

Descripción de la funcionalidad física en los arrecifes de coral de Isla Espíritu Santo, La Paz, Baja California Sur

Description of physical functionality in the coral reefs of Isla Espíritu Santo, La Paz, Baja California Sur

Claudia Rebeca Navarrete-Torices¹, Héctor Reyes-Bonilla², Rafael A. Cabral-Tena^{1*} 

Recibido: 31 de octubre de 2022.

Aceptado: 30 de mayo de 2023.

Publicado: agosto de 2023.

RESUMEN

Antecedentes. Los corales desempeñan un papel fundamental en la estructura y función del arrecife debido a su capacidad para depositar carbonato de calcio y contribuir con la formación de estructuras tridimensionales complejas. Sin embargo, el potencial de funcionamiento de una comunidad arrecifal, en términos de su capacidad de construcción, es afectado por la abundancia relativa de las especies de coral que se encuentran en el arrecife. **Objetivos.** Evaluar la funcionalidad física de los arrecifes de coral en seis sitios del Parque Nacional Zona Marina del Archipiélago Espíritu Santo (PNZMAES). **Métodos.** Se implementó el Índice Funcional Arrecifal (IFA) como métrica de funcionalidad física; esta herramienta considera la tasa de calcificación, la complejidad estructural y la abundancia de las especies de coral en cada sitio. **Resultados.** Los sitios Las Navajas y San Gabriel presentaron la cobertura de coral mayor con 74.72 % y 60.14 %, respectivamente, mientras que La Ballena fue el sitio con menor cobertura coralina (6.77 %). En cuanto al IFA, los sitios que presentaron el mayor valor fueron Las Navajas (0.68) y San Gabriel (0.65), dominados por los corales *Pocillopora meandrina* y *Pocillopora verrucosa*, respectivamente. El sitio con menor IFA fue La Ballena (0.35), donde *Pocillopora verrucosa* predominó. Las especies de coral del género *Pocillopora* son los que predominaron en todos los sitios y los que tuvieron una mayor contribución al IFA. **Conclusiones.** El IFA ayudó a complementar la información del ensamblaje de corales en el PNZMAES y a entender el desempeño que tienen las especies de coral en el funcionamiento arrecifal del Pacífico mexicano.

Keywords: Coral Cover, functional ecology, physical functionality, Gulf of California.

ABSTRACT

Background. Corals play a fundamental role in reef structure and function because of their ability to deposit calcium carbonate and contribute to the formation of complex three-dimensional structures. However, the functioning potential of a reef community, in terms of its building capacity, is affected by the relative abundance of coral species on the reef. **Objectives.** Evaluate the physical functionality of coral reefs at six sites in the Parque Nacional Zona Marina del Archipiélago Espíritu Santo (PNZMAES). **Methods.** The Reef Functional Index (RFI) was implemented as a metric of physical functionality; this tool considers the calcification rate, structural complexity, and abundance of coral species at each site. **Results.** Las Navajas and San Gabriel sites had the highest coral cover, with 74.72 % and 60.14 %, respectively, while La Ballena was the site with the lowest coral cover (6.77 %). In terms of IFA, the sites with the highest index were Las Navajas (0.68) and San Gabriel (0.65), dominated by *Pocillopora meandrina* and *Pocillopora verrucosa* corals, respectively. The site with the lowest IFA was La Ballena (0.35), with *Pocillopora verrucosa* being the predominant coral. Coral species of the genus *Pocillopora* were predominant in all sites and contributed the most to the Reef Function Index. **Conclusions.** The Reef Function Index helped to complement the information on the coral assemblage in the PNZMAES and to understand the performance of coral species in the reef functioning of the Mexican Pacific.

Palabras clave: Cobertura coralina, ecología funcional, funcionalidad física, Golfo de California.

¹ Laboratorio de Arrecifes y Biodiversidad/ Departamento de Ecología Marina, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, 22860. México

² Laboratorio de Sistemas Arrecifales/Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Carretera al sur km 5.5, La Paz, Baja California Sur, 23080. México

*Corresponding author:

Rafael A. Cabral-Tena: e-mail: rcabral@cicese.mx

To quote as:

Navarrete-Torices, C. R., H. Reyes-Bonilla & R. A. Cabral-Tena. 2023. Descripción de la funcionalidad física en los arrecifes de coral de Isla Espíritu Santo, La Paz, Baja California Sur. *Hidrobiológica* 33 (2): 191-200.

DOI:10.24275/RHDH7182

INTRODUCCIÓN

Los corales constructores de arrecifes desempeñan un papel primario en la estructura y función del arrecife (Coates & Jackson, 1987) ya que, debido a su capacidad para depositar carbonato de calcio 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 costeras. Estos servicios pueden ser sociales, culturales o económicos como los recursos pesqueros (Reyes-Bonilla *et al.*, 2014a). 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 actividades; el turismo costero, por ejemplo, genera aproximadamente \$36 billones de dólares anualmente a nivel mundial (Martínez *et al.*, 2007; Spalding *et al.*, 2017).

Debido a la importancia ecológica y económica de los arrecifes de coral, recientemente se han examinado los rasgos funcionales de los corales que son clave para la persistencia de los arrecifes, tales como el crecimiento, la complejidad estructural y la producción de carbonato de calcio (Álvarez-Filip *et al.*, 2011; Medellín-Maldonado *et al.*, 2016). Sin embargo, el potencial de funcionamiento de una comunidad arrecifal, en términos de su capacidad de construcción, es afectado por la abundancia relativa de las especies de coral que se encuentran presentes en el arrecife (Darling *et al.*, 2019). En relación con lo anterior, solo algunos rasgos de los corales (rugosidad y tasa de calcificación de la colonia) determinan la capacidad de las comunidades coralinas para crear estructuras tridimensionales complejas mediante la precipitación de carbonato de calcio, que definen la funcionalidad física del ecosistema, los cuales son particulares a cada especie (González-Barrios *et al.*, 2021).

Los rasgos funcionales de cada especie de coral que determinan la funcionalidad física de los arrecifes coralinos son: la abundancia por especie (cobertura), la complejidad estructural (altura, diámetro y rugosidad por especie) y la tasa de calcificación (extensión y densidad del esqueleto por especie) (Álvarez-Filip *et al.*, 2013; Cabral-Tena *et al.*, 2018). De manera que, utilizando los rasgos funcionales mencionados anteriormente, se ha propuesto el Índice de Funcionalidad Arrecifal (IFA), mediante el cual se determina el aporte de las especies de coral, su función en el ecosistema y las diferentes respuestas de los arrecifes coralinos ante impactos naturales o antropogénicos (González-Barrios & Álvarez-Filip, 2018).

En el Pacífico mexicano, los arrecifes de coral son pequeños, con baja riqueza de especies de coral y generalmente dominados por especies del género *Pocillopora* (> 90 %) (Medellín-Maldonado *et al.*, 2016; López-Pérez *et al.*, 2019). Sin embargo, algunos factores como las zonas de surgencia o gradientes de profundidad y temperatura, así como los efectos de los eventos ENSO (El Niño y La Niña) pueden producir diferencias en la calcificación de *Pocillopora* en la región (Tortolero-Langarica *et al.*, 2017a).

Considerando que los sistemas coralinos del Pacífico mexicano tienen una menor riqueza de especies de coral en comparación con otras regiones (e.g. Caribe, Indo-Pacífico), 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). Dada la importancia de la pérdida de cobertura de coral vivo, diversos estudios se han orientado a evaluar el estado de salud de los ecosistemas por medio de este valor (Selig & Bruno, 2010). No obstante, su estimación puede pasar por alto las diferencias específicas de la complejidad estructural y tasa de calcificación de los corales (Darling *et al.*, 2019), y podría no reflejar el verdadero estado de salud de los arrecifes coralinos (Cabral-Tena *et al.*, 2018, 2020).

Debido a que los estudios en donde se identifican los rasgos morfológicos de las especies de coral que contribuyen a la funcionalidad física del ensamblaje en el Pacífico mexicano se han realizado únicamente en el suroeste del país (Cabral-Tena *et al.*, 2020), el objetivo de este trabajo fue determinar la funcionalidad física de los arrecifes de Isla Espíritu Santo, La Paz, Baja California Sur (B.C.S.), México para describir la función de las especies de coral, así como complementar el conocimiento de los arrecifes coralinos de esta zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

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, B.C.S., México (24°24'-24°36' N; 110°18'-110°27' O) (Fig. 1). 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 refluo 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).

Para determinar la cobertura coralina se realizaron censos submarinos en seis sitios del PNZMAES 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 (10-12 transectos/sitio) a una profundidad máxima de nueve metros. En total se realizaron 66 transectos: 12 transectos en La Dispensa, El Corralito y Las Navajas, respectivamente y 10 transectos en San Gabriel, La Ballena y Roca Swann, respectivamente. El porcentaje de cobertura de coral se registró utilizando seis cuadrantes (1 m²) por transecto, colocados a una distancia de ~4 m. A partir de lo anterior, se obtuvo el promedio de porcentaje de cobertura de coral por transecto, lo que corresponde a la unidad experimental de este estudio.

La complejidad estructural 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 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 (*V*_{min}) entre la distancia lineal del diámetro mayor de la colonia (*D*_{mayor}):

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. Asimismo, en cada sitio se midió de manera aleatoria la altura de las colonias de coral cercanas al transecto con una cinta métrica (103 colonias de *Pocillopora verrucosa* (Ellis & Solander,

1786), 16 colonias de *Pocillopora meandrina* Dana, 1846, 15 colonias de *Pocillopora damicornis* (Linnaeus, 1758), una colonia de *Pavona gigantea* (Verrill, 1869), 24 colonias de *Porites panamensis* Verrill, 1866, una colonia de *Psammocora stellata* (Verrill, 1866) y para *Pocillopora capitata* Verrill, 1864 se tomaron los datos de Martínez-Ávila (2022).

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). El cálculo se realizó 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 paraboide.

Posteriormente, las variables se estandarizaron por medio de la siguiente ecuación:

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

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, mediante el promedio de los valores de cada variable estanda-

rizada. Este coeficiente es particular de cada especie, el cual le confiere un valor dependiendo de los rasgos anteriormente calculados.

El Índice de Función Arrecifal (IFA) se calculó siguiendo lo propuesto por González-Barrios & Álvarez-Filip (2018) el cual considera la 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*), multiplicada por el Coeficiente Funcional (*CF*) de cada especie de coral, por medio de la ecuación:

$$IFA = \sum_i \left(\frac{C_{c_i}}{100} \right) CF_i$$

Para facilitar la interpretación de los datos, se obtuvo la raíz cuarta del IFA (Cálculo de IFA (raíz) = $IFA^{(1/4)}$). 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, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para determinar si hay diferencias en la cobertura coralina y el IFA entre los sitios de muestreo; en caso de que existieran diferencias, se realizó una prueba Tukey como análisis *Post-hoc*. Por último, se ajustó un modelo de regresión lineal simple en el que se busca establecer la relación entre la cobertura coralina de cada género (variable independiente) y el IFA observado (variable dependiente). Los análisis estadísticos se realizaron mediante el programa Past v4.02.

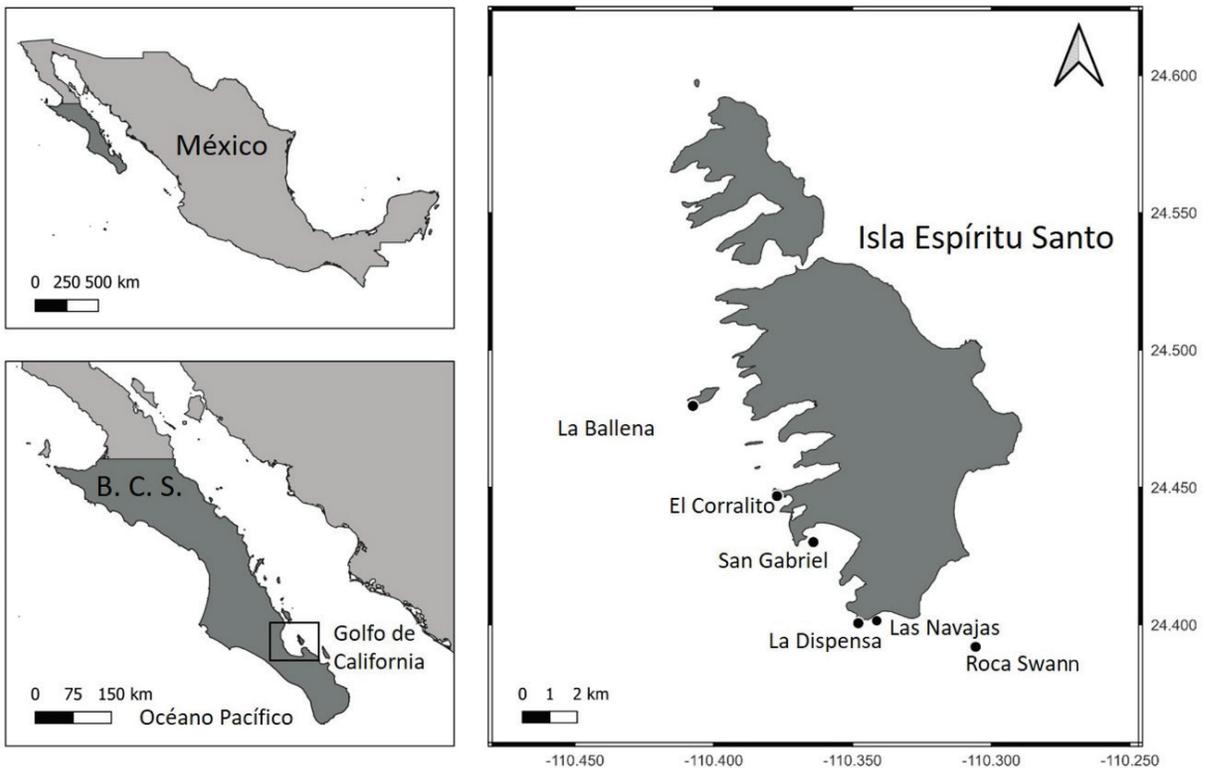


Figura 1. Sitios de muestreo en el Parque Nacional Isla Espíritu Santo, Baja California Sur, México.

RESULTADOS

Los corales del género *Pocillopora* tuvieron los mayores coeficientes funcionales, seguidos de *Pavona*, *Psammocora* y *Porites*. La especie de coral *P. verrucosa* presentó el CF más alto con 0.88, seguido de *P. capitata*, *P. meandrina* y *P. damicornis* con 0.72, 0.70 y 0.62, respectivamente. *Psammocora stellata* y *P. panamensis* fueron las especies de coral que presentaron los CF más bajos con 0.07 y 0.02, respectivamente (Tabla 1).

La cobertura coralina promedio de los sitios en Isla Espíritu Santo fue de 43.78 ± 23.20 % (promedio \pm desviación estándar). Las Navajas y San Gabriel fueron los sitios que presentan la mayor cobertura coralina con 74.72 ± 23.67 % y 60.14 ± 12.92 %, respectivamente. La Ballena fue el sitio con la menor cobertura de coral (6.77 ± 2.34 %). La especie de coral que contribuyó en mayor medida a la cobertura coralina total de Las Navajas fue *P. meandrina* (63.68 %). Por otro lado, *P. verrucosa* fue la especie dominante en San Gabriel y en La Ballena en donde contribuyó con 36 % y 6.28 % a la cobertura total, respectivamente (Fig. 2). Los resultados del análisis de varianza indicaron la existencia de diferencias significativas en la cobertura de coral entre los sitios muestreados ($p < 0.05$, $gl = 65$, $F = 19.71$) (Tabla S1). Los sitios que tuvieron diferencias estadísticas fueron: La Dispensa respecto a La Ballena y Las Navajas; San Gabriel respecto a El Corralito y La Ballena; El Corralito es diferente a La Ballena y Las Navajas; La Ballena es diferente de Las Navajas y Roca Swann; Las Navajas es diferente a Roca Swann (Fig. 2).

El Índice de Función Arrecifal (IFA) promedio en los sitios en Isla Espíritu Santo fue de 0.65 ± 0.15 . Los sitios que presentaron el IFA más alto fueron Las Navajas y San Gabriel con 0.68 y 0.65, respectivamente. Por otro lado, La Ballena fue el sitio con el IFA menor con 0.35. La especie de coral que contribuyó en mayor medida en el IFA del sitio Las Navajas fue *P. meandrina* (0.65) y, por otro lado, *P. verrucosa* fue la especie que contribuyó en mayor medida en los sitios San Gabriel y en La Ballena con 0.45 y 0.30, respectivamente (Fig. 3). Los resultados del análisis de varianza indicaron que existen diferencias significativas en los sitios muestreados ($p < 0.05$, $gl = 65$, $F = 19.71$) (Tabla S2). Los sitios que fueron estadísticamente diferentes fueron: La Dispensa respecto a San Gabriel, La Ballena y Las Navajas; San Gabriel es diferente

a La Ballena; El Corralito es diferente a La Ballena y Las Navajas; La Ballena es diferente a Las Navajas y Roca Swann (Fig. 3).

En cuanto al modelo lineal relacionando la cobertura coralina total y el IFA, hay una relación significativa y positiva ($r^2 = 0.70$, $N = 66$, $p < 0.05$); es decir, el IFA incrementó cuando la cobertura coralina aumentó (Fig. 4). En cuanto a los modelos de regresión lineal relacionando la cobertura de cada género de coral y el IFA, el modelo que incluye los datos de cobertura del género *Pocillopora* fue el único que presentó una tendencia positiva y significativa ($r^2 = 0.74$, $N = 66$, $p < 0.05$) (Fig. 5), mientras que el género *Pavona* presentó una relación no significativa ($r^2 = 0.0004$, $N = 66$, $p > 0.05$) (Fig. 6). Por otro lado, el modelo de regresión lineal con cobertura del género *Porites* presentó una relación no significativa, pero con una tendencia negativa ($r^2 = 0.01$, $N = 66$, $p > 0.05$) (Fig. 7). El género *Psammocora* no se incluyó en el análisis debido a que solo estuvo presente en un sitio.

DISCUSIÓN

En este estudio las especies del género *Pocillopora* presentaron los mayores coeficientes funcionales, resaltando su importancia en la contribución a la funcionalidad física, además de que son las especies de coral constructoras de arrecifes más importantes (en términos de dominancia) en el Pacífico mexicano y a lo largo del Pacífico Oriental Tropical (POT) (Cortés *et al.*, 2017; López-Pérez *et al.*, 2019; Cabral-Tena *et al.*, 2020).

Por otro lado, *P. gigantea* presentó un CF elevado en contraste con las otras especies masivas, esto resalta ya que a pesar de que *P. gigantea* es un coral con valores de rugosidad y calcificación por debajo de los *Pocillopora*, su CF es cercano a *P. damicornis* debido a que la altura de esta especie es superior a todas las especies consideradas en el presente estudio. Esto le confiere un CF con un valor medio entre las especies y, además resalta que fue la especie que tuvo mayor aporte en el IFA en el sitio La Dispensa (Tabla 1, Figs. 2-3). Adicionalmente, los corales *Psammocora* y *Porites* fueron las especies que presentaron los CF más bajos. Los resultados coinciden con lo reportado en Huatulco (Cabral-Tena *et al.*, 2020), donde a pesar de tener una composición de especies diferentes en los arrecifes muestreados, tiene un patrón en el que *Pocillopora* presenta un CF alto, *Pavona* medio y *Porites* bajo.

Tabla 1. Altura (promedio \pm desviación estándar), índice de rugosidad (promedio \pm desviación estándar), tasa de calcificación y coeficientes funcionales (CF) de cada especie de coral de la Isla Espíritu Santo.

	Altura (cm)	Índice de rugosidad	Tasa de calcificación (kg m ⁻² año ⁻¹)	CF
<i>Pocillopora verrucosa</i> (Ellis & Solander, 1786)	26.71 ± 13.74	3.09 ± 0.67	21.16	0.88
<i>Pocillopora capitata</i> (Verrill, 1864)	20 ± 6.61	3.27 ± 0.66	19.74	0.72
<i>Pocillopora meandrina</i> (Dana, 1846)	23.33 ± 5.16	3.72 ± 0.41	15.43	0.70
<i>Pocillopora damicornis</i> (Linnaeus, 1758)	25 ± 3.76	2.77 ± 0.71	16.29	0.62
<i>Pavona gigantea</i> (Verrill, 1869)	27.92 ± 9.88	2.17 ± 0.43	14.75	0.52
<i>Psammocora stellata</i> (Verrill, 1866)	10.75 ± 5.43	1.53 ± 0.27	14.25	0.07
<i>Porites panamensis</i> (Verrill, 1866)	11.75 ± 5.43	1.53 ± 0.27	12.29	0.02

Tabla S1. Prueba Tukey para diferencias de cobertura coralina entre los sitios. Los números en negritas tienen una $p < 0.05$.

	DIS	GAB	COR	BAL	NAV	ROC
DIS		0.3579	0.6207	2.652e⁻⁰⁵	0.001351	0.992
GAB			0.01118	4.181e⁻⁰⁸	0.3659	0.1512
COR				0.004567	4.875e⁻⁰⁶	0.9407
BAL					2.537e ⁻¹¹	0.0004333
NAV						0.0003647
ROC						

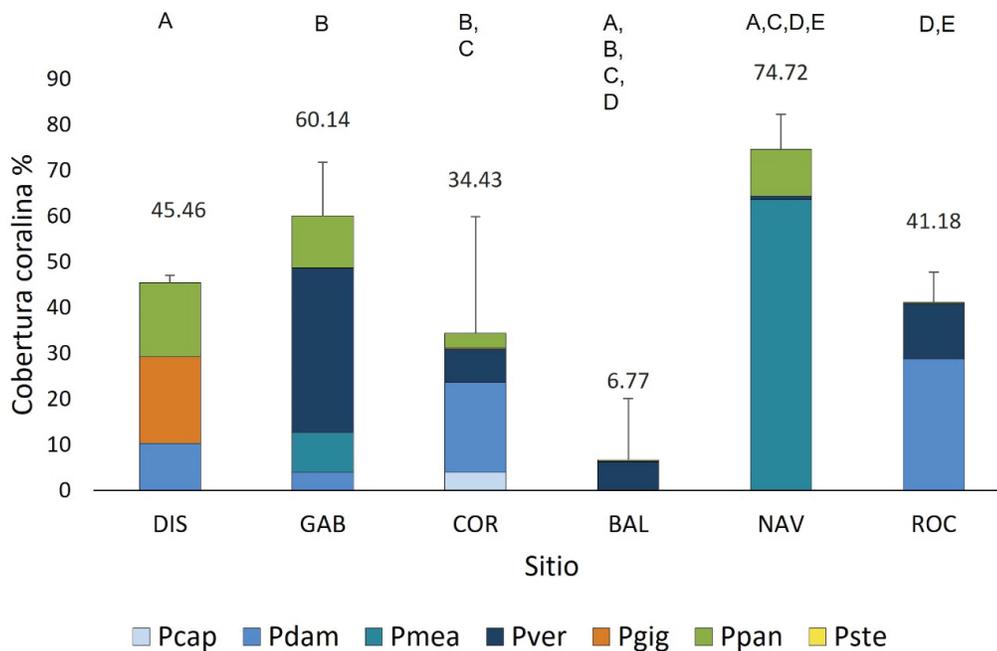


Figura 2. Cobertura coralina promedio de los sitios muestreados (número sobre la barra). La Dispensa (DIS), San Gabriel (GAB), El Corralito (COR), La Ballena (BAL), Las Navajas (NAV) y Roca Swann (ROC). Las especies de coral son: *Pocillopora capitata* (Pcap), *Pocillopora damicornis* (Pdam), *Pocillopora meandrina* (Pmea), *Pocillopora verrucosa* (Pver), *Pavona gigantea* (Pgig), *Porites panamensis* (Ppan) y *Psammocora stellata* (Pste). Barras de error con desviación estándar y las letras agrupan a los sitios estadísticamente diferentes. Los valores por encima de las barras son la sumatoria total de las especies por sitio.

Pocillopora verrucosa fue la especie que estuvo presente en la mayoría de los sitios, a excepción de La Dispensa (Fig. 2), en el cuál resalta la contribución de la cobertura coralina de *P. gigantea* y *P. panamensis*. Por otro lado, *P. damicornis* también estuvo presente en todos los sitios, a excepción de Las Navajas y La Ballena, que fueron sitios en donde predominó el género *Pocillopora*. 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).

En cuanto a la cobertura coralina total del PNZMAES, los sitios que presentaron la mayor cobertura además de Las Navajas y San Gabriel, fueron La Dispensa y Roca Swann (Fig. 2), lo que coincide con los resultados reportados por Reyes-Bonilla & López-Pérez (2009). En el caso de San Gabriel y La Dispensa, una característica a resaltar es la presencia de una matriz arrecifal bien consolidada, que debido al proceso biomineralización proporciona el hábitat y el sustrato para que los corales se asienten y crezcan (Reyes-Bonilla *et al.*, 2014b). Estas barras de coral se han mantenido presentes en San Gabriel y en La Dispensa, debido a que su profundidad es somera, oscila de dos a 11 metros (Tizol-Rosado, 2019), y a que son pequeñas bahías semiprotectidas lo que provee una barrera de protección ante corrientes, oleaje y viento

(Arreola-Robles, 1998; Reyes-Bonilla *et al.*, 2014b) (Fig. 1). Asimismo, Guzmán-Méndez (2009) establece que la mayor proporción de cobertura de coral se encuentra al suroeste del Archipiélago Espíritu Santo y que, por la cercanía de San Gabriel y los sitios aledaños al Canal de San Lorenzo, se ven beneficiados por el intercambio de aguas del Golfo de California, lo que proporciona oxigenación y nutrientes, necesarios para el asentamiento y desarrollo de los organismos sésiles en áreas cercanas (Tizol-Rosado, 2019).

Las Navajas y Roca Swann, que se encuentran al sur de la isla (Fig. 1), presentaron los mayores porcentajes de cobertura de coral a pesar de que son sitios expuestos a frecuentes cambios de intensidad de la corriente, cantidad de luz y nutrientes (Martínez-Sarabia, 2022). Estas condiciones favorecen la presencia de los corales en los sitios, ya que las corrientes y el sustrato ayudan a aumentar la entrada de larvas y a

su asentamiento en sustratos rocosos (Arreola-Robles, 1998), así como la luz que contribuye en los diversos procesos fisiológicos de los corales (Rodríguez-Troncoso & Tortolero-Langarica, 2014). Estos sitios presentan una profundidad de tres a nueve metros (Guzmán-Méndez, 2009; CONANP, 2014), lo que propicia la ocurrencia de aguas claras (mayor irradiancia) y favorece el desarrollo coralino (Martínez-Sarabia, 2022).

La Isla Espíritu Santo, al encontrarse en la zona baja del Golfo de California, se considera como una zona con alta riqueza de especies por situarse en una zona de transición entre la provincia zoogeográfica marina del Indo-Pacífico y la Panámica (Arreola-Robles, 1998; González-Medina *et al.*, 2006). Asimismo, la dinámica de las condiciones ambientales locales son un factor importante que resalta las diferencias de la riqueza de especies de coral que se presentan en cada uno de los sitios (Arreola-Robles, 1998).

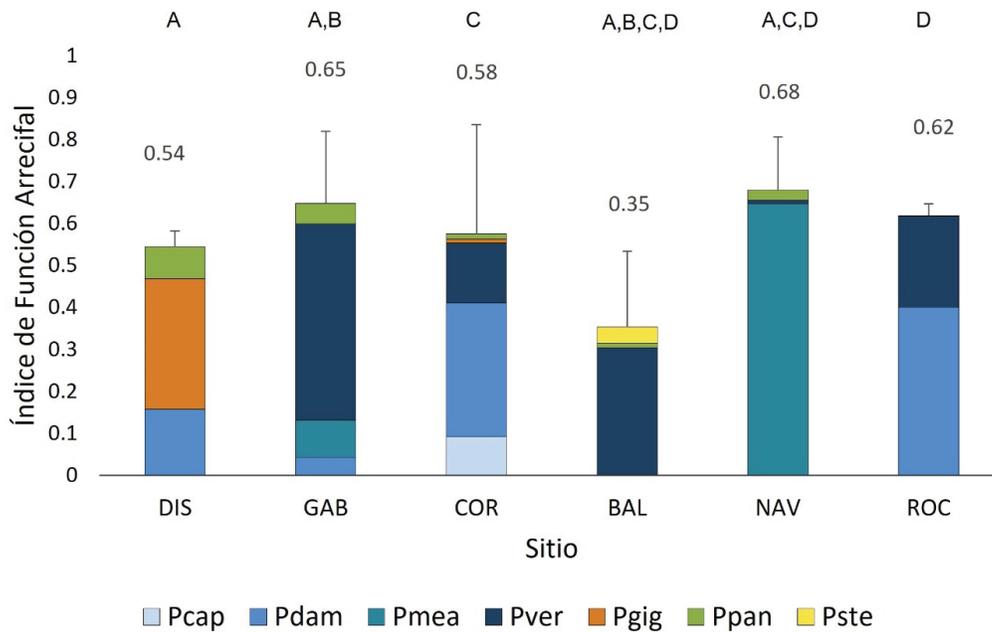


Figura 3. Valores del Índice de Función Arrecifal de cada sitio muestreado (número sobre la barra). La Dispensa (DIS), San Gabriel (GAB), El Corralito (COR), La Ballena (BAL), Las Navajas (NAV) y Roca Swann (ROC). Las especies de coral son: *Pocillopora capitata* (Pcap), *P. damicornis* (Pdam), *P. meandrina* (Pmea), *P. verrucosa* (Pver), *Pavona gigantea* (Pgig), *Porites panamensis* (Ppan) y *Psammocora stellata* (Pste). Barras de error con desviación estándar y las letras agrupan a los sitios estadísticamente diferentes. Los valores por encima de las barras son la sumatoria total de las especies por sitio.

Tabla S2, Prueba Tukey para diferencias del Índice de Función Arrecifal entre los sitios. Los números en negritas tienen una $p < 0.05$.

	IFADIS	IFAGAB	IFACOR	IFABAL	IFANAV	IFAROC
IFADIS		0.02954	0.8476	0.0055574	0.001576	0.2103
IFAGAB			0.3398	1.939e⁻⁰⁷	0.9693	0.9646
IFACOR				0.0001325	0.04957	0.8442
IFABAL					2.88e ⁻⁰⁹	4.374e ⁻⁰⁶
IFANAV						0.5829

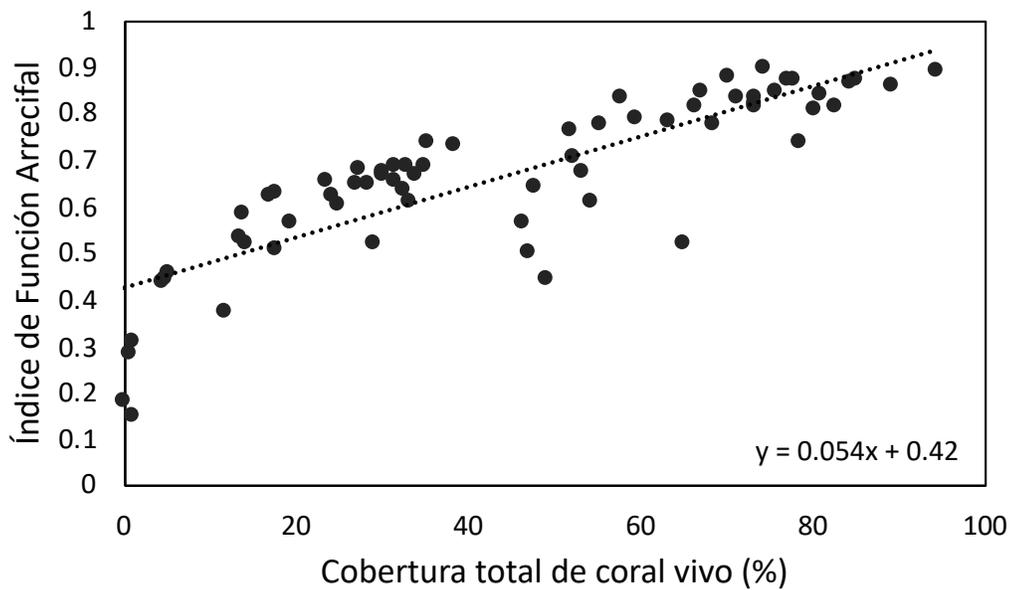


Figura 4. Modelo de regresión lineal simple del porcentaje de la cobertura total de coral vivo y el Índice de Función Arrecifal ($r^2= 0.70$, $N= 66$, $p < 0.05$).

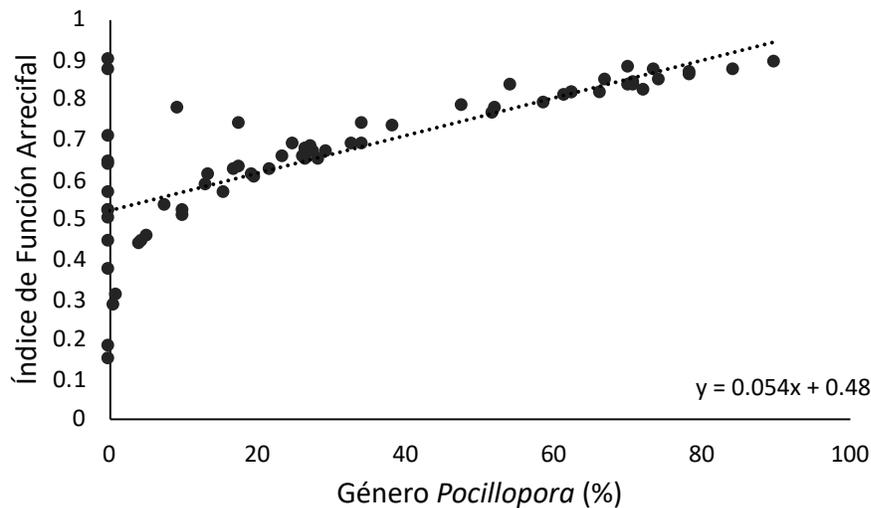


Figura 5. Modelo de regresión lineal simple del porcentaje de la cobertura de coral del género *Pocillopora* y el Índice de Función Arrecifal ($r^2= 0.74$, $N= 66$, $p < 0.05$).

La Ballena es el sitio más norteño de la isla y presentó diferencias significativas con el resto de los sitios (cobertura e IFA más bajos) debido a sus condiciones únicas. Es un sitio considerado como un ambiente expuesto, con un arrecife rocoso y somero en el que dominó el coral *P. verrucosa*, pero que fue el único sitio que tiene la presencia de *P. stellata*, la cual está asociada a dichas características ambientales. Además, la naturaleza del sitio tiene la presión de ser una de las zonas donde se tiene permitida la pesca deportiva (CONANP, 2014).

El IFA está determinado por la cobertura coralina y los atributos morfofuncionales de los corales que permiten estimar la funcionalidad del sitio. En el caso de Las Navajas y San Gabriel, las especies que contribuyeron en mayor medida a la funcionalidad física fueron *P. meandrina* y *P. verrucosa* (Fig. 3) que, a su vez, contribuyen en mayor medida a la cobertura. Por otro lado, es importante resaltar que en los sitios con un IFA bajo, como La Ballena (0.35), la funcionalidad física del sitio está soportada principalmente por *P. verrucosa*, a pesar de tener una cobertura baja (6.28 %).

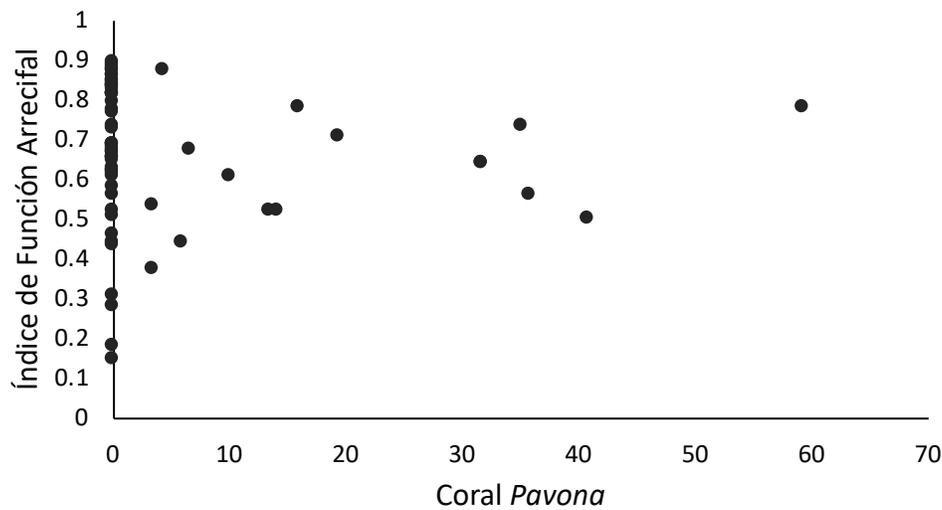


Figura 6. Modelo de regresión lineal simple del porcentaje de la cobertura de coral *Pavona gigantea* y el Índice de Función Arrecifal ($r^2= 0.0004$, $N= 66$, $p > 0.05$).

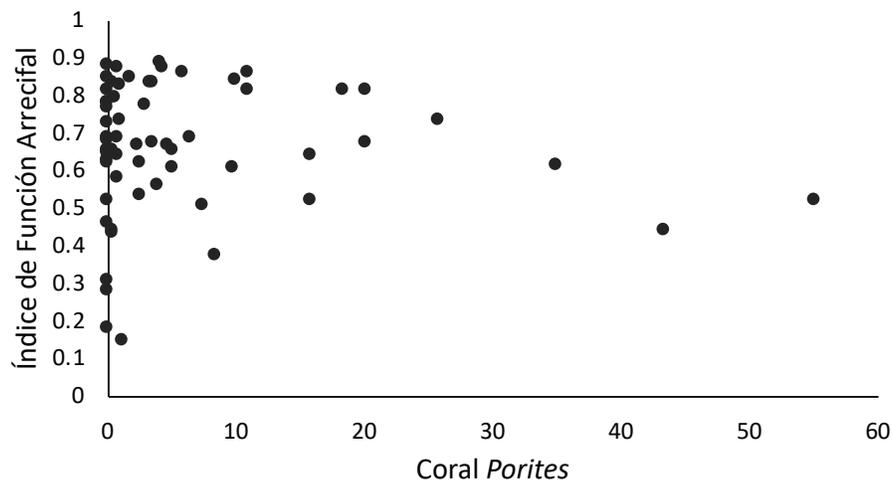


Figura 7. Modelo de regresión lineal simple del porcentaje de la cobertura de coral *Porites panamensis* y el Índice de Función Arrecifal ($r^2= 0.01$, $N= 66$, $p > 0.05$).

Es importante señalar que en La Dispensa, San Gabriel y Las Nava-jas, la cobertura de *P. panamensis* es alta (16.22 %, 11.42 % y 10.27 %, respectivamente), respecto al resto de los sitios en donde se tuvieron valores menores de 3 %, aún así su contribución al IFA es muy pequeña (0.07, 0.04 y 0.02, respectivamente).

De acuerdo con los modelos de regresión lineal en donde se buscó explorar la relación de la cobertura por género con el IFA, únicamente el incremento de la cobertura de las especies del género *Pocillopora* mostraron una relación lineal positiva y significativa en el incremento del IFA. Mientras que en el caso de los géneros *Pavona* y *Porites*, no muestran una tendencia significativa. Lo anterior quiere decir que el IFA aumenta conforme la cobertura de *Pocillopora* incrementa; esta dependencia entre el IFA y la cobertura de *Pocillopora* es debido a las características morfológicas de los corales ramificados que presentan una mayor complejidad estructural (Graham & Nash, 2013), así como

un rápido desarrollo y crecimiento y tasa de calificación que les permite tener una amplia distribución y dominancia (Rodríguez-Troncoso & Tortolero-Langarica, 2014) (Fig. 5).

El éxito de los corales del género *Pocillopora* también puede atribuirse a su habilidad de recuperación ante el estrés térmico, así como a su capacidad de reproducirse por fragmentación, lo cual les permite dispersar sus ramas e incrementar su éxito competitivo al colonizar otros sitios (López-Pérez *et al.*, 2007; LaJeunesse *et al.*, 2010; Romero-Torres *et al.*, 2020). Sin embargo, bajo un escenario de calentamiento global y acidificación en el océano, los corales constructores de arrecifes del POT y el Pacífico mexicano podrían colapsar debido a los cambios constantes de las condiciones ambientales (Cabral-Tena *et al.*, 2020). Lo anterior, 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).

Es por ello que, identificar las especies que dominan las comunidades coralinas es imprescindible para conocer el ensamblaje de corales que soportan el funcionamiento del arrecife y explorar las herramientas que permiten entender el desempeño de las especies de coral, así como las posibles respuestas ante los impactos naturales o antropogénicos (Álvarez-Filip *et al.*, 2013; Cabral-Tena *et al.*, 2020).

AGRADECIMIENTOS

La financiación para realizar el trabajo de campo fue proporcionada por el proyecto "Evaluación de la función geo-ecológica de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano" con número de convenio I1200/189/2020, MOD.ORD.26/2020, FORDECYT-PRONACES/86397/2020 y a la beca de maestría CONACyT No. CVU 794431 otorgada a CRNT. Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) y a la Universidad Autónoma de Baja California Sur por las instalaciones y el material de apoyo. Se agradece a todos los buzos y prestadores de servicio la toma de datos en campo. A los revisores anónimos por sus aportaciones al trabajo.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ-FILIP, L., N. K. DULVY, I. M. CÔTEÉ, A. R. WATKINSON & J. A. GILL. 2011. Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications* 21 (6): 2223-2231. DOI: 10.1890/10-1563.1
- ÁLVAREZ-FILIP, L., J. P. CARRICART-GANIVET, G. HORTA-PUGA & R. IGLESIAS-PRITO. 2013. Shifts in coral-assembly composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific Reports* 3: 1-5. DOI: 10.1038/srep03486
- ARREOLA-ROBLES, J. L. 1998. Diversidad de peces de arrecife en la región de La Paz, B.C.S., México. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, México. 82 p.
- BEZY, M. B., C. JIMÉNEZ, J. CORTÉS, A. SEGURA, A. LEÓN, J. J. ALVARADO, C. GILLÉN & E. MEJÍA. 2006. Contrasting *Psammocora*-dominated coral communities in Costa Rica, tropical eastern Pacific. *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa* 376-381.
- CABRAL-TENA, R. A., H. REYES-BONILLA, S. LLUCH-COTA, D. A. PAZ-GARCÍA, L. E. CALDERÓN-AGUILERA, O. NORZAGARAY-LÓPEZ & E. F. BALART. 2013. Different calcification rates in males and females of the coral *Porites panamensis* in the Gulf of California. *Marine Ecology Progress Series* 476: 1-8. DOI: 10.3354/meps10269
- CABRAL-TENA, R. A., A. LÓPEZ-PÉREZ, H. REYES-BONILLA, L. E. CALDERÓN-AGUILERA, C. O. NORZAGARAY-LÓPEZ, F. A. RODRÍGUEZ-ZARAGOZA, A. CUPUL-MAGAÑA, A. P. RODRÍGUEZ-TRONCOSO & A. AYALA-BOCOS. 2018. Calcification of coral assemblages in the eastern Pacific: Reshuffling calcification scenarios under climate change. *Ecological Indicators* 95: 726-734. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.08.021
- CABRAL-TENA, R. A., A. LÓPEZ-PÉREZ, L. ÁLVAREZ-FILIP, F. J. GONZÁLEZ-BARRIOS, L. E. CALDERÓN-AGUILERA & C. APARICIO-CID. 2020. Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract. *Ecological Indicators* 119: 106795. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106795
- CALDERÓN-AGUILERA, L. E., H. REYES-BONILLA, M. A. OLÁN-GONZÁLEZ, F. R. CASTAÑEDA-RIVERO & J. C. PERUSQUÍA-ARDÓN. 2021. Estimated flows and biomass in a no-take coral reef from the eastern tropical Pacific through network analysis. *Ecological Indicators* 123: 107359. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107359
- COATES, A. G. & J. B. C. JACKSON. 1987. Coral growth, algal symbiosis, and reef formation by corals. *Paleobiology* 13 (4): 363-378. DOI: 10.1017/S0094837300008988
- CONANP (COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS). 2001. *Programa de Manejo del Complejo Insular del Espíritu Santo*. SEMARNAT, México, 164 p.
- CONANP (COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS). 2014. *Programa de Manejo del Parque Nacional Exclusivamente la Zona Marina del Archipiélago de Espíritu Santo*. SEMARNAT-CONANP, México, 226 p.
- CORTÉS, J., I. ENOCHS, J. SIBAJA-CORDERO, L. HERNÁNDEZ, J. ALVARADO, O. BREEDY, J. CRUZ-BARRAZA, O. ESQUIVEL, C. FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. HERMOSILLO, K. KAISER, P. MEDINA-ROSAS, Á. MORALES-RAMÍREZ, C. PACHECO, A. PÉREZ-MATUS, H. REYES-BONILLA, R. RIOSMENA-RODRÍGUEZ, C. SÁNCHEZ NOGUERA, E. WIETERS & F. ZAPATA. 2017. Marine Biodiversity of Eastern Tropical Pacific Coral Reefs. In: Glynn, P., Manzello, D. & I. Enochs (Eds.). *Coral Reefs of the World*. Vol. 8. Springer, pp. 203-250. DOI: 10.1007/978-94-017-7499-4_7
- DARLING, E. S., T. R. McCLANAHAN, J. MAINA, G. G. GURNEY, N. A. J. GRAHAM, F. JANUCHOWSKI-HARTLEY, J. E. CINNER, C. MORA, C. C. HICKS, E. MAIRE, M. PUOTINEN, W. J. SKIRVING, M. ADJEROUD, G. AHMADIA, R. ARTHUR, A. G. BAUMAN, M. BEGER, M. L. BERUMEN, L. BIGOT, L., ... D. MOUILLOT. 2019. Social-environmental drivers inform strategic management of coral reefs in the Anthropocene. *Nature Ecology and Evolution* 3 (9): 1341-1350. DOI: 10.1038/s41559-019-0953-8
- GONZÁLEZ-BARRIOS, F. J. & L. ÁLVAREZ-FILIP. 2018. A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators* 95: 877-886. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.08.038
- GONZÁLEZ-BARRIOS, F. J., R. A. CABRAL-TENA & L. ÁLVAREZ-FILIP. 2021. Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology* 27: 640-65.
- 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, México. 82 p.
- GONZÁLEZ-MEDINA, F., O. HOLGUÍN-QUINONES & G. DE LA CRUZ-AGÜERO. 2006. Variación espaciotemporal de algunos macroinvertebrados (Gastropoda, Bivalvia y Echinodermata) de fondos someros del Archipiélago Espíritu Santo, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas* 32 (1A): 33-44.
- GRAHAM, N. A. J. & K. L. NASH. 2013. The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 32: 315-326. DOI: 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, México. 100 p.
- LAJEUNESSE, T., R. T. SMITH, M. WALTHER, J. C. PINZÓN, D. PETTAY, M. MCGINLEY, M. ASCHAFFENBURG, P. MEDINA-ROSAS, A. CUPUL-MAGAÑA, A. LÓPEZ-PÉREZ, H. RE-

- YES-BONILLA & M. WARNER. 2010. Host-symbiont recombination versus natural selection in the response of coral-dinoflagellate symbioses to environmental disturbance. *Proceedings of The Royal Society* 277: 2925-2934. DOI: 10.1098/rspb.2010.0385
- LÓPEZ-PÉREZ, A., M. G. MORA-PÉREZ & G. E. LEYTE-MORALES. 2007. Coral (Anthozoa: Scleractinia) recruitment at Bahías de Huatulco, western México: Implications for coral community structure and dynamics. *Pacific Science* 61 (3): 355-369.
- LÓPEZ-PÉREZ, A., R. GRANJA-FERNÁNDEZ, O. VALENCIA-MÉNDEZ, C. APARICIO-GID, A. TORRES, N. A. BARRIENTOS-LUJÁN, F. BENÍTEZ-VILLALOBOS & L. HERNÁNDEZ. 2019. Biodiversity associated with Southern Mexican Pacific coral systems. *In: Ibáñez, A. (Ed.) Mexican Aquatic Environments*. Springer, pp. 119-144. DOI: 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. DOI: 10.1007/s00338-010-0623-4
- MARTÍNEZ, M. L., A. INTRALAWAN, G. VÁZQUEZ, O. PÉREZ-MAQUEO, P. SUTTON & R. LANDGRAVE. 2007. The coasts of our world: Ecological, economic, and social importance. *Ecological Economics* 63: 254-272.
- MARTÍNEZ-ÁVILA, C. A. 2022. Cambios en la funcionalidad física del arrecife de Cabo Pulmo entre 1992-2020. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México. 56 p.
- MARTÍNEZ-SARABIA, P. 2022. Evaluación de técnicas de restauración coralina y su influencia en la estructura y función de la ictiofauna asociada. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. 147 p.
- MEDELLÍN-MALDONADO, F., R. A. CABRAL-TENA, A. LÓPEZ-PÉREZ, L. E. CALDERÓN-AGUILERA, O. NORZAGARAY-LÓPEZ, C. CHAPA-BALCORTA & R. ZEPETA-VILCHIS. 2016. Calcification of the main reef-building coral species on the Pacific coast of southern México. *Ciencias Marinas* 42: 209-225. DOI: 10.7773/cm.v42i3.2650
- NORZAGARAY-LÓPEZ, C. O., J. M. HERNÁNDEZ-AYÓN, L. E. CALDERÓN AGUILERA, H. REYES-BONILLA, C. CHAPA-BALCORTA & A. AYALA-BOCOS. 2017. Aragonite saturation and pH variation in a fringing reef are strongly influenced by oceanic conditions. *Limnology and Oceanography* 62 (6): 2375-2388. DOI: 10.1002/lno.10571
- NORZAGARAY-LÓPEZ, O., L. CALDERÓN-AGUILERA, L. BARRANCO, R. A. CABRAL-TENA, J. P. CARRICART-GANIVET, A. CUPUL-MAGAÑA, G. HORTA-PUGA, A. LÓPEZ-PÉREZ, H. PÉREZ-ESPAÑA, H. REYES-BONILLA, A. RODRÍGUEZ-TRONCOSO & A. TORTOLERO-LANGARICA. 2019. Arrecifes y comunidades coralinas. *In: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos & A. S. Velázquez-Rodríguez (Eds.). Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono, pp. 127-149.
- PAZ-GARCÍA, D., A. ALDANA-MORENO, R. A. CABRAL-TENA, F. GARCÍA DE LEÓN, M. HELLBERG & E. BALART. 2015. Morphological variation and different branch modularity across contrasting flow conditions in dominant *Pocillopora* reef-building corals. *Oecologia* 178: 207-218. DOI: 10.1007/s00442-014-3199-9
- PERERA-VALDERRAMA, S., H. CABALLERO, E. SANTAMARÍA-DEL ÁNGEL, L. ÁLVAREZ-FILIP, S. CERDEIRA-ESTRADA, R. MARTELL-DUBOIS, L. ROSIQUE-DE LA CRUZ & R. RESSL. 2020. Arrecifes coralinos. *In: Perera-Valderrama, S., Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Rosique-de la Cruz, L. O., Caballero-Aragón & T. Ressler (Coords.). Protocolos de monitoreo de la biodiversidad marina en áreas naturales protegidas del Caribe mexicano*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 31-81. DOI: 10.25607/OBP-915
- PLAISANCE L., M. J. CALEY, R. E. BRAINARD & N. KNOWLTON. 2011. The diversity of coral reefs: What are we missing?. *PLoS ONE* 6 (10): e25026. DOI: 10.1371/journal.pone.0025026
- REYES-BONILLA, H. & R. A. LÓPEZ-PÉREZ. 2009. Corals and coral-reef communities in the Gulf of California. *In: M. E. Johnson & J. Ledesma-Vásquez (Eds.). Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California: Past and Present*. University of Arizona Press, pp. 45-57.
- REYES-BONILLA, H., P. CÁRDENAS, L. CALDERÓN-AGUILERA, C. RICARDEZ, F. FERNÁNDEZ-RIVERA MELO, T. FRAUSTO, B. SALGUERO, X. MORENO-SÁNCHEZ, M. TORRES, O. NORZAGARAY-LÓPEZ & D. PETATÁN. 2014a. Servicios ambientales de arrecifes coralinos: el caso del Parque Nacional Cabo Pulmo, B.C.S. *In: Urriaga-García, J. I. (Ed.). Desarrollo Regional en Baja California Sur: Una perspectiva de los servicios ecosistémicos*. UABCS-Ediciones del Norte, pp. 49-77.
- REYES-BONILLA, H., L. CALDERÓN-AGUILERA, C. MOZQUEDA-TORRES & J. D. CARRIQUIRY. 2014b. Presupuesto de carbono en arrecifes coralinos de México. *Interciencia* 39 (9): 645-650.
- RODRÍGUEZ-TRONCOSO, A. P. & J. J. A. TORTOLERO-LANGARICA. 2014. Corales: Organismos base constructores de los ecosistemas arrecifales. *In: Cifuentes-Lemus, J. L. & F. G. Cupul-Magaña (Eds.). Temas de investigación costera*. Universidad de Guadalajara, pp. 33-55.
- ROMERO-TORRES, M., A. ACOSTA, A. M. PALACIO-CASTRO, E. A. TREML, F. A. ZAPATA, D. A. PAZ-GARCÍA & J. W. PORTER. 2020. Coral reef resilience to thermal stress in the eastern tropical Pacific. *Global Change Biology* 26: 3880-3890. DOI: 10.1111/gcb.15126
- SELIG, E. R. & J. F. BRUNO. 2010. A global analysis of the effectiveness of marine protected areas in preventing coral loss. *PLoS ONE* 5 (2): e9278. DOI: 10.1371/journal.pone.0009278
- SPALDING, M., L. BURKE, S. WOOD, J. ASHPOLE, J. HUTCHINSON & P. ERMGASSEN. 2017. Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. *Marine Policy* 82: 104-113. DOI: 10.1016/j.marpol.2017.05.014
- TIZOL-ROSADO, D. F. 2019. Influencia de la complejidad del hábitat sobre la variación espacio-temporal de la macrofauna en arrecifes rocosos de la bahía de la Paz. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de ciencias Marinas, México. 113 p.
- TORTOLERO-LANGARICA, A., A. RODRÍGUEZ-TRONCOSO, A. CUPUL-MAGAÑA & J. P. CARRICART-GANIVET. 2017a. Calcification and growth rate recovery of the reef-building *Pocillopora* species in the northeast tropical Pacific following an ENSO disturbance. *PeerJ* 5: e3191. DOI: 10.7717/peerj.3191
- TORTOLERO-LANGARICA, A., J. P. CARRICART-GANIVET, A. CUPUL-MAGAÑA & A. RODRÍGUEZ-TRONCOSO. 2017b. Historical insights on growth rates of the reef-building corals *Pavona gigantea* and *Porites panamensis* from the Northeastern tropical Pacific. *Marine Environmental Research* 132: 23-32. DOI: 10.1016/j.marenvres.2017.10.004