

## Presupuesto de carbonato en el parche de arrecife de La Entrega, Oaxaca, Sur del Pacífico Mexicano

### Carbonate budget in the reef-patch of La Entrega, Oaxaca, Southern Mexican Pacific

Rafael A. Cabral-Tena<sup>1\*</sup>, Francisco Medellín-Maldonado<sup>2</sup>, Rebeca Granja-Fernández<sup>3</sup>, Tania M. González-Mendoza<sup>1</sup>, Andrés López-Pérez<sup>4</sup>

Recibido: 31 de octubre de 2022.

Aceptado: 28 de abril de 2023.

Publicado: agosto de 2023.

#### RESUMEN

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

<sup>2</sup> Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación, Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Prol. Av. Niños Héroes S/N, 77580, Puerto Morelos, Quintana Roo, México

<sup>3</sup> Departamento de Ecología, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Ramón Padilla Sánchez 2100, Las Agujas, 44600 Zapopan, Jalisco, México

<sup>4</sup> Laboratorio de Arrecifes y Biodiversidad/ Laboratorio de Ecosistemas Costeros, Departamento de Hidrobiología, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ra Secc, Iztapalapa, 09340 Ciudad de México, México

#### \*Corresponding author:

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

#### To quote as:

Cabral-Tena, R. A., F. Medellín-Maldonado, R. Granja-Fernández, T. M. González-Mendoza & A. López-Pérez. 2023. Presupuesto de carbonato en el parche de arrecife de La Entrega, Oaxaca. Sur del Pacífico Mexicano. *Hidrobiológica* 33 (2): 201-210.

DOI:10.24275/HTHL7067

**Antecedentes.** Los arrecifes de coral proporcionan diversas funciones geo-ecológicas importantes esenciales para la sostenibilidad de las comunidades humanas costeras. Sin embargo, durante los últimos 50 años, los ecosistemas arrecifales están experimentando una rápida degradación ocasionada por perturbaciones naturales y antropogénicas. Una consecuencia de lo anterior ha sido la reducción de la tasa de producción de carbonatos y la complejidad estructural de estos sistemas. Particularmente, la pérdida de especies coralinas clave en la construcción de arrecifes ha comprometido la funcionalidad del ecosistema. **Objetivo.** En este estudio utilizamos una adaptación de la metodología ReefBudget para medir el balance de carbonato de calcio en el arrecife de La Entrega, Oaxaca, México. **Métodos.** Se realizaron seis transectos para estimar la de abundancia de peces erosionadores (25 x 4 m), erizos (25 x 2 m) y la composición del bentos. **Resultados.** Al realizar los cálculos correspondientes, se encontró que en La Entrega se producen 13.72 kg m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> (unidades comúnmente referidas con “G”), la endobioerosión (incluida la erosión por esponjas) calculada fue de 5.65 G. La erosión por erizos es de 0.12 G y la de peces es de 0.73 G; el balance neto de carbonatos resultantes fue de 7.21 G. La tasa de acreción (crecimiento vertical del arrecife) en el arrecife de La Entrega fue de 7.07 mm año<sup>-1</sup>. Consideramos importante mencionar que el parche arrecifal en La Entrega es relativamente pequeño (aproximadamente 324 x 233 m) en comparación con las formaciones de regiones del Caribe o el Indo-Pacífico. **Conclusiones.** La producción neta en La Entrega es superior a la estimada en la mayoría de los arrecifes del Caribe (2-4 G) pero más baja que la del Indo-Pacífico (5-14 G). Las diferencias en el balance entre regiones están, principalmente, asociadas a las diferencias en las abundancias de especies constructoras en cada región. De acuerdo con lo modelado en este trabajo, el parche arrecifal de La Entrega presenta una tasa de acreción suficiente para lidiar con una posible elevación en el nivel del mar bajo los escenarios RCP 4.5 y 2.6 (4 y 7 mm, respectivamente).

**Palabras clave:** bioerosión, calcificación, carbonatos, funciones geo-ecológicas, Pacífico mexicano.

#### ABSTRACT

**Background.** Coral reefs provide several important geo-ecological functions essential for the sustainability of coastal human communities. However, during the last 50 years, reef ecosystems are experiencing rapid degradation caused by natural and anthropogenic disturbances. One consequence of the above has been the reduction in the carbonate production rate and the structural complexity of these systems. Particularly, the loss of key coral species in the construction of reefs has compromised the functionality of the ecosystem. **Objective.** In this study we used an adaptation of the ReefBudget methodology to measure the calcium carbonate budget in the reef of La Entrega, Oaxaca, Mexico. **Methods.** Six transects were carried out to estimate the abundance of eroding fish (25 x 4 m), sea urchins (25 x 2 m) and the composition of the benthos. **Results.** When carrying out the corresponding calculations, it was found that in La Entrega 13.72 kg m<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup> (commonly referred as “G”) are produced, the endobioerosion (including erosion by sponges) calculated was 5.65 G. The sea urchin erosion is 0.12 G and that of fish is 0.73 G; the resulting net carbonate budget was 7.21 G. The accretion rate (vertical reef growth) at La Entrega reef was 7.07 mm yr<sup>-1</sup>. We consider it important to mention that the reef patch at La Entrega is relatively small (approximately 324 x 233 m) compared to

formations in the Caribbean or Indo-Pacific regions. **Conclusions.** Net production at La Entrega is higher than estimated for most Caribbean reefs (2-4 G) but lower than that of the Indo-Pacific (5-14 G). Differences in the balance between regions are mainly associated with differences in the abundances of builder species in each region. According to what was modeled in this work, the La Entrega reef patch presents a sufficient accretion rate to deal with a possible rise in sea level under the RCP 4.5 and 2.6 scenarios (4 and 7 mm, respectively).

**Key words:** bioerosion, calcification, carbonates, geo-ecological functions, Mexican Pacific.

## INTRODUCCIÓN

Además del valor ecológico intrínseco por la alta biodiversidad que albergan, los arrecifes de coral han sido valuados en más de US \$352,000 ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Costanza *et al.*, 1998; de Groot *et al.*, 2012). Este alto valor ecológico y económico de los arrecifes de coral es resultado de la gran variedad de funciones geo-ecológicas que desempeñan, de entre las que destacan la formación de arena para las playas, la protección a la línea de costa, así como el aprovisionamiento de refugio y zonas de crianza para distintos organismos asociados al arrecife. Adicionalmente, los arrecifes de coral son base fundamental de las redes tróficas, ya que favorecen el flujo de materia y energía entre ecosistemas marinos, y aspectos importantes como el sostenimiento del turismo del cual dependen millones de habitantes de las costas tropicales (Moberg & Folke, 1999; Darling *et al.*, 2019; Enochs & Glynn, 2017; Perry & Alvarez-Filip, 2019). A pesar de la gran importancia que tienen los arrecifes de coral, actualmente están experimentando una rápida degradación impulsada tanto por las perturbaciones antropogénicas directas, así como por el cambio climático (Hughes *et al.*, 2017), lo que ha resultado en la disminución de la abundancia de corales y cambios en el ensamblaje de especies constructoras de arrecife (Alvarez-Filip *et al.*, 2013; Hughes *et al.*, 2017).

El mantenimiento de los arrecifes de coral y su biodiversidad asociada dependen de la acumulación sostenida de carbonato de calcio a través del crecimiento coralino (calcificación), desarrollando sus esqueletos y generando estructuras tridimensionales complejas (Perry *et al.*, 2008; Graham & Nash, 2013). El equilibrio neto entre la producción biológica de carbonato de calcio por parte de las comunidades arrecifales calcificadoras y la bioerosión, sustenta el potencial de acumulación y cimentación de material calcáreo en los ecosistemas arrecifales (Perry *et al.*, 2008). Si bien, una disminución en el porcentaje de cobertura de coral vivo (abundancia) afecta negativamente la cantidad de carbonato de calcio que se acumula en un arrecife (Manzello *et al.*, 2008; Perry & Morgan, 2017), los cambios en la composición del ensamblaje de las especies de coral, así como en las abundancias de los grupos bioerosionadores pueden influir fuertemente en el balance de carbonatos de un arrecife (p. ej. Perry *et al.*, 2014; Januchowski-Hartley *et al.*, 2017) y traer cambios significativos en la funcionalidad de los arrecifes de coral debido a la pérdida de especies clave para la construcción del arrecife (Alvarez-Filip *et al.*, 2013; Perry *et al.*, 2014; Hughes *et al.*, 2017; McWilliam *et al.* 2018).

Muchos arrecifes han experimentado cambios en la abundancia de taxones bioerosionadores (Perry *et al.*, 2014), los cuales, modifican las funciones estructurales que brindan estos sistemas; por ejemplo,

los arrecifes de coral de la región del Caribe han experimentado una disminución rápida de la cobertura de coral de formas complejas (*Acropora palmata*) y un incremento de especies consideradas oportunistas (p. ej., *Agaricia* spp., *Porites astreoides*) con capacidad reducida para producir estructuras de carbonato de calcio, lo que se ha traducido en una reducción de la acreción (tasa de crecimiento vertical) de los arrecifes y su complejidad estructural (Alvarez-Filip *et al.*, 2011; 2013; Perry *et al.*, 2014). Se ha propuesto que los ecosistemas de coral con alta biodiversidad, es decir con alta riqueza y diversidad de especies (p. ej., el Indo-Pacífico) pueden conservar cierto grado de funcionalidad en un entorno cambiante debido a la redundancia funcional inherente de las especies. Por el contrario, en ecosistemas menos diversos, la capacidad para producir estructuras arrecifales es sustentada por pocas especies (Alvarez-Filip *et al.*, 2011; McWilliam *et al.*, 2018; Cabral-Tena *et al.*, 2018; 2020).

Bajo el contexto anterior, el escenario para los arrecifes coralinos del Pacífico Mexicano (PM) no es muy alentador ya que, los arrecifes de esta región tienen una riqueza de especies de coral baja y una tasa de calcificación baja en comparación con los arrecifes del Caribe e Indo-Pacífico (Manzello *et al.*, 2017; McWilliam *et al.*, 2018; Cabral-Tena *et al.*, 2018), debido a la influencia de condiciones ambientales consideradas no óptimas para el desarrollo de arrecifes, como, por ejemplo, fluctuaciones en la temperatura del mar, eventos de surgencia estacionales, eventos del fenómeno El Niño Oscilación del Sur en ambas fases, cálida El Niño y fría La Niña, pH bajo y variable, y pulsos de nutrimentos (Manzello *et al.*, 2008). Sin embargo, los balances de carbonato de los arrecifes de áreas marginales del PM no se han descrito completamente. En el PM, los arrecifes de coral están contruidos por parches arrecifales aislados, en su mayoría son comunidades casi mono-específicas de los géneros *Pocillopora*, *Porites* y *Pavona* con un patrón típico de zonificación: la zona poco profunda (< 7 m) está dominada por *Pocillopora* spp., mientras que en zonas más profundas la dominancia de especies masivas aumenta considerablemente (Glynn *et al.*, 2017). Las formaciones coralinas del Pacífico sur mexicano se consideran entre las formaciones arrecifales mejor desarrolladas del Pacífico Oriental Tropical (Glynn & Leyte-Morales, 1997; López-Pérez *et al.*, 2012) y son biogeográficamente importantes ya que sirven como escalón para el transporte de especies e individuos desde América Central hacia el Pacífico mexicano (Reyes-Bonilla & López-Pérez, 1998).

A pesar de su importancia biogeográfica, aún no se han realizado estudios que describan el balance de carbonato, es decir, cuánto carbonato se está produciendo luego de restar la bioerosión (producción neta), en los arrecifes del Pacífico sur mexicano. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la tasa de producción bruta (producción antes de restar la erosión) y la bioerosión de un parche arrecifal tipo costero del sur del Pacífico mexicano (La Entrega, Oaxaca, México), utilizando, una adaptación de la metodología ReefBudget (Perry *et al.*, 2018a) con la finalidad de identificar el estado del balance de carbonatos, así como calcular la tasa de acreción arrecifal (crecimiento vertical del arrecife). Tasa de la cual depende no solo la formación de estos arrecifes, sino también su persistencia y funcionamiento. En este sentido, la tasa de acreción nos ayudará a saber de qué manera podrá responder el parche arrecifal de La Entrega ante escenarios de elevación del nivel del mar proyectado por el IPCC para el Pacífico Oriental Tropical.

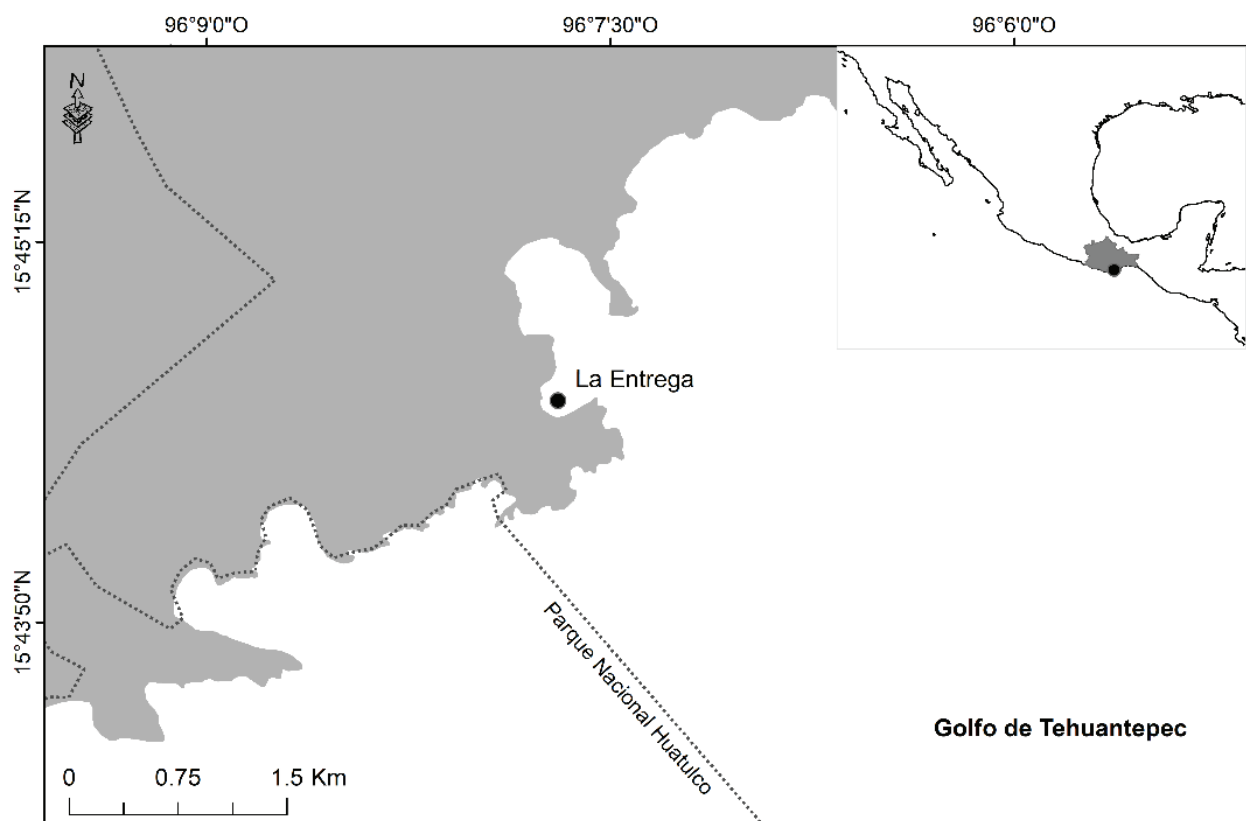
## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de Estudio.** El arrecife La Entrega, en Oaxaca ( $15^{\circ}44'34''$  N;  $96^{\circ}07'35''$  W, Fig. 1), es un parche arrecifal de tipo costero y tiene un tamaño aproximado de 324 x 233 m (Glynn & Leyte-Morales, 1997). Al igual que el resto de los arrecifes del área de Huatulco, está bajo la influencia de la Piscina Cálida del Pacífico y están ubicados en el margen occidental del Golfo de Tehuantepec y están influenciados por vientos intermitentes del norte que producen cambios significativos en la estructura de la columna de agua, lo que puede provocar descensos de la temperatura de la superficie del mar de hasta 8 °C (promedio anual de 28.71 °C). Además, los afloramientos, que son fuertes en la zona, resultan en valores de pH (~ 7.5) y un estado de saturación de aragonita (~ 1.1) bajos en aguas superficiales (Chapa-Balcorta *et al.*, 2015). A pesar de las condiciones ambientales presentes, el sur del Pacífico mexicano contiene algunos de los sistemas de arrecifes coralinos mejor desarrollados a lo largo del Pacífico mexicano (Reyes-Bonilla, 2003), y la mayoría de sus arrecifes someros exhiben una alta cobertura de coral vivo (> 50%; López-Pérez & Hernández-Ballesteros, 2004; López-Pérez *et al.*, 2007). Se cuantificó el balance de carbonatos en La Entrega. Para tal fin, se determinó la cobertura de los componentes bentónicos, y las tasas de

bioerosión producidas por peces, erizos y endobioerosionadores (incluidas esponjas perforadoras).

**Trabajo de Campo.** Para la toma de datos realizamos censos para determinar la abundancia de organismos calcificadores y erosionadores en el área de estudio siguiendo una versión modificada de la metodología Reefbudget en su versión para el Indo-Pacífico (Perry *et al.*, 2018a). Las modificaciones para su uso en el Pacífico Oriental Tropical son el uso de tasas de calcificación y bioerosión reportadas para especies de la región (Eakin 1996; Alvarado *et al.*, 2017; López-Pérez & López-López 2016; Medellín-Maldonado *et al.* 2016).

Los organismos calcificadores (corales y algas calcificadoras) se censaron sobre seis transectos lineales de 25 m de longitud, los cuales se ubicaron al azar y fueron colocados sobre el área arrecifal y paralelos a la línea de costa. Mediante el uso del método de punto intercepto, cada 25 cm se registró el grupo o especie bentónica presente y, con ello, se calculó el porcentaje de cobertura coralina por especie y la cobertura de algas (incluyendo las calcificadoras), así como la cobertura de coral muerto y cualquier escombros por tratarse de sustratos vulnerables a la erosión (Perry *et al.*, 2018a). Adicionalmente, con una cinta métrica y directamente debajo de la línea guía (transecto), se registró la longitud de la superficie (cm) cubierta por cada colonia de coral y la rugosidad de las mismas.



**Figura 1.** Ubicación del sitio de estudio La Entrega en Oaxaca, Pacífico Sur Mexicano.

La tasa de producción bruta (producción de especies calcificadoras) se estimó utilizando las ecuaciones presentadas en Perry *et al.* (2018a), la tasa de extensión y densidad del esqueleto por especie de coral se obtuvieron de Medellín-Maldonado *et al.* (2016)

Los organismos bioerosionadores se registraron sobre los mismos transectos que los organismos bentónicos sésiles. En el caso de los erizos, se registró el número y tamaño de individuos (ancho de la testa) a lo largo de cada uno de los transectos, examinando 1 m a cada lado (25 x 2 m). Los registros de erizos se realizaron a nivel de especie considerando el siguiente listado: *Diadema mexicanum* (A. Agassiz, 1863), *Eucidaris galapagensis* (Döderlein, 1887), *Eucidaris thouarsii* (L. Agassiz & Desor, 1846), *Toxopneustes roseus* (A. Agassiz, 1863), *Centrostephanus coronatus* (Verrill, 1867).

El cálculo de la bioerosión por erizos se realizó utilizando las ecuaciones presentadas en Perry *et al.* (2018a), las tasas de bioerosión por erizos se obtuvieron de publicaciones previas en el Pacífico Oriental Tropical (Glynn, 1988; Herrera-Escalante *et al.*, 2006; López-Pérez & López-López, 2016; Reyes-Bonilla & Calderon-Aguilera, 1999).

En cuanto a los peces bioerosionadores, se registró la abundancia y la talla de peces (en las siguientes clases de talla: < 5, 6-10, 11-15, 16-20, > 20cm) en los transectos antes señalados, con observaciones a 2 m a cada lado del transecto (25 x 4 m). Los registros de peces se realizaron a nivel de especie considerando el siguiente listado: *Scarus rubroviolaceus* (Bleeker, 1847), *Scarus ghobban* (Forsskål, 1775), *Scarus compressus* (Osburn & Nichols, 1916), *Scarus perrico* (Jordan & Gilbert, 1882), *Arothron meleagris* (Anonymous, 1798), *Arothron hispidus* (Linnaeus, 1758), *Sufflamen verres* (Gilbert & Starks, 1904), *Pseudobalistes naufragium* (Jordan & Starks, 1895), *Balistes polylepis* (Steindachner, 1876), *Melichthys niger* (Bloch, 1786).

El cálculo de la bioerosión por peces se realizó utilizando las ecuaciones presentadas en Perry *et al.* (2018b), las tasas de bioerosión por erizos se obtuvieron de publicaciones previas en el Pacífico Oriental Tropical (Glynn *et al.*, 1972; Reyes-Bonilla & Calderon-Aguilera, 1999; Palacios *et al.*, 2014; Alvarado *et al.*, 2017)

Debido a la dificultad para estimar la abundancia de esponjas erosionadoras en arrecifes del Pacífico mexicano mediante censos visuales, se emplearon datos publicados de la tasa de macrobioerosión total por esponjas calculadas por Nava & Carballo (2008) y Carballo *et al.* (2013), para arrecifes del Pacífico mexicano y se estandarizó con base en la disponibilidad del sustrato o área vulnerable a la bioerosión, es decir, aquel sustrato formado de carbonato de calcio, incluyendo sustrato coralino disponible para los organismos bioerosionadores, incluyendo, lo cubierto por macroalgas o algas filamentosas, coral vivo y coral muerto. Además de las esponjas y, siguiendo la misma lógica descrita anteriormente (estandarización con base en la disponibilidad del sustrato), también se consideraron las tasas de erosión de otros grupos macrobioerosionadores como gusanos poliquetos y bivalvos (Alvarado *et al.*, 2017).

En cuanto a la microbioerosión endolítica, se siguió la misma lógica que para la macrobioerosión. Sin embargo, al no existir datos de microbioerosión en la región, se utilizaron las tasas del Indo-Pacífico (Perry *et al.*, 2018a).

La tasa de producción neta (balance de carbonatos) se obtuvo mediante la diferencia entre la tasa de producción bruta y las tasas de bioerosión por cada grupo.

Para calcular la tasa de acreción, entendida como la tasa de crecimiento vertical del arrecife, se siguió el método propuesto por Perry *et al.* (2015) con base en la conversión de las tasas de producción neta de carbonato (considerando la producción primaria, secundaria y la bioerosión) estimadas en el sitio (Smith & Kinsey, 1976). Además, se consideró la porosidad de la matriz arrecifal en función del tipo de comunidad coralina (dominancia de corales ramificados) y la reincorporación de sedimentos generados (Smith & Kinsey, 1976). El cálculo de la tasa de acreción se realizó utilizando las ecuaciones presentadas en Perry *et al.* (2015).

Se ajustó un modelo lineal entre la cobertura coralina (variable independiente) y la tasa de acreción (variable dependiente) para determinar el porcentaje de cobertura coralina necesaria para mantener una tasa de acreción arrecifal positiva. Además, utilizando la ecuación del modelo lineal descrito anteriormente, se identificó la cobertura coralina necesaria para que la tasa de acreción (crecimiento vertical) del sistema arrecifal sea la suficiente para responder ante escenarios de elevación del nivel del mar proyectado por el IPCC para el Pacífico Oriental Tropical (Oppenheimer *et al.*, 2019) para las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 2.6, 4.5 y 8.5. El RCP 2.6 es un escenario de mitigación alta, que predice que las emisiones de gases de efecto invernadero comenzarán a disminuir en 2020 y llegarán a 0 en 2100, la elevación del nivel del mar promedio predicha, bajo este escenario, es de 4 mm. El RCP 4.5 es un escenario de mitigación moderada, que predice que las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzarán su punto máximo en 2040 y disminuirán en ~ 50% para 2080, la elevación del nivel del mar promedio predicha, bajo este escenario, es de 7 mm. El RCP 8.5 es un escenario que asume que no hay reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y un calentamiento continuo, la elevación del nivel del mar promedio predicha, bajo este escenario, es de 15 mm (IPCC, 2014).

## RESULTADOS

La cobertura de coral vivo (CCV) promedio en el parche arrecifal de La Entrega fue de  $68.5 \pm 22.42\%$  (promedio  $\pm$  DE). Se registró la presencia de dos géneros de corales pétreos en el área de estudio, *Pocillopora* y *Pavona*. *Pocillopora* fue el género dominante (79% de la cobertura relativa) en el área de estudio, es importante mencionar que no se observaron algas coralinas incrustantes en el sitio de estudio. Se observaron dos especies de erizos, *Diadema mexicanum* y *Eucidaris thouarsii*, sus densidades promedio fueron de  $0.08 \pm 0.07$  ind m<sup>-2</sup> y de  $0.08 \pm 0.06$  ind m<sup>-2</sup> respectivamente. En el caso de los peces bioerosionadores, se observaron dos especies *Arothron meleagris* y *Sufflamen verres*, sus densidades promedio fueron de  $0.04 \pm 0.01$  ind m<sup>-2</sup> y de  $0.01 \pm 0.01$  ind m<sup>-2</sup>, respectivamente.

La producción bruta de carbonato de calcio promedio en el arrecife La Entrega fue de  $13.72 \pm 6.42$  G. La producción correspondiente a *Pocillopora* fue de  $12.38 \pm 7.04$  G y la de *Pavona* fue de  $1.34 \pm 1.29$  G (Fig. 2). La tasa de erosión promedio en el arrecife La Entrega fue de  $6.51 \pm 0.49$  G. La erosión atribuida a macro-endobioerosionadores fue de 5 G. La erosión por parte de micro-bioerosionadores fue de  $0.65 \pm 0$  G. La erosión correspondiente a erizos fue de  $0.12 \pm 0.10$  G ( $0.11 \pm 0.10$  corresponde a *Diadema mexicanum* y  $0.01 \pm 0.01$  a *Eucidaris thouarsii*). La erosión atribuida a peces fue de  $0.73 \pm 0.45$  G ( $0.52 \pm 0.28$  corresponde a *Arothron meleagris* y  $0.21 \pm 0.23$  a *Sufflamen*

verres (Fig. 2). La producción neta de carbonato de calcio promedio en el arrecife de La Entrega fue de  $7.23 \pm 5.71$  G (Fig. 2).

Como era esperado, los corales hermatípicos son el grupo que aporta la mayor producción (bruta) de carbonatos en el área de estudio (Tabla 1). Cabe mencionar que las tasas de micro y macro-bioerosión (incluidas las esponjas perforadoras) tuvieron el mismo valor en todos los transectos, esto debido a que todos tienen la misma área disponible para ser bioerosionada (100% de los transectos). Por otro lado, la erosión por peces promedio fue de  $0.73 \pm 0.45$  G y la de erizos fue de  $0.12 \pm 0.1$  G.

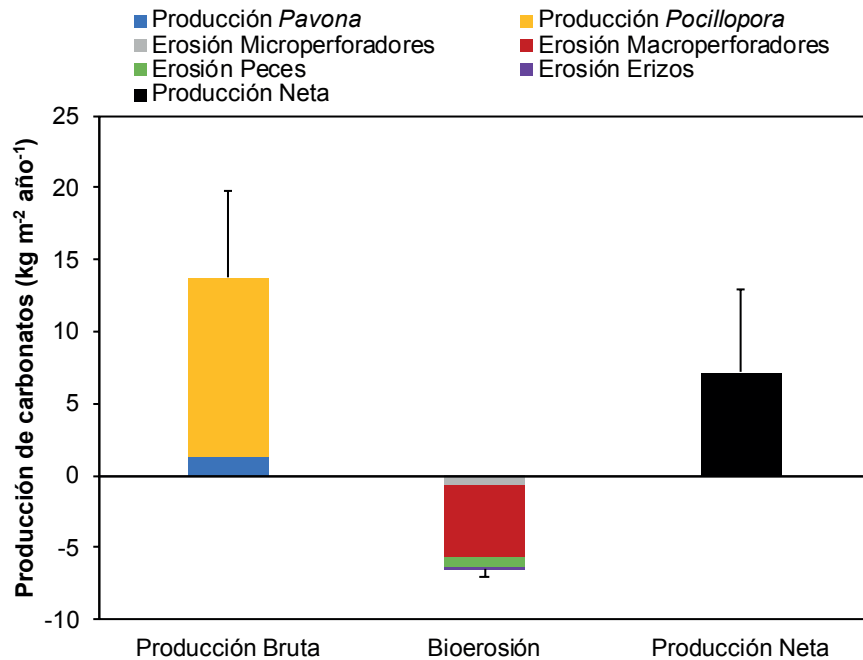
La tasa de acreción (crecimiento vertical) promedio en el arrecife La Entrega fue de  $7.07 \pm 4.08$  mm año<sup>-1</sup>. La tasa de acreción promedio supera el incremento en el nivel del mar predicho en los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 (4 y 7 mm, respectivamente). Por otro lado, la tasa de acreción promedio es menor que la elevación del nivel del mar sugerida por el escenario RCP 8.5 (15 mm).

De acuerdo con el modelo lineal (Fig. 3), la CCV es un buen predictor de la tasa de acreción arrecifal ( $r^2 = 0.90$   $p = 0.03$ ). Además, con base en el modelo lineal, se identificó el umbral de cobertura coralina para mantener una tasa de acreción positiva es de 30% (0.5 mm año<sup>-1</sup>). Finalmente, el modelo mostró que para tener una tasa de acreción suficiente para dar seguimiento a la elevación del nivel del mar para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 es necesario tener una CCV de 50% (RCP 2.6) y 70% (RCP 4.5). Para el escenario RCP 8.5 ni siquiera un 100% de CCV sería suficiente para hacer frente al incremento en el nivel del mar previsto.

## DISCUSIÓN

La cobertura de coral promedio en La Entrega fue de 68.5%, valor superior al promedio en el Pacífico Oriental Tropical (POT; 21%) y en diferentes zonas del PM (p. ej. Cabo Pulmo, 22%, Cabral-Tena *et al.*, 2018; Isla Espíritu Santo, 33%, Cabral-Tena *et al.*, 2018; Islas Mariás, 3%, González-Pabón *et al.*, 2021; Islas Marietas, 13%, Cabral-Tena *et al.*, 2018). La CCV de La Entrega estuvo dominada (~80% cobertura relativa) por *Pocillopora* spp. cuya importancia en los arrecifes del Pacífico mexicano (incluyendo el POT) está documentada ampliamente (p. ej., Glynn & Ault, 2000; Reyes-Bonilla, 2003; Cortés *et al.*, 2017; Cabral-Tena *et al.*, 2018; 2020). Se considera que la dominancia de *Pocillopora* spp. se debe a ventajas competitivas de estas especies (densidad esqueletal alta: 1.66 g cm<sup>-3</sup>, crecimiento rápido: 2.83 cm año<sup>-1</sup> y tasas elevadas de reproducción asexual: 1.30-13.10 col m<sup>-2</sup>) en comparación con las especies con morfologías masivas o frondosas que también se distribuyen en esta región en escalas de tiempo ecológicas y geológicas (Medellín-Maldonado *et al.*, 2016; Glynn & Ault, 2000; López-Pérez *et al.*, 2007; Reyes-Bonilla & López-Pérez, 2009; Glynn *et al.*, 2017; López-Pérez, 2017).

La producción bruta de carbonato de calcio calculada en La Entrega fue de 13.72 G, la cuál es más alta que la estimada en regiones cercanas para las que hay datos, por ejemplo, Islas Mariás (0.47 G, González-Pabón *et al.*, 2021; 1.78-10.65 G, Tortolero-Langarica *et al.*, 2022; Cabo Pulmo, 6.8 G, Reyes-Bonilla *et al.*, 2014) y el promedio calculado para el POT (8.22 G, Cabral-Tena *et al.*, 2018) y similar a lo reportado anteriormente en La Entrega (6.5-15.05 G, Leyte-Morales, 2001).



**Figura 2.** Producción bruta de carbonatos, tasa de bioerosión y producción neta de carbonatos (kg CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>) en La Entrega. Las barras de error representan la desviación estándar.

Por otro lado, la tasa de bioerosión calculada en La Entrega fue de 6.51 G que es mucho más alta que las tasas de bioerosión estimadas en el Caribe (1.9 G, Cornwall *et al.*, 2021; 1.2 G, Molina-Hernández *et al.*, 2020), el Océano Índico (2.9 G; Cornwall *et al.*, 2021) y el Océano Pacífico (1.5 G; Cornwall *et al.*, 2021). Es importante mencionar que los macro-perforadores contribuyeron en mayor medida (77%) a la bioerosión total, seguido de los peces (11%), microperforadores (10%), y erizos (2%). Las tasas altas de bioerosión por macro perforadores (especialmente esponjas) observadas en La Entrega, posiblemente responden a la cantidad alta de nutrientes que hay en el área (Chapa-Balcorta *et al.*, 2015). Estudios previos en el Pacífico de Panamá y en otras regiones del POT han demostrado que los arrecifes sujetos a niveles altos de nutrientes tienen una mayor abundancia de esponjas perforadoras las cuales se alimentan precisamente de materia y organismos en suspensión en la columna de agua (Enochs *et al.*, 2021; Rose & Risk, 1985; Prouty *et al.*, 2017). Por otro lado, la relativamente baja tasas de erosión por parte de peces y erizos encontrada en este estudio responde a las bajas abundancias de esos grupos en el área de estudio, lo que posiblemente está relacionado con las pesquerías locales y el desarrollo costero en la zona (Juárez-Hernández & Tapia-García, 2018).

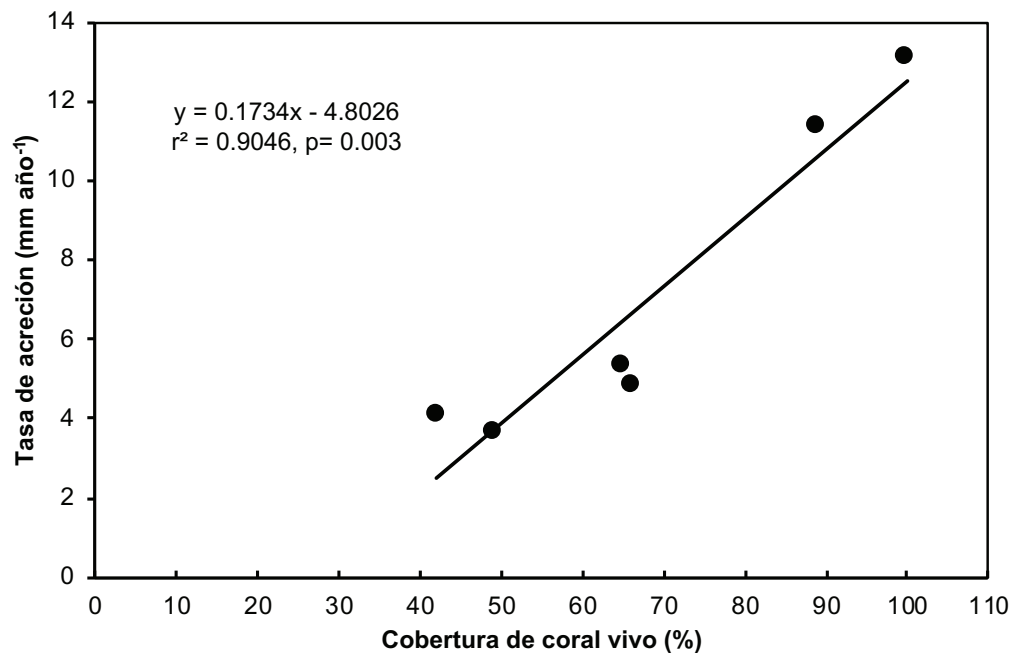
La producción neta de carbonato promedio en el arrecife de La Entrega fue de 7.23 G, Si bien, este estudio se trata del balance de carbonatos en un sitio en Huatulco, creemos que esto representa un aproximado en otros parches arrecifales cercanos del sur del Pacífico mexicano en donde se comparten algunas características como, por ejemplo, arrecifes de tipo costero que tengan una plataforma con una alta cobertura coralina (> 60%) y dominadas por especies del género *Pocillopora*. La estimación del balance de carbonatos en La Entrega es más alta que la realizada previamente en el único trabajo que ha llevado a cabo un balance de carbonatos (producción y erosión) en el POT (Eakin, 1996). Para el arrecife de la isla Uva (Eakin, 1996) se reportó una tasa neta de producción de carbonato de 0.6 G. Anterior al evento de El Niño de 1982-1983, es decir en un momento en el que el arrecife no había sido impactado severamente por el fenómeno el cual redujo su tasa neta de producción de carbonato a 0.1 G. En contraste con lo descrito para otras áreas, el balance es más alto que los estimados en el Caribe (~2-4 G, Perry *et al.* 2013; 2014; 2018b; 0.6 G, Molina-Hernández *et al.* 2020; -0.36G a -2.30 G, Estrada-Saldivar *et al.*, 2019), y en arrecifes del Indo-Pacífico (5 G, Montaggioni, 2005) y las Seychelles (~3.5 G Januchowski-Hartley *et al.*, 2017), aunque por debajo de lo observado en Palau y Yap (13 G y 14.1 G, van Woesik & Cacciapagli, 2018). Las diferencias en el balance entre regiones están, principalmente, asociadas a las diferencias en las abundancias de especies constructoras en cada región lo que no necesariamente refleja la

cantidad total de carbonato producido en cada sitio ya que, el área total del parche arrecifal de La Entrega es menor a las grandes extensiones (varios kilómetros) de los arrecifes del Caribe e Indo-Pacífico. Además, nos gustaría poner en contexto que las cifras de arrecifes del Caribe e Indo-Pacífico con las que estamos comparando usualmente son calculadas en el arrecife frontal, en el arrecife posterior o en la laguna arrecifal, sitios donde, normalmente las la producción e carbonatos es más baja. Por ejemplo, en el Caribe mexicano, la cobertura coralina promedio es de 14.84% (González-Barrios *et al.*, 2021) la cual es mucho menor que la observada en este trabajo (68.5%). Concurrentemente, la tasa de acreción promedio calculada en el arrecife La Entrega (7.07 mm año<sup>-1</sup>) es similar a las calculadas para arrecifes con altas tasas de producción neta, como Palau y Yap en el Pacífico occidental (7.9 mm año<sup>-1</sup>, van Woesik & Cacciapagli, 2018), y más alta a la de arrecifes de regiones como Bonaire (4.9 mm año<sup>-1</sup>; Perry *et al.*, 2018b), Micronesia (5.9 mm año<sup>-1</sup>, van Woesik & Cacciapagli, 2021), y Chagos (2.9 mm año<sup>-1</sup>, Perry *et al.*, 2018).

Aunque tanto la producción neta de carbonatos como la tasa de acreción en La Entrega son más altas y superiores a la media reportada para diferentes arrecifes en distintas regiones del mundo. El área total de desarrollo arrecifal en este sitio se limita a pequeñas áreas aisladas en forma de parches arrecifales y en general las extensiones arrecifales del POT son limitadas en comparación con numerosos arrecifes distribuidos en el Caribe y en el Indo-Pacífico, cuyas formaciones pueden erguirse varios metros sobre el fondo y alcanzar extensas áreas por varios kilómetros (Perry *et al.*, 2015; 2018b). Lo anterior, debido a que en general, estos arrecifes presentan una baja cementación (Manzello *et al.*, 2008), una alta bioerosión y, además, la mayoría de los sedimentos derivados del arrecife son transportados hacia afuera del sistema debido a las condiciones oceanográficas; por lo tanto, sedimentológicamente hablando, funciona de manera limitada como un arrecife de coral (Riegl *et al.*, 2007). De esta forma, el tener un desarrollo arrecifal limitado, puede poner en riesgo la persistencia de estos sistemas (y su biodiversidad asociada) en un ambiente que cambia rápidamente (Cabral-Tena *et al.*, 2018). Por otro lado, de acuerdo con lo sugerido por el modelo lineal, la cobertura de coral necesaria para mantener una tasa de acreción positiva en La Entrega es de 30% lo que es mucho más alto que los valores de CCV necesarios para tener balances de carbonato positivos en el Caribe (10 %), Chagos (12 %), o el Pacífico occidental (~1 0–12 %; Perry & Morgan, 2017; van Woesik & Cacciapagli, 2018; van Woesik & Cacciapagli, 2021). El contraste de coberturas necesarias para mantener balances de carbonato positivos entre La Entrega y otras regiones, se debe a las tasas altas de bioerosión que son características del Pacífico oriental (Glynn & Manzello, 2015).

Tabla 1. Producción bruta de carbonatos y tasas de bioerosión por grupo de cada transecto en La Entrega. G= kg de CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>.

Transecto	Producción corales (G)	Producción algas coralinas (G)	Micro-bioerosión (G)	Macro-bioerosión (G)	Erosión por peces (G)	Erosión por erizos (G)	Balance (G)
1	8.98	0	0.65	5.00	0.27	0.02	3.03
2	11.64	0	0.65	5.00	1.17	0.003	4.81
3	9.95	0	0.65	5.00	0.10	0.11	4.07
4	8.93	0	0.65	5.00	0.75	0.08	2.44
5	20.06	0	0.65	5.00	0.93	0.25	13.22
6	22.75	0	0.65	5.00	1.17	0.25	15.67
Promedio ± DE	13.72 ± 6.09	0	0.65 ± 0	5.00 ± 0	0.73 ± 0.45	0.12 ± 0.1	7.23 ± 5.71



**Figura 3.** Relación lineal entre la tasa de acreción (mm año<sup>-1</sup>) y la cobertura de coral vivo (%) para cada transecto en La Entrega. Se muestra la ecuación del modelo lineal y el coeficiente de determinación.

De acuerdo con lo modelado en este trabajo, actualmente, el arrecife La Entrega presenta una tasa de acreción suficiente para lidiar con una posible elevación en el nivel del mar bajo los escenarios RCP 4.5 y 2.6 (4 y 7 mm, respectivamente); no obstante, ni con un incremento hasta el 100% de CCV sería capaz de seguir creciendo bajo el incremento en el nivel del mar estimado por el escenario RCP 8.5 (15 mm). Es importante aclarar que las estimaciones de las tasas de acreción/erosión del modelo empleado, no consideran cambios en las tasas de calcificación o bioerosión causados por cambios poblacionales, eventos de estrés térmico y/o acidificación del océano y tormentas tropicales. Por lo que futuras estimaciones deberán de incorporar escenarios de cambio en todas las variables involucradas en el modelo (cobertura coralina, abundancia de erosionadores, tasas de crecimiento coralino, etc.), no solo para poder tomar decisiones asertivas para el manejo del arrecife La Entrega, sino para visualizar escenarios de calcificación/erosión (ReefBudget) a amplias escalas espaciales y temporales en el Pacífico oriental. Finalmente, nos gustaría puntualizar que es necesario realizar este tipo de trabajos en otros arrecifes del Pacífico Mexicano (y el POT) para poder realizar estimaciones más certeras a nivel regional.

### AGRADECIMIENTOS

Al proyecto CF 2019/866397 Evaluación de la función geo-ecológica de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano por el financiamiento para el desarrollo del trabajo. Al personal del laboratorio de arrecifes y biodiversidad (ARBIOLAB) y a Buceo Huatulco por su apoyo en el trabajo de campo.

### REFERENCIAS

- ALVARADO, J. J., B. GRASSIAN, J. R., CANTERA-KINTZ, J. L. CARBALLO & E. LONDOÑO-CRUZ. 2017. Coral Reef Bioerosion in the Eastern Tropical Pacific. In: Glynn, P. W., D. P. Manzello, I. C. Enochs (Eds.) Coral reefs of the eastern tropical Pacific, pp. 369-403. DOI:10.1007/978-94-017-7499-4\_12
- ALVAREZ-FILIP, L., N.K. DULVY, I. M. CÔTÉ, A.R. WATKINSON & J.A. GILL. 2011. Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications* 21 (6), 2223-2231. DOI:10.1890/101563.1
- ALVAREZ-FILIP, L., J. P. CARRICART-GANIVET, G. HORTA-PUGA & R. IGLESIAS-PRIENTO. 2013. Shifts in coral-assemblage composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific reports*, 3(1), 1-5. DOI: 10.1038/srep03486
- CABRAL-TENA, R.A., A. LÓPEZ-PÉREZ, H. REYES-BONILLA, L. E. CALDERON-AGUILERA, C. O. NORZAGARAY-LÓPEZ, F. A. RODRÍGUEZ-ZARAGOZA, A. L. 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* 726-734. DOI:10.1016/j.ecolind.2018.08.021
- CABRAL-TENA, R. A., A. LÓPEZ-PÉREZ, L. ALVAREZ-FILIP, F. J. GONZÁLEZ-BARRIOS, L. E. CALDERON-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

- CARBALLO, J. L., E. BAUTISTA, H. NAVA, J. A. CRUZ-BARRAZA & J. A. CHÁVEZ. 2013. Boring sponges, An increasing threat for coral reefs affected by bleaching events. *Ecology and Evolution* 3, 872-886. DOI:10.1002/ece3.452
- CHAPA-BALCORTA, C., J. M. HERNANDEZ-AYON, R. DURAZO, E. BEIER, S. R. ALIN & A. LÓPEZ-PÉREZ. 2015. Influence of post-Tehuano oceanographic processes in the dynamics of the CO<sub>2</sub> system in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 7752-7770. DOI:10.1002/2015JC011249
- CORTÉS, J., I. C. ENOCHS, J. SIBAJA-CORDERO, L. HERNÁNDEZ, J. J. ALVARADO, O. BREEDY, J. A. CRUZ-BARRAZA, O. ESQUIVEL-GARROTE, C. FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. HERMOSILLO, K. L. KAISER, P. MEDINA-ROSAS, A. MORALES-RAMÍREZ, C. PACHECO, A. PÉREZ-MATUS, H. REYES-BONILLA, R. RIOSMENA-RODRÍGUEZ, C. SÁNCHEZ-NOGUERA, E. A. WIETERS, F. A. ZAPATA. 2017. Marine biodiversity of eastern tropical Pacific Coral Reefs. In: Glynn, P.W., Manzello, D.P., Enochs, I.C. (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. Springer, Netherlands, pp. 203-250. DOI:10.1007/978-94-017-7499-4\_7
- CORNWALL, C. E., S. COMEAU, N. A. KORNDER, C. T. PERRY, R. VAN HOODONK, T. M. DECARLO, M. S. PRATCHETT, K. D. ANDERSON, N. BROWNE, R. CARPENTER, G. DÍAZ-PULIDO, J. P. D'OLIVO, S. S. DOO, J. FIGUEREIDO, S. A. V. FORTUNATO, E. KENNEDY, C. A. LANTZ, M. T. MCCULLOCH, M. GONZÁLEZ-RIVERO, V. SCHOEPF, S. G. SMITHERS & R. J. LOWE. 2021. Global declines in coral reef calcium carbonate production under ocean acidification and warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(21), e2015265118. DOI:10.1073/pnas.201526511 (2021).
- COSTANZA, R., R. D'ARGE, R. DE GROOT, S. FARBER, M. GRASSO, B. HANNON, K. LIMBURG, S. NAEEM, J. PARUELO, R. G. RASKIN, P. SUTTON, M. VAN DEN BELT. 1998. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological Economics* 25(1), 67-72. DOI:10.1016/S0921-8009(98)00019-6
- DARLING, E.S., T. R. McCLANAHAN, J. MAINA, G.G. GURNEY, GRAHAM NAJ, JANUCHOWSKI-HARTLEY F, CINNER JE, MORA C, HICKS CC, MAIRE E, PUOTINEN M, SKIRVING WJ, ADJEROUD M, AHMADIA G, ARTHUR R, BAUMAN AG, BEGER M, BERUMEN ML, BIGOT L, BOUWMEESTER J, BRENIER A, BRIDGE TCL, BROWN E, CAMPBELL SJ, CANNON S, CAUVIN B, CHEN CA, CLAUDET J, DENIS V, DONNER S, ESTRADIVARI FN, FEARY DA, FENNER D, FOX H, FRANKLIN EC, FRIEDLANDER A, GILMOUR J, GOIRAN C, GUEST J, HOBBS J-PA, HOEY AS, HOUK P, JOHNSON S, JUPITER SD, KAYAL M, KUO C-Y, LAMB J, LEE MAC, LOW J, MUTHIGA N, MUTTAQIN E, NAND Y, NASH KL, NEDLIC O, PANDOLFI JM, PARDEDE S, PATANKAR V, PENIN L, RIBAS-DEULOFEU L, RICHARDS Z, ROBERTS TE, RODGERS KS, SAFUAN CDM, SALA E, SHEDRAWI G, SIN TM, SMALLHORN-WEST P, SMITH JE, SOMMER B, STEINBERG PD, SUTTHACHEEP M, TAN CHJ, WILLIAMS GJ, WILSON S, YEEMIN T, BRUNO JF, FORTIN M-J, KRKOSEK M, MOUILLOT D. 2019. Social-environmental drivers inform strategic management of coral reefs in the Anthropocene. *Nature Ecology and Evolution* 3:1341-1350. DOI:10.1038/s41559-019-0953-8
- DE GROOT, R., L. BRANDER, S. VAN DER PLOEG, R. COSTANZA, F. BERNARD, L. BRAAT, M. CHRISTIE, N. CROSSMAN, A. GHERMANDI, L. HEIN, S. HUSSAIN, KUMAR, P., McVITIE, A., PORTELA, R., RODRIGUEZ, L.C., TEN BRINK, P., VAN BEUKERING, P., 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services* 1 (1), 50-61. DOI:10.1016/j.ecoser.2012.07.005
- EAKIN, C. M. (1996). Where have all the carbonates gone? A model comparison of calcium carbonate budgets before and after the 1982–1983 El Niño at Uva Island in the eastern Pacific. *Coral Reefs*, 15(2), 109-119. DOI:10.1007/BF01771900
- ENOCHS, I.C. & P.W. GLYNN. 2017. Trophodynamics of Eastern Pacific Coral Reefs. In: Glynn, P., D. Manzello, I. Enochs. (eds) *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*. *Coral Reefs of the World*, vol 8. Springer, Dordrecht. DOI:10.1007/978-94-017-7499-4\_9
- ENOCHS, I. C., L. T. TOTH, A. KIRKLAND, D. P. MANZELLO, KOLODZIE, J. T. MORRIS, D. M. HOLSTEIN, A. SCHLENZ, C. J. RANDALL, J. L. MATÉ, J. J. LEICHTER & R. B. ARONSON. 2021. Upwelling and the persistence of coral-reef frameworks in the eastern tropical Pacific. *Ecological Monographs*, 91(4), e01482. DOI:10.1002/ecm.1482
- ESTRADA-SALDÍVAR, N., E. JORDÁN-DALHGREN, R. E. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, C. PERRY & L. ALVAREZ-FILIP. 2019. Functional consequences of the long-term decline of reef-building corals in the Caribbean: evidence of across-reef functional convergence. *Royal Society Open Science*, 6(10), 190298. DOI:10.1098/rsos.190298
- GLYNN, P. W. 1988. El Niño—Southern oscillation 1982-1983: Nearshore population, community, and ecosystem responses. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 19(1), 309-346. DOI:10.1146/annurev.es.19.110188.001521
- GLYNN, P. W., R. H. STEWART & J. E. McCOSKER. 1972. Pacific coral reefs of Panama: structure, distribution and predators. *Geologische Rundschau*, 61, 483-519. DOI:10.1007/BF01896330
- GLYNN, P.W. & G. E. LEYTE-MORALES, G.E. 1997. Coral reefs of Huatulco, west México: reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec. *Rev. Biol. Trop.* 45 (3), 10331047. <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/21114>
- GLYNN, P. W. & D. P. MANZELLO 2015. Bioerosion and coral reef growth: a dynamic balance. In *Coral reefs in the Anthropocene* (pp. 67-97). Springer, Dordrecht.
- GLYNN, P. W., J. J. ALVARADO, S. BANKS, J. CORTÉS, J. S. FEINGOLD, C. JIMÉNEZ, J. E. MARAGOS, P. MARTÍNEZ, J. L. MATÉ, D. A. MOANGA, S. NAVARRETE, H. REYES-BONILLA, B. RIEGL, F. RIVERA, B. VARGAS-ÁNGEL, E. A. WIETERS & F. A. ZAPATA. 2017. Eastern Pacific Coral Reef Provinces, coral community structure and composition: an overview. In: Glynn, P.W., D. P. Manzello, I. C. Enochs (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. Springer, Netherlands, pp. 107-176. DOI: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), 1-23. DOI:10.1007/s003380050220
- GONZÁLEZ-BARRIOS, F. J., R. A. CABRAL-TENA & L. ALVAREZ-FILIP. 2021. Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology*, 27(3), 640-651. DOI:10.1111/gcb.15431
- GONZÁLEZ-PABÓN, M. A., J. A. TORTOLERO-LANGARICA, L. E. CALDERON-AGUILERA, E. SOLANA-ARELLANO, A. P. RODRÍGUEZ-TRONCOSO, A. L. CUPUL-MAGAÑA & R. A. CABRAL-TENA. 2021. Low calcification rate, structural complexity, and calcium carbonate production of Pocillopora corals in a bios-



- phere reserve of the central Mexican Pacific. *Marine Ecology*, 42(6), e12678. DOI:10.1111/maec.12678
- 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
- HERRERA-ESCALANTE, T., A. LÓPEZ-PÉREZ & G. E. LEYTE-MORALES. 2005. Bioerosion caused by the sea urchin *Diadema mexicanum* (Echinodermata: Echinoidea) at Bahías de Huatulco, Western Mexico." *Revista de biología tropical* 53.3: 263-273. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44919815016>
- HUGHES, T.P., J. T. KERRY, M. ÁLVAREZ-NORIEGA, J. G. ÁLVAREZ-ROMERO, K. D. ANDERSON, A. H. BAIRD, R.C BABCOCK, M. BEGER, D. R. BELLWOOD, R. BERKELMANS, T. C. BRIDGE, I. R. BUTLER, M. BYRNE, N. E. CANTIN, S. COMEAU, S. R. CONNOLLY, G. S. CUMMING, S. J. DALTON, G. DIAZ-PULIDO & S. K. WILSON. 2017. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543(7645),373377. DOI:10.1038/nature21707
- IPCC. CLIMATE CHANGE 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC (2014). <http://hdl.handle.net/10013/epic.45156.d001>
- JANUCHOWSKI-HARTLEY, F. A., N. A. GRAHAM, S. K. WILSON, S. JENNINGS & C. T. PERRY. 2017. Drivers and predictions of coral reef carbonate budget trajectories. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1847), 20162533. DOI:10.1098/rspb.2016.2533
- JUÁREZ-HERNÁNDEZ, L. G. & M. TAPIA-GARCÍA. 2018. Cambios en la comunidad de peces por efecto del desarrollo costero en el Parque Nacional Huatulco (México). *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1569-1579. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.31908>
- LEYTE MORALES, G. E. 2001. Estructura de la comunidad de corales y características geomorfológicas de los arrecifes coralinos de Bahías de Huatulco, Oaxaca, México Tesis Doctoral.
- LÓPEZ-PÉREZ, R. 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. DOI:10.2984/1534-6188(2007)61[355:CASRAB]2.0.CO;2
- LÓPEZ-PÉREZ, A., L.E. CALDERÓN-AGUILERA, H. REYES-BONILLA, J. D. CARRIQUIRY, P. MEDINA-ROSAS, A. L. CUPUL-MAGAÑA, M. D. HERRERO-PÉREZRUZ, H. A. HERNÁNDEZ-RAMÍREZ, M. A. AHUMADA-SEMPOA, B. M. LUNA-SALGUERO. 2012. Coral communities and reefs from Guerrero, Southern Mexican Pacific. *Marine Ecology* 33 (4), 407-416. DOI:10.1111/j.1439-0485.2011.00505.x
- LÓPEZ-PÉREZ, A. & D. A. LÓPEZ-LÓPEZ. 2016. Impacto bioerosivo de *Diadema mexicanum* en arrecifes de coral del Pacífico sur mexicano. *Ciencias marinas*, 42(1), 67-79. DOI:10.7773/cm.v42i1.2586
- LÓPEZ-PÉREZ, A., & L. M. HERNÁNDEZ-BALLESTEROS, L. M. 2004. Coral community structure and dynamics in the Huatulco area, western Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 75(3), 453-472. <https://www.ingentaconnect.com/content/umrsmas/bullmar/2004/00000075/00000003/art00008#>
- LÓPEZ-PÉREZ, A. 2017. Revisiting the Cenozoic History and the Origin of the Eastern Pacific Coral Fauna. In: Glynn, P.W., Manzello, D.P., Enochs, I.C. (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. Springer, Netherlands, pp. 39-57. DOI:10.1007/978-94-017-7499-4\_2
- MANZELLO, D. P., J. A. KLEYPAS, D. A. BUDD, C. M. EAKIN, P. W. GLYNN & C. LANGDON. 2008. Poorly cemented coral reefs of the eastern tropical Pacific: Possible insights into reef development in a high-CO2 world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(30), 10450-10455. DOI:10.1073/pnas.0712167105
- MANZELLO, D.P., M. C. EAKIN, P. W. GLYNN. 2017. Effects of global warming and ocean acidification on carbonate budgets of Eastern Pacific coral reefs, in: Glynn, P.W., Manzello, D.P., Enochs, I.C. (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. Springer, Netherlands, pp. 517-533. DOI:10.1007/978-94-017-7499-4\_18
- MCWILLIAM, M., M. O. HOOGENBOOM, A. H. BAIRD, C. Y. KUO, J. S. MADIN, T. P. HUGHES. 2018. Biogeographical disparity in the functional diversity and redundancy of corals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115 (12), 3084-3089. DOI:10.1073/pnas
- MEDELLÍN-MALDONADO, F., R. A. CABRAL-TENA, A. LÓPEZ-PÉREZ, L. E. CALDERÓN-AGUILERA, C. O. NORZAGARAY-LÓPEZ, C. CHAPA-BALCORTA, R. C. ZEPETA-VILCHIS. 2016. Calcification of the main reef-building coral species on the Pacific coast of southern Mexico. *Ciencias Marinas* 42 (3), 209-225. DOI:10.7773/cm.v42i3.2650
- MOBERG, F. & C. FOLKE. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological economics*, 29(2), 215-233. DOI:10.1016/S0921-8009(99)00009-9
- MOLINA-HERNÁNDEZ, A., F. J. GONZÁLEZ-BARRIOS, C. T. PERRY & L. ÁLVAREZ-FILIP. 2020. Two decades of carbonate budget change on shifted coral reef assemblages: are these reefs being locked into low net budget states?. *Proceedings of the Royal Society B*, 287(1940), 20202305. DOI:10.1098/rspb.2020.2305
- MONTAGGIONI, L. 2005. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: development patterns and controlling factors. *Earth Science Reviews* 71, 1-75. DOI:10.1016/j.earscirev.2005.01.002
- NAVA, H. & J. L. CARBALLO. 2008. Chemical and mechanical bioerosion of boring sponges from Mexican Pacific coral reefs. *Journal of Experimental Biology*. 211, 2827-2831. DOI:10.1242/jeb.019216
- OPPENHEIMER, M., B. GLAVOVIC, J. HINKEL, R. VAN DE WAL, A. K. MAGNAN, A. ABD-ELGAWAD, R. CAI, M. CIFUENTES-JARA, R. M. DECONTO, T. GHOSH, J. HAY, F. ISLA, B. MARZEION, B. MEYSSIGNAC & Z. SEBESVARI. 2019. Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*
- PALACIOS, M. M., C. G. MUÑOZ & F. A. ZAPATA. 2014. Fish corallivory on a pocilloporid reef and experimental coral responses to predation. *Coral Reefs*, 33, 625-636. DOI:10.1007/s00338-014-1173-y
- PERRY C.T., T. SPENCER & P. S. KENCH. 2008. Carbonate budgets and reef production states: a geomorphic perspective on the ecological phase-shift concept. *Coral Reefs* 27:853-866 DOI:10.1007/s00338-008-0418-z
- Perry, C.T., G. N. Murphy, P. S. Kench, S. G. Smithers, E. N. Edinger, R. S. Steneck & P. J. Mumby. 2013. Caribbean-wide decline in carbonate production threatens coral reef growth. *Nature Communications* 4, 1402. DOI:10.1038/ncomms2409

- PERRY C. T., G. N. MURPHY, P. S. KENCH, E. N. EDINGER, S. G. SMITHERS, R. S. STENECK & P. J. MUMBY. 2014. Changing dynamics of Caribbean reef carbonate budgets: emergence of reef bioeroders as critical controls on present and future reef growth potential. *Proceedings of the royal society B* 281:20142018 DOI:10.1098/rspb.2014.2018
- PERRY, C. T., G. N. MURPHY, N. A. GRAHAM, S. K. WILSON, F. A. JANUCHOWSKI-HARTLEY & H. K. EAST. 2015. Remote coral reefs can sustain high growth potential and may match future sea-level trends. *Scientific Reports*, 5(1), 1-8. DOI:10.1038/srep18289
- PERRY, C. T., & K. M. MORGAN. 2017. Post-bleaching coral community change on southern Maldivian reefs: is there potential for rapid recovery?. *Coral Reefs*, 36(4), 1189-1194. DOI:10.1007/s00338-017-1610-9
- PERRY C. T., I. LANGE, F. A. JANUCHOWSKI-HARTLEY. 2018a. ReefBudget Indo Pacific: online resource and methodology. <http://geography.exeter.ac.uk/reefbudget/>
- PERRY, C. T., L. ALVAREZ-FILIP, N. A. GRAHAM, P. J. MUMBY, S. K. WILSON, P. S. KENCH, D. P. MANZELLO, K. M. MORGAN, A. B. A. SLANGEN, D. P. THOMSON, F. JANUCHOWSKI-HARTLEY, S. G. SMITHERS, R. S. STENECK, R. CARLTON, E. N. EDINGER, I. C. ENOCHS, N. ESTRADA-SALDIVAR, M. D. E. HAYWOOD, G. KOŁODZIEJ, G. N. MURPHY, E. PÉREZ-CERVANTES, A. SCHULEY, L. VALENTINO, R. BOENISH, M. WILSON & C. MACDONALD. 2018b. Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level. *Nature*, 558(7710), 396-400. DOI:10.1038/s41586-018-0194-z
- PERRY, C. T., & L. ALVAREZ-FILIP. 2019. Changing geo-ecological functions of coral reefs in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33(6), 976-988. DOI:10.1111/1365-2435.13247
- PROUTY, N. G., A. COHEN, K. K. YATES, C. D. STORLAZZI, P. W. SWARZENSKI & D. WHITE. 2017. Vulnerability of coral reefs to bioerosion from land-based sources of pollution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12), 9319-9331. DOI:10.1002/2017JC013264
- REYES-BONILLA, H. & A. LÓPEZ-PÉREZ. 1998. Biogeografía de los corales pétreos (Scleractinia) del Pacífico de México. *Ciencias Marinas*, 24(2), 211-224 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48024206>
- REYES-BONILLA, H. 2003. Coral reefs of the Pacific coast of México. In: Cortés, J. (Ed.), *Latin American Coral Reefs*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 331-349 DOI:10.1016/B978-044451388-5/50015-1
- REYES-BONILLA, H., & L. E. CALDERON-AGUILERA. 1999. Population density, distribution and consumption rates of three corallivores at Cabo Pulmo Reef, Gulf of California, Mexico. *Marine Ecology*, 20(3-4), 347-357. DOI:10.1046/j.1439-0485.1999.2034080.x
- REYES-BONILLA, H. & A. LÓPEZ-PÉREZ. 2009. Coral and coral reef communities in the Gulf of California. Atlas of coastal ecosystems in the western Gulf of California. In: Johnson, A., J. Ledezma-Vázquez. (Eds.), *Atlas of Coastal Ecosystems in the Western Gulf of California*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 45-57.
- REYES-BONILLA, H., L. E. CALDERÓN-AGUILERA, M. C. MOZQUEDA-TORRES & J. D. CARRIQUIRY. 2014. Presupuesto de carbono en arrecifes coralinos de México. *Interciencia*, 39(9), 645-650. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33932147006>
- RIEGL, B.M., J. HALFAR, S. J. PURKIS, L. GODINEZ-ORTA. 2007. Sedimentary facies of the eastern Pacific's northernmost reef-like setting (Cabo Pulmo, Mexico). *Marine Geology* 236 (1), 61-77. DOI:10.1016/j.margeo.2006.09.021
- ROSE, C. S. & M. J. RISK. 1985. Increase in *Cliona delitrix* Infestation of *Montastrea cavernosa* Heads on an Organically Polluted Portion of the Grand Cayman Fringing Reef. *Marine Ecology* 6, 345-363. DOI:10.1111/j.1439-0485.1985.tb00142.x
- SMITH, S. V. & D. W. KINSEY. 1976. Calcium carbonate production, coral reef growth, and sea level change. *Science*, 194(4268), 937-939. DOI:10.1126/science.194.4268.937
- TORTOLERO-LANGARICA, J. A., A. P. RODRÍGUEZ-TRONCOSO, A. L. CUPUL-MAGAÑA, D. E. MORALES-DE-ANDA, J. E. CASELLE & J. P. CARRICART-GANIVET. 2022. Coral calcification and carbonate production in the eastern tropical Pacific: The role of branching and massive corals in the reef maintenance. *Geobiology*, 20(4), 533-545. DOI:10.1111/gbi.12491
- VAN WOESIK, R. & C. W. CACCIAPAGLIA. 2018. Keeping up with sea-level rise: carbonate production rates in Palau and Yap, western Pacific Ocean. *PLoS One* 13 (5), e0197077. DOI:10.1371/journal.pone.0197077
- VAN WOESIK, R. & C. W. CACCIAPAGLIA. 2021. Thermal stress jeopardizes carbonate production of coral reefs across the western and central Pacific Ocean. *PLoS one*, 16(4), e0249008. DOI:10.1371/journal.pone.0249008