

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

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

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

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Ecología Marina**

---

**Características esclerocronológicas de *Porites lutea* en Isla  
Socorro, en el Parque Nacional Revillagigedo**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Presenta:

**Karla Elisa Martínez Cota**

Ensenada, Baja California, México

2024

Tesis defendida por  
**Karla Elisa Martínez Cota**  
y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Rafael Andrés Cabral Tena**  
Director de tesis

**Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera**

**Dr. Horacio Jesús De la Cueva Salcedo**



---

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

---

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Karla Elisa Martínez Cota** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ecología Marina.

**Características esclerocronológicas de *Porites lutea* en Isla Socorro, en el Parque Nacional Revillagigedo**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena  
**Director de tesis**

Las islas de Revillagigedo son uno de los lugares más destacados del Pacífico mexicano, gracias a sus características oceanográficas y climáticas que propician una biodiversidad marina notable, destacando los arrecifes de coral, ecosistemas vitales que sustentan una amplia variedad de vida oceánica. Dentro de estos arrecifes, el género *Porites* es fundamental en la formación de arrecifes, siendo *Porites lutea* una de las especies más comunes y exclusivas de esta región. El propósito de esta investigación es comprender la dinámica de crecimiento de *P. lutea* en la isla Socorro del archipiélago Revillagigedo. El objetivo es analizar cómo *P. lutea* responde a diversas condiciones ambientales y se adapta a cambios en su entorno, especialmente ante la amenaza del cambio climático. Se evaluaron las características esclerocronológicas de las colonias de coral de tasa de extensión (TE), densidad del esqueleto (DE) y tasa de calcificación (TC), a partir del análisis de las bandas anuales de baja y alta densidad del esqueleto coralino. Se llevaron a cabo análisis estadísticos para entender la relación entre los cambios en el crecimiento de los corales y las variaciones temporales en la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de clorofila a (Cla). Los resultados revelaron que las características esclerocronológicas de las colonias de coral presentan valores promedio de  $TE = 1.56 \text{ cm año}^{-1}$ ,  $DE = 0.98 \text{ g cm}^{-3}$  y  $TC = 1.54 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , dentro del rango reportado para esta especie en el Indo-Pacífico. Estos valores son considerablemente más altos que los reportados para otras especies de *Porites* en el Pacífico mexicano, lo que podría estar relacionado con las características oceanográficas específicas que favorecen el crecimiento coralino en la zona. Existe una relación significativa entre el aumento en la TSM y el aumento de la DE de las colonias de coral. Estos hallazgos contribuyen a nuestro entendimiento sobre la respuesta de *P. lutea* ante condiciones ambientales cambiantes, y subrayan la importancia de considerar el impacto del cambio climático en la salud y el crecimiento de los arrecifes de coral en la región de las islas de Revillagigedo.

**Palabras clave:** Esclerocronología, arrecifes de coral, crecimiento coralino.

Abstract of the thesis presented by **Karla Elisa Martínez Cota** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology

**Sclerocronological characteristics of *Porites lutea* on Socorro Island, in the Revillagigedo National Park**

Abstract approved by:

---

PhD Rafael Andrés Cabral Tena  
**Thesis Director**

The Revillagigedo Islands stand out as one of the most prominent locations in the Mexican Pacific, owing to their oceanographic and climatic characteristics that foster significant marine biodiversity, with coral reefs being particularly prominent. These reefs serve as vital ecosystems supporting a wide array of oceanic life. Within these ecosystems, the genus *Porites* plays a fundamental role, with *Porites lutea* being one of the most common and exclusive species in this region. The aim of this research is to comprehend the growth dynamics of *P. lutea* on Socorro Island. The objective is to analyze how these corals respond to various environmental conditions and adapt to changes in their surroundings, especially amidst the threat of climate change. To achieve this goal, the sclerocronological characteristics of coral colonies, including the extension rate (ER), skeletal density (SD), and calcification rate (CR), were evaluated based on the analysis of low and high-density annual bands present in the coral skeleton. Additionally, statistical analyses were conducted to understand the relationship between changes in coral growth and variations in sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a concentration (Chla) over time. The results revealed that the sclerocronological characteristics of coral colonies have average values of ER=1.56 cm year<sup>-1</sup>, SD=0.98 g cm<sup>3</sup>, and CR=1.54 g cm<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>, within the reported range for this species in the Indo-Pacific. These values are significantly higher than those reported for other *Porites* species in the Mexican Pacific, which may be related to specific oceanographic characteristics favoring coral growth in the area. A significant relationship was found between increased SST and increased SD of coral colonies. These findings contribute to our understanding of *P. lutea* response to changing environmental conditions and underscore the importance of considering the impact of climate change on the health and growth of coral reefs in the Revillagigedo Islands region.

**Keywords: Sclerochronology, coral reefs, coral growth**

## **Dedicatoria**

*A mi familia, mami y papi, nunca serán suficientes las palabras para agradecerles el apoyo que me han dado en cada decisión a lo largo de mi vida y por estar a mi lado en cada paso que doy.*

*A mis hermanas que aun a la distancia, cada una a su manera, siento su amor y apoyo cada día.*

*A la Karlita de hace 1 año, por levantarte y salir adelante cuando todo parecía oscuro.*

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por permitirme realizar mis estudios de posgrado en su institución

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado para el estudio del posgrado (CVU 1065016).

A mi director, el Dr. Rafael Andrés Cabral Tena, mil gracias por haber confiado en que podía lograrlo cuando ni yo misma lo hacía, por toda la paciencia y dedicación que pusiste a mi proyecto, por apoyarme incondicionalmente, sin ti yo no estuviera aquí hoy.

Al doctor Luis Calderón, por siempre estar disponible para despejar mis dudas y darme un norte cuando estaba perdida, por todos sus consejos y recomendaciones, y por siempre recordarme que estamos aquí por la ecología.

Al doctor Horacio de la Cueva, por estar al pendiente de mis avances, por todas las recomendaciones y valiosos consejos desde el primer día.

A mis compañeros de laboratorio de EPZC-ARBIOLAB, por todo el apoyo durante estos dos años, por sus consejos y opiniones, para orientarme en el mundo de los corales. Pero, sobre todo, por todas las risas y momentos inolvidables que pasamos juntos.

A mi mejor amigo y equipo Enrique Barco (el wombat), gracias por estos dos años mi amor, por tu ayuda durante toda la maestría no solamente en lo académico, por ser mi compañero y apoyo en cada paso y aventura en Ensenada, sin ti no hubiera sido posible llegar hasta este momento. Te amo.

A mi roomie Sandra la colombiana, amiga simplemente llegaste a salvarme, la vida fue mucho más fácil a tu lado, gracias por todas las risas, pláticas, comidas, develadas, fiestas y llantos juntas. Te llevo en mi corazón.

A mi roomie Adan, sin duda una de las personas más brillantes que he conocido, gracias por toda tu paciencia para ayudarme con estadística, aunque sea de lento aprendizaje, pero sobre todo gracias por tu amistad, por siempre estar disponible para escucharme y aconsejarme.

A mi mejor amiga Samai Arce, miya no hay palabras para expresar mi cariño por ti, gracias por venir a vivir esta aventura conmigo, y a llenar de risas mi vida, una plática contigo le da luz a mi día.

A mi amiga Evelyn, la chilanga más amorosa y simpática de la vida, te quiero amix, gracias por todas las risas y locuras juntas.

A todas las personas que, de una u otra manera, pusieron un granito o un camión de arena para que pudiera llegar aquí, mi psicóloga, mi psiquiatra, mis compañeros de volibol, maestros y compañeros de maestría, mil gracias.

Al M.C. Mario Montalvo por la recolecta de las muestras necesarias para realizar esta tesis.

Por último, pero no menos importante a mi gatita valqui, que tomo todas las clases en línea conmigo y se desveló a mi lado frente a la computadora por muchas noches. Mi compañera más incondicional y mi salvavidas en los días malos.



## Tabla de contenido

|   | Página    |
|---|-----------|
| Resumen en español.....   | ii        |
| Resumen en inglés.....  | iii       |
| Dedicatoria .....   | iv        |
| Agradecimientos.....  | v         |
| Lista de figuras.....   | ix        |
| Lista de tablas .....   | x         |
| <br>  |           |
| <b>Capítulo 1. Introducción.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Antecedentes .....  | 6         |
| 1.2 Justificación .....   | 9         |
| 1.3 Hipótesis.....  | 10        |
| 1.4 Objetivos .....   | 11        |
| 1.4.1 Objetivo general .....  | 11        |
| 1.4.2 Objetivos específicos.....  | 11        |
| <br>  |           |
| <b>Capítulo 2. Metodología.....</b>   | <b>12</b> |
| 2.1 Área de estudio .....   | 12        |
| 2.2 Trabajo de campo.....   | 13        |
| 2.3 Trabajo de laboratorio .....  | 14        |
| 2.3.1 Obtención de lajas .....  | 14        |
| 2.4 Estimación de características esclerocronológicas .....                   | 15        |
| 2.4.1 Radiografiado de lajas de coral .....                                   | 15        |
| 2.4.2 Estimación de la densidad del esqueleto mediante escala de grises ..... | 15        |
| 2.5 Análisis de series de tiempo de variables ambientales.....                | 21        |

|                    |  |           |
|--------------------|--|-----------|
| 2.6                | Análisis estadísticos.....   | 21        |
| <b>Capítulo 3.</b> | <b>Resultados .....</b>  | <b>23</b> |
| 3.1                | Características esclerocronológicas .....  | 23        |
| 3.2                | Relación entre las características esclerocronológicas .....                                 | 24        |
| 3.3                | Relación entre las características esclerocronológicas, la TSM y la Clorofila <i>a</i> ..... | 24        |
| <b>Capítulo 4.</b> | <b>Discusión.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Capítulo 5.</b> | <b>Conclusiones .....</b>  | <b>34</b> |
|                    | <b>Literatura citada .....</b>   | <b>35</b> |

## Lista de figuras

| Figura   | Página |
|--|--------|
| 1. La calcificación se lleva a cabo en el espacio subcalicoblástico a partir de un fluido inicial derivado del agua de mar y con suministro adicional de carbono inorgánico disuelto (DIC) de origen metabólico. Las anhidrasas carbónicas catalizan la conversión de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) en iones de bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ). Modificada de (McCulloch et al., 2017) ..... | 1      |
| 2. Mapa del área de estudio y sitio de muestreo Playa Blanca .....   | 12     |
| 3. Trabajo de campo. a) Recolecta de las muestras. b) Ejemplo del morfotipo masivo de los corales. c) Secado de las muestras.....  | 13     |
| 4. Obtención de las lajas. a) Corte de la colonia. b) Lajas obtenidas. c) Lijado de las lajas. d) Secado de las lajas .....  | 14     |
| 5. Radiografías de las lajas de coral, (estandar de aragononita posicionado en el parte superior de la imagen).....  | 15     |
| 6. Imagen de la radiografía del coral Col1_laja1_sec2. Se presenta el área de estudio (banda amarilla) sobre el eje principal de crecimiento, se aprecia el bandeo de densidad con bandas hialina (baja densidad) y oscura (alta densidad).....  | 17     |
| 7. Imagen de la radiografía del coral Col1_laja2. Se presenta el área de estudio (banda amarilla) de la sección 1, 2 y 3 .....   | 17     |
| 8. Imagen del perfil de densidad óptica en un transecto extraído de una laja de <i>Porites lutea</i> .   | 18     |
| 9. Perfil de valores de gris y distancia, las fechas muestra el año correspondiente de crecimiento coralino.....   | 19     |
| 10. Perfil de densidad óptica y extensión de laja de <i>P. lutea</i> . El corchete indica aproximadamente un año de crecimiento y las líneas punteadas indican las distancias que se tomaron en cuenta para determinar la extensión anual. ....  | 20     |
| 11. Relación entre las características esclerocronológicas y los años de estudio. a) TE y años b) DE y años, c) TC y años .....  | 23     |
| 12. Regresión lineal simple entre las características esclerocronológicas de las colonias. a) Calcificación vs Densidad, b) Calcificación vs extensión y c) Densidad vs extensión.....   | 24     |
| 13. Análisis de correlación cruzada de TSM vs TE.....  | 26     |
| 14. Análisis de correlación cruzada de la DE y los parámetros ambientales TSM y <i>Cl<sub>a</sub></i> .....  | 26     |
| 15. Análisis de correlación cruzada de la DE y los parámetros ambientales TSM y <i>Cl<sub>a</sub></i> .....  | 26     |

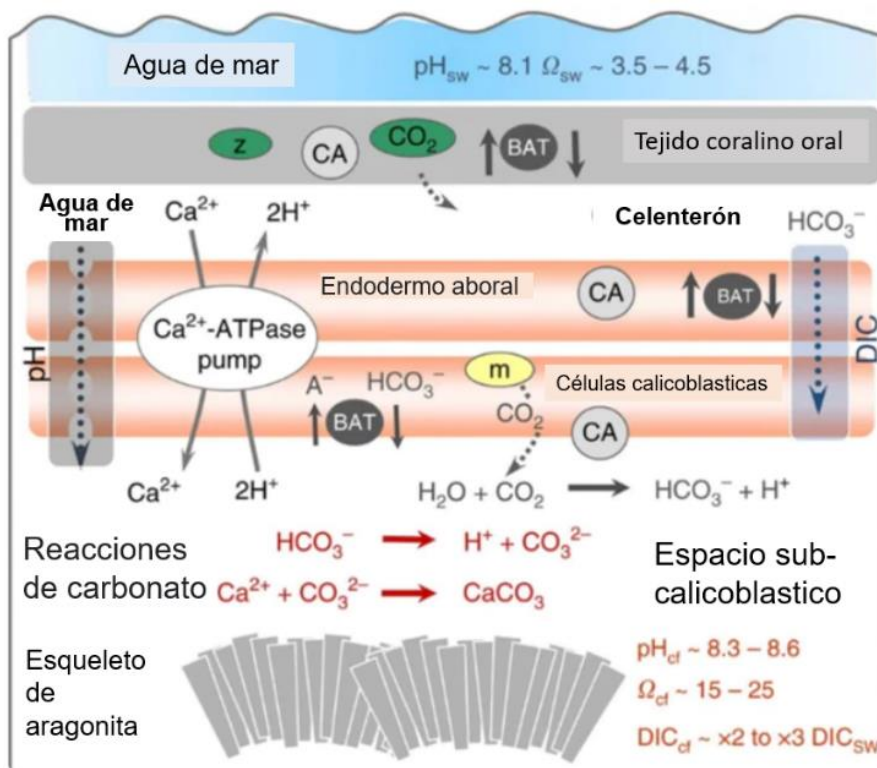
## Lista de tablas

| Tabla   | Página |
|---|--------|
| 1. ID de las colonias de <i>P. lutea</i> recolectadas en la Isla Socorro (Ejemplo Colonia 1, laja 1 , Sección 1) .....  | 18     |
| 2. Regresiones lineales simples entre las características esclerocronológicas de los corales. Tasa de extensión (TE), densidad del esqueleto (DE), tasa calcificación (TC)..... | 22     |
| 3. Regresión no paramétrica de la TE, DE y TC vs TSM y Cla. En rojo los valores no significativos .....   | 25     |
| 4. Tabla de correlación de Spearman entre las características esclerocronológicas y los parámetros ambientales .....  | 25     |
| 5. Características esclerocronológicas de <i>Porites</i> en distintas regiones del mundo. modificada de Ong et al., 2022 .....  | 28     |

## Capítulo 1. Introducción

Los arrecifes de coral se encuentran entre los ecosistemas marinos más dinámicos y productivos del planeta (Veron et al., 2009). Aunque el área total de todos los arrecifes de coral representa menos del 1% del suelo oceánico, albergan alrededor de una cuarta parte de la biodiversidad marina (Moberg & Folke, 1999). Los arrecifes de coral son hábitats importantes para numerosas especies de importancia económica y son la base de muchas pesquerías en todo el mundo, actuando como viveros y zonas de desove (Spalding et al., 2001). La distribución geográfica de los corales hermatípicos (formadores de arrecifes) se restringe a los hábitats costeros de la franja intertropical, que se limita a las latitudes 30° norte y sur (Carriquiry, 2007; Veron & Stafford-Smith, 2000).

La mayoría de los corales hermatípicos son organismos marinos coloniales, donde cada pólipo forma un exoesqueleto de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en forma de aragonita a través de un proceso metabólico llamado calcificación (Figura 1) (Allemand et al., 2011; Hoegh-Guldberg et al., 2007; Pandolfi et al., 2011).



**Figura 1.** La calcificación se lleva a cabo en el espacio subcalicoblástico a partir de un fluido inicial derivado del agua de mar y con suministro adicional de carbono inorgánico disuelto (DIC) de origen metabólico. Las anhidrasas carbónicas catalizan la conversión de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en iones de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Modificada de (McCulloch et al., 2017)

Durante el proceso de calcificación, los iones de calcio y carbonato son extraídos del agua de mar y son bombeados a la capa calicoblástica, ubicada entre el pólipo y el esqueleto coralino. En esta capa, el pólipo crea condiciones de sobresaturación de iones de  $\text{CaCO}_3$ , facilitando la precipitación de estos iones en el esqueleto en forma de cristales (Allemand et al., 2011). El crecimiento del esqueleto de coral está regido por dos procesos fundamentales: la disponibilidad de energía que determina la tasa de depósito activo de material calcáreo, conocida como la tasa de calcificación (Colombo-Pallotta et al., 2010); y la manera en que los corales emplean dicho material para construir sus esqueletos, lo cual se traduce en dos estrategias de crecimiento distintas: dirigir las fuentes de calcificación hacia la extensión lineal o la densidad del esqueleto (Carricart-Ganivet, 2004; Carricart-Ganivet & Merino, 2001).

Un ejemplo de estas estrategias de crecimiento se observa en las especies del género *Porites*, que canalizan sus recursos de calcificación hacia el aumento de su capacidad de extensión lineal, lo que resulta en una ocupación rápida del espacio (Lough & Barnes, 2000). Este enfoque contrasta con el de las especies del género *Orbicella*, quienes dirigen sus recursos de calcificación hacia la construcción de esqueletos más densos (Carricart-Ganivet, 2004). Este contraste en las estrategias de crecimiento entre géneros ofrece una visión de la adaptabilidad de los corales a su entorno y destaca la diversidad de estrategias que pueden emplear para optimizar su desarrollo.

En las investigaciones sobre el crecimiento de los corales, Knutson et al. (1972) mediante el uso de imágenes de rayos X aportaron una contribución significativa al describir un patrón de bandas en los esqueletos de coral. Este patrón revela bandas de alta y baja densidad, las cuales indican períodos de depósito de material, ya sea con mayor o menor contenido de carbonato a lo largo de un año. La formación de estas bandas está influenciada por las condiciones ambientales en las que viven los corales. Por ende, el estudio detallado de los esqueletos de coral no solo permite realizar un análisis retrospectivo del crecimiento de estas colonias, sino que también proporciona información valiosa sobre cómo responden a los cambios en su entorno (Medellín-Maldonado et al., 2016).

Este enfoque ofrece una herramienta única para comprender la historia y la adaptabilidad de los corales en relación con las variaciones ambientales a lo largo del tiempo. Lough & Barnes (1997, 2000) detallan las características esclerocronológicas de los corales hermatípicos mediante la observación de cada par de bandas anuales, que se distinguen por su alta y baja densidad. Estas bandas proporcionan información crucial sobre tres aspectos del crecimiento coralino.

**1) Tasa de extensión esquelética:** Esta medida representa el crecimiento anual de las colonias de coral y se expresa como la tasa de extensión ( $\text{cm año}^{-1}$ ). También se informa como crecimiento en extensión, proporcionando una visión cuantitativa de la velocidad a la que la colonia se expande.

**2) La densidad esquelética** es una medida de la cantidad de material acumulado en los esqueletos de una colonia y se mide en gramos de carbonato de calcio por centímetro cúbico ( $\text{gCaCO}_3 \text{ cm}^{-3}$ ), mostrando un patrón anual de densidades que alternan una banda de alta densidad y una banda de menor densidad.

**3) Tasa de calcificación anual** se evalúa mediante el análisis de los esqueletos de los corales y se interpreta como la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  depositado anualmente por unidad de área. En estudios de densitometría, este cálculo se obtiene multiplicando la densidad promedio por la extensión esquelética para cada par de bandas y se expresa en gramos de carbonato de calcio por centímetro cuadrado por año ( $\text{gCaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ).

Es ampliamente reconocido que los factores ambientales desempeñan un papel crucial en la distribución y morfología de los arrecifes de coral en todo el mundo, y que están estrechamente vinculados a las características esclerocronológicas de los corales, como la extensión del esqueleto, la densidad y la tasa de calcificación (Lough & Barnes, 1992). Los factores ambientales que se considera que influyen en la formación de bandas de diferentes densidades incluyen la disponibilidad de nutrientes, la turbidez del agua, la sedimentación, la salinidad, la temperatura de la superficie del mar (TSM), la intensidad de la luz, el pH y el estado de saturación de aragonita ( $\Omega$ ), destacando este último como el factor químico principal. Investigaciones previas respaldan esta conexión entre factores ambientales y características esclerocronológicas (Barnes & Lough, 1993; Cabral-Tena et al., 2013; Carricart-Ganivet, 2007; Fabricius et al., 2011; Marubini & Atkinson, 1999; Medellín-Maldonado et al., 2016; Norzagaray-López et al., 2015). Este enfoque multidisciplinario proporciona una comprensión más completa de la influencia del entorno en el desarrollo y la respuesta de los corales, y destaca la importancia del equilibrio ambiental para la salud y la persistencia de los arrecifes de coral. Varios autores han observado que la intensidad de la luz y la temperatura de la superficie del mar (TSM) son los factores clave que intervienen en la formación del patrón de bandas (Lough & Barnes, 2000; Taylor et al., 1993; Tomascik & Sander, 1985).

Marshall & Clode (2004) encontraron en experimentos de laboratorio que la tasa de calcificación de los corales se ve afectada por una variación de  $1^\circ\text{C}$  en la TSM, considerando un rango óptimo de temperatura de ( $25 - 28^\circ\text{C}$ ) para estos organismos. Por otro lado, se ha observado que los corales que construyen

estructuras masivas pueden soportar temperaturas superficiales del mar más elevadas (30 – 31 °C), pero si estas condiciones adversas persisten durante períodos prolongados, pueden provocar el blanqueamiento coralino y una reducción en la tasa de calcificación (Sammarco et al., 2006).

Cabral-Tena et al. (2013) y Norzagaray-López et al. (2015) han demostrado que la TSM ejerce una influencia significativa en la extensión y densidad del esqueleto de los corales masivos en la costa del Pacífico de México. El estudio de Medellín-Maldonado et al. (2016) confirmó una correlación importante entre la densidad del esqueleto y la TSM en todas las especies de coral con crecimiento masivo.

La investigación de las características esclerocronológicas mediante el análisis de las bandas de alta y baja densidad en los esqueletos de corales ofrece una valiosa perspectiva sobre cómo los cambios ambientales han impactado a lo largo de los años en las colonias de corales (Lough & Cooper, 2011). Estas características, individualmente o en conjunto, han sido empleadas por diversos investigadores para explicar variaciones en las tasas de crecimiento entre especies de coral (Guzmán & Cortés, 1989), morfotipos (Cruz-Piñón et al., 2003; Knowlton et al., 1992) arrecifes de coral (Risk & Sammarco, 1991), y patrones temporales (Hudson et al., 1976; Tomascik & Sander, 1985).

Estas investigaciones han abarcado tanto corales ramificados como masivos, siendo estos últimos los más utilizados en este tipo de estudios. Los géneros *Porites* en el Pacífico y *Orbicella* en el Atlántico occidental, reconocidos como algunas de las principales especies constructoras de arrecifes en cada región, han sido especialmente destacados en este tipo de análisis (Carricart-Ganivet, 2007). La preferencia por los corales masivos se debe en parte a su capacidad para proporcionar información sobre condiciones ambientales a lo largo de extensos periodos en regiones tropicales (Barnes & Lough, 1993; Lough & Barnes, 1997). En conjunto, estos enfoques de investigación permiten comprender mejor cómo los factores ambientales influyen en el desarrollo y la adaptación de los corales, siendo esenciales para la conservación y gestión efectiva de los ecosistemas de arrecifes de coral.

En México existen varias investigaciones sobre el estudio de las características esclerocronológicas de los corales a través de sus bandas de crecimiento, entre ellos están los realizados por Norzagaray-López, (2010); Rendón, (2010); Trejo, 2020) y, específicamente en el Pacífico mexicano (García Malo, 2020; Tortolero-Langarica et al., 2016). Sin embargo, una de las áreas más emblemáticas del Pacífico México, han sido poco estudiada con relación a la esclerocronología en corales, este es el caso del Parque Nacional Revillagigedo, designado como Área Natural Protegida (ANP) y establecido como Parque Nacional a través



de un decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 27 de noviembre de 2017. El parque abarca un área total de 14 millones 808 mil 780 hectáreas, de las cuales 14 millones 793 mil 261 hectáreas corresponden a la porción marina y 15 mil 518 hectáreas a la porción terrestre insular. Esta porción terrestre incluye las islas Clarión, San Benedicto, Socorro y Roca Partida. Estos datos se encuentran detallados en el plan de manejo del Parque Nacional Revillagigedo (Conanp-Semarnat 2019).

Esta ANP es de gran importancia debido a que las islas y bajos del archipiélago provocan cambios importantes en los ciclos biogeoquímicos de mares y océanos, donde se evidencia el efecto principal en los ciclos materiales y finalmente en los flujos de energía. A nivel regional, el área se encuentra dentro de la 17.<sup>a</sup> ecorregión marina de América del Norte, conocida como la Zona de Transición México-Pacífico logrando que sea una zona compleja y altamente productiva (Wilkinson, et al., 2009). Las islas y las aguas que rodean el archipiélago son reconocidas por su rica biodiversidad marina y su importancia como puente y punto intermedio entre los océanos Pacífico Oriental y Occidental. El aislamiento de las islas y su estado relativamente prístino han preservado procesos evolutivos que han resultado en un alto grado de endemismo, tanto en ecosistemas terrestres como marinos (Conanp-Semarnat, 2019).

La fauna marina del archipiélago es conocida por su gran diversidad de invertebrados, especialmente crustáceos (Hernández-Aguilera et al., 2023), moluscos (Quiñones & Michel-Morfin, 2002) equinodermos (Solís-Marín et al., 2014), esponjas (Bautista-Guerrero et al., 2011) y corales (Ketchum & Bonilla, 2001; Reyes Bonilla et al., 1999). En el caso de los corales destaca el género *Porites*, al ser constructor de arrecifes y tener la mayor riqueza de especies en la localidad (Ketchum & Bonilla, 2001). La especie de interés para la presente investigación es *Porites lutea*, la cual es una de las menos estudiadas en el Pacífico Mexicano. La información disponible sobre esta especie es limitada, y hasta el momento, la descripción más detallada proviene del estudio realizado por (Ketchum & Bonilla, 2001).

Estos autores realizaron la primera descripción de la especie para Revillagigedo, señalando que *Porites lutea* se distribuye en el Pacífico oriental, específicamente en las Revillagigedo y Clipperton. Además, se ha registrado su presencia en el Pacífico occidental y central, desde Japón, Filipinas y Australia oriental, hasta las Islas Marshall, Pitcairn e Islas Line. Dada la consideración de la ANP como un entorno propicio para el desarrollo de arrecifes de coral formados por *Porites*, debido a su alta productividad y bajo impacto antropogénico, se plantea la necesidad de estudios detallados sobre las bandas de crecimiento en *Porites lutea*. Estos estudios podrían ofrecer información histórica valiosa sobre el crecimiento de los corales en

condiciones óptimas, permitiendo comparaciones con otros sitios en el Pacífico mexicano y explorando posibles diferencias y el impacto de condiciones estresantes en los arrecifes de coral.

## 1.1 Antecedentes

Dentro del archipiélago de Revillagigedo no se han realizado estudios de esclerocronología en corales. Sin embargo, a lo largo del Pacífico mexicano diversos autores han realizado estudios en los que se han medido las características esclerocronológicas de los corales, y uno de los géneros más utilizados es *Porites* debido a su amplia distribución. Norzagaray-López et al. (2015) realizaron un estudio esclerocronológico en *Porites panamensis* en la costa del Pacífico mexicano, específicamente tres localidades: Bahía de Los Ángeles, Cabo Pulmo e Islas Marietas. En el cual encontraron que, en general, la tasa de calcificación de *P. panamensis* era baja en los tres sitios de estudio, argumentando que posiblemente era por la baja cantidad de nutrientes disponibles. Observaron variaciones en las características esclerocronológicas entre los sitios, influenciadas por la forma de crecimiento de la colonia. Las colonias masivas en el norte mostraron una mayor tasa de calcificación que las colonias incrustantes en el sur, siendo Bahía de los Ángeles la ubicación con la tasa más alta, atribuida a las condiciones oceanográficas del Golfo de California. Un hallazgo significativo fue la identificación de una relación lineal positiva significativa entre las tasas anuales de calcificación y las temperaturas de la superficie marina dentro de las poblaciones de *P. panamensis*. Este resultado sugiere que la temperatura desempeña un papel crucial como control ambiental en las tasas de calcificación de los corales.

Tortolero-Langarica et al. (2016), compararon las tasas de crecimiento y calcificación de distintos morfotipos del coral *Porites lobata* en un periodo de seis años. El estudio incluyó formas columnares, masivas y de vida libre, y se llevó a cabo en el Parque Nacional Isla Isabel, ubicado en el Pacífico mexicano. Los resultados revelaron diferencias significativas en las características esclerocronológicas entre los morfotipos de *Porites lobata*. Las colonias masivas exhibieron tasas de extensión anual más altas en comparación con las formas columnares y de vida libre. Se observó que las colonias masculinas presentaron tasas de extensión anual superiores a las colonias femeninas, especialmente en la morfología columna y corallite. El estudio resaltó la notable plasticidad de esta especie y destacó que cada género manifestó respuestas fisiológicas distintas a las condiciones ambientales. En vista de estos hallazgos, los autores subrayaron la importancia de considerar la variabilidad morfológica en los corales al evaluar sus

tasas de crecimiento y calcificación. Esto, argumentaron, es esencial para llevar a cabo eficazmente los esfuerzos de conservación y las estrategias de manejo de los arrecifes coralinos.

En la tesis de maestría de García Malo (2020), se realizó un análisis esclerocronológico de *Porites panamensis*, en un sistema hidrotermal somero localizado en Santispac, al suroeste del Golfo de California (GC), con el fin de evaluar la respuesta de este coral a condiciones ambientales extremas, ya que se reporta un pH promedio de  $6.96 \pm 0.19$  y temperaturas de 27–30 °C en el agua de mar y 48°C en el sedimento. Obteniendo como resultado que las características esclerocronológicas de extensión, densidad y calcificación, son, a la fecha, las más bajas reportadas para el género, no solo en condiciones acidificadas, si no también fuera de estas. Se encontró que la calcificación de *P. panamensis* en esta zona no se relaciona con la temperatura, en desacuerdo con el modelo propuesto por (Lough, 2008) para *Porites* spp. Con base en este resultado infiere que la calcificación de *Porites* en Santispac responde principalmente a las condiciones acidificadas del medio. Esta información encontrada es muy útil para conocer de qué manera podría comportarse esta especie de coral ante escenarios de acidificación marina provocados por el cambio climático.

La tesis de maestría de Trejo (2020) reportó un estudio esclerocronológico de *Porites panamensis* en el área natural protegida de Bahía de los Ángeles (BLA), en el Golfo de California, en el que se evaluó el cambio en los parámetros de crecimiento en un lapso de 16 años, encontrando que hubo una reducción en la tasa de extensión y la tasa de calcificación de *P. panamensis*. Este cambio se le atribuyó al evento El Niño 2014- 2017 que generó anomalías positivas en temperatura de la superficie del mar (TSM) en BLA. Este resultado nos deja ver como el aumento en la TSM está afectando directamente el crecimiento de los corales, por lo tanto, podemos esperar que los corales no solamente serán afectados por este tipo de fenómenos, sino también por los efectos del cambio climático, debido al incremento de CO<sub>2</sub> antropogénico en la atmosfera, uno de cuyos efectos es aumentar la TSM.

A pesar de que el género *Porites* es uno de los más utilizados en estudios esclerocronológicos en el Pacífico mexicano, la información sobre *Porites lutea* es casi nula. Sin embargo, es posible encontrar algunos estudios de esta especie en regiones del Pacífico occidental y central, tal es el caso de (Lough & Barnes, 2000) los cuales realizaron un estudio sobre el crecimiento de 245 colonias masivas de *Porites* (*P. lobata*, *P. lutea*, *P. australiensis*, *P. solida* *P. mayeri*) distribuidas en 29 arrecifes a lo largo de la Gran Barrera Arrecifal (GBR) en Australia. La investigación se centró en el análisis de las bandas de densidad anual, evaluando la densidad, la tasa de extensión y la tasa de calcificación. Los resultados revelaron que en la

parte superior de las colonias se registraron tasas de extensión, tasas de calcificación y grosor del tejido significativamente mayores en comparación con los lados. Se observó una disminución de estas tasas de norte a sur a lo largo de la GBR, correlacionada de manera significativa con la temperatura superficial del mar (SST) promedio anual. Cada aumento de 1°C en la SST se asoció con un incremento de 0.33 g cm por año en la tasa de calcificación y 3.1 mm por año en la tasa de extensión. La densidad mostró una correlación inversa con la tasa de extensión, aumentando a medida que se alejaba de la costa. Estos hallazgos, basados en una extensa cobertura geográfica a lo largo de la GBR, proporcionan información valiosa sobre la respuesta del coral *Porites* a las variaciones térmicas, con implicaciones significativas para comprender los efectos del cambio climático en los arrecifes coralinos del Indo-Pacífico.

Tanzil (2012) realizó un estudio en el Mar de Andamán, Tailandia del Sur, sobre las características de crecimiento y la susceptibilidad al blanqueamiento del coral masivo *Porites lutea*. El análisis abordó las diferencias en las tasas de crecimiento entre colonias severamente blanqueadas (completamente blancas) y colonias parcialmente blanqueadas (de color pálido) posterior a un evento extenso de calentamiento del agua de mar y blanqueamiento en la región de Phuket en 2010. Durante el período anterior al blanqueamiento, de diciembre de 2008 a noviembre de 2010, no se identificaron diferencias en la extensión lineal y la densidad de los pólipos entre las colonias que posteriormente experimentaron blanqueamiento severo en comparación con aquellas con blanqueamiento parcial. Sin embargo, en el periodo post-blanqueamiento, de junio de 2010 a enero de 2011, se observó una reducción significativa en las tasas de extensión lineal en los corales parcial y completamente blanqueados en comparación con los valores pre-blanqueamiento. Estos resultados subrayan el impacto de un evento de blanqueamiento severo en las características de crecimiento de *Porites lutea*, evidenciando su vulnerabilidad a estos fenómenos ambientales

Considerando la tendencia actual del aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y los efectos negativos que puede tener sobre la TSM y, por tanto, en la calcificación de los corales, se han sugerido áreas que podrían ser refugios temporales para los corales. Estas son las áreas profundas, zonas de surgencia y algunas áreas con características óptimas para el crecimiento de los corales, algunas de estas áreas en el Pacífico mexicano son Bahía de los Ángeles (BLA), ubicada en el Golfo de California (Halfar et al., 2005), y más recientemente Carter et al., (2020) realizaron la primera evaluación del potencial de las Islas Revillagigedo como refugio climático para corales y arrecifes en el Pacífico oriental tropical, basándose en el uso de literatura publicada, datos ambientales remotos e *in situ* y observaciones de campo, donde se encontró que el área de Revillagigedo exhibe una combinación de características distintivas en la comunidad de

corales y en los procesos oceanográficos que respaldan las condiciones de refugio. Entre esta característica destacan que la TSM es relativamente estable ya que entre 1880 y 2010, el Archipiélago Revillagigedo experimentó un aumento moderado de 0.7 °C en la temperatura superficial del mar (TSM), y desde 1982 hasta 2017, se registró una anomalía térmica máxima regional de 2.4 °C asociada con el evento de El Niño. Esto puede ejercer una presión relativamente pequeña sobre las comunidades de coral en las estas islas en comparación con el estrés relacionado con la temperatura los arrecifes de coral de latitudes más bajas en el Pacífico tropical oriental, donde hubo un mayor aumento en la TSM y se han registrado mayores anomalías térmicas relacionadas con el ENSO (p. ej., + 6 °C) (Rasmusson & Hall, 1983). Además de esto el potencial de refugio aumenta debido a la ausencia de factores estresantes antropogénicos secundarios significativos.

## 1.2 Justificación

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más diversos de la tierra, tienen un alto valor cultural, ecológico y económico, proporcionando alimento, refugio y sustrato para una multitud de especies. Actualmente, los arrecifes coralinos están considerados como uno de los ecosistemas marinos más amenazados por la influencia directa de las actividades antropogénicas y principalmente por la acumulación de gases invernadero en la atmósfera, provocando aumentos en la TSM, además de tener efectos en la química del agua de mar, afectando directamente las características del crecimiento coralino (tasa extensión, densidad del esqueleto y tasa calcificación) que están influenciados por la disponibilidad de nutrientes, turbidez, sedimentos, salinidad, temperatura de la superficie del mar (TSM), luz, pH y estado de saturación de aragonita ( $\Omega$ ).

Una de las formas más utilizadas para conocer de qué manera se ven afectados los parámetros de crecimiento de los corales en respuesta a los cambios ambientales, son los estudios esclerocronológicos, que, a partir de las bandas de crecimiento de alta y baja densidad de los corales, nos permiten conocer la historia de vida, las condiciones ambientales en las que crecieron y su respuesta a cambios en el entorno a través de los años. Actualmente, diversos estudios esclerocronológicos alrededor del mundo han encontrado una disminución en los parámetros de crecimiento de los corales, sobre todo en la tasa de calcificación, producto del aumento de temperatura.

Diversos estudios esclerocronológicos alrededor del mundo han encontrado una disminución en los parámetros de crecimiento de los corales, sobre todo en la tasa de calcificación, producto del aumento de temperatura. En México se han realizado algunos estudios esclerocronológicos a lo largo del Pacífico mexicano, sin embargo, dentro de estos lugares no se ha tomado en cuenta uno de los sitios ecológicamente más importantes del país, que es el parque nacional Revillagigedo, un archipiélago ubicado frente a las costas de Colima, que ha sido declarado como área natural protegida desde 2017, este lugar es conocido por su enorme riqueza biológica tanto marina como terrestre, debido a sus condiciones climáticas y oceanográficas, además que el efecto antropogénico es casi inexistente.

Ante la falta de información sobre los corales del género *Porites*, en particular sobre la especie *Porites lutea*, en México, surge la necesidad de llevar a cabo un estudio esclerocronológico. El objetivo principal es conocer la historia de vida de esta especie y comprender de qué manera ha sido afectada por las variaciones climáticas a lo largo del tiempo. Esta investigación cobra una relevancia no solo por la escasez de datos en esta área específica, sino también porque podría servir como punto de referencia para contrastar con otras regiones del Pacífico mexicano. Se busca determinar si las condiciones ambientales aparentemente óptimas y el mínimo impacto antropogénico dentro del Área Natural Protegida (ANP) han influido de manera positiva en la salud y desarrollo de *Porites lutea*, en comparación con áreas donde las condiciones ambientales son subóptimas o han sido fuertemente afectadas por factores antropogénicos.

### **1.3 Hipótesis**

Se espera encontrar que las características esclerocronológicas de *Porites lutea* serán mayores en la isla Socorro en comparación con otros arrecifes del Pacífico mexicano. Esto podría atribuirse a las condiciones óptimas para el crecimiento coralino presentes en el Parque Nacional del Archipiélago de Revillagigedo. Se espera que el ambiente insular, junto con la ausencia de impacto antropogénico y la baja variación en la temperatura de la superficie del mar, proporcione un hábitat propicio para un mayor desarrollo coralino en la isla Socorro.

Se espera encontrar que los cambios a través del tiempo en las bandas de crecimiento de las colonias de *Porites lutea* en isla Socorro sean mínimos, debido a las condiciones óptimas y con poca perturbación presentadas en el archipiélago de Revillagigedo.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Determinar la dinámica de crecimiento y las variaciones temporales en las características esclerocronológicas de *Porites lutea* en Isla Socorro, así como explorar las posibles influencias de factores ambientales en el crecimiento coralino, con el fin de aportar información clave de los corales que habitan el PN Revillagigedo.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Determinar la tasa de extensión esquelética, densidad del esqueleto y tasa de calcificación de *Porites lutea* en Isla Socorro, para conocer la dinámica de crecimiento de la especie en Isla Socorro.

Realizar un análisis temporal de las características esclerocronológicas de *Porites lutea*, para identificar cambios a través del tiempo.

Analizar y evaluar las potenciales relaciones de regresión lineal entre las tasas de extensión esquelética, densidad y calcificación de *Porites lutea* para una mejor comprensión de la dinámica de crecimiento de esta especie en el entorno específico de Isla Socorro.

Explorar la influencia de variables ambientales, como la temperatura del agua y la concentración de clorofila, en las características esclerocronológicas de *Porites lutea* en Isla Socorro, contribuyendo así a la comprensión de los factores clave que modelan la salud de los arrecifes coralinos en esta región.

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

El Área de estudio es la Isla Socorro ( $18^{\circ}47''$  N y  $110^{\circ}58''$  O) (Figura 2), que se encuentra en el Archipiélago de Revillagigedo, situado a 455 km al suroeste de Cabo San Lucas, México, y a 674 km al oeste-suroeste del Cabo Corrientes en Jalisco, está compuesto por cuatro islas volcánicas, San Benedicto, Socorro y Roca Partida, conocidas como las islas interiores e isla Clarión, considerada la isla exterior. Siendo la Isla Socorro la más grande, con una superficie de  $210 \text{ km}^2$  (Flores Palacios et al., 2009).

Las islas se encuentran en la zona de transición de la Corriente Ecuatorial del Norte (CRN) y la Corriente de California (Brattstrom, 1990). A lo largo de un ciclo anual, los valores mensuales de la temperatura de la superficie del mar (TSM) oscilan entre aproximadamente  $23.5^{\circ}\text{C}$  y  $28.5^{\circ}\text{C}$ . La TSM mínima se registra desde enero hasta junio, reflejando el dominio de la corriente de California en el transporte de aguas frías desde latitudes más altas hacia el sur. En junio, la corriente de California se debilita y la CRN, alimentada principalmente por la cálida Contracorriente Ecuatorial del Norte (CCRN), se convierte en la influencia dominante, lo que provoca un aumento de la TSM (Kesler, 2006).



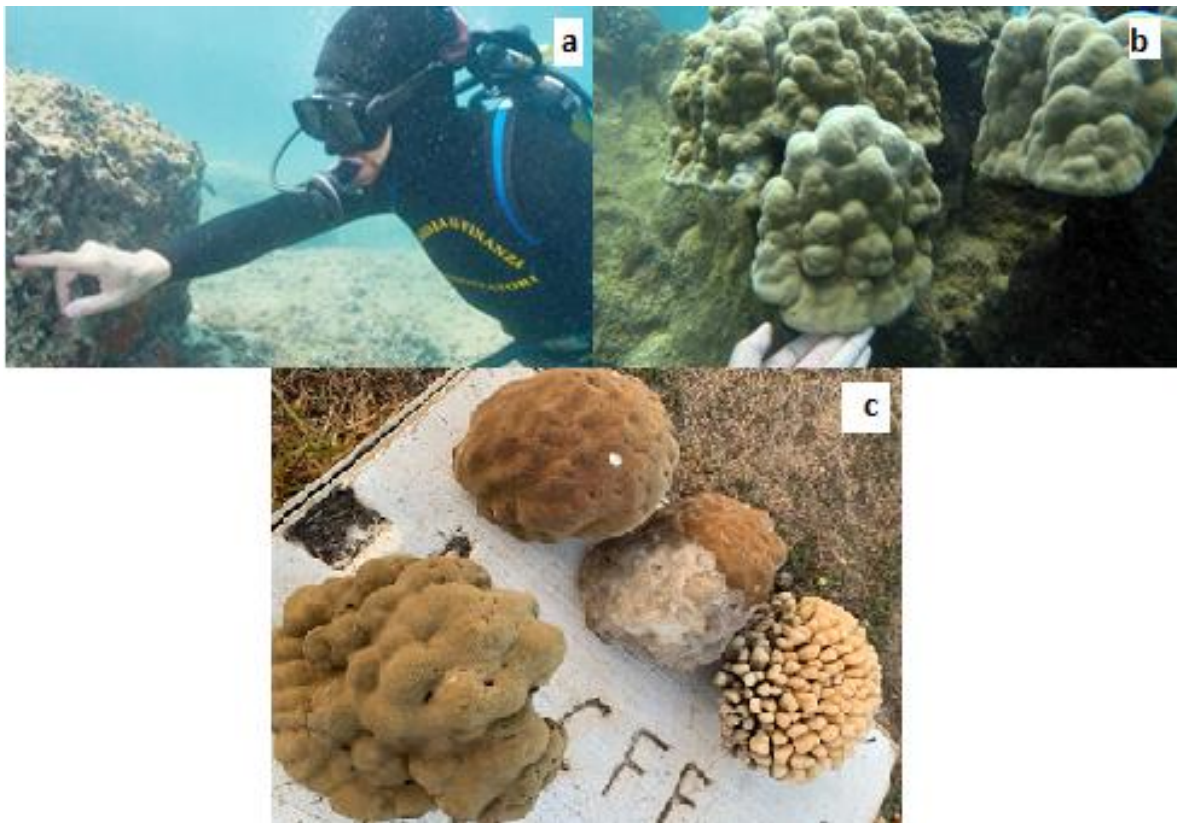
Figura 2. Mapa del área de estudio y sitio de muestreo Playa Blanca



## 2.2 Trabajo de campo

### 2.2.1 Recolecta de muestras

Se recolectaron un total de tres colonias de *Porites lutea* de entre 15 y 21 cm de altura en Isla Socorro, la recolecta fue realizada en marzo de 2023. Cada colonia coralina fue elegida al azar y recolectada manualmente, empleando martillo y cincel durante una inmersión con equipo SCUBA a una profundidad menor de 10m (Figura 3a). Todas las colonias presentaron un morfotipo masivo (Figura 3b). Una vez recolectadas, fueron lavadas con agua dulce y se dejaron secar al aire libre y a sol directo durante 1 semana para evitar la contaminación por hongos (Figura 3c). Posteriormente las muestras fueron transportadas a la ciudad de Ensenada, con todas las medidas de seguridad para evitar daños en los corales, para ser tratados en el laboratorio de esclerocronología de CICESE.



**Figura 3.** Trabajo de campo. a) Recolecta de las muestras. b) Ejemplo del morfotipo masivo de los corales. c) Secado de las muestras.

## 2.3 Trabajo de laboratorio

### 2.3.1 Obtención de lascas

Una vez llegadas las muestras al laboratorio, se revisó el estado de los corales y se pudo notar que algunos de ellos habían sido contaminados por hongos, por lo que se procedió a secar las muestras en un horno (marca THELCO, modelo 26), a 60°C por 48 horas para eliminar los restos de los hongos. Posteriormente, se evaluaron las colonias visualmente para seleccionar el eje máximo de crecimiento vertical, se hizo el primer corte del coral en la parte central de la colonia utilizando una sierra de alta velocidad con disco diamantado con un grosor de 1mm (Marca, Specialty Saw Inc) (Figura 4a). Para evitar el sobrecalentamiento de la cortadora, se empleó una mezcla de aceite mineral de 20% y agua al 80% como lubricante. A partir de este corte, de cada colonia se extrajeron tres lascas de ~7mm de grosor de la sección central de la colonia (Figura 4b). Las lascas fueron medidas con un Vernier, y aquellas lascas que tenían un grosor mayor a 7mm fueron lijadas utilizando una herramienta rotatoria inalámbrica (Dremel 7700) (Figura 4c), hasta obtener un grosor aproximado de 7mm. Posteriormente, las lascas fueron lavadas con agua dulce para eliminar los lodos generados durante el corte y fueron secadas en un horno a 60°C por 24h para evitar la contaminación por hongos (Figura 4d).



**Figura 4.** Obtención de las lascas. a) Corte de la colonia. b) Lascas obtenidas. c) Lijado de las lascas. d) Secado de las lascas

## 2.4 Estimación de características esclerocronológicas

### 2.4.1 Radiografiado de lajas de coral

Para obtener el patrón de bandas de crecimiento en las lajas, se utilizó un mamógrafo digital que arrojó imágenes de rayos X. Cada laja se radiografió junto con un estándar de aragonita que consistió en ocho bloques de un área aproximada de  $2.5\text{cm}^2$  y con diferentes grosores (9 a 118mm) obtenidos de la almeja *Tridacna máxima* con una densidad conocida de  $2.826\text{ g cm}^3$ , ya antes reportada (Carricart-Ganivet, 2007; Chalker & Barnes, 1990). Las lajas y el estándar fueron expuestos a la fuente de emisión a una distancia de 30cm durante 60 segundos. De donde se obtuvieron 2 radiografías (Figura 5) que fueron incluidas en el análisis de densitometría.

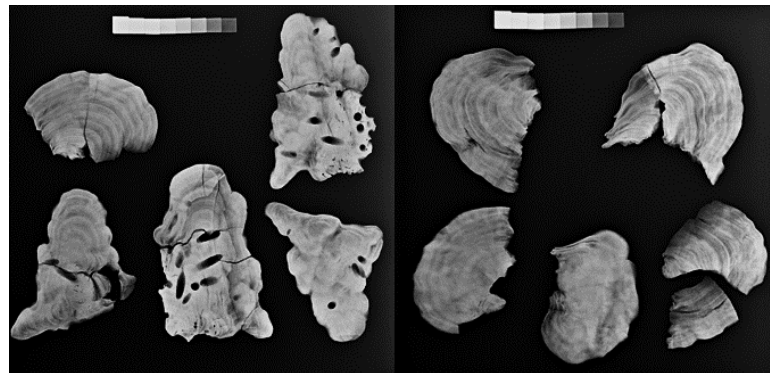


Figura 5. Radiografías de las lajas de coral, (estandar de aragononita posicionado en el parte superior de la imagen)

### 2.4.2 Estimación de la densidad del esqueleto mediante escala de grises

Se llevó a cabo un análisis utilizando la técnica conocida como densitometría óptica, la cual fue descrita previamente por (Carricart-Ganivet, 2007). Esta técnica se utilizó para cuantificar la densidad óptica (DO) en imágenes de lajas de muestra y en un estándar de aragonita. La DO se refiere al valor que representa la intensidad de luz en la escala de grises de cada píxel de la imagen, donde los valores oscilan entre 1 y 255 unidades.

El análisis se realizó empleando el software ImageJ, el cual permitió medir la DO en un área específica de 0.15 centímetros cuadrados ubicada en el centro de cada bloque del estándar de aragonita. Una vez

obtenidos los valores de DO, se procedió a realizar un ajuste exponencial utilizando estos datos. Sin embargo, para lograr una relación lineal ( $y = ax + b$ ), se transformaron los valores de DO utilizando el logaritmo natural ( $\ln(DO)$ ).

Luego, se evaluó la calidad de ajuste de diferentes modelos lineales calculando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se seleccionó el modelo que presentara un  $R^2$  superior a 0.80, lo que indicaría que los datos se ajustaron adecuadamente a un modelo lineal, permitiendo un análisis más preciso de la densidad óptica.

La ecuación del ajuste de la escala de grises ( $y = ax + b$ ) muestra la relación entre la densidad ( $P_{\text{estándar}}$ ), el grosor del bloque de aragonita ( $X_{\text{estándar}}$ ) y la densidad óptica ( $\ln(DO)$ ):

$$P_{\text{estándar}} * X_{\text{estándar}} = (\ln DO - b) / a \quad (1)$$

Dónde:  $a$  y  $b$  son constantes del ajuste lineal

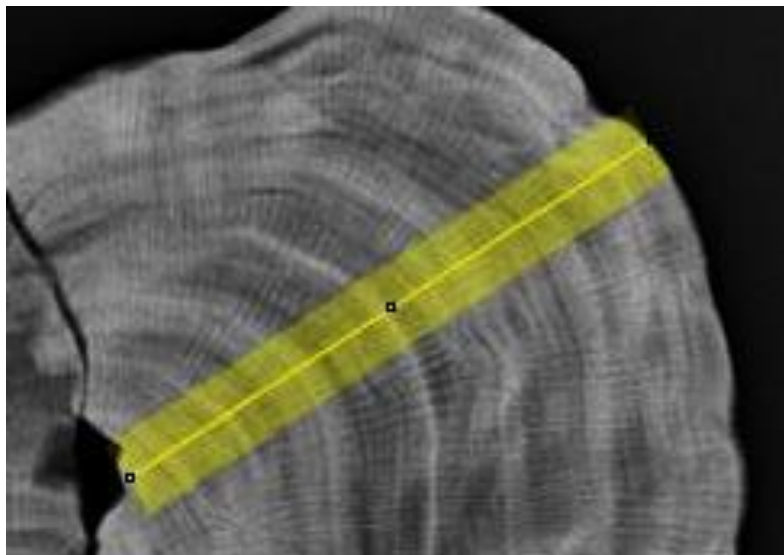
$a$  = representa el factor de ajuste de densidad

$b$  = intercepto o densidad mínima por radiografía.

Posteriormente, para evaluar la densidad de cada una de las láminas de los corales, se delimitó un área de 4 mm de ancho, con una longitud variable a lo largo del eje de crecimiento principal (eje vertical, figura 6) utilizando el software ImageJ. Para llevar a cabo este proceso, el área seleccionada para el análisis debía cumplir con ciertas características propuestas por (Lough & Barnes, 1992), con el fin de asegurar resultados óptimos. A continuación, se detallan estas características.

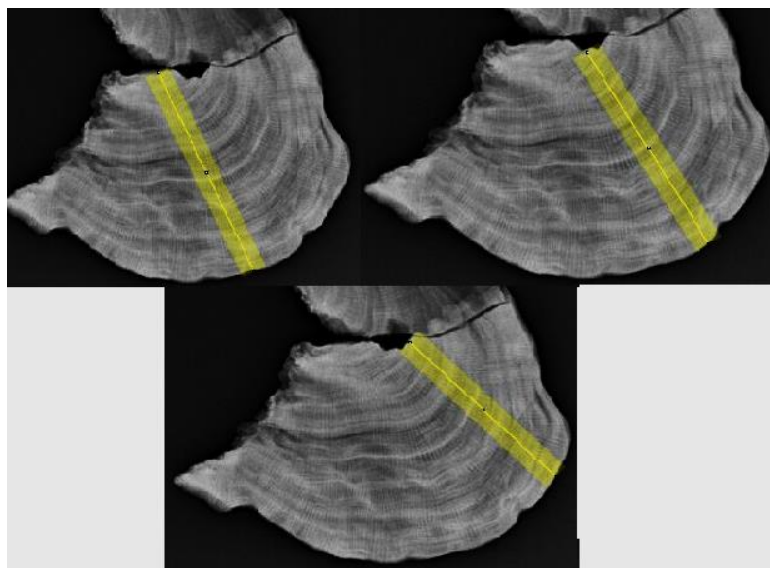
- 1) el área debe presentar bandeo de densidad,
- 2) estar ubicada dentro de la región del eje de crecimiento principal, identificable como zona donde el bandeo presenta una mínima curvatura,
- 3) estar perpendicular al bandeo de densidad,
- 4) presentar la menor erosión posible, y

5) no presentar sobre-crecimiento de coral u otras imperfecciones en la macroarquitectura del bandeado



**Figura 6.** Imagen de la radiografía del coral Col1\_laja1\_sec2. Se presenta el área de estudio (banda amarilla) sobre el eje principal de crecimiento, se aprecia el bandeado de densidad con bandas hialina (baja densidad) y oscura (alta densidad).

Una vez que se tomaron en cuenta estas características en las lajas de coral, se delimitaron tres áreas distintas en cada una de ellas (Figura 7), obteniendo un total de 9 áreas de estudio para cada una de las colonias (tabla 1).

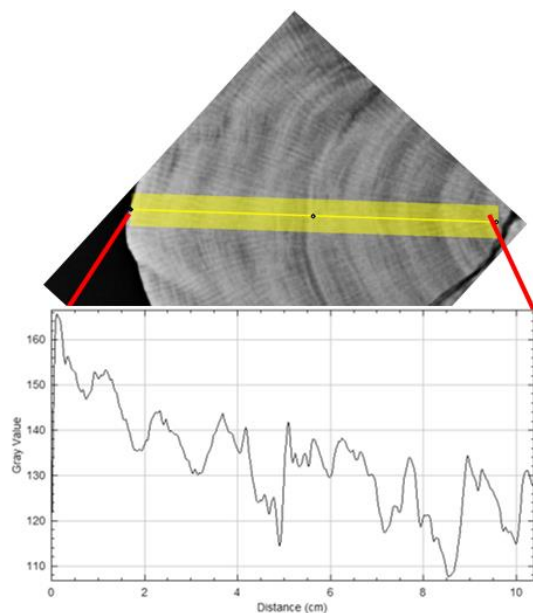


**Figura 7.** Imagen de la radiografía del coral Col1\_laja2. Se presenta el área de estudio (banda amarilla) de la sección 1, 2 y 3.

**Tabla 1.** ID de las colonias de *P. lutea* recolectadas en la Isla Socorro (Ejemplo Colonia 1, laja 1, Sección 1)

| ID_Colonia 1    | ID_Colonia 2    | ID_Colonia 2    |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Col1_laja1_sec1 | Col2_laja1_sec1 | Col3_laja1_sec1 |
| Col1_laja1_sec2 | Col2_laja1_sec2 | Col3_laja1_sec2 |
| Col1_laja1_sec3 | Col2_laja1_sec3 | Col3_laja1_sec3 |
| Col1_laja2_sec1 | Col2_laja2_sec1 | Col3_laja2_sec1 |
| Col1_laja2_sec2 | Col2_laja2_sec2 | Col3_laja2_sec2 |
| Col1_laja2_sec3 | Col2_laja2_sec3 | Col3_laja2_sec3 |
| Col1_laja3_sec1 | Col2_laja3_sec1 | Col3_laja3_sec1 |
| Col1_laja3_sec2 | Col2_laja3_sec2 | Col3_laja3_sec2 |
| Col1_laja3_sec3 | Col2_laja3_sec3 | Col3_laja3_sec3 |

Basado en la información proporcionada previamente, se generó un perfil de densidad óptica en el que se asignó un valor de escala de grises a cada píxel a lo largo del recorrido de medición (Figura 8). Se efectuaron mediciones del grosor de la lámina en cada centímetro a lo largo de este perfil de densidad utilizando un micrómetro digital. Esto permitió obtener un grosor de lámina continuo para cada píxel del perfil. Posteriormente, se llevó a cabo una interpolación de los valores a través de una regresión lineal entre los intervalos medidos.

**Figura 8.** Imagen del perfil de densidad óptica en un transecto extraído de una laja de *Porites lutea*

Se establece la siguiente relación, cuando la exposición (energía de rayos X y tiempo de exposición) de una laja de coral fue igual al estándar de aragonita en una misma radiografía.

$$P_{\text{coral}} * X_{\text{coral}} = P_{\text{estándar}} * X_{\text{estándar}} \quad (2)$$

Así la densidad del coral ( $P_{\text{coral}}$ ) y su grosor ( $X_{\text{coral}}$ ) son equivalentes a la densidad ( $P_{\text{estándar}}$ ) y grosor del estándar ( $X_{\text{estándar}}$ ), lo cual nos permite conocer la densidad del coral:

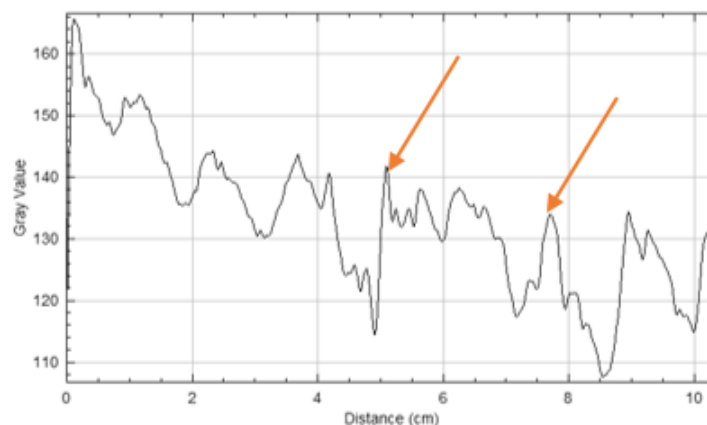
$$P_{\text{coral}} = P_{\text{estándar}} * X_{\text{estándar}} / X_{\text{coral}} \quad (3)$$

Combinando la ecuación 3 y 1 del ajuste de la escala de gris, se obtiene una ecuación que permite calcular la densidad del esqueleto para las lajas de coral:

$$P_{\text{coral}} = [(\ln DO - b) / a] / X_{\text{coral}} \quad (3)$$

### 2.4.3 Densidad anual del esqueleto

La densidad anual del esqueleto se calculó a partir de los resultados de densidad efectiva a lo largo de los transectos. Se asumió que un año de crecimiento coralino correspondía a un par de bandas de diferente densidad, es decir, desde un valle hasta el siguiente en el perfil de densidad óptica (Figura 9). Los datos presentados en este estudio se basan en la información recopilada en el año inmediatamente anterior a la toma de muestras (Lough & Barnes, 2000).

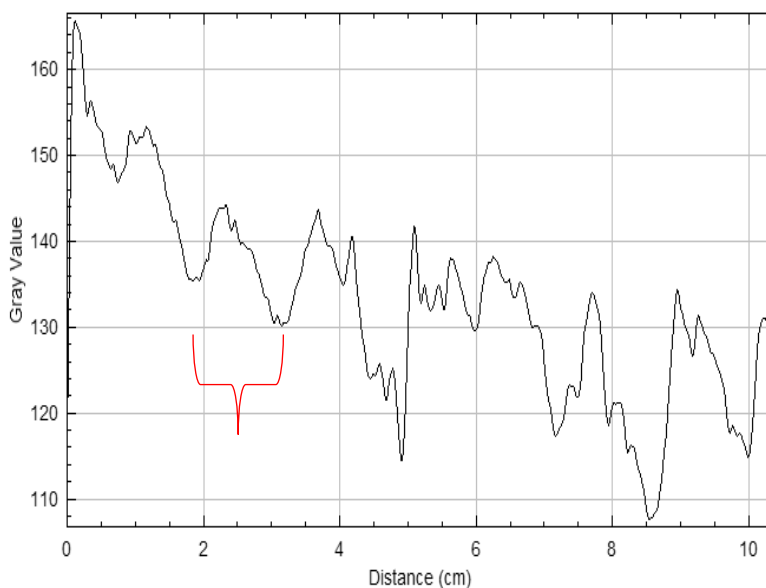


**Figura 9.** Perfil de valores de gris y distancia, las fechas muestra el año correspondiente de crecimiento coralino



## 2.5 Tasa de extensión lineal

Para calcular la tasa de extensión, se utilizarán los perfiles de densidad del esqueleto previamente mencionados. En estos perfiles, se identificarán los picos de alta y baja densidad, los cuales corresponden a las bandas de mayor y menor densidad del esqueleto. Siguiendo el enfoque propuesto por (Knutson et al., 1972), al medir la distancia entre cada par de picos con la misma densidad, se puede estimar el crecimiento aproximado de la colonia durante un año (Figura 10).



**Figura 10.** Perfil de densidad óptica y extensión de laja de *P. lutea*. El corchete indica aproximadamente un año de crecimiento y las líneas punteadas indican las distancias que se tomaron en cuenta para determinar la extensión anual.

### 2.5.1 Tasa de calcificación

La tasa de calcificación se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Calcificación} = \pi_i * \text{Ex}_i \quad (3)$$

Dónde:

$\pi_i$  = es la densidad anual del esqueleto

$\text{Ex}_i$  = es el valor de la extensión lineal del coral al año.



## 2.6 Análisis de series de tiempo de variables ambientales

Se llevó a cabo un análisis de series temporales de variables ambientales con el propósito de determinar si las condiciones del entorno cercano a la Isla Socorro tenían algún efecto significativo sobre las características esclerocronológicas medidas en el estudio. Se recopilaron datos de dos variables ambientales importantes: la temperatura de la superficie del mar (TSM) y la concentración de clorofila a ( $\text{Chl a}$   $\text{g cm}^{-3}$ ). Estos datos se obtuvieron a través de plataforma de datos satelitales Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) cubriendo el período de enero de 2017 hasta enero de 2023.

Los datos satelitales recolectados fueron promedios mensuales y con una resolución espacial de 4 km. Esto nos permitió evaluar de manera detallada los cambios en estas variables ambientales a lo largo del tiempo y su posible influencia en las características esclerocronológicas de *P. lutea* en la Isla Socorro.

## 2.7 Análisis estadísticos

Se llevó a cabo un análisis exploratorio de estos datos con los valores de las características esclerocronológicas. Esto involucró el cálculo de los promedios y desviaciones estándar de cada parámetro para las tres colonias. Posteriormente, se compararon las variables para evaluar las diferencias significativas en las características esclerocronológicas a lo largo de los años y observar si existe alguna tendencia.

Se llevó a cabo un análisis de varianza con el propósito de investigar la presencia de diferencias estadísticamente significativas entre las características esclerocronológicas. En este análisis, se consideraron los años de estudio como el factor de diferenciación. Sin embargo, al verificar el supuesto de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Bartlett, se obtuvo un resultado que las variables no cumplían con dicho supuesto. Debido a esta falta de homogeneidad en las varianzas, se optó por realizar una prueba de Kruskal Wallis, una técnica adecuada para datos no paramétricos. Posteriormente, se efectuó un análisis post hoc utilizando la prueba de Dunn, con la corrección de Bonferroni, con el fin de identificar los años en los que se presentaban diferencias significativas.

A continuación, se llevó a cabo un análisis de regresión lineal simple con los datos de las tres colonias en conjunto, explorando las relaciones entre las características esclerocronológicas, la tasa de extensión (TE),

la densidad del esqueleto (DE) y la tasa de calcificación (TC) (Tabla 2). Cada análisis consistió en ajustar un modelo de regresión lineal simple y posteriormente se calcularon los coeficientes de regresión, así como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para evaluar la calidad del ajuste del modelo. Se llevaron a cabo pruebas de hipótesis para evaluar la significancia estadística de los coeficientes de regresión, así como el cumplimiento de los supuestos.

**Tabla 2.** Regresiones lineales simples entre las características esclerocronológicas de los corales. Tasa de extensión (TE), densidad del esqueleto (DE), tasa calcificación (TC).

| Variable independiente | Variable dependiente |
|------------------------|----------------------|
| TE                     | DE                   |
| TE                     | TC                   |
| DE                     | TC                   |

### 2.7.1 Relación de las características esclerocronológicas con la TSM y la concentración de Clorofila a

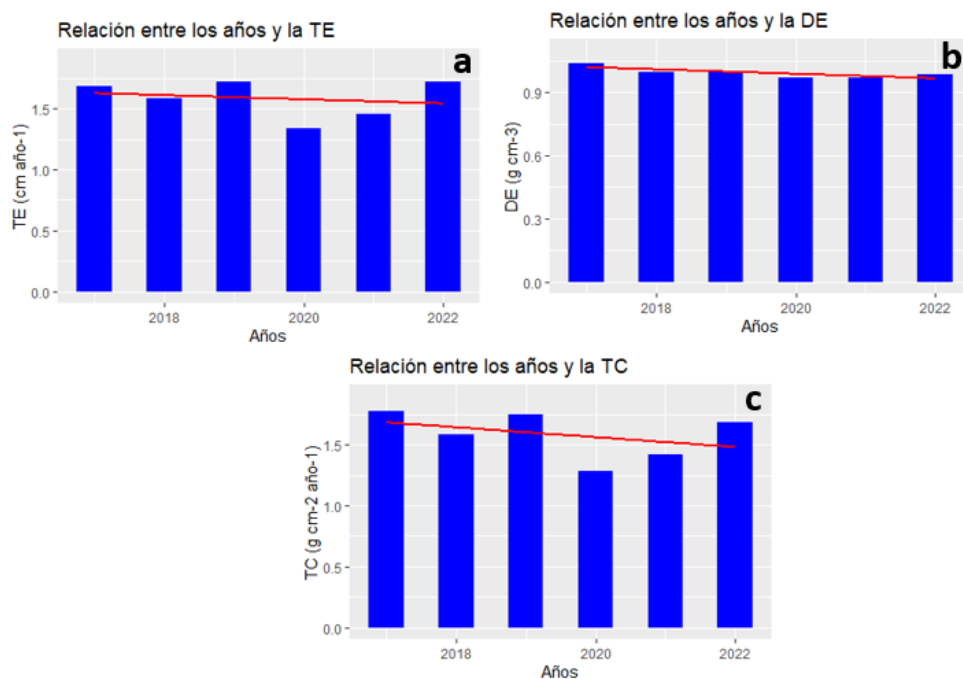
Para determinar si existe una relación en el tiempo entre las características esclerocronológicas y las variables ambientales, se llevaron a cabo análisis de regresión no paramétricos, debido a que las variables no presentan una distribución normal y tampoco una relación lineal. En este análisis, se consideraron las características de tasa de extensión (TE), densidad del esqueleto (DE) y tasa de calcificación (TC) como variables dependientes, mientras que las variables independientes incluyeron TSM y Cla. Se ajustó el modelo de regresión lineal más adecuado para las variables y posteriormente se calcularon los coeficientes de regresión, así como el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) para evaluar la calidad del ajuste del modelo. Además, se llevaron a cabo pruebas de hipótesis para evaluar la significancia estadística de los coeficientes de regresión. Adicionalmente, se realizaron análisis de correlación de Spearman entre las variables, para conocer si estas aumentan o disminuyen juntas. De igual forma se realizó un análisis de correlación cruzada, esta técnica nos permitió explorar las relaciones entre las características esclerocronológicas y los factores ambientales, incluso si estas no varían juntas, si no que existe un desfase o efecto retardado en la relación de estas variables.

## Capítulo 3. Resultados

Se obtuvieron los valores de las características esclerocronológicas de las tres colonias recolectadas de *Porites lutea*. Estos datos abarcan un periodo de seis años (2017-2022). Las colonias tuvieron entre cinco y seis años de crecimiento, dos colonias de 2017-2022 y una de 2018-2022. Los valores de las características fueron, para la tasa de extensión  $TE= 1.54\pm 0.71\text{cm año}^{-1}$ , la densidad del esqueleto  $DE=0.98\pm 0.09\text{ g cm}^{-3}$ , y la tasa de calcificación  $TC=1.54\pm 0.77\text{ g cm}^{-2}\text{ año}^{-1}$ .

### 3.1 Características esclerocronológicas

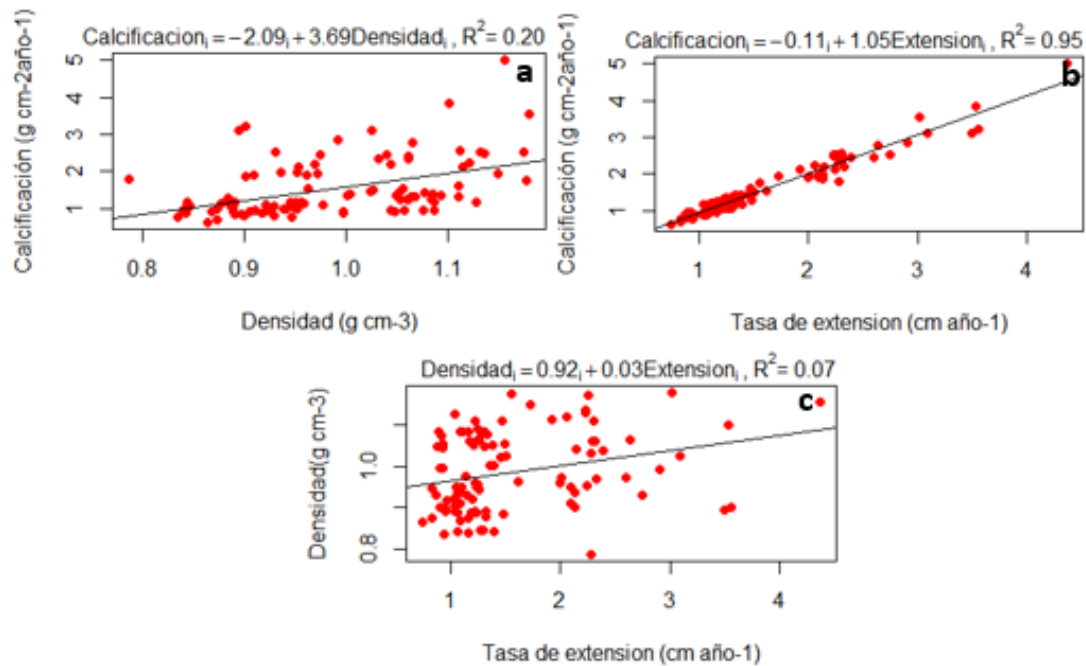
Se llevó a cabo un análisis de Kruskal-Wallis para encontrar posibles diferencias significativas en las características esclerocronológicas de las colonias a lo largo de los años de estudio, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los años para estas características. Se observaron las tendencias en los promedios de las características esclerocronológicas desde el año 2017 hasta el 2022, y se encontró una reducción del 3.8% en la TE y un aumento del 5.1% en la DE y del 8.7% en la TC (Figura 11).



**Figura 11.** Relación entre las características esclerocronológicas y los años de estudio. a) TE y años b) DE y años, c) TC y años

### 3.2 Relación entre las características esclerocronológicas

El análisis de regresión lineal simple entre las características esclerocronológicas de las tres colonias, reveló una tendencia lineal positiva en todos los casos. Tasa de calcificación vs densidad ( $R^2 = 0.20$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 101$ ), tasa de calcificación vs tasa de extensión ( $R^2 = 0.95$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 101$ ) y densidad vs tasa de extensión ( $R^2 = 0.07$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 101$ ). (Figura 12).



**Figura 12.** Regresión lineal simple entre las características esclerocronológicas de las colonias. a) Calcificación vs Densidad, b) Calcificación vs extensión y c) Densidad vs extensión

### 3.3 Relación entre las características esclerocronológicas, la TSM y la Clorofila

**a**

Se llevó a cabo un análisis de la relación entre las características esclerocronológicas y las variaciones en la temperatura de la superficie del mar (TSM) y la concentración de Clorofila a ( $Cl_a$ ). Esto se llevó a cabo mediante regresiones no paramétricas. Dando como resultado que únicamente la DE tiene una relación significativa con TSM y con la  $Cl_a$ , siendo positiva en los dos casos. No obstante, a pesar de ser significativo, el coeficiente de determinación  $r^2$  es pequeño, en el caso de TSM explica el 18% de la variación de la DE, y la  $Cl_a$  únicamente explica el 2% (Tabla 3).

**Tabla 3.** Regresión no paramétrica de la TE, DE y TC vs TSM y Cla. En rojo los valores no significativos

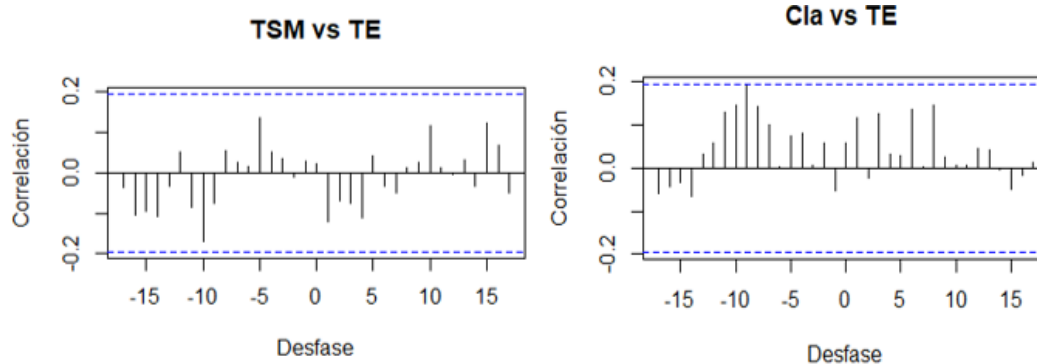
| Modelo    | p-valor   | Intercepto | r <sup>2</sup> |
|-----------|-----------|------------|----------------|
| TE vs TSM | p = 0.572 | 1.554      | 0.002          |
| TE vs Cla | p=0.572   | 1.5548     | -0.006         |
| DE vs TSM | p=0.0009  | 0.9862     | 0.188          |
| DE vs Cla | p = 0.047 | 0.9862     | 0.029          |
| TC vs TSM | p = 0.222 | 1.5462     | 0.034          |
| TC vs Cla | p=0.924   | 1.5463     | -0.010         |

Se realizaron análisis de correlación de Spearman entre las características esclerocronológicas de las colonias, y los parámetros ambientales TSM y Cla (Tabla 4), sin embargo, las correlaciones fueron muy bajas en todos los casos, por lo que podemos asumir que estas variables no están asociadas en el tiempo.

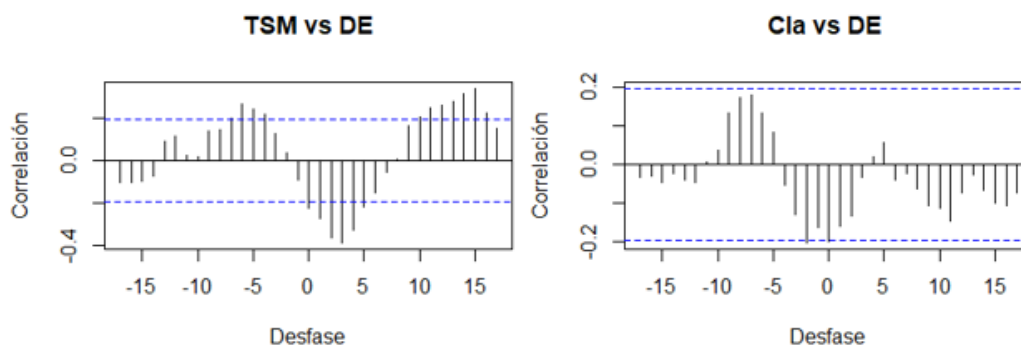
**Tabla 4.** Tabla de correlación de Spearman entre las características esclerocronológicas y los parámetros ambientales

| Variables | Correlación de Spearman |
|-----------|-------------------------|
| TE vs TSM | -0.098                  |
| TE vs Cla | 0.143                   |
| DE vs TSM | -0.295                  |
| DE vs Cla | -0.113                  |
| TC vs TSM | -0.177                  |
| TC vs Cla | 0.106                   |

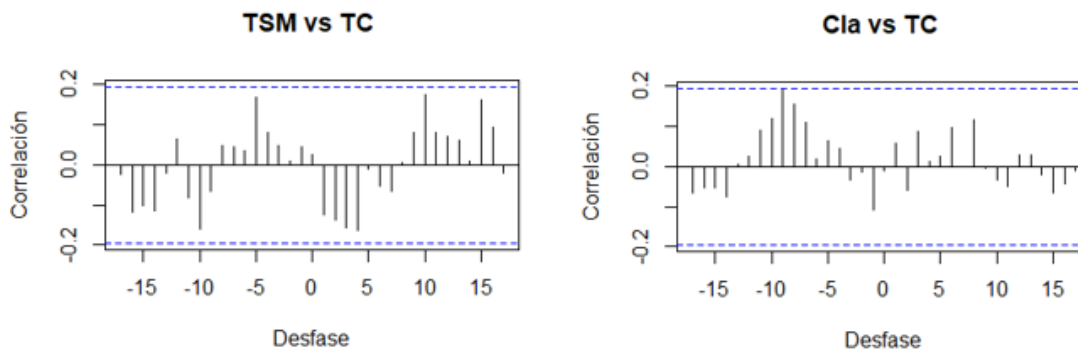
Posteriormente se realizó análisis de correlación cruzada, entre las variables de crecimiento coralino y las ambientales. Sin embargo, se encontró que, en la mayoría de las variables los valores de autocorrelación fueron muy cercanos a 0, lo que indica que la correlación es débil o nula entre las variables (Figuras 13 y 15). Únicamente la DE, tuvo valores de correlación significativos en 3 de los 17 desfases del análisis, al relacionarla con la TSM, teniendo valores negativos para el desfase 2 y 3, un valor positivo para el desfase 15 (Figura 14). Los valores negativos sugieren que cuando la TSM aumenta, la DE tiende a disminuir en 2 y 3 periodos posteriores, o dicho de otra manera tienen un retraso de tiempo. El valor positivo por otro lado indica que al aumentar la TSM, la DE tiende a aumentar en 15 periodos posteriores. Sin embargo, la correlación no implica causalidad, por lo que podrían ser otros factores los que estén afectando a la variabilidad de la DE.



**Figura 13.** Análisis de correlación cruzada de TSM vs TE



**Figura 14.** Análisis de correlación cruzada de la DE y los parámetros ambientales TSM y Cla



**Figura 15.** Análisis de correlación cruzada de la DE y los parámetros ambientales TSM y Cla

## Capítulo 4. Discusión

---

El hallazgo de que las colonias de coral *Porites lutea*, recolectadas en Revillagigedo tenían entre 5 y 6 años de edad esclarece las circunstancias de nuestro estudio. En comparación con la longevidad conocida de *P. lutea*, que puede superar los 500 años en entornos como la isla de Ta'u en la Samoa Americana (Coward et al., 2020) y la Gran Barrera de Coral en Australia (Lough & Barnes, 1997), las colonias seleccionadas para nuestro análisis eran muy jóvenes. Las características esclerocronológicas de los corales tenían una relación con tendencia negativa con el tiempo, evidenciando una influencia de la edad en las variaciones de crecimiento del coral. Sin embargo, nuestros resultados no mostraron una relación definida de las características esclerocronológicas y la edad de los corales, contrario con a la observación de Lough & Barnes (1997) en la Gran Barrera de Coral. Sin embargo, es importante destacar que su estudio incluyó corales de edades avanzadas, con un promedio de más de 100 años y un análisis promediado en intervalos de 10 años en las bandas de crecimiento, lo que dificulta la comparación directa con nuestro estudio.

El estudio de Lough (2008) en tres arrecifes de la sección central del GBR en especies de *Porites* masivas abarcó desde 1961 hasta 2005, y señalando que la edad de los corales tuvo un efecto significativo en la disminución de la extensión lineal, la calcificación y la densidad del esqueleto, especialmente en uno de los tres de los arrecifes estudiados. Este decrecimiento podría estar relacionado con el aumento de la TSM, por el ejemplo en Carricart-Ganivet et al. (2012) se registró un aumento de 0.4°C en el intervalo 1989 a 2002 equivalente a 2.9°C por siglo en la región de la GBR.

Por otro lado, nuestro estudio coincide con Kang et al. (2021), que analizó colonias de *Porites* masivas de entre 100 y 200 años en arrecifes del mar del sur de China. En este estudio se optó por tomar el promedio de los datos en períodos de 10 años para reducir el impacto de posibles influencias no deseadas o "ruido". Este enfoque resalta variaciones decadales, facilitando la identificación de tendencias más robustas en el crecimiento coralino. A diferencia de nuestros resultados en (Lough, 2008; Lough & Barnes, 1997), y (Kang et al., 2021) no se observaron efectos significativos de la edad en la tasa de extensión lineal o en la densidad esquelética.

Es importante resaltar que estos tres estudios realizaron promedios de las tasas de crecimiento de las colonias en intervalos de 10 años, lo que limita nuestra comprensión de cómo variaron en sus primeros 5 y 6 años de vida. Es importante tener en cuenta que nuestro estudio, al enfocarse en los primeros 5 años

de crecimiento, ofrece una visión única de la sensibilidad de las características esclerocronológicas de los corales a los cambios en el ambiente. Aunque la influencia de la edad en las características esclerocronológicas no es visible en nuestros corales a medida que aumenta la longevidad del coral, la interacción compleja con otros factores ambientales subraya la necesidad de investigaciones más detalladas para comprender plenamente las dinámicas del crecimiento coralino en diferentes etapas de su vida.

### Características esclerocronológicas

**Tabla 5.** Características esclerocronológicas de *Porites* en distintas regiones del mundo. Modificada de Ong et al., 2022

| Localización del arrecife  | Años      | Tasa de extensión lineal $\text{cm año}^{-1}$ | Tasa de calcificación $\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ | Densidad esqueleto $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ |
|--|-----------|---|--|---|
| Revillagigedo  | 2018-2023 | $1.56 \pm 0.71$                               | $1.54 \pm 0.77$  | $0.98 \pm 0.09$                               |
| Pulau Tinggi (Ong et al., 2022)  | 2005-2014 | $2.18 \pm 0.04$                               | $2.46 \pm 0.05$  | $1.14 \pm 0.01$                               |
| Pulau Tioman (Tanzil et al., 2013)   | 1980-2010 | $1.72 \pm 0.30$                               | $2.24 \pm 0.23$  | $1.31 \pm 0.13$                               |
| Pulau Redang (Tanzil et al., 2013)   | 1980-2010 | $1.97 \pm 0.22$                               | $2.32 \pm 0.22$  | $1.19 \pm 0.06$                               |
| Singapore (Tanzil et al., 2013)  | 1980-2010 | $1.66 \pm 0.45$                               | $1.71 \pm 0.33$  | $1.13 \pm 0.28$                               |
| Phuket, Tailandia (Tanzil et al., 2013)  | 1980-2010 | $2.08 \pm 0.38$                               | $2.29 \pm 0.29$  | $1.12 \pm 0.14$                               |
| Gran Barrera de Coral (Lough & Barnes, 1997)   | 1934-1982 | $1.48 \pm 0.32$                               | $1.72 \pm 0.36$  | $1.17 \pm 0.10$                               |
| Gran Barrera de Coral (Lough & Barnes, 2000)   | 1979-1986 | $1.28 \pm 0.16$                               | $1.63 \pm 0.38$  | $1.29 \pm 0.34$                               |
| Mar de China (Kang et al., 2021)   | 1847–2014 | 0.32 a 2.56                                   | 1.40   | 0.93 a 1.90                                   |
| La Paz, Golfo de California (Cabral-Tena et al., 2013; Norzagaray-López et al., 2015). | 2009-2013 | 0.4-0.81                                      | 0.36-1   | 0.93-1.3                                      |
| Isla Isabel, Pacífico mexicano (Tortolero-Langarica et al., 2016)                      | 2008-2013 | $0.47 \pm 0.23$                               | $0.51 \pm 0.26$  | $1.08 \pm 0.14$                               |



En las características esclerocronológicas de las colonias de *P. lutea* en Revillagigedo, se observa que las tasas de extensión (TE) y calcificación (TC) se encuentran dentro de los rangos previamente documentados para *P. lutea* en diversas regiones del mundo (Ong et al., 2022) (TE = 0.37–2.18 cm año<sup>-1</sup>, DE = 1.12–1.49 g cm<sup>3</sup> y TC = 0.55–2.46 g cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). No obstante, se destaca que la densidad esquelética (DE) registrada en Revillagigedo es la más baja reportada hasta la fecha para esta especie en dichas localidades, con un valor de (DE = 0.98 ± 0.09 g·cm<sup>3</sup>) (Tabla 5).

Existe una falta de registros sobre las características esclerocronológicas de *P. lutea* en el Pacífico mexicano, debido que se encuentra únicamente en el PN Revillagigedo, lo que puede afectar la precisión de la comparación con localidades más distantes debido a las variaciones en las condiciones oceanográficas. Por otro lado, en el Pacífico mexicano, se cuenta con datos sobre las características esclerocronológicas de especies, como *P. panamensis*, la cual ha sido más estudiada en la región. Para *P. panamensis*, se han registrado valores en TE= 0.4-0.81 cm año<sup>-1</sup>, DE=0.93-1.3 g cm<sup>3</sup> y TC=0.36-1 g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> (Cabral-Tena et al., 2013; Norzagaray-López et al., 2015). Al comparar estos datos con los obtenidos para *P. lutea* en PN Revillagigedo, se evidencia que los valores son notablemente más altos para *P. lutea*. Sin embargo, no es factible realizar una comparación directa de las características esclerocronológicas de *P. panamensis* en Revillagigedo, ya que no existen estudios esclerocronológicos sobre esta especie en dicha ubicación, donde se considera que el ambiente es óptimo para su crecimiento.

Se compararon los hallazgos obtenidos para *Porites lutea* en PN Revillagigedo con los resultados de un estudio esclerocronológico realizado en *P. lobata* en la Isla Isabel, ubicada en el Pacífico mexicano, frente a las costas de Nayarit (Tortolero-Langarica et al., 2016) En el estudio de la isla Isabel, se encontró que las características esclerocronológicas medias para *P. lobata* fueron TE= 0.47±0.23 cm año<sup>-1</sup>, DE=1.08±0.14 g cm<sup>3</sup> y TC=0.51±0.26 g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Se observó que *P. lobata* en la isla Isabel tiende a dirigir sus recursos hacia la formación de corales más densos y menos extensos, contrastando con los hallazgos para *P. lutea*, en el presente estudio, así como en la Gran Barrera de Coral, China y Tailandia, donde los recursos se destinan más a la extensión que a la densidad de las colonias (Kang et al., 2021; Lough & Barnes, 2000; Ong et al., 2022)

Se compararon los resultados de este estudio con los obtenidos para *P. lobata* en China, en la Isla Hainan, China, (Su et al., 2016) donde se registraron valores esclerocronológicos diferentes, con TE= 1.62±0.30 cm año<sup>-1</sup>, DE=1.06 ±0.14 g cm<sup>3</sup> y TC=1.68±0.25 g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Estos valores contrastan con lo reportado para *P. lobata* en el Pacífico mexicano, ya que son claramente más altos en todos los aspectos.

En estudios como el de la Gran Barrera de Coral para las especies de *Porites* (Lough & Barnes, 2000), se consideró que no existía una diferencia significativa entre las características esclerocronológicas de *P. lobata* y *P. lutea*. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos de las características esclerocronológicas de *P. lobata* en el Pacífico mexicano con los obtenidos para *P. lutea* en las islas de Revillagigedo, si se observó una diferencia. En Revillagigedo, las características esclerocronológicas registradas para *P. lutea* fueron notablemente más altas en comparación con *P. lobata* estudiada en el Pacífico mexicano (Tortolero-Langarica et al., 2016). Esta disparidad puede atribuirse posiblemente a las características oceanográficas específicas que rodean a las islas de Revillagigedo, creando un entorno que parece ser óptimo para el crecimiento de los corales y resultando en valores de las características esclerocronológicas más elevados en esta región, tales como, la presencia de ondas internas generadoras de alta frecuencia de variabilidad térmica, llegando a variar hasta 7 °C durante el día (Carter et al., 2020), promoviendo la resistencia de los corales al estrés térmico, así como la variabilidad causada por ciclones tropicales teniendo un impacto en el enfriamiento en la TSM durante el período más cálido del año, así como el impacto limitado de estresores antropogénicos directos (Carter et al., 2020).

#### **Aumento y disminución de las características esclerocronológicas en el tiempo**

En los resultados de este estudio pudimos observar que entre 2017 y 2022 hubo una ligera reducción de la TE, y un ligero aumento en DE y TC. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre ninguno de los años. Por lo tanto, podemos inferir que las características esclerocronológicas de los corales en la zona de estudio se han mantenido prácticamente constantes durante estos 6 años.

Nuestros resultados coinciden con el estudio de Tortolero-Langarica et al. (2017), en el Pacífico mexicano donde no identificaron tendencias en los parámetros de crecimiento de *P. panamensis* en las Islas Marietas, México. Por su parte Kourandeh et al. (2018) reportan un ligero aumento en la TC de *P. lobata* en un periodo de 30 años en Tailandia, sin embargo, la tendencia no es muy clara. En cambio, Trejo, (2020) observó una reducción anual del ~4.3% en la TC de *P. panamensis* en Bahía de los Ángeles, junto con una disminución anual del ~2.1% en TE en los 16 años analizados, y Tanzil et al. (2009) encontraron reducciones anuales del 1.1% en TE y TC en *P. lutea* en Tailandia en 21 años. Cooper et al. (2008) señalaron una disminución anual del ~1% en TE en *Porites* sp. de arrecifes australianos durante 15 años. Sin embargo, la TC y TE disminuyeron cuatro y dos veces más, respectivamente, en un periodo de tiempo similar (15 a 21 años).

Es importante destacar que estos hallazgos resaltan la sensibilidad de las características esclerocronológicas de los corales, ya que estos autores atribuyen estas disminuciones a las variaciones térmicas del mar. Esto respalda la necesidad de monitoreo continuo para comprender mejor las dinámicas de respuesta de los corales a las condiciones ambientales cambiantes.

### **Relación entre las características esclerocronológicas**

Las características esclerocronológicas de *P. lutea* en Revillagigedo revelan una relación positiva y significativa, indicando que el aumento en la densidad está asociado con un incremento en la tasa de calcificación, explicando aproximadamente el 20% de la variación. Además, se observa que el aumento en la tasa de extensión guarda una relación positiva con el aumento en la tasa de calcificación, explicando el 95% de la variación. Este hallazgo sugiere que la variación en la tasa de calcificación está estrechamente vinculada al cambio en la tasa de extensión.

Estos resultados respaldan las tendencias observadas en los valores esclerocronológicos del género *Porites* en otros estudios, donde una tasa de extensión alta se asocia con una elevada tasa de calcificación. En consecuencia, se podría inferir que esta *P. lutea* tiende a asignar sus recursos preferentemente a la extensión en lugar de la formación de esqueletos más densos como lo observado en otras especies de *Porites* (Cabral-Tena et al., 2013; Kang et al., 2021; Lough & Barnes, 2000; Ong et al., 2022)

En el estudio de Carricart-Ganivet (2004), se observó que las especies de *Porites* masivas y *Montastraea* exhiben estrategias de crecimiento distintas. En el caso de *Porites*, se evidenció que la inversión en calcificación se dirige hacia la extensión, y las colonias con esqueletos más densos tienden a tener tasas de calcificación más bajas. En cambio, *Montastraea* canaliza sus recursos hacia la formación de esqueletos más densos. Este hallazgo confirma lo observado en *P. lutea* en Revillagigedo y respalda informes previos sobre *Porites panamensis* en la tesis de Trejo (2020), así como también en especies de *Porites* en el Pacífico mexicano según los de estudios Cabral-Tena et al., (2013; Medellín-Maldonado et al., (2016); Tortolero-Langarica et al., (2017)

En el estudio realizado en la Gran Barrera Arrecifal (Lough & Barnes, 2000), se identificó una relación entre la calcificación y la tasa de extensión. Aunque la densidad del esqueleto se utiliza en el cálculo de la tasa de calcificación, no se encontró una relación significativa con la densidad esquelética, indicando que las variaciones en la tasa de calcificación están principalmente influenciadas por los cambios en la tasa de

extensión. En este contexto, la tasa de extensión y la densidad esquelética mostraron una relación positiva, aunque débil, con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.07$ .

En contraste, estudios anteriores realizados en la Gran Barrera Arrecifal (Lough & Barnes, 1997; Scoffin et al., 1992) encontraron una correlación significativa e inversa entre la tasa de extensión y la densidad esquelética, con un coeficiente de correlación  $r = -0.47$ . Estos resultados respaldan la idea de que las variaciones en la densidad esquelética resultan de cambios en el engrosamiento aplicado a los depósitos iniciales responsables de la extensión, ya que una mayor tasa de extensión permite menos tiempo para el engrosamiento, asumiendo que no hay cambios significativos en el grosor del tejido.

Sin embargo, es importante destacar que, en los corales de Revillagigedo, la relación entre la tasa de extensión y la densidad esquelética es positiva pero muy baja, lo que sugiere diferencias en la dinámica de crecimiento en comparación con otras regiones, como en la Gran Barrera Arrecifal.

#### **TSM, *Chl a* y su influencia global en las características esclerocronológicas de *Porites***

El rango de TSM en Revillagigedo durante los años 2017-2022, fue de 24.46° C -29.71 °C, siendo el 2017 el año con el promedio más bajo y 2020 el promedio más alto. Las regresiones lineales no paramétricas arrojaron que la DE está relacionada de manera positiva con la TSM por lo que al aumentar la TSM, la densidad tiende a aumentar. Inferiéndose que a mayor temperatura los esqueletos serán más densos. De igual forma la DE tiene una relación positiva con la *Chl a*, por lo que al aumentar la concentración de clorofila *a*, la DE tiende a disminuir. Sin embargo, la TSM solo explica en 18% de la variabilidad de la densidad y la clorofila *a* únicamente el 2%, por lo que se puede inferir que existen otros factores que podrían estar afectando la variación en la densidad del esqueleto en *P. lutea* en Revillagigedo.

Los resultados de las regresiones no paramétricas para TE y TC con respecto a la TSM y la *Chl a*, arrojaron que no tienen una relación significativa entre ellas, por lo que podemos inferir que la TSM y la *Chl a* no influyen en la variabilidad de la TE y la TC, en la zona de estudio. Estos resultados contrastan con lo reportado por Trejo (2020) que observó una reducción del 34% en la TE y 69% de la TC en el periodo evaluado (16 años) las cuales coincidieron con las anomalías positivas en la TSM a partir del año 2014 en BLA. De igual forma contrastan con otros estudios realizados con *Porites spp.* en los cuales se observa que la TE y TC disminuye cuando la TSM aumenta (Tanzil et al., 2009).

En el estudio de realizado por Carricart-Ganivet et al. (2012) en especies masivas de *Porites* en la Gran Barrera de Coral, se encontró que la tasa de calcificación está relacionada de manera negativa con la TSM, lugar que ha registrado una tendencia de aumento de la TSM de 0.4°C durante un intervalo de 13 años de 1989 a 2002, provocando una disminución de la tasa de calcificación de alrededor del 20%. Este resultado es similar al realizado en *Porites* spp. en dos localidades de la GBR, el cual tuvo una disminución del 21% en la calcificación, en el periodo de 1988 a 2003, atribuyendo la disminución al estrés térmico provocado por el aumento en la TSM (Cooper et al., 2008).

Por el contrario, Lough & Barnes (1997) informaron de una relación positiva entre la TSM y la tasa de calcificación de *Porites* spp. que crecieron en la GBR entre 1906 y 1982, aumentando su tasa de calcificación 0.33 g cm<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>, y de igual forma la TE aumentando 0.31cm al aumentar 1°C. Con este contraste obtenido en la GBR, se puede suponer que los impactos negativos sobre la tasa de calcificación debidos al estrés térmico inducido por el calentamiento oceánico comenzaron en la década de 1980 en la GBR.

Actualmente el cambio climático y específicamente el aumento en la temperatura superficial del mar, ha provocado eventos de blanqueamiento masivo en todo el mundo (Tanzil, 2012). En lo que respecta a la Gran Barrera Arrecifal, se ha señalado que el cambio climático es el factor principal impulsor del cambio (Hughes et al., 2018). En el año 2020, las anomalías prolongadas en las temperaturas de la superficie del mar, superaron los 2 °C en amplias regiones, dando lugar a una ola de calor marino que resultó en un extenso blanqueamiento coralino (Pratchett et al., 2020). Este episodio marcó el tercer evento masivo de blanqueamiento coralino en la GBR en cinco años, causando perturbaciones en los arrecifes de coral a nivel regional (Hughes et al., 2018). De igual forma en el Mar de China Meridional (Kang et al., 2021) destacaron los declives en las características esclerocronológicas de *Porites*, que consideran fueron provocados por el evidente aumento en el calentamiento del agua de mar en el último siglo, comenzando este cambio en la década de 1960.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

Las colonias del coral *P. Lutea* recolectadas en Revillagigedo mostraron pocos años de crecimiento en comparación con la longevidad conocida de esta especie. A pesar de su corta edad, se observó una leve variación en las características esclerocronológicas, a medida que avanzaba el proceso de envejecimiento del coral. Para obtener una comprensión más exhaustiva de este resultado, es necesario llevar a cabo estudios que involucren colonias de coral de mayor edad. Resulta crucial examinar cómo factores externos, como el aumento de la temperatura superficial del mar y los cambios en la química marina, podrían estar influyendo en el crecimiento de los corales de esta especie en las islas de Revillagigedo.

Las características esclerocronológicas de *P. lutea* en Revillagigedo se encuentran mayormente dentro de los rangos documentados para esta especie en el Indo-Pacífico, con la excepción de la densidad del esqueleto, que muestra un resultado más bajo. Se ha observado que el aumento en la tasa de calcificación está relacionado en un 95% con el incremento en la tasa de extensión, mientras que solo está vinculado en un 20% al aumento en la densidad del esqueleto. Estos hallazgos sugieren que la variación en la tasa de calcificación está más estrechamente asociada con los cambios en la tasa de extensión. Esto concuerda con lo observado en esta especie, ya que tiende a asignar recursos hacia la formación de corales más grandes, pero menos densos. Los corales de *P. lutea* parecen dirigir sus recursos hacia el crecimiento en tamaño, priorizando la extensión sobre la densidad del esqueleto, un patrón consistente con lo reportado para esta especie y para otras especies del género *Porites*.

Los valores de las características esclerocronológicas de *P. lutea*, son considerablemente más altos que los reportados para otras especies de *Porites* en el Pacífico mexicano, resultado que podría estar relacionado con las características oceanográficas locales, que favorecen al crecimiento coralino en las islas de Revillagigedo.

El aumento en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) ejerce un impacto significativo en el aumento de la densidad de los corales en un 18%, de manera local y no tiene relación con las variaciones en la tasa de extensión y la tasa de calcificación de los corales en isla Socorro. Sin embargo, basados en diversos estudios de crecimiento de *Porites* a nivel mundial donde el aumento en la temperatura superficial del mar está generando efectos adversos en su crecimiento, tal como el blanqueamiento coralino, es de suma importancia mantener un monitoreo continuo de estos arrecifes de coral, para evitar el deterioro de este ecosistema.

## Literatura citada

- Allemand, D., Tambutté, É., Zoccola, D., & Tambutté, S. (2011). Coral Calcification, Cells to Reefs. En Z. Dubinsky y N. Stambler (Eds.), *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. pp. 119–150. Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0114-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0114-4_9)
- Barnes, D. J., & Lough, J. M. (1993). On the nature and causes of density banding in massive coral skeletons. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 167(1), 91–108. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(93\)90186-R](https://doi.org/10.1016/0022-0981(93)90186-R)
- Bautista-Guerrero, E., Carballo, J. L., Cruz-Barraza, J. A., & Nava, H. (2011). New species of excavating sponges (Porifera: Demospongiae) on coral reefs from the Mexican Pacific Ocean. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 91(5), 999–1013. <https://doi.org/10.1017/S0025315410002079>
- Brattstrom, B. H. (1990). Brattstrom, B. H. (1990). Biogeography of the Islas Revillagigedo, Mexico. *Journal of Biogeography*, 17(2), 177–183. <https://doi.org/10.2307/2845325>
- Cabral-Tena, R., Reyes-Bonilla, H., Lluch-Cota, S., Paz-García, D., Calderón-Aguilera, L., Norzagaray-López, O., & Balart, E. (2013). Different calcification rates in males and females of the coral *Porites panamensis* in the Gulf of California. *Marine Ecology Progress Series*, 476, 1–8. <https://doi.org/10.3354/meps10269>
- Carricart-Ganivet, J. P. (2004). Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 302(2), 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.10.015>
- Carricart-Ganivet, J. P. (2007). Annual density banding in massive coral skeletons: Result of growth strategies to inhabit reefs with high microborers' activity? *Marine Biology*, 153(1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0780-3>
- Carricart-Ganivet, J. P., & Cupul-Magaña, A. L. (2016). Skeletal extension, density and calcification rates of massive free-living coral *Porites lobata* Dana, 1846. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 478, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.02.005>
- Carricart-Ganivet, J. P., Cabanillas-Terán, N., Cruz-Ortega, I., & Blanchon, P. (2012). Sensitivity of calcification to thermal stress varies among genera of massive reef-building corals. *PLoS ONE*, 7(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032859>
- Carter, A. L., Wilson, A. M. W., Bello, M., Hoyos-Padilla, E. M., Inall, M. E., Ketchum, J. T., Schurer, A., & Tudhope, A. W. (2020). Assessing opportunities to support coral reef climate change refugia in MPAs: A case study at the Revillagigedo Archipelago. *Marine Policy*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103769>
- Chalker, B., & Barnes, D. (1990). Gamma densitometry for the measurement of skeletal density. *Coral Reefs*, 9, 11–23. <https://doi.org/10.1007/BF00686717>

- Colombo-Pallotta, M. F., Rodríguez-Román, A., & Iglesias-Prieto, R. (2010). Calcification in bleached and unbleached *Montastraea faveolata*: Evaluating the role of oxygen and glycerol. *Coral Reefs*, 29(4), 899–907. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0638-x>
- Conanp-Semarnat (2019). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Archipiélago de Revillagigedo. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programas-de-manejo>
- Cooper, T. F., De’Ath, G., Fabricius, K. E., & Lough, J. M. (2008). Declining coral calcification in massive *Porites* in two nearshore regions of the northern Great Barrier Reef. *Global Change Biology*, 14(3), 529–538. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01520.x>
- Coward, G., Lawrence, A., Ripley, N., Brown, V., Sudek, M., Brown, E., Moffitt, I., Fuiava, B., & Vargas-Ángel, B. (2020). A new record for a massive *Porites* colony at Ta’u Island, American Samoa. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77776-7>
- Cruz-Piñón, G., Carricart-Ganivet, J. P., & Espinoza-Avalos, J. (2003). Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: Biological and environmental controls. *Marine Biology*, 143, 491–500. <https://doi.org/10.1007/s00227-003-1127-3>
- Fabricius, K. E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De’ath, G., Okazaki, R., Muehllehner, N., Glas, M. S., & Lough, J. M. (2011). Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change*, 1(3), 165–169. <https://doi.org/10.1038/nclimate1122>
- Flores-Palacios, A., Martínez Gómez, J. E., & Curry, R. L. (2009). La vegetación de Isla Socorro, Archipiélago de Revillagigedo, México. *Botanical Sciences*, 84, 13–23. <https://doi.org/10.17129/botsci.2288>
- García-Malo, C. (2020). *Características esclerocronológicas del coral Porites panamenisis (Scleractinia: Poritidae) en un sistema hidrotermal somero del Golfo de California* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3369>
- Guzmán, H. M., y Cortés, J. (1989). Growth Rates of Eight Species of Scleractinian Corals in the Eastern Pacific (Costa Rica). *Bulletin of Marine Science*, 44(3), 1186–1194. [https://www.researchgate.net/publication/233497416\\_Growth\\_Rates\\_of\\_Eight\\_Species\\_of\\_Scleractinian\\_Corals\\_in\\_the\\_Eastern\\_Pacific\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/233497416_Growth_Rates_of_Eight_Species_of_Scleractinian_Corals_in_the_Eastern_Pacific_Costa_Rica)
- Hernández-Aguilera, J. L., Toral-Almazán, R. E., Ruiz-Nuño, J. A., & Simões, N. (2023). Crustáceos estomatópodos y decápodos en 12 arrecifes coralinos del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 33(2). <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/1718>
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., & Hatziolos, M. E. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, 318(5857), 1737–1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>



- Hudson, J. H., Shinn, E. A., Halley, R. B., & Lidz, B. (1976). Sclerochronology: A tool for interpreting past environments. *Geology*, 4(6), 361–364. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1976\)4<361:SATFIP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4<361:SATFIP>2.0.CO;2)
- Kang, H., Chen, X., Deng, W., Wang, X., Cui, H., Liu, X., Cai, G., Zeng, T., Zhao, J. xin, & Wei, G. (2021). Skeletal Growth Response of *Porites* Coral to Long-Term Ocean Warming and Acidification in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(10). <https://doi.org/10.1029/2021JG006423>
- Kesler, W. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific. A Review Progress in Oceanography, 69(2–4), 181–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- Ketchum, J. T., & Bonilla, H. R. (2001). Taxonomía y distribución de los corales hermatípicos (Scleractinia) del Archipiélago de Revillagigedo, México. *Revista de Biología Tropical*, 49(3–4) [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442001000300001](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442001000300001)
- Knowlton, N., Weil, E., Weigt, L. A., & Guzmán, H. M. (1992). Sibling species in *Montastraea annularis*, coral bleaching, and the coral climate record. *Science*, 255(5042), 330–333. <https://doi.org/10.1126/science.255.5042.330>
- Knutson, D. W., Buddemeier, R. W., & Smith, S. V. (1972). Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. *Science*, 177(4045), 270–272. <https://doi.org/10.1126/science.177.4045.270>
- Kourandeh, M. B., Nabavi, S. M. B., Shokri, M. R., & Ghanemi, K. (2018). Variation in skeletal extension, density and calcification of the Scleractinian coral *Porites lobate* across the northern Persian Gulf. *Regional Studies in Marine Science*, 24, 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.09.013>
- Lough, J. M. (2008). Coral calcification from skeletal records revisited. *Marine Ecology Progress Series*, 373, 257–264. <https://doi.org/10.3354/meps07398>
- Lough, J. M., & Barnes, D. J. (2000). Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 245(2), 225–243. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(99\)00168-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(99)00168-9)
- Lough, J. M., y Barnes, D. J. (1997). Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: A proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 211, 29–67. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(96\)02710-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(96)02710-4)
- Lough, J. M., & Cooper, T. F. (2011). New insights from coral growth band studies in an era of rapid environmental change. *Earth-Science Reviews*, 108(3–4), 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.07.001>
- Lough, J. M., & Barnes, D. (1992). Comparisons of skeletal density variations in *Porites* from the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 155(1), 1–25. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(92\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0022-0981(92)90024-5)

- Marshall, A., & Clode, P. (2004). Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate and an azooxanthellate scleractinian reef coral. *Coral Reefs*, 23, 218–224. <https://doi.org/10.1007/s00338-004-0369-y>
- Marubini, F., & Atkinson, M. J. (1999). Effects of lowered pH and elevated nitrate on coral calcification. *Marine Ecology Progress Series*, 188, 117–121. <https://doi.org/10.3354/meps188117>
- McCulloch, M. T., D’Olivo, J. P., Falter, J., Holcomb, M., & Trotter, J. A. (2017). Coral calcification in a changing World and the interactive dynamics of pH and DIC upregulation. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms15686>
- Medellín-Maldonado, F., Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Chapa-Balcorta, C., & Zepeta-Vilchis, R. C. (2016). Calcification of the main reef-building coral species on the Pacific coast of southern Mexico. *Ciencias Marinas*, 42(3), 209–225. <https://doi.org/10.7773/cm.v42i3.2650>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), 215–233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Norzagaray-López, C. O., Calderón-Aguilera, L. E., Hernández-Ayón, J. M., Reyes-Bonilla, H., Carricart-Ganivet, J. P., Cabral-Tena, R. A., & Balart, E. F. (2015). Low calcification rates and calcium carbonate production in *Porites panamensis* at its northernmost geographic distribution. *Marine Ecology*, 36(4), 1244–1255. <https://doi.org/10.1111/maec.12227>
- Norzagaray-López. (2010). *Producción potencial de carbonato de calcio por Porites panamensis en dos comunidades arrecifales del Pacífico mexicano* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/774>
- Ong, C. K., Lee, J. N., & Tanzil, J. T. I. (2022). Skeletal growth rates in *Porites lutea* corals from Pulau Tinggi, Malaysia. *Water*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010038>
- Pandolfi, J. M., Connolly, S. R., Marshall, D. J., & Cohen, A. L. (2011). Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *Science*, 333(6041), 418–422. <https://doi.org/10.1126/science.1204794>
- Pratchett, M. S., McWilliam, M. J., & Riegl, B. (2020). Contrasting shifts in coral assemblages with increasing disturbances. *Coral Reefs*, 39, 783–793. <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01936-4>
- Quiñones, O. E., & Michel-Morfin, J. (2002). Distribution, density and length-weight relationship of *Chiton articulatus sowerby, 1832* (Mollusca-Polyplacophora) on Isla Socorro, Revillagigedo Archipelago, Mexico. *Journal of Shellfish Research*, 21, 239–241. <https://ipn.elsevierpure.com/en/publications/distribution-density-and-length-weight-relationship-of-chiton-art>
- Rasmusson, E. M., & Hall, J. M. (1983). El Niño: the great equatorial warming: Pacific Ocean event of 1982–1983. *Weatherwise*, 36(4), 166–176. <https://doi.org/10.1080/00431672.1983.9930138>

- Rendón. (2010). Crecimiento del coral *Porites astreoides* bajo distintos regímenes de temperatura [Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur]. Repositorio Institucional. <http://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/1880>
- Reyes Bonilla, H., Pérez Vivar, T. L., & Ketchum Mejía, J. T. (1999). Distribución geográfica y depredación de *Porites lobata* (Anthozoa: Scleractinia) en la costa occidental de México. *Revista de Biología Tropical*, 47(1–2), 273–279. <https://doi.org/10.15517/rbt.v47i1-2.19078>
- Risk, M. J., & Sammarco, P. W. (1991). Cross-shelf trends in skeletal density of the massive coral *Porites lobata* from the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 69(1/2), 195–200. <https://doi.org/10.3354/meps069195>
- Sammarco, P. W., Winter, A., & Stewart, J. C. (2006). Coefficient of variation of sea surface temperature (SST) as an indicator of coral bleaching. *Marine Biology*, 149(6), 1337–1344. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0318-0>
- Scoffin, T. P., Tudhope, A. W., Brown, B. E., Chansang, H., & Cheeney, R. F. (1992). Coral Reefs Patterns and possible environmental controls of skeletogenesis of *Porites lutea*, South Thailand. *Coral Reefs*, 11, 1–11. <https://doi.org/10.1007/BF00291929>
- Solís-Marín, F. A., Laguarda-Figueras, A., & Honey-Escandón, M. (2014). Biodiversidad de equinodermos (Echinodermata) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 441–449. <https://doi.org/10.7550/rmb.31805>
- Spalding, M., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press. <https://www.amazon.com/World-Atlas-Coral-Reefs-Spalding/dp/0520232550>
- Su, R., Lough, J., & Sun, D. (2016). Variations in massive *Porites* growth rates at Hainan Island, northern South China Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 546, 47–60. <https://doi.org/10.3354/meps11654>
- Tanzil, J. T. I. (2012). Bleaching susceptibility and growth characteristics of *Porites lutea* from the Andaman Sea, South Thailand. *Phuket Marine Biological Center Research Bulletin*, 71, 49–56. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/92851>
- Tanzil, J. T. I., Brown, B. E., Dunne, R. P., Lee, J. N., Kaandorp, J. A., & Todd, P. A. (2013). Regional decline in growth rates of massive *Porites* corals in Southeast Asia. *Global Change Biology*, 19(10), 3011–3023. <https://doi.org/10.1111/gcb.12279>
- Tanzil, J. T. I., Brown, B. E., Tudhope, A. W., & Dunne, R. P. (2009). Decline in skeletal growth of the coral *Porites lutea* from the Andaman Sea, South Thailand between 1984 and 2005. *Coral Reefs*, 28(2), 519–528. <https://doi.org/10.1007/s00338-008-0457-5>
- Taylor, R. B., Barnes, D. J., & Lough, J. M. (1993). Simple models of density band formation in massive corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 167(1), 109–125. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(93\)90187-S](https://doi.org/10.1016/0022-0981(93)90187-S)
- Tomascik, T., & Sander, F. (1985). Effects of eutrophication on reef-building corals. *Marine Biology*, 87(2), 143–155. <https://doi.org/10.1007/BF00539422>

- Tortolero-Langarica, J. A., Cupul-Magaña, A. L., Carricart-Ganivet, J. P., Mayfield, A. B., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2016). Differences in growth and calcification rates in the reef-building coral *Porites lobata*: The implications of morphotype and gender on coral growth. *Frontiers in Marine Science*, 3(SEP). <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00179>
- Tortolero-Langarica, J. A., Carricart-Ganivet, J. P., Cupul-Magaña, A. L., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2017). 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. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.10.004>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Carricart-Ganivet, J. P., & Cupul-Magaña, A. L. (2016). Skeletal extension, density and calcification rates of massive free-living coral *Porites lobata* Dana, 1846. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 478, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.02.005>
- Trejo, A. (2020). *Reconstrucción histórica de los parámetros de crecimiento de Porites panamensis (Scleractinia: Poritidae) en Bahía de Los Ángeles, Baja California* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3305>
- Veron, J. E. N., Hoegh-Guldberg, O., Lenton, T. M., Lough, J. M., Obura, D. O., Pearce-Kelly, P., Sheppard, C. R. C., Spalding, M., Stafford-Smith, M. G., & Rogers, A. D. (2009). The coral reef crisis: The critical importance of <350 ppm CO<sub>2</sub>. *Marine Pollution Bulletin*, 58(10), 1428–1436. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.09.009>
- Veron J. E. N. & Stafford-Smith M. (2000). *Corals of the world*. Australian Institute of Marine Science. <https://search.worldcat.org/title/Corals-of-the-world/oclc/43734090>
- Wilkinson T., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan & M. Padilla, Ecorregiones marinas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. <http://www.cec.org/es/publications/ecorregiones-marinas-de-america-del-norte/>