores de CF (*Pocillopora spp*).

En este estudio, se ha registrado por primera vez el IFA de BB con un valor de 0.59 ± 0.14 en las costas del Pacífico mexicano. A pesar de la ausencia de registros previos, su valor es superior al 50% de IFA máximo posible, considerando que tiene baja cobertura coralina de 25.92 ± 14.67 (Fig. 5; Anexo C). Este valor del IFA de BB es mayor respecto al IFA de BLP (0.57 ± 0.12) se atribuye a las características particulares de las especies presentes en la localidad. Específicamente, la presencia y predominancia del género *Pocillopora* con altos CF y cobertura coralina (Fig. 10), junto con la altura de *P. gigantea*, que contribuye significativamente al CF, y, por lo tanto, eleva el valor del IFA (Tabla 1). Además, se ha observado que las especies de crecimiento masivo muestran una mayor tolerancia al estrés térmico, lo que se refleja en una menor incidencia de blanqueamiento y en una respuesta menos severa ante perturbación perturbaciones (Tortolero-Langarica et al., 2022).

En el Golfo de California, BLP presenta un IFA de 0.57 ± 0.12 , constituyendo uno de los primeros registros de IFA en esta región. Resulta relevante señalar que Martínez-Ávila, (2022), en el Parque Nacional Cabo Pulmo (PNCP), y Navarrete-Torices et al. (2023), en el PNZMAES, registraron un IFA de 0.62 y 0.65 respectivamente. Coinciden en que el género *Pocillopora* es el principal contribuyente al índice, específicamente, *Pocillopora verrucosa* representó la mayor contribución al IFA (40%) en Cabo Pulmo, mientras que en PNZMAES fueron *P. meandrina* y *P. verrucosa*, que, a su vez, desempeñan un papel significativo en la cobertura coralina del parque. Por otro lado, se observó que *Porites panamensis* y *Psammocora stellata* son las especies que muestran el menor IFA en estas localidades. Coincidiendo en

que las altas coberturas coralinas y altos CF para *Pocillopora* indican que el arrecife alcanza su máxima funcionalidad.

En BLA también se presenta el primer registro del IFA con un valor de 0.34 ± 0.08 . Dado que *P. panamensis* es la única especie presente, se trata de un ambiente monoespecífico capaz de resistir condiciones no óptimas, comparado con otros géneros de coral. En un escenario futuro, con condiciones extremas, estos corales podrían ser los supervivientes y podrían influir en la estructura arrecifal del Pacífico. En un contexto de cambios rápidos, con un aumento en la frecuencia e intensidad de anomalías térmicas, como los eventos de El Niño-Oscilación Austral (ENOS) en el Pacífico Oriental Tropical (POT), el futuro de los arrecifes en esta región dependerá no solo de la supervivencia de los pocilloporidos, sino también de la capacidad de los arrecifes de coral para adaptarse a condiciones oceanográficas extremadamente variables y mantenerse como ecosistemas funcionales.

Es fundamental destacar que las localidades que se investigaron presentan una disminución progresiva en la riqueza de corales, así como en su cobertura, y, por consiguiente, en los valores de IFA a lo largo del gradiente latitudinal que abarcan. Específicamente, la localidad de BH, situada en la parte más meridional del Pacífico mexicano, se distingue por presentar alta riqueza de corales, la mayor cobertura e IFA (Anexo C). En contraste, las localidades hacia el norte se encuentran en el límite de la distribución de los corales, siendo BLA la localidad más marginal en este contexto. Las poblaciones marginales suelen mostrar una mayor adaptación a condiciones generalmente subóptimas. Estos cambios observados en la riqueza, cobertura e IFA guardan una estrecha relación con el mencionado gradiente latitudinal (Saavedra-Sotelo, 2013).

Capítulo 5. Conclusiones

El presente estudio revela que las especies pertenecientes al género *Pocillopora* sobresalen en términos de Coeficientes Funcionales (CF) en todas las localidades investigadas, destacando estos corales como los principales constructores de arrecifes debido a su complejidad estructural y elevadas tasas de crecimiento. El Parque Nacional de Huatulco se distingue por presentar la mayor cobertura coralina promedio, alcanzando un 55.61% de coral vivo, indicando un notable desarrollo arrecifal en esta área. Asimismo, se observa que, en todas las localidades estudiadas a excepción de BLA, el género *Pocillopora*, en especial la especie *P. verrucosa*, se destaca como el principal contribuyente al Índice de Función Arrecifal (IFA), superando el 70% en algunos casos. Estos resultados resaltan la importancia de las especies del género *Pocillopora* en la formación y funcionalidad de los arrecifes de coral en el Pacífico mexicano. Adicionalmente, resalta la capacidad de adaptación de ciertas especies, como *P. panamensis*, a las condiciones ambientales de BLA. Los resultados de este trabajo ofrecen valiosa información que puede ser instrumental en la conservación y gestión efectiva de los ecosistemas de arrecifes en la región.

Literatura citada

- Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Côté, I. M., Watkinson, A. R. & Gill, J. A. (2011). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications*, 21(6), 2223-2231. <https://doi.org/10.1890/10-1563.1>
- Álvarez-Filip, L. & Reyes-Bonilla, H. (2006). Comparison of community structure and functional diversity of fishes at Cabo Pulmo coral reef, western México between 1987 and 2003. *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, 1, 216-225. https://www.researchgate.net/publication/259309765_Comparison_of_community_structure_and_functional_diversity_of_fishes_at_Cabo_Pulmo_coral_reef_western_Mexico_between_1987_and_2003
- Álvarez-Filip, L., Carricart-Ganivet, J. P., Horta-Puga, G. & Iglesias-Prieto, R. (2013). Shifts in coral-assemblage composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific Reports*, 3, 1-5. <https://doi.org/10.1038/srep03486>
- Baums, I. B., Boulay, J. N., Polato, N. R. & Hellberg, M. (2012). No gene flow across the Eastern Pacific Barrier in the reef-building coral *Porites lobata*. *Molecular Ecology*, 21(22). <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05733.x>
- Bruno, J. F. & Selig, E. R. (2007). Regional Decline of Coral Cover in the Indo-Pacific: Timing, Extent, and Subregional Comparisons. *PLoS ONE*, 2(8), e711. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000711>
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C. & Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(Junio), 827-833. <https://doi.org/10.1038/nature02691>
- Bezy, M. B., Jiménez, C., Cortés, J., Segura, A., León, A., Alvarado, J. J., Gillén, C. & Melía, E. (2006). Contrasting *Psammocora* dominated coral communities in Costa Rica, Tropical eastern Pacific. *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, 376-381. <http://dx.doi.org/10.3354/meps10269>
- Cabral-Tena, R. A., Reyes-Bonilla, H., Lluch-Cota, S., Paz-García, D., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, O. & Balart, E. (2013). Different calcification rates in males and females of the coral *Porites panamensis* in the Gulf of California. *Marine Ecology Progress Series*, 476(Febrero), 1-8. <http://dx.doi.org/10.3354/meps10269>
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Reyes-Bonilla, H., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Cupul-Magaña, A., Rodríguez-Troncoso, A. P. & Ayala-Bocos, A. (2018). Calcification of coral assemblages in the eastern Pacific: Reshuffling calcification scenarios under climate change. *Ecological Indicators*, 95(Agosto), 726-734. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.021>
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Álvarez-Filip, L., González-Barrios, F. J., Calderón-Aguilera, L. & Aparicio, T. (2020). Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract. *Ecological Indicators*, 119(Diciembre). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106795>
- Cabral-Tena, R. A., Medellín-Maldonado, F., Granja-Fernández, R., González-Mendoza, T. M., & López-Pérez, A. (2023). Presupuesto de carbonato en el parche de arrecife de La Entrega, Oaxaca, Sur del

- Pacífico Mexicano. *Hidrobiológica*, 33(2), 201-210.
<https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/1713>.
- Calderón-Aguilera, L., Reyes-Bonilla, H. Olán-González, M., Castañeda-Rivero, F. R. & Perusquía-Ardón, J. (2021). Estimated flows and biomass in a no-take coral reef from the eastern tropical Pacific through network analysis. *Ecological Indicators*, 123(Abril).
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107359>
- Carpizo-Ituarte, E., Vizcaíno-Ochoa, V. Chi-Barragán, G., Tapia-Vázquez, O., Cupul-Magaña, A. L. y Medina-Rosas, P. (2011). Evidencia de reproducción sexual en los corales hermatípicos *Pocillopora damicornis*, *Porites panamensis* y *Pavona gigantea* en Bahía de Banderas, Pacífico mexicano. *Ciencias marinas*, 37 (1), 97-112. <https://www.redalyc.org/pdf/480/48020766009.pdf>
- Cortés, J. (2003). *Latin American Coral Reefs*. Elsevier.
https://books.google.com.mx/books?id=LLwoNspxi0C&source=gbs_navlinks_s
- CONANP (Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas). (2001). *Programa de Manejo del Complejo Insular del Espíritu Santo*. CONANP.
https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/espiritu_santo_ok.pdf
- CONANP (Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas). (2003). *Programa de manejo Parque Nacional Huatulco: México*. CONANP.
https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/huatulco.pdf
- CONANP (Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas). (2007). *Programa de conservación y manejo Parque Nacional Islas Marietas: México*. CONANP.
https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/27_libro_pm.pdf
- CONANP (Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas). (2014). *Programa de Manejo del Parque Nacional Exclusivamente la Zona Marina del Archipiélago de Espíritu Santo*. CONANP.
https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/141_libro_pm.pdf
- Danemann, G. D., y Ezcurra, E. (2008). Bahía de Los Ángeles recursos naturales y comunidad. Línea base 2007. Instituto Nacional de Ecología. 740.
<https://books.google.com.mx/books?id=kSP02XgNpbIC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Darling, E., Álvarez-Filip, L., Thomas, O., McClanahan, T., Côté, I. & Bellwood, D. (2012). Evaluating life-history strategies of reef corals from species traits. *Ecology letters*, 15(12), 1378-86.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01861.x>
- Darling, E. S., McClanahan, T. R., Maina, J., Gurney, G. G., Graham, N. A. J., Januchowski-Hartley, F., Cinner, J. E., Mora, C., Hicks, C. C., Maire, E., Puotinen, M., Skirving, W. J., Adjeroud, M., Ahmadi, G., Arthur, R., Bauman, A. G., Begler, M., Berumen, M. L., Bigot, L., ... Mouillot, D. (2019). Social-environmental drivers inform strategic management of coral reefs in the Anthropocene. *Nature Ecology and Evolution*, 3(9), 1341–1350. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0953-8>
- Secretaría de Gobernación. (2007a). Decreto de Reserva de la Biosfera de Bahía de los Ángeles, canales de Ballenas y de Salsipuedes. Primera sección, 05 de Junio. Diario Oficial de la Federación.

- Secretaría de Gobernación. (2007b) Decreto del Parque Nacional Archipiélago Espíritu Santo. Primera Sección, 10 de mayo. Diario Oficial de la Federación.
- García-Hernández, V.C. (2014). *Análisis de la biodiversidad en arrecifes rocosos en la zona de transición tropical subtropical del Pacífico mexicano*. [Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones biológicas del Noroeste, S. C.]. <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/439>
- Glynn, P. W. (2001). Eastern Pacific coral reef ecosystems. En: Seeliger, U. & Kjerfve, B. (eds.), *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. (281-305). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-7499-4_5
- Glynn, P. W., & Ault, J. S. (2000) A biogeographic analysis and review of the far eastern Pacific coral reef region. *Coral Reefs*, 19, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s003380050220>
- Glynn, P. W., Alvarado, J. J., Banks, S., Cortés, J., Feingold, J. S., Jiménez, C., Maragos, J. E., Martínez, P., Maté, J. L., Moanga, D. A., Navarrete, S., Reyes-Bonilla, H., Riegl, B., Rivera, F., Vargas-Ángel, B., Wieters, E. A. & Zapata F. A. (2017). Eastern Pacific Coral Reef Provinces, Coral Community Structure and Composition: An Overview. En: Glynn, P., Manzello, D., Enochs, I. (eds), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific. Coral Reefs of the World* (Vol 8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_5
- Glynn, P. W., & Leyte Morales, G. E. (1997). Coral reefs of Huatulco, West México: reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec. *Revista De Biología Tropical*, 45(3), 1033–1047. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/21114>
- González-Barrios, F. J. & Álvarez-Filip, L. (2018). A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators*, 95(April), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.038>
- González-Barrios, F. J., Cabral-Tena, R. A., & Alvarez-Filip, L. (2021). Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology*, 27(3), 640-651. <https://doi.org/10.1111/gcb.15431>
- González-Medina, F. J. (2004). *Variación espacio temporal de algunos macroinvertebrados bentónicos del Archipiélago Espíritu Santo, B.C. S. México*. [Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas]. Repositorio institucional <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/14406>
- Graham, N. A. .J. & Nash, K. L., (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32(2), 315–326. <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0984-y>
- Guzmán-Méndez, I. A. 2009. Estructura de las asociaciones de algunos invertebrados del archipiélago Espíritu Santo, Baja California Sur, México. [Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de ciencias Marinas]. Repositorio institucional <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/13687/1/guzmanme1.pdf>
- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69, 181-217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- López-Pérez, R. A., Mora-Pérez, M. G. & Leyte-Morales, G. E.. (2007). Coral (Anthozoa: Scleractinia) Recruitment at Bahías de Huatulco, Western México: *Implications for Coral Community Structure*

- and Dynamics. *Pacific Science*, 61(3), 355-369. [https://doi.org/10.2984/1534-6188\(2007\)61\[355:CASRAB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2984/1534-6188(2007)61[355:CASRAB]2.0.CO;2)
- López-Pérez, R. A. (2017). *Revisiting the Cenozoic history and the origin of the Eastern Pacific coral fauna*. En: P. Glynn, D.P. Manzello, I. Enochs (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*. Springer, https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_2
- López-Pérez, A., Granja-Fernández, R., Aparicio, T., Zepeta, R., Torres, A., Benitez-Villalobos, F., López-López, D., Cruz-Antonio, C. & Valencia-Méndez, O. (2014). Corales pétreos, equinodermos y peces asociados a comunidades y arrecifes coralinos del Parque Nacional Huatulco, Pacífico sur mexicano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 1145-1159. <https://doi.org/10.7550/rmb.31834>
- López-Pérez, A., Granja-Fernández, R., Valencia-Méndez, O., Aparicio, T., Torres, A., Barrientos-Luján, N.A., Benítez-Villalobos, F. & Hernández, Luis. (2019). Biodiversity Associated with Southern Mexican Pacific Coral Systems. En: Ibáñez, A. (ed) *Mexican Aquatic Environments*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11126-7_5
- Manzello, D. (2010). Coral growth with thermal stress and ocean acidification: Lessons from the eastern tropical Pacific. *Coral Reefs*, 29, 749-758. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0623-4>
- Martínez-Ávila, C. A. 2022. *Cambios en la funcionalidad física del arrecife de Cabo Pulmo entre 1992-2000*. [Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3788/1/tesis_Christian%20Alfonso%20Mart%C3%ADnez%20%C3%81vila_01%20nov%202022.pdf
- Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P. & Landgrave, R. (2007) The Coasts of Our World: Ecological, Economic and Social Importance. *Ecological Economics*, 63, 254-272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>
- Medellín-Maldonado, F., Cabral-Tena, R. A., y López-Pérez, A., Calderón-Aguilera, L., Norzagaray-López, O., Chapa-Balcorta, C. & Zepeta-Vilchis R. (2016). Calcification of the main reef-building coral species on the Pacific coast of southern México. *Ciencias Marinas*. 42, 209–225. <https://doi.org/10.7773/cm.v42i3.2650>
- Molina-Luna, M. (2013). *Análisis del estado de salud de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/615/1/233441.pdf>
- Mouillot, D., Graham, N. A. J., Villéger, S., Mason, N. W. H., & Bellwood, D. R. (2013). A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in Ecology and Evolution*, 28(3), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.004>
- Mouillot, D., Villéger, S., Parravicini, V., Kulbicki, M., Arias-González, J. E., Bender, M., Chabanet, P., Floeter, S. R., Friedlander, A., Vigliola, L., & Bellwood, D. R. (2014). Functional over-redundancy and high functional vulnerability in global fish faunas on tropical reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(38), 13757–13762. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1317625111>
- Norzagaray-López, C. O., Ávila-López, M. C., Chapa-Balcorta, C., Calderón-Aguilera, L. E. & Hernández-Ayón, M. (2013). Reducida producción de CaCO₃ por *Porites panamensis* en tres comunidades

- arrecifales del Pacífico mexicano. En: Pellat FP, González JW, Bazan M, Saynes V (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013*. (437-441 pp). Programa mexicano del Carbono, México. [https://www.researchgate.net/publication/262919177 Reducida produccion de CaCO3 por Porites panamensis en tres comunidades arrecifales del Pacifico mexicano](https://www.researchgate.net/publication/262919177_Reducida_produccion_de_CaCO3_por_Porites_panamensis_en_tres_comunidades_arrecifales_del_Pacifico_mexicano)
- Norzagaray-López, C. O, Calderón-Aguilera, L. E, Hernández-Ayón, J. M., Reyes-Bonilla, H., Carricart-Ganivet, J. P., Cabral-Tena, R. A. & Balart, E. F. (2014). Low calcification rates and calcium carbonate production in *Porites panamensis* at its northernmost geographic distribution. *Marine. Ecology*. 36, 1244–1255. <http://dx.doi.org/10.1111/maec.12227>
- Norzagaray-López, O. C., Calderón-Aguilera, L. E., Castro-Ceseña, A. B., Hirata, G. & Hernández-Ayón, J. M. (2017). Skeletal dissolution kinetics and mechanical tests in response to morphology among coral genera. *Facies*, 63(7), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10347-016-0488-2>
- Norzagaray-López, C. O., Calderón-Aguilera, L., Barranco, L., Cabral-Tena, R. A., Carricart-Ganivet, J. P., Cupul-Magaña, A., Horta-Puga, G., López-Pérez, A., Pérez-España, H., Reyes-Bonilla, H. Rodríguez-Troncoso, A. & Tortolero-Langarica, A. (2019). Arrecifes y comunidades coralinas. Capítulo 7. En: Paz, F., Hernández, J., Sosa, R. & Velázquez, A. (Eds), *Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. [https://www.researchgate.net/publication/334373903 Capitulo 7 Arrecifes y comunidades coralinas](https://www.researchgate.net/publication/334373903_Capitulo_7_Arrecifes_y_comunidades_coralinas)
- Olán-González, M. A. (2018). *Geomorfología arrecifal y su efecto sobre la función de los ensamblajes ícticos*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California Sur]. Repositorio Institucional <https://biblio.uabcs.mx/tesis/te3925.pdf>
- Ortega-Rubio A., González-López, I., March-Mifsut, I., Bustamante-Moreno, E. I., Palmeros-Rodríguez, M. Á., Bojórquez-Galeana, N., Suárez, A., Bermúdez-Almada, B. (2019). *Parque Nacional Zona Marina del Archipiélago Espíritu Santo: primer Área Natural Protegida de México con el Certificado Lista Verde de UICN*. 2019. Áreas Naturales Protegidas Scripta, Vol. 5 (1), 43- 68. http://areas-naturales-protegidas.org/scripta/Volumen09/ARTICULO_4.pdf
- Paz-García, D. A., Correa-Sandoval, F., Chávez-Romo, H. E., Reyes-Bonilla, H., López-Pérez, R. A., Medina-Rosas, P., & Hernández-Cortés, M. P. (2009). Genetic structure of the massive coral *Porites panamensis* (Anthozoa: Scleractinia) from the Mexican Pacific. In *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium*, 449-453. [https://www.researchgate.net/publication/233171262 Genetic structure of the massive coral Porites panamensis Anthozoa Scleractinia from the Mexican Pacific](https://www.researchgate.net/publication/233171262_Genetic_structure_of_the_massive_coral_Porites_panamensis_Anthozoa_Scleractinia_from_the_Mexican_Pacific)
- Paz-García, D., Aldana-Moreno, A., Cabral-Tena, R. A., García De León, F., Hellberg, M. & Balart, E. (2015). Morphological variation and different branch modularity across contrasting flow conditions in dominant *Pocillopora* reef-building corals. *Oecologia*, 178, 207-218. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3199-9>
- Perera-Valderrama, S., Caballero, H., Santamaría-Del-Ángel, E., Álvarez-Filip, L., Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Rosique-de la Cruz, L. & Ressler, R. (2020). Arrecifes coralinos. En: Perera-Valderrama, S., Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Rosique-de la Cruz, L. O., Caballero-Aragón, H. & Ressler, R. (coords.). *Protocolos de monitoreo de la biodiversidad marina en áreas naturales protegidas del Caribe mexicano*. (31-81 pp). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [https://www.researchgate.net/publication/351288104 CAPITULO II-](https://www.researchgate.net/publication/351288104_CAPITULO_II-)

[Arrecifes coralinos En Perera-Valderrama S Cerdeira-Estrada S Martell-Dubois R Rosique-de la Cruz LO Caballero-Aragon H Ressler R 2020 Protocolos de Monitoreo de la Biodiversidad Marina en](#)

- Plaisance, L., Caley, M. J., Brainard, R. E. & Knowlton, N. (2011) The Diversity of Coral Reefs: What Are We Missing?. *PLoS ONE*, 6(10), e25026. <https://doi.org/doi:10.1371/journal.pone.0025026>
- Reyes Bonilla, H. (2001). Effects of the 1997-98 El Niño Southern Oscillation on coral communities of the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 69 (1), 251-266. https://www.researchgate.net/publication/233672019_Effects_of_the_1997-1998_El_Niño_Southern_Oscillation_on_coral_communities_of_the_Gulf_of_California_Mexico
- Reyes-Bonilla H. & López-Pérez R. A. (2009). Corals and coral-reef communities in the Gulf of California. In: Johnson ME, Ledesma-Vásquez J (eds.), *Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California. Past and Present*. (45-57 pp). University of Arizona Press. https://www.researchgate.net/publication/236122576_Corals_and_Coral-reef_Communities_in_the_Gulf_of_California
- Reyes-Bonilla, H., Escobosa-González, L. E., Cupul-Magaña, A. L., Medina-Rosas, P. & Calderón-Aguilera, L. E. (2013). Estructura comunitaria de corales zooxantelados (Anthozoa: Scleractinia) en el arrecife coralino de Carrizales, Pacífico Mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 61(2), 583-594. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44927436011>
- Reyes-Bonilla, H., Cárdenas, P., Calderón-Aguilera, L., Ricárdez, C., Fernández-Rivera Melo, F., Frausto, T., Salguero, B., Moreno-Sánchez, X., Torres, M., Norzagaray-López, O. & Petatán, D. (2014). Servicios ambientales de arrecifes coralinos: el caso del Parque Nacional Cabo Pulmo, B.C.S. En: Urciaga-García, J. I. (Ed), *Desarrollo Regional en Baja California Sur: Una perspectiva de los servicios ecosistémicos*. (38-63 pp). https://www.researchgate.net/publication/263890955_SERVICIOS_AMBIENTALES_DE_ARRECIFE_S_CORALINOS_EL_CASO_DEL_PARQUE_NACIONAL_CABO_PULMO_BCS
- Reyna-Fabián, M. Espinoza, A., Seingier, G., Ortiz-Lozano, L. & Espejel, I. (2018). De la evaluación ecológica a la socio-ecológica: la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático. *Sociedad y Ambiente*, 17, 59-92. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i17.1840>
- Rodríguez-Troncoso, A. P. & Tortolero-Langarica, J. J. A. (2015). Corales: Organismos base constructores de los ecosistemas arrecifales. En: Cifuentes Lemus J. L. & Cupul-Magaña, F. G. *Temas sobre investigaciones costeras*. (34-55 pp). Universidad de Guadalajara. https://www.researchgate.net/publication/268078100_Capitulo_3_Corales_Organismos_base_constructores_de_los_ecosistemas_arrecifales
- Romero-Torres, M., Acosta, A., Palacio-Castro, A. M., Trembl, E. A., Zapata, F. A., Paz-García, D. A. & Porter, J. W. (2020) Coral reef resilience to thermal stress in the eastern tropical Pacific. *Global Change Biology*, 26, 3880–3890. <https://doi.org/10.1111/gcb.15126>
- Rojas-Higuera, P. J. & Pabón-Caicedo, J. D. (2015). Sobre el calentamiento y la acidificación del océano mundial y su posible expresión en el medio marino costero colombiano. *Revista. De la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 39(151), 201-217. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.135>

- Saavedra-Sotelo N. C. (2007). *Estructura y flujo genético de Pavona gigantea (Anthozoa: Scleractinia) en las costas del Pacífico mexicano*. [Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/751/1/178051.pdf>
- Saavedra Sotelo, N. C. 2013. Viviendo en el límite : evaluación del efecto de hábitats marginales en la diversidad y diferenciación genética de corales hermatípicos en el Golfo de California y el Pacífico mexicano. [Tesis de Doctorado en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/742>
- Santiago-Valentín, J. D., Rodríguez-Troncoso, A. P., Carpizo-Ituarte, E., Benitez-Villalobos, F., Torres-Hernández, P. & López-Pérez, A. (2015). Reproductive pattern of the reef-building coral *Pavona gigantea* (Scleractinia: Agariciidae) off southwestern Mexico. *Ciencias Marinas*. 41.(3), 233-246. <https://doi.org/10.7773/cm.v41i3.2482>
- Selig, E. R. & Bruno, J. F. (2010) A Global Analysis of the Effectiveness of Marine Protected Areas in Preventing Coral Loss. *PLoS ONE*, 5(2), e9278. <https://doi.org/doi:10.1371/journal.pone.0009278>
- Tortolero-Langarica, A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. & Carricart-Ganivet, J.P. (2017a). Calcification and growth rate recovery of the reef-building *Pocillopora* species in the northeast tropical Pacific following an ENSO disturbance. *PeerJ*, 5, 3191. <https://doi.org/doi:10.7717/peerj.3191>
- Tortolero-Langarica, A., J., Carricart-Ganivet, P., Cupul-Magaña, A. & Rodríguez-Troncoso, A. (2017b). Historical insights on growth rates of thereef-building corals *Pavona gigantea* and *Porites panamensis* from the Northeastern tropical Pacific. *Marine Environmental Research*. 132, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.10.004>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L. & Rinkevich, B. (2020). Micro-Fragmentation as an Effective and Applied Tool to Restore Remote Reefs in the Eastern Tropical Pacific. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6574. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186574>

Anexos

Anexo A.

Tabla 2 Valores la altura, índice de rugosidad y tasa de calcificación estandarizados de las especies de cada localidad.

Localidad	Especie	Altura	Índice de Rugosidad	Tasa de Calcificación
Bahía de Los Ángeles	<i>Porites panamensis</i>	0.14	0.19	0
Bahía de La Paz	<i>Pavona gigantea</i>	0.30	0.06	0.56
	<i>Pocillopora capitata</i>	0.30	0.47	0.76
	<i>Pocillopora damicornis</i>	0.27	0.19	0.62
	<i>Pocillopora meandrina</i>	0.24	0.19	0.59
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	0.25	0.16	0.82
	<i>Porites panamensis</i>	0.05	0.12	0.02
	<i>Psammocora stellata</i>	0	0	0.54
Bahía Banderas	<i>Pavona clavus</i>	0.37	0.10	0.48
	<i>Pavona gigantea</i>	1.00	0.33	0.31
	<i>Pocillopora capitata</i>	0.28	0.97	0.90
	<i>Pocillopora damicornis</i>	0.37	0.41	0.97
	<i>Pocillopora effusus</i>	0.11	0.05	0.97
	<i>Pocillopora grandis</i>	0.44	1	0.99
	<i>Pocillopora meandrina</i>	0.31	0.62	0.48
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	0.26	0.90	1
	<i>Porites panamensis</i>	0.09	0.05	0.12
Bahías de Huatulco	<i>Pavona gigantea</i>	0.38	0.14	0.42
	<i>Pavona varians</i>	0.25	0.01	0.15
	<i>Pocillopora capitata</i>	0.24	0.50	0.68
	<i>Pocillopora damicornis</i>	0.23	0.37	0.66
	<i>Pocillopora meandrina</i>	0.20	0.59	0.60
	<i>Pocillopora effusus</i>	0.11	0.05	0.97
	<i>Pocillopora grandis</i>	0.23	0.46	0.67
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	0.24	0.39	0.75
	<i>Porites panamensis</i>	0.05	0.05	0.11

Anexo B.

Tabla 3 Cobertura coralina (promedio \pm desviación estándar) e Índice de función arrecifal (promedio \pm desviación estándar) de cada localidad (n=135).

Localidad	Cobertura coralina	Índice de Función Arrecifal
Bahía de Los Ángeles	17.16 \pm 0.08	0.34 \pm 0.08
Bahía de La Paz	43.78 \pm 23.20	0.57 \pm 0.12
Bahía de Banderas	25.92 \pm 14.67	0.59 \pm 0.14
Bahías de Huatulco	55.61 \pm 21.94	0.68 \pm 0.09

Anexo C.

Tabla 4 Análisis post hoc para diferencia de medianas de la cobertura coralina entre las localidades. Los numero en rojo indican los valores menores a una $p < 0.05$.

Multiple comparisons p values (2 tails); Cobertura				
Independent (grouping) variable: factor				
Kruskal-wallis test: H (3, N= 135) =25.98380 p=.0000				
Depend: Cobertura	BLA R:32.000	BLP R:73.697	BB R:47.633	BH R: 88.517
BLA		0.010088	1.000000	0.000489
BLP	0.010088		0.014863	0.534032
BB	1.000000	0.014863		0.000359
BH	0.000489	0.534032	0.000359	

Anexo D.

Tabla 5 Contribución a la cobertura coralina por especie de cada localidad. Bahía de Los Ángeles (BLA), Bahía de La Paz (BLP), Bahía de Banderas (BB) y Bahías de Huatulco (BH).

Especie	BLA	BLP	BB	BH
<i>Pavona clavus</i>	-	-	0.03 ± 0.06	-
<i>Pavona gigantea</i>	-	3.19 ± 7.68	2.06 ± 3.63	3.69 ± 5.20
<i>Pavona varians</i>	-	-	-	0.22 ± 0.54
<i>Pocillopora capitata</i>	-	0.68 ± 1.65	7.57 ± 6.49	1.09 ± 1.19
<i>Pocillopora damicornis</i>	-	10.49 ± 11.70	2.06 ± 2.56	20.66 ± 17.24
<i>Pocillopora effusus</i>	-	-	-	0.13 ± 0.30
<i>Pocillopora grandis</i>	-	-	0.07 ± 0.12	2.44 ± 3.31
<i>Pocillopora meandrina</i>	-	12.07 ± 25.52	-	0.17 ± 0.40
<i>Pocillopora verrucosa</i>	-	10.38 ± 13.31	12.36 ± 8.04	26.45 ± 22.47
<i>Porites panamensis</i>	17.16 ± 13.23	6.95 ± 6.63	1.78 ± 0.26	0.76 ± 1.51
<i>Psammocora stellata</i>	-	0.04 ± 0.09	-	-

Anexo E.

Tabla 6 Análisis post hoc para diferencia de medianas del índice de Función Arrecifal entre las localidades

Multiple comparisons p values (2-tails); IFA				
Independent (grouping) variable: factor				
Kruskal-wallis test: H (3, N= 135)= 32.00150 p=.0000				
Depend: IFA	BLA R:14.300	BLP R:63.621	BB R: 71.067	BH R: 93.310
BLA		0.001215	0.000423	0.000000
BLP	0.001215		1.000000	0.003942
BB	0.000423	1.000000		0.173902
BH	0.000000	0.003942	0.173902	

Anexo F.

Tabla 7 Contribución de IFA por especie de cada localidad. Bahía de Los Ángeles (BLA), Bahía de La Paz (BLP), Bahía de Banderas (BB) y Bahías de Huatulco (BH).

Especie	BLA	BLP	BB	BH
<i>Pavona clavus</i>	-	-	0.0003	-
<i>Pavona gigantea</i>	-	0.053	0.081	0.045
<i>Pavona varians</i>	-	-	-	0.001
<i>Pocillopora capitata</i>	-	0.015	0.147	0.014
<i>Pocillopora damicornis</i>	-	0.153	0.026	0.223
<i>Pocillopora effusus</i>	-	-	0.000	0.001
<i>Pocillopora grandis</i>	-	-	0.002	0.038
<i>Pocillopora meandrina</i>	-	0.123	0.000	0.003
<i>Pocillopora verrucosa</i>	-	0.190	0.314	0.351
<i>Porites panamensis</i>	0.342	0.029	0.017	0.003
<i>Psammocora stellata</i>	-	0.006	-	-