



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**RECONSTRUCCIÓN DEL CRECIMIENTO CORALINO  
DEL PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO  
MORELOS: TASAS DE CALCIFICACIÓN DE *Orbicella*  
*faveolata* EN LAS ÚLTIMAS DOS DÉCADAS (1998-2018)**

Tesis para obtener el título de

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

PRESENTA:

**Ania Ochoa Serena**

DIRECTOR:

**Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet**

CODIRECTOR:

**Dr. José de Jesús Adolfo Tortolero Langarica**



MAYO, 2023

## Agradecimientos

Al Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet, mi director de tesis por abrirme las puertas de su laboratorio y confiar en mi para realizar este trabajo, por mostrarme el campo de la Esclerocronología coralina.

Al Dr. Adolfo Tortolero Langarica, mi codirector de tesis, por guiarme en cada paso de este proyecto, brindarme las herramientas necesarias y por estar dispuesto en todo momento para brindarme apoyo y guía.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT/IN200420) con el proyecto “Características esclerocronológicas del coral hermatípico *Orbicella faveolata* a lo largo de gradientes latitudinal y lumínico en el Caribe mexicano” Al permiso de colecta otorgado por la dirección de Vida Silvestre (SGPA/DCVS/04660/21) de la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT

A la M. C Gabriela Gutiérrez Estrada por apoyarme a resolver siempre mis dudas, por recibirme y brindarme ayuda durante toda mi estadía.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, mi casa de estudios y a los profesores que marcaron mi formación como bióloga.

A mi familia, mamá y papá, mi más grande apoyo, los que siempre creen en mí y están incondicionalmente en cada paso del camino sin importar la distancia y que tan difícil sea, los que me ayudan a cumplir mis sueños. A Toño, mi hermano, por siempre darme ánimos, acompañarme y siempre sacarme una sonrisa.

## ÍNDICE

<b>Resumen .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Hipótesis.....</b>	<b>14</b>
<b>3. Objetivo general.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Métodos .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Área de estudio .....</b>	<b>15</b>
<b>5. Resultados .....</b>	<b>20</b>
<b>6. Discusión.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1. Parámetros de crecimiento.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2. Relación entre los parámetros de crecimiento .....</b>	<b>35</b>
<b>6.3. Efecto de la Temperatura Superficial del Mar en las tasas de crecimiento .....</b>	<b>36</b>
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>38</b>
<b>8. Referencias .....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Promedio de densidad esquelética ( $\text{g cm}^{-3}$ ) de las colonias de <i>Orbicella faveolata</i> en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante el periodo 1998-2018. La densidad esquelética máxima y mínima del periodo es resaltado en negritas. ....	22
<b>Cuadro 2.</b> Tasa de extensión anual ( $\text{cm año}^{-1}$ ) de las colonias de <i>Orbicella faveolata</i> , en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante del periodo 1998-2018. La extensión esquelética máxima y mínima del periodo es resaltado en negritas. .	23
<b>Cuadro 3.</b> Tasa de calcificación anual ( $\text{cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) por colonia de <i>Orbicella faveolata</i> , en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante el periodo de 1998-2018. Tasa de calcificación máxima y mínima durante el periodo en negritas. ....	24
<b>Cuadro 4.</b> Promedios anuales y generales de los parámetros de crecimiento de <i>O. faveolata</i> en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, (datos tomados de Rico-Esenaro <i>et al.</i> , 2018). Sombreados los años que coinciden con el periodo abarcado en el presente estudio. ....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de un pólipo y los principales componentes del esqueleto de corales hermatípicos (Modificado de Ilustración por Geoff Kelley. Corals of the World. Veron. Vol I. 2000, Modificado por E. Delgadillo-Nuño, 2018).....	10
<b>Figura 2.</b> Colonia del coral hermatípico <i>Orbicella faveolata</i> . (Tomada por A. Tortolero-Langarica, 2022).....	14
<b>Figura 3.</b> Mapa del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, Q. Roo, México. La Línea azul representa el polígono del Parque. El recuadro verde señala el punto del que se extrajeron las muestras. Modificado de mapa obtenido a partir de los servidores de Open Layer Map, Google 2015 por E. Navarro-Espinoza, 2015.....	16
<b>Figura 4.</b> a) Colecta de los núcleos de las colonias de <i>Orbicella faveolata</i> , b) Obtención de las lajas, mediante corte con sierra con punta de diamante, c) Radiografías corregidas de las lajas obtenidas de los núcleos de coral. ....	18
<b>Figura 5</b> Valores de densidad esquelética correspondientes al patrón de bandeo a largo de las lajas de <i>Orbicella faveolata</i> del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.....	19
<b>Figura 6.</b> Imagen de radiografía de laja de coral <i>Orbicella faveolata</i> , denotando los años de reconstrucción a lo largo de eje de crecimiento utilizando densitometría óptica.....	21
<b>Figura 7.</b> Comparación de las características esclerocronológicas (promedio $\pm$ DS): a) densidad esquelética, b) tasa de extensión y c) tasa de calcificación, entre colonias de <i>Orbicella faveolata</i> en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante el periodo de 2006 a 2018. ....	25
<b>Figura 8.</b> Relación entre variables de crecimiento del coral <i>Orbicella faveolata</i> en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, en el periodo 1998-2018.....	26
<b>Figura 9.</b> Tendencia temporal de las características esclerocronológicas (promedio $\pm$ DS), a) densidad esquelética; b) tasa de extensión; c) tasa de calcificación, de colonias de <i>Orbicella faveolata</i> en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos los últimos 20 años.....	28

**Figura 10.** Fluctuación de los promedios mensuales de la temperatura (°C) superficial de mar en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos en el periodo 2009-2018..... 28

**Figura 11.** Relación entre los valores anuales de temperatura superficial del mar (°C) entre OceanColor y SAMMO en el periodo 2009-2018..... 29

**Figura 12.** Relación de las características esclerocronológicas de *Orbicella faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y la temperatura del mar superficial, a) densidad esquelética, b) tasa de extensión c) tasa de calcificación. 30

## Resumen

Los corales hermatípicos son capaces de registrar información ambiental en sus esqueletos durante el proceso de calcificación y crecimiento, proporcionando datos sobre las condiciones ambientales en donde se desarrollaron y la forma en que responden a estas, por lo que son excelentes proxies climáticos e indicadores ambientales. En este trabajo analizamos la información de 20 años de crecimiento (tasa de extensión, densidad esquelética y tasa de calcificación) y su relación con la temperatura del mar superficial (TMS) correspondientes al periodo 1998-2018, mediante la técnica de densitometría óptica, en núcleos del coral *Orbicella faveolata*, extraídas en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo (PNAPM). Los resultados esclerocronológicos mostraron valores promedio por debajo de lo reportado anteriormente para la especie en densidad ( $1.24 \text{ g cm}^{-3}$ ) y tasa de calcificación ( $0.71 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ), siendo solo la tasa de extensión esquelética aquella con valores dentro de rango reportado para el Caribe ( $0.61 \pm 0.09 \text{ cm año}^{-1}$ ). Los datos evidencian una estrategia de crecimiento común para la especie denominado “Stretching modulation” que consta en invertir sus recursos en construir esqueletos más densos. Pese a que las tasas de calcificación resultaron relativamente estables a lo largo del tiempo de estudio, se observó un incremento en la densidad esquelética durante las últimas dos décadas (aproximadamente  $0.1 \text{ g cm}^{-3}$ , por año). Asimismo, los resultados muestran la inexistencia de relación entre los parámetros de crecimiento y la TMS, por lo que los cambios en el crecimiento lo podrían deberse a otras condiciones ambientales como la sedimentación, aumento

de nutrientes y calidad del agua. La información obtenida a partir de estudios como este proporciona una línea base histórica de la respuesta de crecimiento de las principales especies constructoras de arrecife coralinos ante futuros cambios ambientales en el actual escenario de la crisis climática, y ayuda en la mejora de planes de manejo y conservación eficientes que cubran las necesidades de áreas protegidas con el fin de conservar los arrecifes coralinos de la región.

## 1. Introducción

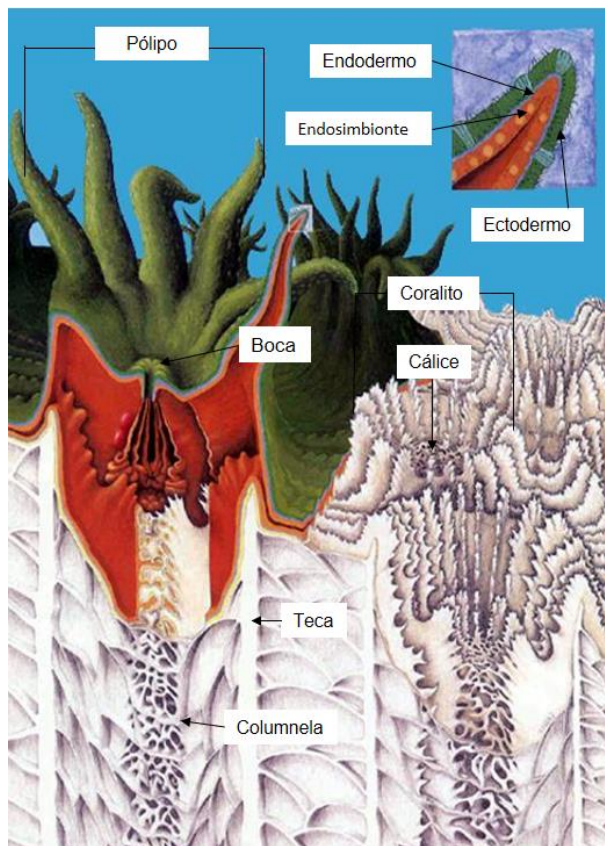
Los arrecifes coralinos constituyen uno de los ecosistemas con mayor biodiversidad (> 25 %) de los océanos (Roberts *et al.*, 2002), se distribuyen en aguas claras poco profundas (1-50 m) a lo largo de zonas tropicales y subtropicales (30°N-30°S) (Sheppard *et al.*, 2010; Gattuso, 2014), caracterizándose por ser sitios de alimentación, reproducción y refugio de una gran cantidad de organismos como peces, invertebrados y diversidad asociada (Sheppard *et al.*, 2010). Los arrecifes son fundamentales para mantener el equilibrio y funcionalidad de los océanos (Moberg & Folke, 1999; Veron *et al.*, 2009). Sin embargo, son ecosistemas frágiles y sensibles a presiones y perturbaciones ambientales tanto naturales como antropogénicas derivadas principalmente por efecto del cambio climático (Díaz-Pérez *et al.*, 2016).

Los arrecifes coralinos proporcionan servicios ecosistémicos que son vitales y valiosos para las poblaciones humanas (Perera-Valderrama *et al.*, 2020), pues sostienen directamente pesquerías de tipo ribereñas, generando ingresos mediante actividades turísticas y recreativas desarrolladas en estos ecosistemas debido a la belleza escénica que poseen (Alquezar & Boyd, 2007), se estima que, su valor económico a nivel mundial es de \$ 9.9 trillones de dólares al año (Costanza *et al.*, 2014), por lo que, contribuyen al sustento de las poblaciones humanas de zonas costeras (Alquezar & Boyd, 2007) y a la protección física de la línea de costa contra la erosión, tormentas y huracanes (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007).

Se estima que la cobertura de coral ha disminuido en un 50% a nivel mundial a partir de la década de 1950 (Eddy *et al.*, 2021) y en la actualidad más de la mitad de los arrecifes de coral del mundo se encuentran en un nivel alto de degradación (Burke *et al.*, 2011; Hughes *et al.*, 2018). Pese a que los arrecifes de coral ocupan menos del 0.1% del suelo oceánico (Gattuso, 2014) son un importante componente en la mayoría de las regiones oceanográficas (Spalding *et al.*, 2001). En la región del mar Caribe se encuentra el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual se extiende por aproximadamente 1000 km de longitud, abarcando Belice, Guatemala, Honduras y México (Ardisson *et al.*, 2011). El SAM comprende más de 60 áreas

naturales protegidas proveedoras de hábitats clave para la conservación y el desarrollo de procesos como anidación y crianza de especies de importancia comercial, amenazadas o en peligro de extinción (Kramer & Kramer, 2002; SAM, 2004). Los arrecifes coralinos del Caribe han sufrido pérdidas masivas desde la década de los 1980's (Jackson *et al.*, 2014) y se estima que la abundancia de los corales constructores de arrecifes ha disminuido en más del 80% (Gardner *et al.*, 2003). Las consecuencias incluyen el colapso de las poblaciones coralinas, el incremento de la presencia de macroalgas, eventos de blanqueamiento por la expulsión de las microalgas endosimbiontes y múltiples episodios de enfermedades, así como la pérdida de la capacidad de los corales de recuperarse de perturbaciones naturales como tormentas y huracanes (Jackson *et al.*, 2014).

Los corales hermatípicos proporcionan el marco principal de estos arrecifes, y construyen la base estructural biofísica que provee tridimensional al hábitad y balance a la funcionalidad del ecosistema coralino (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012). Los corales hermatípicos son invertebrados marinos del Filo Cnidaria, Clase Anthozoa, Subclase Hexacoralia, Orden Scleractinia, que tienen una relación endosimbiótica con microalgas dinoflageladas de la familia Symbiodinacea (Stamber, 2011; LaJeunesse *et al.*, 2018), las cuales translocan energía al coral-hospedero, equivalente al 95% de requerimientos energéticos diarios (Furla *et al.*, 2005; Mayfield & Gates, 2007), para efectuar procesos fisiológicos como la calcificación y la reproducción (Stamber, 2011), al mismo tiempo el simbiote aprovecha los desechos metabólicos del coral-hospedero, generando un ciclo de recirculación de nutrientes-desecho (Stamber, 2011).



**Figura 1.** Esquema de un pólipo y los principales componentes del esqueleto de corales hermatípicos (Modificado de Ilustración por Geoff Kelley. *Corals of the World*. Veron. Vol I. 2000, Modificado por E. Delgadillo-Nuño, 2018).

El desarrollo y crecimiento de especies de coral formadoras de arrecife aporta la rugosidad y tridimensionalidad al fondo marino, a medida que las colonias van creciendo y cubren el suelo marino (zona bentónica), pueden llegar a formar grandes estructuras de carbonato de calcio (Rodríguez-Troncoso & Tortolero-Langarica, 2014). Los corales hermatípicos son considerados organismos calcificadores, los cuales tienen la capacidad de tomar el carbonato inorgánico disponible en el medio y mediante el proceso de calcificación, que permite la depositación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), formar sus esqueletos (Spalding *et al.*, 2001).

La calcificación es un proceso que se lleva a cabo con la energía proporcionada por la población de microalgas dinoflageladas que se ubica dentro del tejido de los corales, estas algas le brindan recursos como glicerol y aminoácidos (Furla *et al.*,

2005; Mayfield & Gates, 2007). Este proceso de formación de  $\text{CaCO}_3$  se lleva a cabo en el epitelio calicoblástico, el cual está unido al esqueleto a través del medio extracelular calcificante, sitio en donde se precipitan los cristales de aragonita que determinan la densidad esquelética, esta precipitación sucede a partir de la continua producción de carbonato y la continua entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  que genera un punto constante de saturación en condiciones óptimas de luz y temperatura (Rodríguez-Troncoso & Tortolero-Langarica, 2014; Figura 1).

Durante el depósito de  $\text{CaCO}_3$  los corales masivos forman bandas de distinta densidad (alta y baja), las cuales representan un año de crecimiento teórico y a partir de estas se pueden obtener sus características esclerocronológicas (tasa de extensión, densidad esquelética y tasa de calcificación). Estas últimas, se han utilizado para la reconstrucción de variables ambientales como la temperatura del mar superficial (TMS), química del agua nutrientes, entre otros (Lough & Barnes, 1997; Saenger *et al.*, 2009; Lough & Cooper, 2011; Vásquez-Bedoya *et al.*, 2012;). Con la información esclerocronológica también es posible realizar modelos predictivos a diferentes escenarios a futuro, así como, relacionar los patrones de crecimiento del coral con múltiples variables espaciales, como latitud, profundidad, luz y distancia de la costa (Tortolero-Langarica *et al.*, 2016a).

Existen diversos factores tanto climáticos (extrínsecos), como no climáticos (intrínsecos) que pueden provocar efectos negativos sobre el crecimiento y la calcificación en corales y los arrecifes de coral (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Factores extrínsecos como el cambio climático (Jackson *et al.*, 2001), pueden ocasionar incrementos y la frecuencia de pulso en anomalías de la temperatura del mar (Berkelmans & Oliver, 1990). Estas anomalías en la temperatura del mar provocan estrés térmico en los corales, provocando, entre muchas otras afectaciones, la expulsión de las microalgas endosimbiontes que pueden poner en riesgo la supervivencia del coral (Baird *et al.*, 2009). Otros factores como el incremento de la descarga de sedimentos y aguas residuales pueden ocasionar cambios en la química del agua como la salinidad, nutrientes (nitritos, nitratos) y carbonato inorgánico (Gattuso *et al.*, 1998 Kleypas *et al.*, 1999; Lirman, 2003). Esto incluye las presiones antropogénicas como el desarrollo no planificado de zonas

costeras, actividades turísticas, contaminación y la sobrepesca (Yañez-Arancibia *et al.*, 1996; Esslemont, 1999; Rouphael & Inglis, 2000; Padilla, 2000; Zakai & Chadwick-Furman, 2002; Pikitch *et al.*, 2004), provocando consecuentemente el deterioro y degradación de las condiciones ambientales (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007).

La temperatura es uno de los principales factores estudiados ya que afecta directamente la calcificación, por lo tanto, la variabilidad de las tasas de crecimiento depende de la sensibilidad térmica de cada especie coralina (Edmunds 2005, Tanzil *et al.*, 2013). La temperatura en conjunto con otros factores como la luz, sedimentación, acción hidrodinámica, química del agua, nutrientes, metales pesados, profundidad, entre otros, controlan la tasa de crecimiento de los arrecifes coralinos (Padilla-Souza *et al.*, 2009). Dentro de estos factores la luz o irradiancia lumínica es determinante para el crecimiento, el cual es medido mediante el coeficiente de atenuación vertical del agua ( $K_d$ ), que describe la variación de la cantidad de luz en un gradiente vertical, entre menor sea el valor de  $K_d$ , indica mayor claridad del agua y viceversa (Kirk, 1994). La disponibilidad de luz está en función de las propiedades aparentes del agua y de la química de esta, ambas influyen en la transparencia y, por lo tanto, en la cantidad de luz que impactará en el arrecife (Sheppard, *et al.*, 2017).

Se conoce que los corales son capaces de almacenar información ambiental histórica en sus esqueletos calcáreos (Allemand *et al.*, 2004). Por lo que, la investigación de las características de crecimiento nos proporciona información sobre las condiciones en donde se desarrolló, la forma en que estos respondieron a las distintas condiciones ambientales y la forma en la que invirtieron su energía en los diferentes procesos metabólicos (Dodge & Vaisnys, 1975; Tomascik & Sander, 1985; Leuzinger *et al.*, 2012; Madin *et al.*, 2012). Existen diversos métodos para la obtención de los parámetros de crecimiento de los corales hermatípicos, las técnicas más precisas son la foto-densitometría, la gama-densitometría (Chalker & Barnes, 1990), tomografía computarizada (Bosscher, 1993), la densitometría-óptica (Carricart-Ganivet & Barnes, 2007) y lo más reciente, mediante fotogrametría y modelos 3D (Lange & Perry, 2020). La técnica de densitometría óptica desarrollada

por Carricart-Ganivet & Barnes (2007) se realiza a partir de radiografías de rayos-X, que posteriormente son digitalizadas para analizar los parámetros de crecimiento en corales masivos como densidad esquelética ( $\text{g cm}^3 \text{año}^{-1}$ ), extensión ( $\text{cm año}^{-1}$ ) y calcificación ( $\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), ésta última es el producto de la densidad esquelética y la tasa de extensión.

El género *Orbicella* es uno de los principales géneros constructores de arrecifes en el Caribe y la especie *Orbicella faveolata* (Figura 2) se encuentra ampliamente distribuida en esta región en aguas relativamente someras (1-40 m) (Yranzo *et al.*, 2020). Esta especie pasó a ser considerado como el género más importante de corales constructores de arrecifes someros en la región del Caribe después del declive de *Acropora palmata* en la década de los 1980's (Aronson & Precht, 2001). Sin embargo, sus poblaciones también han disminuido debido a eventos de blanqueamiento y enfermedades, encontrándose dentro de la Lista Roja de la UICN bajo la categoría "En Peligro" (Yranzo, *et al.*, 2020). Esta especie de coral masivo se caracteriza por presentar forma hemisférica en capas con bordes tipo falda y dadas las grandes dimensiones de sus colonias, es que contribuyen a la complejidad estructural del arrecife. Es una especie altamente sensible al estrés ambiental, y su crecimiento es principalmente regulado por la TMS, se conoce que alcanza la máxima tasa de calcificación a los  $28.8^\circ\text{C}$  (Wórum *et al.*, 2007) y se ha reportado que su calcificación puede disminuir aproximadamente  $0.12 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  por cada aumento de  $1^\circ\text{C}$  (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012).



**Figura 2.** Colonia del coral hermatípico *Orbicella faveolata*. (Tomada por A. Tortolero-Langarica, 2022).

En el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, esta especie es uno de los principales componentes de la estructura de comunidad en toda la zona arrecifal. Sin embargo, pese a su importancia existe poca investigación respecto a su historia de vida y su respuesta ante factores ambientales a lo largo del tiempo. Por lo que, el propósito de este trabajo fue determinar las características esclerocronológicas del coral *O. faveolata* y su relación con la TMS, así como su estrategia de crecimiento en los últimos 20 años (1998-2018), a partir del análisis de las bandas de crecimiento utilizando la técnica de densitometría óptica.

## **2. Hipótesis**

En los últimos años se ha observado un constante aumento de la temperatura del mar superficial alrededor del mundo, lo cual ha ocasionado disminución (30-40 %) en procesos fisiológicos como la tasa de crecimiento y calcificación de diversas especies de coral hermatípico. Por lo tanto, se espera, que la tasa anual de calcificación de la especie constructora de arrecife *O. faveolata* en el PNAPM, del Caribe mexicano derive en un patrón de disminución (tendencia negativa) con respecto al incremento gradual de TMS en los últimos años, presentando los valores de crecimiento más bajos durante los años más cálidos debido a eventos de anomalías térmicas.

## **3. Objetivo general**

Determinar la tasa de calcificación del coral *O. faveolata* del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y el efecto de la temperatura en su crecimiento a lo largo de dos décadas.

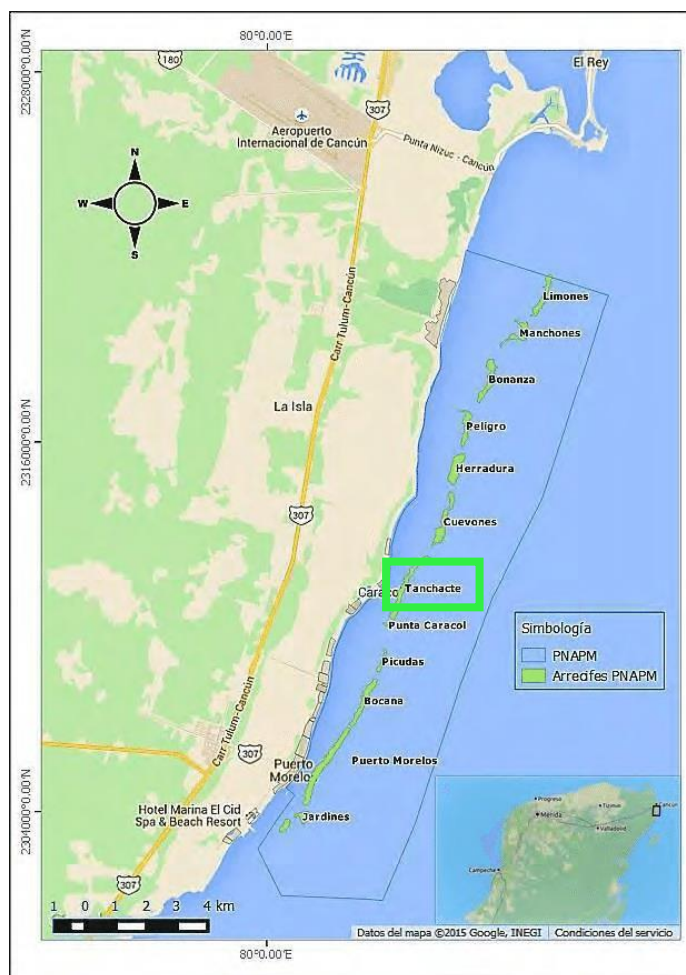
### **3.1. Objetivos específicos**

- Estimar las características esclerocronológicas (tasa de extensión, densidad esquelética y tasa de calcificación) del coral *O. faveolata*.
- Comparar la tasa anual de calcificación y su trayectoria histórica durante el periodo 1998-2018.
- Relacionar los tres parámetros de crecimiento anual de *O. faveolata*, así como el efecto de la temperatura superficial del mar en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.

## **4. Materiales y Métodos**

### **4.1 Área de estudio**

El estudio fue realizado en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) localizado en el Caribe mexicano ( $21^{\circ}00'00''$  y  $20^{\circ}48'33''$  N y  $86^{\circ}53'14.94''$  y  $86^{\circ}46'38.94$  W; Figura 3). El PNAPM se estableció el 2 de febrero de 1998 por Decreto Presidencial y en el 2002 se registró en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2019), ocupa 9, 066.63 ha y se extiende a lo largo de 21 kilómetros (Navarro-Espinoza, 2015).



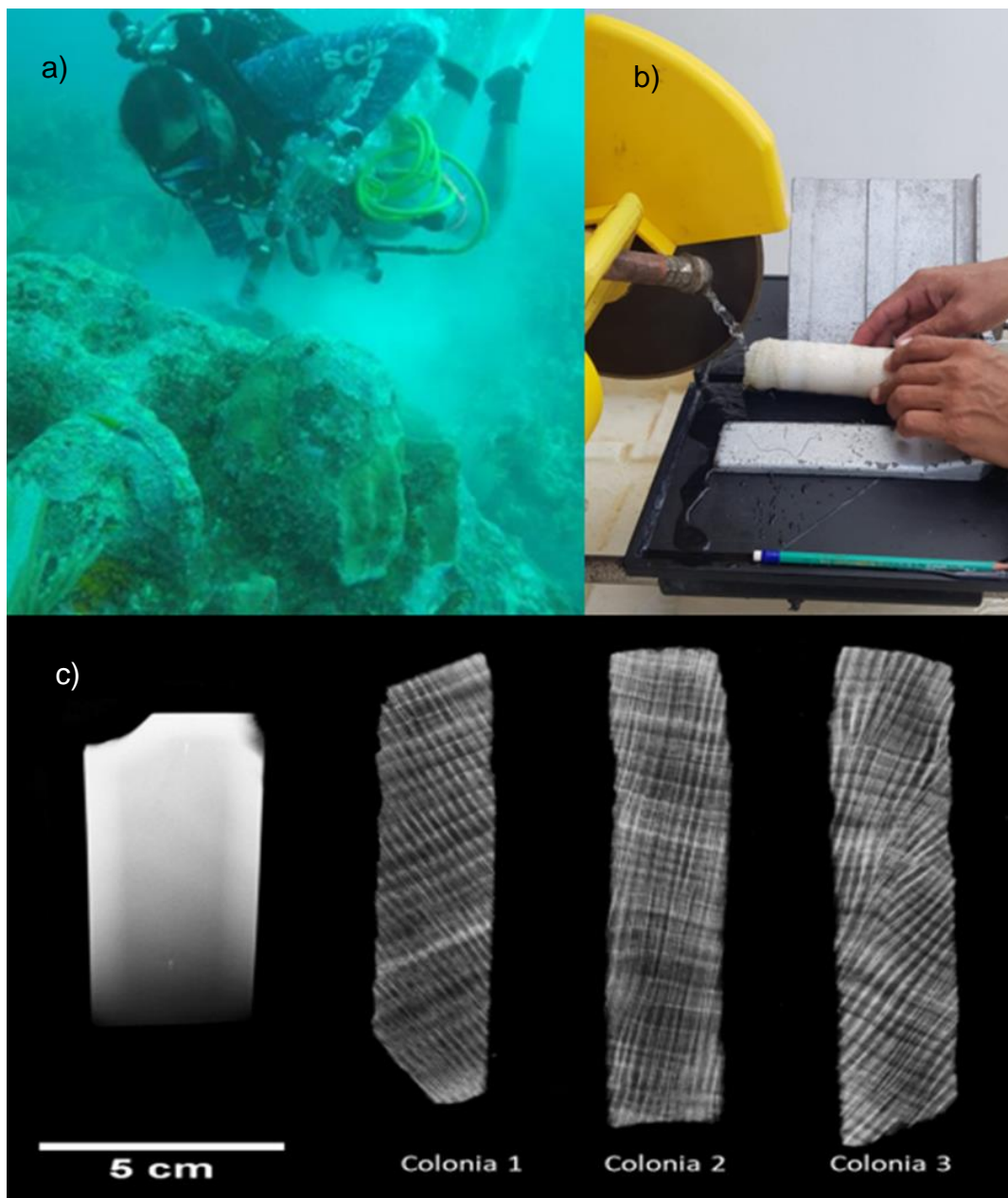
**Figura 3.** Mapa del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, Q. Roo, México. La Línea azul representa el polígono del Parque. El recuadro verde señala el punto del que se extrajeron las muestras. Modificado de mapa obtenido a partir de los servidores de Open Layer Map, Google 2015 por E. Navarro-Espinoza, 2015.

El área del PNAPM está influenciada principalmente por la corriente de Yucatán, la cual influye paralela al borde de la plataforma continental con dirección al Norte, con una temperatura anual de 27°C la cual varía de dirección e intensidad dependiendo de la temporada (Ruíz-Rentería, 1979; Merino & Otelo, 1991). En la laguna arrecifal la corriente es paralela a la costa, dicha corriente igualmente cambia en velocidad y dirección, influenciada por variables como el viento y el oleaje (INEE, 2000).

El PNPM presenta aguas relativamente someras con una profundidad promedio de 2.5-15 m y está compuesto principalmente por el coral cuerno de alce (*A. palmata*), coral estrella (*O. faveolata*), coral cerebro (*Pseudodiploria strigosa*), coral de fuego

aplanado (*Millepora complanata*), coral mostaza (*Porites astreoides*), coral estrellado (*Siderastrea siderea*) y coral lechuga (*Agaricia spp*) (CONANP, 2022).

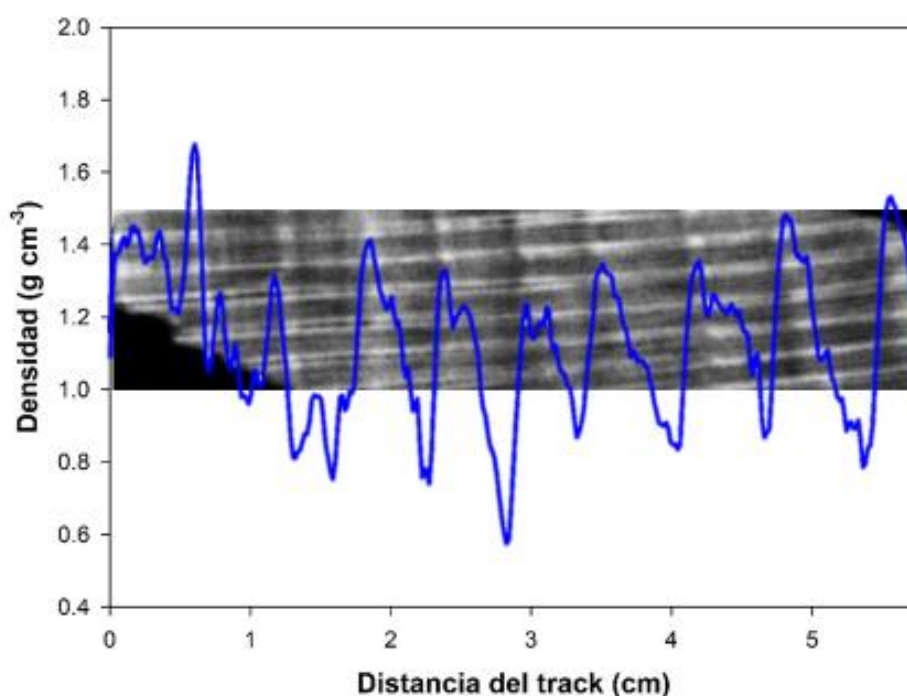
Se seleccionaron 3 colonias de *O. faveolata*, que no presentaran evidencia de enfermedad, blanqueamiento o erosionadas por organismos competidores; las muestras fueron extraídas en diciembre del año 2019 a una misma profundidad (3 m) en el sitio de Tanchacte del PNAPM (Figura 3). En cada colonia se colectó un núcleo del esqueleto calcáreo de aproximadamente 10 cm de largo siguiendo el eje máximo de crecimiento apical utilizando un taladro eléctrico sumergible (Nemo ®) con boca cilíndrica de punta adiamantada con 5 cm de diámetro, después de extraído el núcleo, los orificios fueron cubiertos con pelotas de unicel para proteger a la colonia de la invasión de organismos perforadores y para la recuperación del tejido coralino (Figura 4a). Posteriormente, se obtuvieron lajas de cada núcleo, de 7-10 mm de grosor, usando una sierra con filo diamantado y agua dulce para lubricar el área de corte (Figura 4b). Después las lajas fueron enjuagadas con agua dulce con el fin de eliminar residuos resultantes del corte anterior, para su secado fueron expuestas a luz solar y después en un horno convencional a 70°C durante 4 horas. Las lajas resultantes fueron radiografiadas con equipo radiográfico convencional de rayos-X con un ajuste de 60kv por 20 mAs a 1 m de distancia focal entre la fuente y las muestras, incluyendo una cuña de concha *Tridacnia maxima* dentro de las radiografías como estándar o control de aragonita con densidad conocida (2.82 g cm<sup>-3</sup>), para posteriormente obtener los valores de densidad absoluta a lo largo de cada laja.



**Figura 4.** a) Colecta de los núcleos de las colonias de *Orbicella faveolata*, b) Obtención de las lajas, mediante corte con sierra con punta de diamante, c) Radiografías corregidas de las lajas obtenidas de los núcleos de coral.

Las imágenes de rayos-X resultantes fueron corregidas siguiendo el protocolo descrito por Duprey *et al.* (2012), para evitar sobreestimaciones en los valores de densidad debido a la influencia de irradiación irregular de los rayos-X, los cuales pueden provocar heterogeneidad en la irradiación de rayos-X mediante el efecto de talón y la ley de inversos cuadrados.

Utilizando el programa *imageJ* ver. 11.0 (<https://imagej.nih.gov/ij/>) para el procesamiento de las imágenes y siguiendo la técnica de densitometría óptica para imágenes digitalizadas propuesta por Carricart-Ganivet & Barnes (2007) se obtuvieron los parámetros de crecimiento. La densidad esquelética se estimó a partir de la identificación de los picos de valores de densidad máxima y la distancia entre estos mismos. La tasa de extensión se determinó a partir de la distancia lineal observable entre cada par de bandas de alta densidad (Figura 5). Finalmente, la tasa de calcificación se calculó mediante el producto de la extensión y la densidad esquelética (Lough & Cooper, 2011).



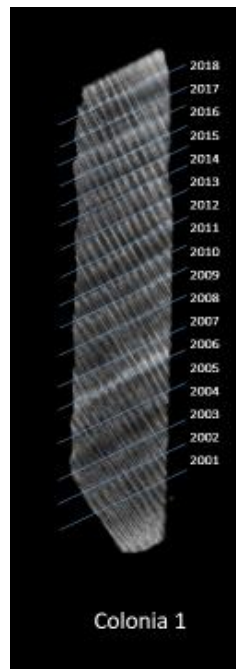
**Figura 5.** Valores de densidad esquelética correspondientes al patrón de bandeo a largo de las lajas de *O. faveolata* del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.

A partir de los resultados densitométricos se obtuvieron los promedios anuales para un periodo de 20-años (1998-2018) para cada parámetro de crecimiento a nivel de colonia y agrupadas a nivel de especie/sitio. Paralelamente, también se obtuvo información anual de la temperatura del mar superficial mediante imágenes satelitales (4x4 km) a nivel mensual para el periodo de (2002- 2017) con ayuda de la plataforma AquaModis® (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) y analizadas en el

programa Wam\_Statitist® ver. 6.33 ([www.Wimsoft.com](http://www.Wimsoft.com)). Adicionalmente, para corroborar la precisión de la TMS obtenida satelitalmente se obtuvieron datos *in situ* de la base de datos del Servicio Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO) de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, ICML, UNAM (<https://sammo.icmyl.unam.mx/>) para el periodo de (1998-2017). Posteriormente, se realizaron pruebas de normalidad ( $p < 0.05$ ) y homocedasticidad ( $p < 0.05$ ) para cada parámetro de crecimiento, así como análisis de varianza de una vía (ANOVA) entre colonias y a nivel temporal (años). Regresiones lineales fueron realizadas para evaluar relación entre los parámetros de crecimiento y la TMS. Todos los análisis fueron computados con el programa Sigmaplot ver.11. 0, con intervalo de confianza de 95% ( $\alpha = 0.05$ ).

## **5. Resultados**

Se analizaron un total de ( $n = 48$ ) bandas de densidad entre un periodo de 13 años (2004-2018) a 20 años (1998-2018) (Figura 6), esto fue debido a que a pesar de que se pudieron observar bandas de crecimiento para un mayor número de años de los reportados, estos no fueron tomados para algunas colonias debido al bajo nivel de confianza que representaban los datos, como resultado de las características físicas de las lajas (erosión o secciones de esqueleto incompleto).



**Figura 6.** Imagen de radiografía de laja de coral *Orbicella faveolata*, denotando los años de reconstrucción a lo largo de eje de crecimiento utilizando densitometría óptica.

El promedio ( $\pm$  desviación estándar) de la densidad esquelética fue de  $1.24 \pm 0.11$  g  $\text{cm}^{-3}$ , el valor más alto reportado para densidad fue de  $1.45$  g  $\text{cm}^{-3}$  en el año 2018 mientras que el valor más bajo fue de  $1.00$  g  $\text{cm}^{-3}$  para el año 2005. Al hacer la comparación de los promedios anuales no se encontraron diferencias significativas ( $F=11.444$ ,  $p>0.05$ ) en los valores reportados para la densidad (Cuadro 1). Sin embargo, a nivel de colonia los valores de densidad mostraron un coeficiente de variación de 25.4%, presentando diferencias significativas ( $F=13.061$ ,  $p<0.001$ ; Figura 8).

**Cuadro 1. Promedio de densidad esquelética (g cm<sup>-3</sup>) de las colonias de *O. faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante el periodo 1998-2018. La densidad esquelética máxima y mínima del periodo es resaltado en negritas.**

Año	Colonia 1	Colonia 2	Colonia 3	Promedio	DS
2018	1.39	1.38	1.59	<b>1.45</b>	0.11
2017	1.15	1.15	1.38	1.22	0.13
2016	1.14	1.29	1.32	1.19	0.09
2015	1.02	1.11	1.35	1.16	0.17
2014	1.17	1.04	1.35	1.19	0.15
2013	1.16	.92	1.39	1.16	0.23
2012	1.24	1.10	1.45	1.26	0.17
2011	1.22	1.18	1.49	1.30	0.16
2010	1.43	1.32	1.40	1.38	0.05
2009	0.90	1.22	1.45	1.19	0.27
2008	1.42	1.09	1.49	1.33	0.21
2007	1.36	1.09	1.17	1.21	0.13
2006	1.02	1.17	1.38	1.19	0.18
2005	1.00	0.99	-	<b>1.00</b>	<b>0.57</b>
2004	1.29	1.07	-	1.18	0.69
2003	-	1.03	-	1.03	-
2002	-	1.13	-	1.13	-
2001	-	1.10	-	1.10	-
2000	-	1.08	-	1.08	-
1999	-	1.05	-	1.05	-
1998	-	1.18	-	1.18	-
<b>Promedio</b>	1.19	1.12	1.40	1.24	0.14

El promedio ( $\pm$  DS) de la extensión anual fue de  $0.61 \pm 0.09$  cm año<sup>-1</sup>, en el año 2005 se reportó el valor más alto de  $0.74$  cm año<sup>-1</sup>, los años 1998 y 2010 presentaron el valor más bajo  $0.50$  cm año<sup>-1</sup> de extensión esquelética. En la comparación de promedios anuales no se encontraron diferencias significativas

entre los valores de extensión esquelética ( $F=0.791$ ,  $p>0.05$ ). De igual forma a nivel colonia los valores de extensión presentaron un coeficiente de variación de 17.9%, sin diferencias significativas ( $F=0.791$ ,  $p<0.05$ ; Figura 8).

**Cuadro 2. Tasa de extensión anual ( $\text{cm año}^{-1}$ ) de las colonias de *O. faveolata*, en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante del periodo 1998-2018. La extensión esquelética máxima y mínima del periodo es resaltado en negritas.**

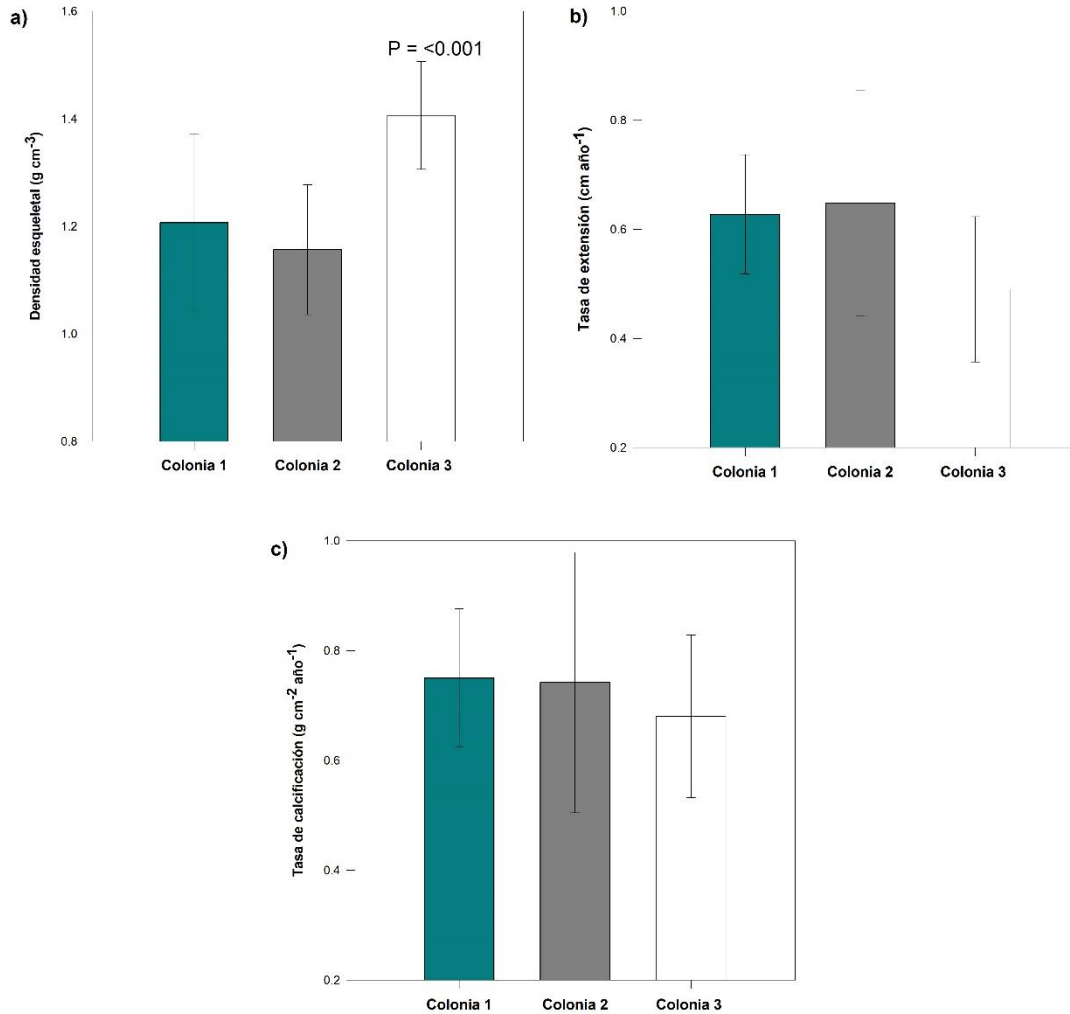
Año	Colonia 1	Colonia 2	Colonia 3	Promedio	DS
2018	0.56	0.65	0.38	0.53	0.15
2017	0.68	0.75	0.43	0.62	0.13
2016	0.51	1.01	0.48	0.67	0.28
2015	0.58	0.57	0.48	0.54	0.03
2014	0.55	0.70	0.51	0.58	0.04
2013	0.68	0.75	0.58	0.67	0.05
2012	0.61	0.70	0.31	0.54	0.17
2011	0.75	0.80	0.43	0.66	0.16
2010	0.68	0.30	0.53	<b>0.50</b>	0.28
2009	0.88	0.59	0.63	0.70	0.10
2008	0.46	0.30	0.36	0.37	0.17
2007	0.60	0.42	0.81	0.61	0.25
2006	0.56	1.10	0.38	0.68	<b>0.26</b>
2005	0.75	0.73	-	<b>0.74</b>	0.40
2004	0.66	0.76	-	0.71	0.13
2003	-	0.75	-	0.75	-
2002	-	0.54	-	0.54	-
2001	-	0.64	-	0.64	-
2000	-	0.71	-	0.71	-
1999	-	0.60	-	0.60	-
1998	-	0.50	-	<b>0.50</b>	-
Promedio	0.63	0.660	0.49	0.61	0.09

La calcificación anual presentó un promedio  $0.71 \pm 0.09 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , mostrando el valor más alto  $0.84 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  en 2008, mientras que el valor más bajo fue de 0.51

g cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> en el año 2000. Sin diferencias significativas entre años al igual que en la comparación entre colonias (F=0.448, p<0.05; Figura 8), con un coeficiente de variación de 3.1%.

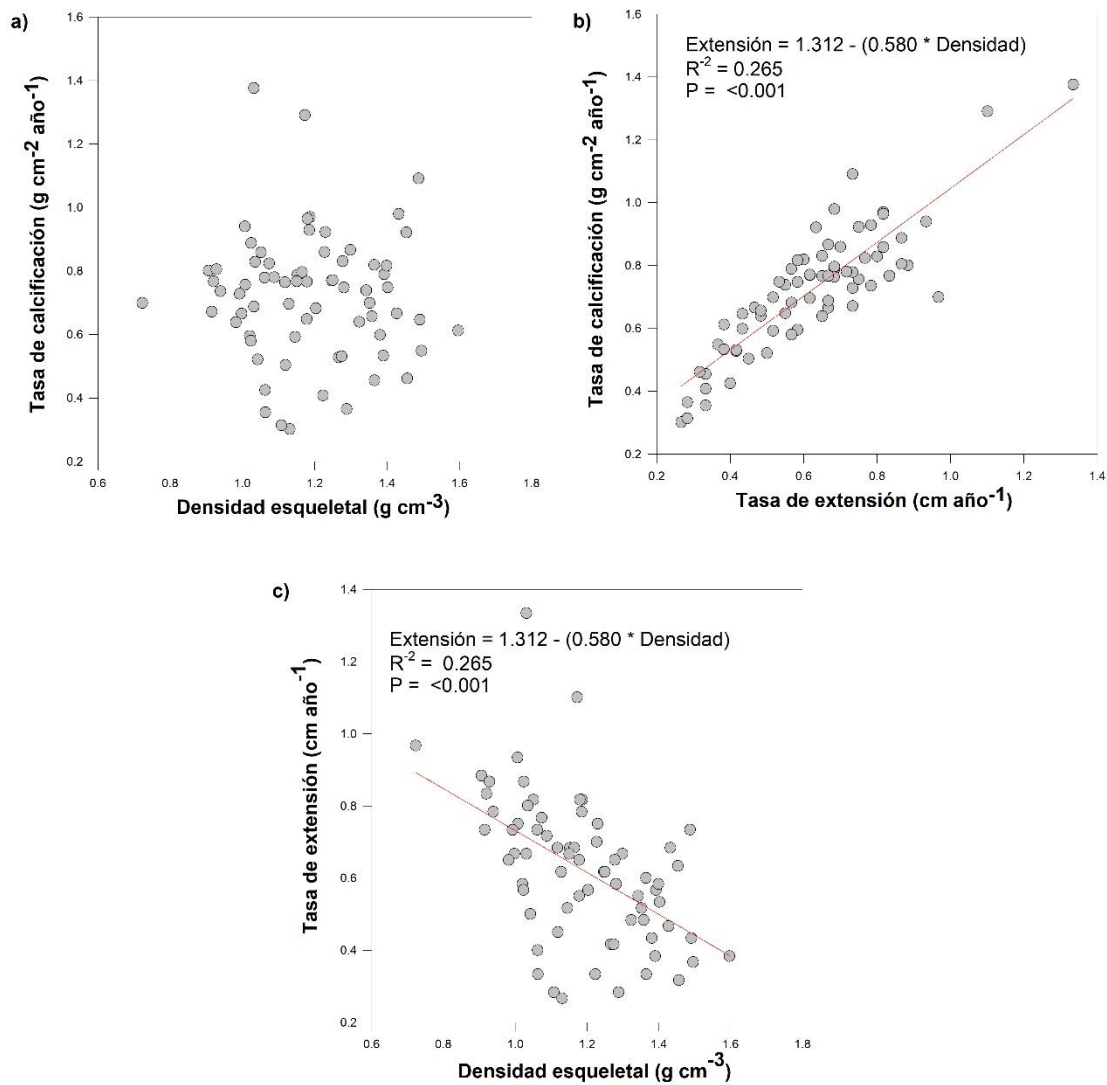
**Cuadro 3. Tasa de calcificación anual (cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>) por colonia de *O. faveolata*, en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante el periodo de 1998-2018. Tasa de calcificación máxima y mínima durante el periodo en negritas.**

Año	Colonia 1	Colonia 2	Colonia 3	Promedio	DS
2018	0.78	0.91	0.61	0.77	0.15
2017	0.78	0.85	0.59	0.74	0.13
2016	0.59	1.11	0.63	0.78	0.28
2015	0.59	0.64	0.65	0.63	0.03
2014	0.64	0.73	0.69	0.69	0.04
2013	0.79	0.70	0.81	0.77	0.05
2012	0.76	0.77	0.46	0.66	0.17
2011	0.92	0.94	0.64	0.83	0.16
2010	0.97	0.41	0.74	0.71	0.28
2009	0.80	0.72	0.92	0.81	0.10
2008	0.66	0.32	0.54	<b>0.51</b>	<b>0.17</b>
2007	0.81	0.46	0.96	0.74	0.25
2006	0.58	1.01	0.53	0.70	0.26
2005	0.75	0.62	-	0.69	0.40
2004	0.86	0.67	-	0.77	0.13
2003	-	0.69	-	0.69	-
2002	-	0.80	-	0.80	-
2001	-	0.78	-	0.78	-
2000	-	0.84	-	<b>0.84</b>	-
1999	-	0.54	-	0.54	-
1998	-	0.52	-	0.52	-
Promedio	0.75	0.72	0.68	0.71	0.03



**Figura 7.** Comparación de las características esclerocronológicas (promedio  $\pm$  DS): a) densidad esquelética, b) tasa de extensión y c) tasa de calcificación, entre colonias de *O. faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos durante el periodo de 2006 a 2018.

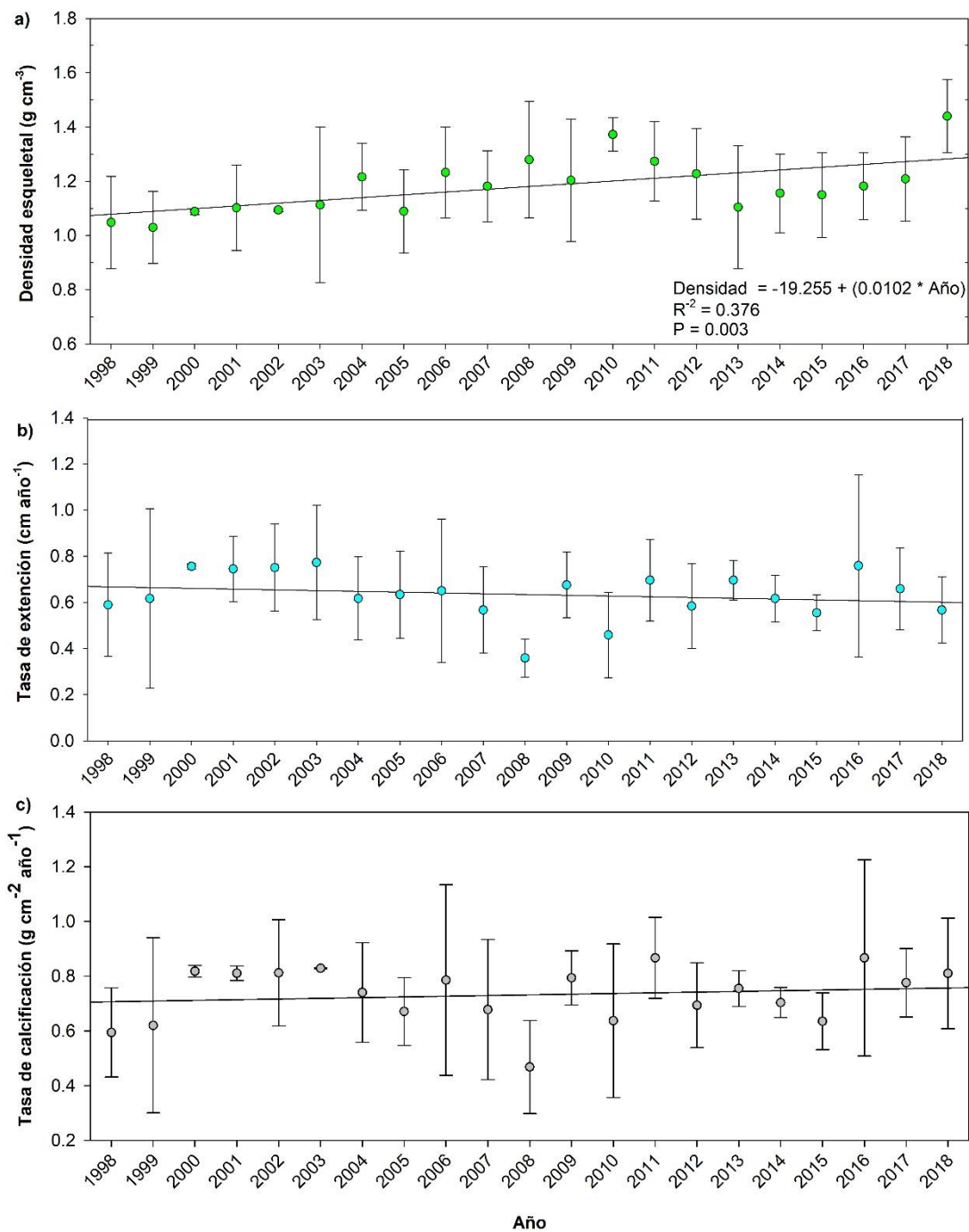
Los resultados de la relación de los tres parámetros de crecimiento, mostraron que existe una relación positiva significativa entre la tasa de calcificación y la extensión esquelética ( $p = < 0.001$ ) lo que indica que al aumentar la extensión, aumenta la tasa de calcificación de *O. faveolata* (Figura 8a) por el contrario, para extensión y densidad existe una relación negativa significativa ( $p = 0.001$ , Figura 8b) lo que indica que al aumentar la densidad esquelética la extensión disminuye, en el caso de densidad y calcificación no se obtuvieron resultados significativos ( $p = 0.716$ , Figura 8c).



**Figura 8.** Relación entre variables de crecimiento del coral *O. faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, en el periodo 1998-2018. a) tasa de calcificación vs tasa extensión, b) tasa de extensión vs densidad esqueletal, c) tasa de calcificación vs densidad esqueletal. Se muestra la pendiente y formula en los modelos que resultaron significativos.

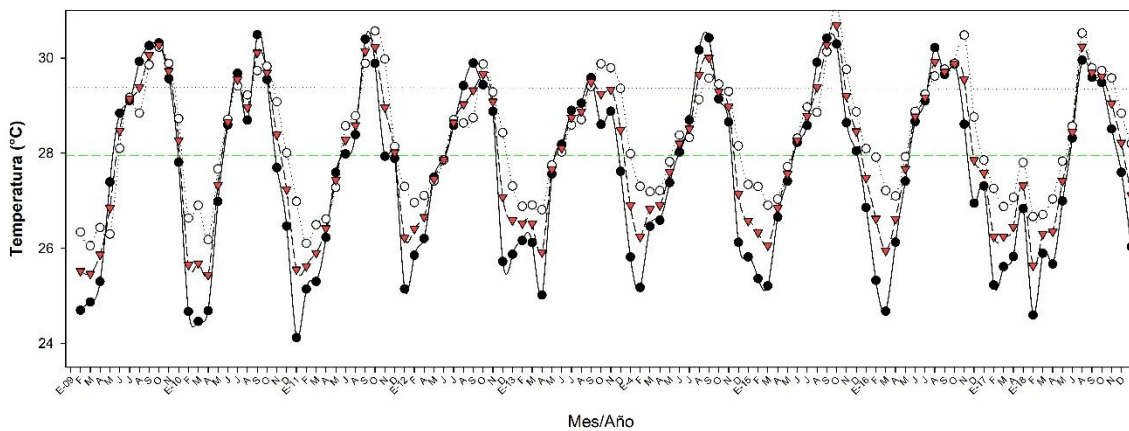
En relación a las tendencia histórica (años) de densidad esqueletal, tasa de calcificación, y tasa de extensión en el periodo (1998-2018), el resultado mostró una tendencia positiva únicamente para densidad ( $R^2 = 0.373$ ,  $p = 0.003$ ) que refleja el aumento de esta característica a lo largo de los años de aproximadamente  $0.1 \text{ g cm}^{-3}$ , por año, mientras que la extensión mostró una ligera disminución, no suficiente para

ser significativa ( $p= 0.385$ ) y la calcificación mostró un ligero incremento, igualmente no significativo ( $p= 0.511$ , Figura 9).

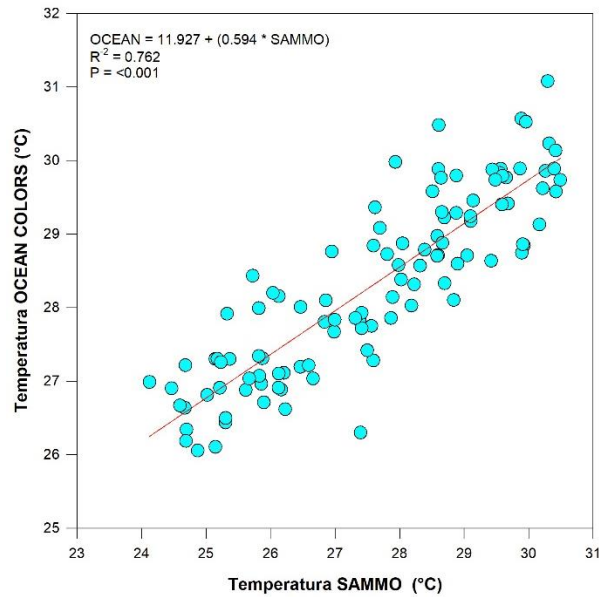


**Figura 9.** Tendencia temporal de las características esclerocronológicas (promedio  $\pm$  DS), a) densidad esquelética; b) tasa de extensión; c) tasa de calcificación, de colonias de *O. faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos los últimos 20 años.

Los datos de temperatura (TMS) anual fueron el resultado del agrupamiento de los datos obtenidos de las imágenes satelitales de OceanColor y del Servicio Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO) de enero de 1998 a diciembre de 2018. El análisis de regresión lineal para la relación de los datos del promedio mensual la temperatura del mar superficial proporcionados por SAMMO y los datos de OceanColor mostró relación positiva significativa ( $p < 0.001$ , Figura 10 y 11). El promedio anual en la TMS en este periodo fue de  $27.95^{\circ}\text{C}$ . Los años que reportaron las temperaturas más altas fueron 2005 y 2009.

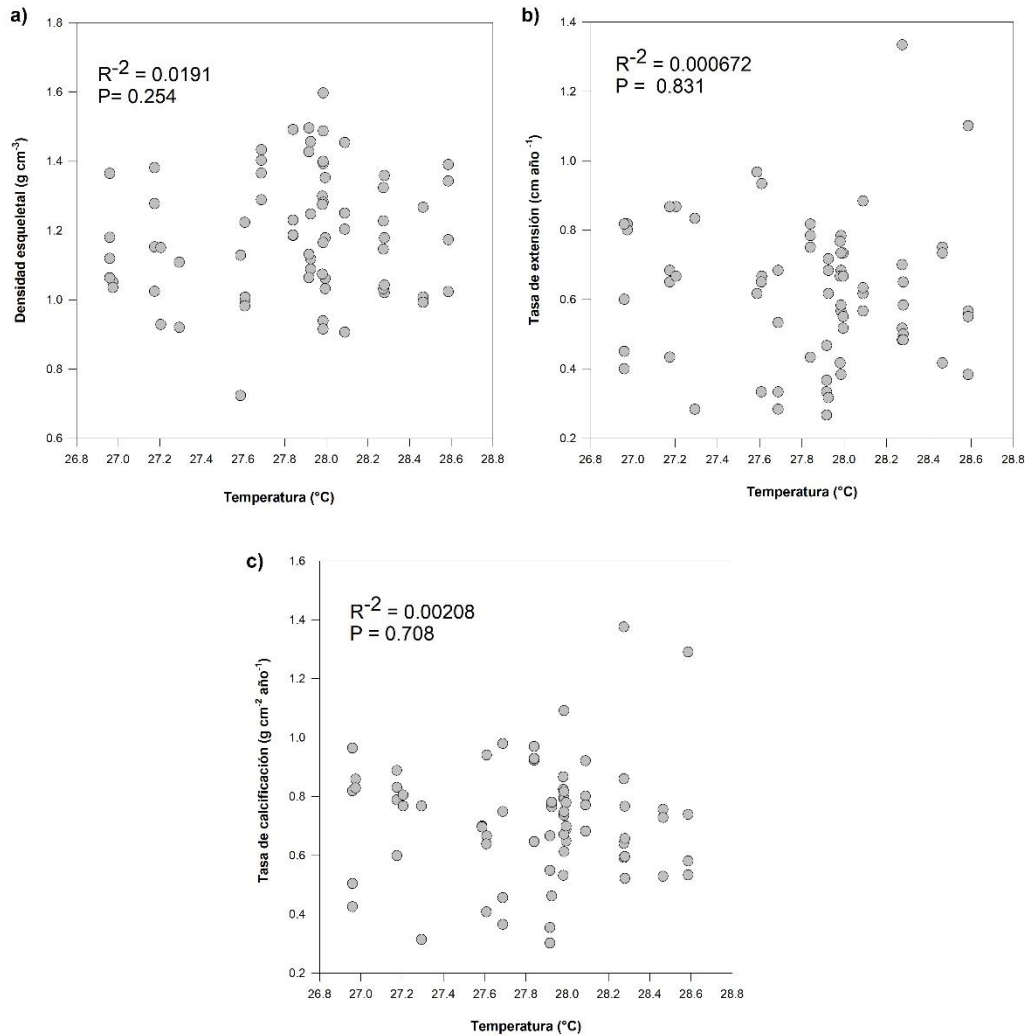


**Figura 10.** Fluctuación de los promedios mensuales de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) superficial de mar en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos en el periodo 2009-2018. Se observa los datos obtenidos de SAMMO= círculos negros, OceanColor= círculos blancos y el promedio de ambos = triángulos rojos, así como la temperatura promedio anual = línea verde y el promedio de la temperatura máxima anual = línea azul.



**Figura 11.** Relación entre los valores anuales de temperatura superficial del mar (°C) entre OceanColor y SAMMO en el periodo 2009-2018.

Por otro lado, los resultados de la relación de las características esclerocronológicas y la TMS, no mostraron resultados significativos en ninguno de los casos. (Figura 12a) densidad esquelética ( $p= 0.254$ ), (Figura 12b) tasa de calcificación ( $p= 0.708$ ) y (Figura 12c) tasa de extensión ( $p=0.831$ ).



**Figura 12.** Relación de las características esclerocronológicas de *O. faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y la temperatura del mar superficial, a) densidad esquelética, b) tasa de extensión c) tasa de calcificación.

## 6. Discusión

Este estudio constituye uno de los primeros reportes de la reconstrucción histórica de características esclerocronológicas del coral hermatípico *O. faveolata* y su relación con la TMS en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (Carricart-Ganivet *et al.*, 2000; Rico-Esenaro, 2014; Rico-Esenaro, 2018; Rico-Esenaro *en prensa*), donde se muestra la plasticidad morfológica de la especie reflejando la respuesta a las condiciones del sitio, las tasas de calcificación resultaron estables

y se observó un ligero incremento en la densidad esquelética durante las últimas dos décadas. Estos resultados podrían estar explicando posibles cambios en las condiciones ambientales (potencialmente nutrientes) como resultado del alto nivel de desarrollo poblacional en la zona (Rico-Esenaro *en prensa*); lo que implicaría la aparición de múltiples factores de riesgo que causen afectaciones al buen desarrollo de las colonias coralinas que conforman el arrecife. Por lo que es importante considerar los resultados presentados en este estudio como un antecedente del estado actual de la especie para ser considerados en la toma de decisiones para la conservación y manejo del PNAPM.

### **6.1. Parámetros de crecimiento**

Los promedios de los parámetros de crecimiento (densidad, extensión y tasa de calcificación) mostraron que la tasa de extensión y densidad se encuentran dentro del intervalo de valores reportados para el Océano Atlántico Occidental y para el género *Orbicella* (Carricart-Ganivet *et al.*, 2000; Sánchez-Pelcastre. 2019). A nivel de especie el promedio de la extensión esquelética de *O. faveolata* coincide con los promedios reportados anteriormente, en arrecifes costeros en los Cayos de Florida (Manzello *et al.*, 2015), Golfo de México (Manzello *et al.*, 2021) y en el Caribe mexicano (Cruz-Piñón *et al.*, 2003), donde se ha aseverado una posible aclimatación térmica y/o adaptación fenotípica, que resulta en una mayor resistencia al estrés térmico comparado con otras especies coralinas (Lirman & Fong 2007; Alabama. 2011). El promedio de tasa de calcificación fue menor a lo registrado para el género, dentro del Océano Atlántico (Carricart-Ganivet & Martín-Merino, 2001), Golfo de México (Manzello *et al.*, 2021) y Puerto Morelos (Carricart-Ganivet *et al.*, 2000).

Cruz-Ortega (2013) reportó un promedio de tasa de calcificación de  $0.96 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  en Mahahual y de  $0.97 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  en Banco Chinchorro, relacionándolo con las fluctuaciones en la temperatura del mar superficial. Lo cual puede estar explicando que la respuesta histórica de la especie podría depender de las condiciones específicas del sitio, por ejemplo, en sitios con condiciones oligotróficas (aguas claras con bajo nivel de nutrientes) las tasas de calcificación se relacionan

positivamente con la TMS y la radiación lumínica (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012). Al contrario, con sitios donde las condiciones de luz son reducidas los parámetros de crecimiento se relacionan con el nivel de nutrientes o tasas sedimentación (Rico-Esenaro *en prensa*).

En el Arrecife de Puerto Morelos, Rico-Esenaro *et al.*, (2018) encontraron valores menores en densidad esquelética y tasa de calcificación (Cuadro 4), dicha variabilidad pudiera ser explicada por la diferencia en el número de años analizados en cada estudio, ya que en el primer caso fue en el periodo 1986-2015, en el caso de la extensión esquelética, sin embargo, se encontró un promedio muy similar a nuestro estudio. Una posible explicación para los bajos valores de calcificación encontrados en este estudio, podrían estar relacionados con la disponibilidad de luz en la columna de agua, ya que la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  que se deposita está directamente relacionada con la energía trasladada al coral que proviene de la fotosíntesis (Muscatine, 1990; Colombo-Pallota *et al.*, 2010), anteriormente se ha reportado que, al vivir en condiciones de poca luz, los corales disminuyen sus requerimientos energéticos, al mismo tiempo disminuyendo las tasas de crecimiento (Colombo-Pallota *et al.*, 2010; Roth, 2014).

**Cuadro 4.** Promedios anuales y generales de los parámetros de crecimiento de *O. faveolata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, (datos tomados de Rico-Esenaro *et al.*, 2018). Sombreados los años que coinciden con el periodo abarcado en el presente estudio.

Año	Densidad	Extensión	Calcificación
2015	0.63 ± 0.18	0.73 ± 0.0	0.46 ± 0.13
2014	0.69 ± 0.19	0.54 ± 0.0	0.38 ± 0.11
2013	0.73 ± 0.16	0.69 ± 0.0	0.56 ± 0.13
2012	0.69 ± 0.16	0.70 ± 0.0	0.54 ± 0.12
2011	0.68 ± 0.23	0.69 ± 0.0	0.51 ± 0.18
2010	0.63 ± 0.17	0.72 ± 0.0	0.51 ± 0.19
2009	0.54 ± 0.19	0.73 ± 0.0	0.39 ± 0.12
2008	0.77 ± 0.19	0.57 ± 0.0	0.77 ± 0.11
2007	0.83 ± 0.21	0.57 ± 0.0	0.47 ± 0.12
2006	0.60 ± 0.17	0.60 ± 0.0	0.36 ± 0.10
2005	0.61 ± 0.14	0.55 ± 0.0	0.34 ± 0.08
2004	0.65 ± 0.15	0.51 ± 0.0	0.33 ± 0.07
2003	0.55 ± 0.18	0.69 ± 0.0	0.38 ± 0.12
2002	0.59 ± 0.16	0.66 ± 0.0	0.39 ± 0.10
2001	0.64 ± 0.17	0.53 ± 0.0	0.33 ± 0.07
2000	0.67 ± 0.14	0.50 ± 0.0	0.34 ± 0.09
1999	0.60 ± 0.16	0.65 ± 0.0	0.38 ± 0.09
1998	0.65 ± 0.12	0.54 ± 0.0	0.35 ± 0.08
1997	0.65 ± 0.15	0.51 ± 0.0	0.34 ± 0.08
1996	0.59 ± 0.17	0.60 ± 0.0	0.35 ± 0.10
1995	0.53 ± 0.18	0.66 ± 0.0	0.35 ± 0.11
1994	0.60 ± 0.15	0.64 ± 0.0	0.39 ± 0.10
1993	0.62 ± 0.14	0.63 ± 0.0	0.39 ± 0.09
1992	0.62 ± 0.16	0.63 ± 0.0	0.39 ± 0.11
1991	0.71 ± 0.14	0.47 ± 0.0	0.34 ± 0.07
1990	0.64 ± 0.16	0.56 ± 0.0	0.36 ± 0.09
1989	0.55 ± 0.16	0.75 ± 0.0	0.41 ± 0.12
1988	0.56 ± 0.17	0.72 ± 0.0	0.41 ± 0.12
1987	0.64 ± 0.17	0.56 ± 0.0	0.36 ± 0.10
1986	0.60 ± 0.18	0.60 ± 0.0	0.36 ± 0.10
<b>Promedio</b>	<b>0.64 ± 0.06</b>	<b>0.62 ± 0.07</b>	<b>0.41 ± 0.09</b>

Otra posible explicación para los bajos valores de calcificación encontrados en este estudio, podrían estar relacionados no solo con las condiciones lumínicas, sino también con la combinación con la temperatura (Nybbaken, 2001). La penetración

de luz (irradiancia y extinción de luz) en el agua en los arrecifes de coral está estrechamente relacionada con la densidad de organismos autótrofos (fotosintéticos) que se encuentran en estos ecosistemas, incluyendo las algas endosimbiontes de los corales formadores de arrecifes, la fotosíntesis béntica en los arrecifes de coral contribuye en la fijación de carbono y mejora las tasas de deposición de  $\text{CaCO}_3$  (Delesalle *et al.*, 1993). Consecuentemente, la disponibilidad de luz y la calidad del agua influyen directamente a los arrecifes de coral y la luz en específico es responsable de la profundidad a la que se pueden desarrollar los corales y la misma distribución espacial de los arrecifes coralinos, al ser la principal fuente de energía de los organismos foto-dependientes (Sheppard *et al.*, 2017). Debido a esta relación que presentan una gran plasticidad en su comportamiento alimenticio al ser capaces de obtener energía de forma heterótrofa o mixtrófica, se ha reportado que, al vivir en condiciones de poca luz, los corales disminuyen sus requerimientos energéticos debido a su cambio de alimentación, ocasionando disminución en las tasas de crecimiento (Colombo-Pallota *et al.*, 2010; Roth, 2014).

Asimismo, se han reportado cambios a nivel morfológico o fenotípico, en función de su capacidad para la captación de luz (Hoogenboom *et al.*, 2008; Muko *et al.*, 2000), tales cambios traen consigo cambios en las características esclerocronológicas (Dodge & Brass, 1984; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007). Los valores de coeficiente de atenuación vertical del agua ( $K_d$ ), en donde más alto sea el  $k_d$  menor es la transparencia, por ejemplo en mares tropicales con aguas claras se encuentra entre  $0.03\text{-}0.04\text{ m}^{-1}$  (Gattuso *et al.*, 2006; Grigg 2006), para el PNAPM se han reportado valores de  $k_d$  de 0.1, un valor alto al compararlo con sitios como Punta Allen, Mahahual y Xcalak, que presentan valores entre 0.05 y 0.09 (Sánchez-Pelcastre, 2023), lo que indica que la calidad y cantidad de luz de la que disponen los corales y algas no son los más óptimos, por lo que se puede considerar este factor como uno de los vectores que afectan directamente a la especie *O. faveolata*. La disminución de los valores de  $k_d$  se pueden deber a muchos factores como la llegada de arribazones masivos de macroalgas en esta zona, *Sargasum fluitans* y *S. natans* (Franks *et al.*, 2011, Smetacek & Zingone, 2013), que provocan ensombrecimiento y un cambio de color, tendiendo a marrón, de las aguas cercanas a la costa (Van Tussenbroek *et al.*, 2017), así como al levantamiento de sedimentos por efecto de

huracanes o tormentas y la descarga de aguas residuales, que en conjunto exacerban la calidad de las propiedades ópticas del agua.

Por otro lado, los parámetros de crecimiento evidenciaron una tendencia positiva en la densidad esquelética durante las dos décadas estudiadas, estos resultados son similares a los reportados por Rico-Esenaro *et al.*, (2018), para la misma área de estudio (PNAPM) y especie *O. faveolata*, encontrando una pequeña pero significativa tendencia de incremento en la tasa de densidad esquelética. El tiempo estudiado en este trabajo coincide con el nombramiento de área como Parque Natural y pese a que esta estrategia de conservación tiene como uno de sus objetivos mantener los procesos ecológicos estables y potencialmente mitigar las perturbaciones, tanto naturales como antropogénicas que afectan a los arrecifes (Bruno *et al.*, 2019), la tendencia observada en este estudio no representa una evidencia de recuperación o indicador de mejoría en el arrecife.

## **6.2. Relación entre los parámetros de crecimiento**

Carricart-Ganivet & Martín-Merino (2001) proponen la existencia de un patrón general de crecimiento llamado “Stretching modulation of skeletal growth”, donde los corales con tasas de extensión mayor presentan menores tasas de calcificación y por el contrario los corales con menores tasas de extensión menores presentan mayores tasas de calcificación, dicha teoría es sustentada con los resultados del presente estudio a pesar del sesgo que presenta el cálculo de la extensión esquelética y tasa de calcificación, los valores de densidad esquelética, reflejan este patrón, ya que se reportan con valores por debajo de lo usual.

El resultado positivo significativo de la relación de tasa de calcificación y densidad esquelética surge como consecuencia de la forma en que se mide la tasa de extensión, ya que este método genera variabilidad adicional inducida, y por lo tanto, la tasa de calcificación, siendo el producto de un parámetro con alta variación y un parámetro conservador, Carricart-Ganivet (2011) sostiene este argumento y menciona que la medición de la extensión esquelética por medio del número y grosor de diseptos representa mejor este parámetro.

Por otro lado, los registros de Rico-Esenaro et al., (2018), para el PNAPM durante los últimos 30 años, evidencian que las colonias de *O. faveolata* han sacrificado continuamente la densidad para mantener los niveles de extensión esqueletal, con esto como antecedente podemos suponer que las condiciones y las presiones ambientales del sitio continúan similares. Posteriormente, Rico-Esenaro et al., (en prensa) analiza datos de 100 años de los parámetros de crecimiento en el mismo sitio, encontrando los valores más bajos para la tasa de calcificación, así como densidad, reportados para *O. faveolata* hasta ahora. Observando que la calcificación sufrió un periodo de decaimiento en el periodo 1975-2005, para posteriormente mostrar índices de recuperación en los últimos 5-10 años, atribuyen estas características a la alta variabilidad hidrológica del sitio, la fuerza del oleaje y la corriente intensa, factores identificados como estresantes para las colonias coralinas (Coronado *et al.*, 2007). Rico-Esenaro *et al.*, (2018) teorizan que uno de los factores con mayor impacto sobre los arrecifes son las descargas de aguas residuales, en Puerto Morelos no se cuenta con un sistema de drenaje sanitario ni pluvial (Vázquez-Lule & Adame, 2009). Hasta el año 2010 en este municipio se contaba con dos plantas de tratamiento de Aguas Residuales (CONAGUA, 2009), en ese mismo año se estimó que alrededor de 1 209, 600 L día<sup>-1</sup> de agua residual sin tratamiento fueron recibidos por el manto acuífero sin tratamiento alguno, cantidad que representa el 50% de lo producido (Rico-Esenaro, 2014), todos estos desechos se filtran hasta los arrecifes coralinos, aumentando la concentración de nutrientes, favoreciendo la concentración de algas y afectado la salud de los arrecifes. Evidencia de los efectos de estas condiciones encontró Rico-Esenaro (2014), al ver una relación positiva significativa entre los valores de  $\delta^{15}N$  y la cantidad de N almacenada en la matriz orgánica de colonias de *O. faveolata* en Puerto Morelos, pues el  $\delta^{15}N$  es un indicador de distintas fuentes de N en los organismos coralinos, como descargas de fertilizantes, agua residual y surgencias.

### **6.3. Efecto de la Temperatura Superficial del Mar en las tasas de crecimiento**

La relación de los parámetros de crecimiento (densidad, extensión y tasa de calcificación) del coral hermatípico *O. faveolata* en respuesta a la evolución de la

temperatura durante las últimas dos décadas nos mostró que no existe una relación significativa que evidencie que este factor sea un condicionante para el comportamiento de cualquiera de los parámetros de crecimiento en ese sitio.

Carricart-Ganivet (2004) observó en corales del mismo género (*Orbicella*) localizados a distintas distancias de la costa en el Caribe mexicano, la relación de la TMS con los parámetros de crecimiento y sugiere que, en un sitio cerca de la costa, la naturaleza de los resultados se deba posiblemente a una baja variación en la TMS, que permite que los efectos de otras variables ambientales se hagan más evidentes, como se observa en nuestros resultados. Por lo que, podemos atribuir el comportamiento de las variables de crecimiento, a los efectos de otras condiciones medioambientales, así como a las presiones antropogénicas mencionadas anteriormente. Basado en los antecedentes, al comparar el aumento en la temperatura del nivel del mar, con el de las amenazas antropogénicas, observamos que estas últimas han tenido un aumento significativo en esta zona, a diferencia de la TMS que se ha mostrados estable en las últimas dos décadas analizadas. Por otro lado, la estabilidad en la TMS podría deberse a alto dinamismo hidráulico de estos sitios, en particular, esta región se caracteriza por la presencia de la corriente de Yucatán, un ambiente micro-mareal y la influencia de los vientos alisos (Coronado, 2005), se ha observado que existe un patrón de circulación que consiste en un flujo que es inducido por la rompiente del oleaje, la cual, a través de la barrera arrecifal ingresa a la laguna, para posteriormente abandonar por las bocas norte y sur. El corto tiempo de residencia del agua (Coronado, 2005) puede ayudar a explicar la estabilidad de la temperatura en la zona, al haber un intercambio de agua constante, se evita el estancamiento y con ello el sobrecalentamiento de esta.

Carricart-Ganivet *et al.*, (2000) observaron en el Caribe Mexicano que las diferencias en las condiciones ambientales, específicamente en la temperatura, se han mantenido similares durante las últimas dos décadas, Molina (2020) reporta que en el PNAPM aunque no se ha observado un aumento significativo de la TMS esta ha aumentado 0.95°C. Anteriormente, se ha reportado que este género posee menor sensibilidad al estrés térmico a comparación de otros corales constructores de corales, como *Porites*, al menos en las últimas tres décadas (Carricart-Ganivet

*et al.*, 2012). Sin embargo, es necesario mantener un monitoreo continuo del comportamiento de los parámetros de crecimiento de esta especie, ya que el no haber encontrado relación con la TMS. Una explicación alterna se puede deber a que el promedio de la TMS aún se encuentra dentro de los estándares en los que se considera que un coral se puede desarrollar de manera óptima, 22°C y 28°C en promedio (CONABIO, 2019), y 0.9°C por debajo de la TMS donde *O. faveolata* alcanzaría su tasa de calcificación máxima. Por lo que potencialmente al alcanzar el límite máximo recomendado, comiencen a presentar efectos relacionados con la temperatura en todos los parámetros de crecimiento de esta especie.

## **7. Conclusiones**

El PNAPM no presenta evidencia del incremento en la TMS, contrario a lo hipotetizado, por lo tanto, la inexistencia de relación de los parámetros de crecimiento en respuesta a la TMS refleja que son otros los factores en el ambiente o la combinación de ellos los causantes de afectaciones y cambios en el desarrollo de los arrecifes en el PNAPM. Por lo que, es de gran importancia realizar estudios que incluyan otras variables como las condiciones lumínicas, niveles de nutrientes y efectos de presiones antropogénicas para relacionarlo con el crecimiento de especies coralinas. A partir de la tendencia positiva significativa de la densidad observada dentro de las dos décadas estudiadas y la ausencia de tendencia alguna en los otros dos parámetros de crecimiento, se evidencia que a pesar del nombramiento la zona como Parque Nacional este decreto no asegura el mantenimiento de las condiciones ambientales como la aportación de nutrientes y calidad de agua derivada de la actividad humana y desarrollo turístico de la zona.

En este actual contexto, los arrecifes coralinos se encuentran bajo distintas presiones ambientales, debido a que el municipio de Puerto Morelos ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas cuatro décadas, inducida por la migración y el desarrollo de proyectos turísticos de alto impacto, ocasionando un acompañado incremento de nutrientes y sedimentos en la zona.

Con base en los resultados de este estudio se recomienda un mayor esfuerzo de muestreo en el área para tener una base de datos más extensa que brinde un panorama más amplio y completo de las condiciones medio ambientales que modifican el comportamiento de los parámetros de crecimiento, así como la aplicación de mejores y más efectivas estrategias de conservación y restauración integral de las especies constructoras de arrecifes en el PNAPM y la región del Caribe.

## 8. Referencias

1. Allemand D, Ferrier-Pagès C, Furla P, Houlbrèque F, Puvarel S, Reynaud S, Zoccola D. 2004. Biomineralización en corales formadores de arrecifes: de los mecanismos moleculares al control ambiental. *Comptes Rendus Palevol*, 3 (6-7), 453-467. <http://dx.doi.org//10.1016/j.crpv.2004.07.011>
2. Alquezar R, Boyd W. 2007. Development of rapid, cost effective coral survey techniques: tools for management and conservation planning. *Journal of Coastal Conservation*, 11, 105-119. <http://dx.doi.org//10.1007/s11852-008-0011-1>
3. Ardisson PL, May-Kú MA, Herrera-Dorantes MT, Arellano-Guillermo A. 2011. El sistema arrecifal mesoamericano-México: Consideraciones para su designación como zona marítima especialmente sensible. *Hidrobiológica*, 21 (3), 261-280.
4. Baird AH, Guest JR, Willis BL. 2009. Systematic and biogeographical patterns in the reproductive biology of scleractinian corals. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 551-571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120220>
5. Berkelmans R, Oliver JK. 1990. Large scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 18, 55–60. <https://doi.org/10.1007/s003380050154>
6. Bosscher H. 1993. Computerized tomography and skeletal density of coral skeletons. *Coral Reefs*, 12, 97-103. <https://doi.org/10.1007/BF00302109>
7. Burke L, Reytar K, Spalding M, Perry A. 2011. *Reefs at risk revisited*. World Resources Institute, Washington, D.C., USA, 130 pp.

8. 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>
9. Carricart-Ganivet JP, Barnes DJ. 2007. Densitometry from digitized images of X-radiographs: methodology for measurement of coral skeletal density. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 344(1), 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.12.018>
10. Carricart-Ganivet JP, Merino M. 2001. Growth responses of the reef-building coral *Montastraea annularis* along a gradient of continental influence in the southern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 68(1), 133-146.
11. Carricart-Ganivet JP, Beltrán-Torres AU, Merino M, Ruiz-Zárata MA. 2000. Skeletal extension, density and calcification rate of the reef building coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander) in the Mexican Caribbean. *Bulletin of Marine Science*, 66(1), 215-224.
12. Carricart-Ganivet JP, Cabanillas-Teran 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), e32859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032859>
13. Carricart-Ganivet JP, Lough JM, Barnes DJ. 2007. Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive Porites from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 351 (1-2), 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.05.038>
14. Chalker BE, Barnes DJ. 1990. Gamma densitometry for the measurement of skeletal density. *Coral Reefs*, 9, 11-23. <https://doi.org/10.1007/BF00686717>
15. Colombo-Pallotta MF, Rodríguez-Román A, Iglesias-Prieto R. 2010. Calcification in bleached and unbleached *Montastraea faveolata*: evaluating the role of oxygen and glycerol. *Coral Reefs*, 29, 899–907. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0638-x>
16. Coronado C. 2005. Influencia de los forzamientos ambientales en la hidrodinámica de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo,

- México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 84 pp.
17. Coronado C, Candela J, Iglesias-Prieto R, Sheinbaum J, López M, Ocampo-Torres FJ. 2007. On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*, 26, 149–163. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0175-9>
  18. Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van der Ploeg S, Anderson SJ, Kubiszewski I, Farber S, Turner RK. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
  19. Cruz-Ortega, A. 2013. Tasa de Calcificación del género *Montastraea* y *Porites astreoides* en función de la temperatura superficial del océano y el estado de saturación de la aragonita en el Caribe mexicano. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica de Puerto Morelos. 55pp.
  20. Cruz-Piñón G, Carricart-Ganivet JP, 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>
  21. Díaz-Pérez L, Rodríguez-Zaragoza FA, Ortiz M, Cupul-Magaña AL, Carriquiry JD, Ríos-Jara E, García-Rivas MDC. 2016. Coral reef health indices versus the biological, ecological and functional diversity of fish and coral assemblages in the Caribbean Sea. *PLoS one*, 11(8), e0161812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161812>
  22. Dodge RE, Brass GW. 1984. Skeletal extension, density and calcification of the reef coral, *Montastrea annularis*: St. Croix, US Virgin Islands. *Bulletin of Marine Science*, 34(2), 288-307.
  23. Dodge, R. E., & Vaišnys, J. R. 1975. Hermatypic coral growth banding as environmental recorder. *Nature*, 258(5537), 706-708.
  24. Eddy, T.D., Lam, V.W., Reygondeau, G., Cisneros-Montemayor, A.M., Greer, K., Palomares, M.L.D. & Cheung, W.W. 2021. Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth*, 4 (9), 1278-1285.

25. Edmunds PJ. 2005. The effect of sub-lethal increases in temperature on the growth and population trajectories of three scleractinian corals on the southern Great Barrier Reef. *Oecologia*, 146 (3), 350–364.  
<https://doi.org/10.1007/s00442-005-0210-5>
26. Esslemont G. 1999. Heavy metals in corals from Heron Island and Darwin Harbour, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 38 (11), 1051–1054.
27. Franks JS, Johnson DR, Ko DS, Sanchez-Rubio G, Hendon JR, Lay M. 2011. Unprecedented influx of pelagic Sargassum along Caribbean island coastlines during summer 2011. *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute* 64, 6-8.
28. Furla P, Allemand D, Shick M, Ferrier-Pages C, Richier S, Plantivaux A, Tambutte A. 2005. The symbiotic anthozoan: A physiological chimera between alga and animal. *Integrative and Comparative Biology*, 45 (4), 595-604. <https://doi.org/10.1093/icb/45.4.595>
29. Gardner TA, Côté IM, Gill JA, Grant A, Watkinson AR. 2003. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 301 (5635), 958–960.  
<https://doi.org/10.1126/science.1086050>
30. Gattuso JP, Frankignoulle M, Bourge I, Romaine S, Buddemeier RW. 1998. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global and Planetary Change*, 18(1-2), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00035-6)
31. Gattuso JP, Gentili B, Duarte CM, Kleypas JA, Middelburg JJ, Antoine D. 2006. Light availability in the coastal ocean: impact on the distribution of benthic photosynthetic organisms and their contribution to primary production. *Biogeosciences*, 3(4), 489-513. <https://doi.org/10.5194/bg-3-489-2006>
32. Gattuso JP, Hoegh-Guldberg O, Pörtner HO. 2014. Cross-chapter box on coral reefs. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN,

- MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 97-100.
33. Grigg RW. 2006. Depth limit for reef building corals in the Au'au Channel, SE Hawaii. *Coral Reefs*, 25(1), 77-84. <https://doi.org/10.1007/s00338-005-0073-6>
34. Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, Hatziolos M. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857), 1737-1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
35. Hoogenboom MO, Connolly SR, Anthony K. 2008. Interactions between morphological and physiological plasticity optimize energy acquisition in corals. *Ecology*, 89 (4), 1144-1154. <https://doi.org/10.1890/07-1272.1>
36. Hughes TP, Barnes ML, Bellwood DR, Cinner JE, Cumming GS, Jackson JBC, Scheffer M. 2017. Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546, 82–90
37. INE. 2000. Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, México. Instituto Nacional de Ecología. Desarrollo Gráfico Editorial. México, DF, 225p.
38. Jackson JBC, Donovan MK, Cramer KL, Lam VV. 2014. Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Switzerland, 306 pp.
39. Jackson JBC, Kirby MX, Berger WH, Bjorndal KA, Botsford LW, Bourque BJ, Bradbury RH, Cooke R, Erlandson J, Estes JA, Hughes TP, Kidwell S, Lange CB, Lenihan HS, Pandolfi JM, Peterson CH, Steneck RS, Tegner MJ, Warner RR. 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293, 629–638. <https://doi.org/10.1126/science.1059199>
40. Kirk JT. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, 509 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623370>
41. Kleypas JA, Buddemeier RW, Archer D, Gattuso JP, Langdon C, Opdyke BN. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284 (5411), 118-120. <https://doi.org/10.1126/science.284.5411.1>

42. Kramer PA, Kramer PR. 2002. Ecoregional Conservation Planning for the Mesoamerican Caribbean Reef. World Wildlife Fund, Washington, D.C. 147 pp.
43. Kramer PA, Kramer PR .2002. Transient and lethal effects of the 1998 coral bleaching event on the Mesoamerican reef system. In Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia, 2,1175-1180.
44. Lange ID, Perry CT. 2020. A quick, easy and non-invasive method to quantify coral growth rates using photogrammetry and 3D model comparisons. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 714-726. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13388>
45. Leuzinger S, Willis BL, Anthony KRN. 2012. Energy allocation in a reef coral under varying resource availability. *Marine Biology* 159, 177–186. <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1797-1>
46. Lirman DA. 2003. Simulation model of the population dynamics of the branching coral *Acropora palmata*. Effects of storm intensity and frequency. *Ecological Modelling*, (161) (3),167-180. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00346-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00346-0)
47. Lirman D, Fong P. 2007. Is proximity to land-based sources of coral stressors an appropriate measure of risk to coral reefs? An example from the Florida Reef Tract. *Marine Pollution Bulletin*, 54(6), 779-791. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.01>
48. Lough JM, Cooper TF. 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>
49. Lough JL, Barnes DJ. 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(1), 29–67. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(96\)02710-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(96)02710-4).
50. Madin JS, Hoogenboom MO, Connolly SR. 2012. Integrating physiological and biomechanical drivers of population growth over environmental gradients

- on coral reefs. *Journal of Experimental Biology*, 215 (6): 968–976.  
<https://doi.org/10.1242/jeb.061002>
51. Manzello DP, Enochs IC, Kolodziej G, Carlton R. 2015. Recent decade of growth and calcification of *Orbicella faveolata* in the Florida Keys: an inshore-offshore comparison. *Marine Ecology Progress Series*, 521, 81-89.  
<https://doi.org/10.3354/meps11085>
52. Manzello DP, Kolodziej G, Kirkland A, Besemar N, Enochs I. 2021. Increasing coral calcification in *Orbicella faveolata* and *Pseudodiploria strigosa* at Flower Garden Banks, Gulf of Mexico. *Coral Reefs*, 40, 1097–1111. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02108-8>
53. Mayfield AB, Gates RD. 2007. Osmoregulation in anthozoan–dinoflagellate symbiosis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 147(1), 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.12.042>
54. Merino-Ibarra M, Otero L. 1990. Atlas Ambiental Costero, Puerto Morelos, Quintana Roo. Quintana Roo, México: Centro de Investigaciones de Quintana Roo.1, 80 pp.
55. 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)
56. Molina-Ramos SI. 2020. Estado de conservación y cambios en el arrecife de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos ante las amenazas antropogénicas. Tesis de Licenciatura. Universidad Iberoamericana, 55pp.
57. Muko S, Kawasaki K, Sakai K, Takasu F, Shigesada N. 2000. Morphological plasticity in the coral *Porites sillimaniani* and its adaptive significance. *Bulletin of Marine Science*, 66(1), 225-239.
58. Muscatine L. 1990. The role of symbiotic algae in carbon and energy flux in reef corals. *Ecosystems of the world*, 25, 75-87.
59. Navarro-Espinoza E. 2015. Prevalencia de enfermedades de *Acropora palmata* en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos y su relación con las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero. Tesis de grado.

Universidad Nacional Autónoma de México, México.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20156.95369>.

60. Padilla-Souza C, Alata-Vázquez H, Andreu-Montalvos E. 2009. Factores de riesgo para los arrecifes coralinos y sus mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático global. Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche, 181 pp.
61. Padilla C. 2000. Evaluación del potencial de uso sustentable del coral negro en Isla Cozumel y parte sur de Quintana Roo. Amigos de Sian Ka'an AC. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. M160. México D. F. 70 pp.
62. Sánchez-Pelcastre W. 2023. Características esclerocronológicas del coral hermatípico *Orbicella faveolata* en un gradiente latitudinal en el caribe mexicano. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 63 pp.
63. Perera-Valderrama S, Caballero-Aragón H, Santamaría-del Ángel E, Álvarez-Filip L, Reyes-Bonilla H, Cerdeira-Estrada S, Martell-Dubois R, Rosique-de la Cruz LO, Alva-Basurto JC, Francisco-Ramos V, Ressler R, Francisco-Ramos V, Van Tussenbroek, BI, Rodríguez-Zúñiga MT, Villeda-Chávez E, Herrera-Silveira J, Herrera-Pavón R, Zamora-Vilchis I, Blanco-Parra MP, Lara-Lizardi F, Hoyos-Padilla E. 2020. Arrecifes coralinos. En: Perera-Valderrama S, Cerdeira-Estrada S, Martell-Dubois R, Rosique-de la Cruz LO, Caballero-Aragón H, Ressler R (eds.), Protocolos de monitoreo de la biodiversidad marina en áreas naturales protegidas del Caribe mexicano. CONABIO. México, 31-81. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-915>
64. Pikitch E, Santora C, Babcock E, Bakun A, Bonfil R, Conover D, Dayton P, Doukakis P, Fluharty D, Heneman B. 2004. Ecosystem-based fishery management. *Science*, 305(5682), 346-347. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1098222>
65. Precht WF, Aronson RB. 2004. Climate flickers and range shifts of reef corals. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(6), 307-314. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0307:CFARSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0307:CFARSO]2.0.CO;2)
66. Rico-Esenaro S. 2014. Valores de  $\delta^{15}N$  en la matriz orgánica del coral hermatípico *Orbicella faveolata* como indicadores del impacto del desarrollo

- turístico en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica de Puerto Morelos, 41 pp.
67. Rico-Esenaro SD, Sánchez-Cabeza JA, Carricart-Ganivet JP, Montagna P, Ruiz-Fernández AC. 2018. Uncertainty and variability of extension rate, density and calcification rate of a hermatypic coral (*Orbicella faveolata*). *Science of The Total Environment*, 650, 1576-1581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.397>
68. Rico-Esenaro S, Iglesias-Prieto R, Tortolero-Langarica A, Carricart-Ganivet JP. *En prensa*. The  $\delta^{15}\text{N}$  in *Orbicella faveolata* organic matrix reveals anthropogenic impact by sewage inputs in a caribbean coral reef lagoon.
69. Roberts CM, McClean CJ, Veron JE, Hawkins JP, Allen GR, McAllister DE, Vynne C. 2002. Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs. *Science*, 295(5558), 1280-1284. <https://www.doi.org/10.1126/science.1067728>
70. Rodríguez-Troncoso AP, Tortolero-Langarica JDJA. 2014. Corales: organismos base constructores de los ecosistemas arrecifales. *Temas sobre investigaciones Costeras*, 1,3, 33.
71. Roth MS. 2014. The engine of the reef: photobiology of the coral–algal symbiosis. *Frontiers in microbiology*, 5, 422. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00422>
72. Roupheal AB, Inglis GJ. 2000. Take only photographs and leave only footprints?: An experimental study of the impacts of underwater photographers on coral reef dive sites. *Biological Conservation*, 100(3), 281-287. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00032-5)
73. Saenger C, Cohen AL, Oppo DW, Halley RB, Carilli JE. 2009. Surface-temperature trends and variability in the low-latitude North Atlantic since 1552. *Nature Geoscience*, 2(7), 492-495. <https://doi.org/10.1038/ngeo552>
74. SAM. 2004. Proyecto para la Conservación y Uso Sostenible del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) Belice-Guatemala-Honduras-México. Documento Técnico del SAM, 14, 29.

75. Sheppard C, Davy S, Pilling G, Graham N. 2017. The Biology of Coral Reefs. Oxford University Press. London. 2, 384 pp.
76. Sheppard CRC, Davy SK, Pilling GM. 2010. The Biology of Coral Reefs. Oxford University Press, London. 1, 384 pp.
77. Smetacek V, Zingone A. 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. Nature, 504(7478), 84-88. <https://doi.org/10.1038/nature12860>
78. Soto IM, Muller-Karger FE, Hallock P, Hu C. 2011. Sea surface temperature variability in the Florida Keys and its relationship to coral cover. Journal of Marine Biology, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/981723>
79. Spalding MD, Ravolius C, Green EP. 2001. World Atlas of Coral Reef. PNUMA / WCMC, University of California Press, EUA, 416 pp.
80. Tanzil JTI, Brown BE, Dunne RP, Lee JN, Kaandorp JA, Todd PA. 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>
81. Tomascik T, Sander FJMB. 1985. Effects of eutrophication on reef-building corals: I. Growth rate of the reef-building coral *Montastrea annularis*. Marine biology, 87, 143-155. <https://doi.org/10.1007/BF00539422>
82. Tortolero-Langarica JDJA, Cupul-Magaña AL, Carricart-Ganivet JP, Mayfield AB, Rodríguez-Troncoso AP. 2016a. 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, 179. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00179>
83. Van Tussenbroek BI, Arana HAH, Rodríguez-Martínez RE, Espinoza-Avalos J, Canizales-Flores HM, González-Godoy CE, Collado-Vides L. 2017. Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. Marine pollution bulletin, 122(1-2), 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
84. Vásquez-Bedoya LF, Cohen AL, Oppo DW, Blanchon P. 2012. Corals record persistent multidecadal SST variability in the Atlantic Warm Pool since 1775 AD. Paleoceanography and Paleoclimatology, 27 (3). <https://doi.org/10.1029/2012PA002313>

85. Vázquez-Lule AD, Adame MF. 2009. Caracterización del sitio de manglar Puerto Morelos–Punta Maroma. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (ed.) Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, Ciudad de México, 1–11.
86. Veron JE, Hoegh-Guldberg O, Lenton TM, Lough JM, Obura DO, Pearce-Kelly P, Sheppard CRC, Spalding M, Stafford-Smith A, Rogers AD. 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>
87. Wórum FP, Caricart-Ganivet JP, Benson L, Golicher D. 2007. Simulation and Observations of annual density banding in skeletons of *Mostastraea* (Cnidaria: Scleractinia) growing under thermal stress associated with ocean warming. *Limnology and Oceanography*., 52, 2317-2323. <https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.5.2317>
88. Yáñez-Arancibia A, Zárate D, Fandiño VS. 1996. La evaluación del impacto ambiental en la región del Gran Caribe. 587-604. En: Botello AV, Rendón-Von Osten J, Gold-Bouchot G, Agraz-Hernández C(eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. México. EPOMEX Serie Científica Universidad Autónoma de Campeche. 6. 666.
89. Yranzo A, Villamizar E, Herrera-Reveles AT, Pérez J, Boadas H, Pereira C, Rodríguez JG, Narciso S, Bustillos F, Cavada-Blanco F. 2020. Estatus y plan de acción para la conservación del coral pilar estrella, *Orbicella annularis* y el coral estrella montañoso, *Orbicella faveolata*. Instituto de Zoología y Ecología Tropical, EDGE of Existence, Sociedad Zoológica de Londres, Londres, UK.
90. Zakai D, Chadwick-Furman NE. 2002. Impacts of intensive recreational diving on reef corals at Eilat, northern Red Sea. *Biological Conservation*, 105(2), 179-187. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00181-1)