

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



**Maestría en Ciencias
Ecología Marina**

**Endo-bioerosión en corales masivos del Pacífico mexicano y su
relación con factores extrínsecos e intrínsecos**

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

Presenta:

Jazmín Arleth Cosain Díaz

Ensenada, Baja California, México
2021

Tesis defendida por
Jazmín Arleth Cosain Díaz

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Codirector de tesis

Dr. José de Jesús Adolfo Tortolero Langarica
Codirector de tesis

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera

Dra. Raquel Negrete Aranda



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

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Jazmín Arleth Cosain Díaz © 2021

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Jazmín Arleth Cosain Díaz** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Endo-bioerosión en corales masivos del Pacífico mexicano y su relación con factores extrínsecos e intrínsecos

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Codirector de tesis

Dr. José de Jesús Adolfo Tortolero Langarica
Codirector de tesis

El crecimiento, mantenimiento y configuración de los arrecifes, dependen de la dinámica entre las fuerzas de crecimiento (producción) y erosión (remoción de carbonato de calcio). La bioerosión es una de las principales fuentes de erosión en los sistemas arrecifales y pese a su importancia ha sido poco estudiada en la región del Pacífico mexicano. Por lo que, el objetivo de este trabajo fue cuantificar las tasas de endo-bioerosión en corales masivos a lo largo del Pacífico mexicano: Golfo de California (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo), Pacífico Central (Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas) y Pacífico Sur (Zihuatanejo y Huatulco), así como determinar su relación con factores extrínsecos e intrínsecos. Para obtener el volumen de CaCO_3 removido por endo-bioerosión, se analizaron radiografías de rayos-X en colonias de 5 especies diferentes de coral, se determinó la proporción de áreas erosionadas, e identificaron los organismos endo-bioerosionadores causantes. En promedio, la región del Pacífico sur tiene una tasa de bioerosión de $7.50 \pm 11.80 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, el Pacífico central $11.59 \pm 13.38 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y la región del golfo de California $8.63 \pm 19.20 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$. A nivel localidad, Bahía de Concepción obtuvo la mayor tasa de endo-bioerosión ($17.00 \pm 13.76 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Zihuatanejo presentó menor tasa de endo-bioerosión ($0.7 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$). El Pacífico sur tiene la menor endo-bioerosión. Los principales endo-bioerosionadores resultaron ser los moluscos con $4.59 \pm 7.12 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, seguido de las esponjas erosionadoras con $1.93 \pm 5.25 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y en menor medida los poliquetos $0.22 \pm 0.47 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$. La densidad del esqueleto se correlacionó de manera positiva con la tasa de endo-bioerosión por moluscos en *Porites panamensis*, *Pavona gigantea* y *Porites lobata*. A pesar de mostrar valores altos de nutrientes en todas las localidades, las tasas de endo-bioerosión fueron bajas a lo reportado en otros estudios. Un aumento en la bioerosión podría debilitar la estructura física de las colonias, poniendo en riesgo los procesos ecológicos y biológicos en ecosistemas arrecifales.

Palabras clave: Endo-bioerosión, Pacífico Mexicano, endo-bioerosionadores

Abstract of the thesis presented by **Jazmín Arleth Cosain Díaz** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in [Marine Ecology](#).

Endo-bioerosion in massive corals of the Mexican Pacific and its interaction with extrinsic and intrinsic factors

Abstract approved by:

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena
Codirector de tesis

Dr. José de Jesús Adolfo Tortolero Langarica
Codirector de tesis

The growth, maintenance and configuration of reefs depend on the dynamics between the forces of growth (production) and erosion (removal of calcium carbonate). Bioerosion is one of the main sources of erosion in reef systems and despite its importance has been poorly studied in the Mexican Pacific region. The objective of this study was to quantify the rates of endo-bioerosion in massive corals along the Mexican Pacific: Gulf of California (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo), Central Pacific (Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas) and Southern Pacific (Zihuatanejo and Huatulco), as well as to determine their relationship with extrinsic and intrinsic factors. To obtain the volume of CaCO₃ removed by endo-bioerosion, X-ray radiographs were analyzed in colonies of 5 coral species, the proportion of eroded areas was determined, and the identification of the endo-bioeroding organisms. On average, the Southern Pacific region has a bioerosion rate of 7.50 ± 11.80 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹, the central Pacific 11.59 ± 13.38 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹ and the Gulf of California region 8.63 ± 9.20 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹. At the local level, Bahía de Concepción obtained the highest rate of endo-bioerosion (17.00 ± 13.76 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹) and Zihuatanejo site presented the lowest rate of endo-bioerosion (0.7 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹). The Southern Pacific had the least endo-bioerosion. The main endo-bioeroders were the molluscs with 4.59 ± 7.12 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹, followed by eroding sponges with 1.93 ± 5.25 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹ and to a lesser extent polychaetes with 0.22 ± 0.47 mg CaCO₃ cm⁻² year⁻¹. The skeletal density was positively correlated with the endo-bioerosion rate by mollusks in *Porites panamensis*, *Pavona gigantea* and *Porites lobata*. Endo-bioerosion rates in general were not very high, despite showing high nutrient stress values in all localities, but the endo-bioerosion could weaken its physical structure of the colonies, being able to put in risk the ecological and biological processes in reef ecosystems.

Keywords: endo-bioerosion, Mexican Pacific, endo-bioeroders

Dedicatoria

A mi familia
Al mar

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), y en particular al Posgrado en Ecología Marina.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado a través de su Programa de Becas de Posgrados de Calidad. No. CVU: 964500.

Al Proyecto de Ciencia de Frontera "FORDECYT-PRONACES 86397 Evaluación de la función geo-ecológica de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano" cuyo financiamiento hizo posible la realización de esta tesis.

A mis codirectores de tesis. Al Dr. Rafael Cabral Tena por aceptarme en la realización de este trabajo y ayudarme a lo largo del mismo, gracias por ser mi guía en este proceso, por sus consejos y comentarios que fueron de mucha ayuda. Al Dr. Adolfo Tortolero Langarica por incentivar me a seguir por el camino de la investigación y estar al pendiente de mi trabajo, así como por ser un buen guía en este camino.

A los miembros de mi comité. Al Dr. Luis Calderón por sus enseñanzas a lo largo de la maestría y aportes en la elaboración de la tesis. A la Dra. Raquel Negrete Aranda, por sus aportaciones en los avances, haciendo que el trabajo fuera mejorando poco a poco.

A todos aquellos investigadores que proporcionaron sus muestras, para la realización del trabajo: Por el lado del Pacífico Central al Doctor Amilcar Cupul Magaña, a la Dra. Alma Paola Rodríguez-Troncoso ambos del Laboratorio de Ecología Marina Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara. Al Instituto Tecnológico Nacional de México, campus Bahía de Banderas y al Proyecto Iniciativa de conservación Isla Marías Cleofás de la A.C, PROZONA. En el sur, al Dr. Andrés López Pérez de la Universidad Metropolitana. En el norte, al Dr. Héctor Reyes Bonilla, al Dr. Luis Calderón y al Dr. Eduardo Francisco Balart Paez.

A todos los profesores que me dieron clases a lo largo del posgrado, sembrando conocimiento que me servirá más adelante.

A los miembros del laboratorio de esclerocronología y ecología y pesquerías de la zona costera, por sus comentarios y compañía en el laboratorio, a Fernando por sus aportaciones. A todos mis compañeros de generación por su compañía y ayuda. A los amigos que hice en el camino, en especial a Poncho y Lucero.

A mis padres, por siempre estar al pendiente de mí y apoyarme para cumplir mis metas, donde sea que estas me lleven. A mis hermanas por ser grandes mujeres y mis compañeras de vida. A mis tíos, primos y familiares que me apoyaron a llegar donde estoy.

A Ángel por su compañía y apoyo en la finalización de mi trabajo, gracias por todo un año de aventuras.

Al mar por su infinito misterio, a los corales por su particular belleza.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Erosión en el sistema arrecifal	2
1.1.2 Organismos bioerosionadores	4
1.1.3 El Pacífico mexicano	7
1.1.4 Antecedentes	8
1.2 Justificación	9
1.3 Hipótesis.....	10
1.4 Objetivos	10
1.4.1 Objetivo general.....	10
1.4.2. Objetivos específicos.....	10
Capítulo 2. Metodología.....	12
2.1 Área de estudio	12
2.2 Recolecta y tratamiento de muestras.....	12
2.3 Determinación de volumen y porcentaje de endo-bioerosión.....	15
2.4 Tasa de endo-bioerosión anual	15
2.5 Determinación de endo-bioerosionadores	16
2.6 Factores ambientales	17
2.7 Análisis estadísticos.....	17
Capítulo 3. Resultados	18
3.1 Pacífico mexicano.....	18
3.2 Endo-bioerosión en subregiones del Pacífico mexicano.....	19
3.2.1 Tasas de endo-bioerosión	19
3.2.2 Volumen de endo-bioerosión.....	23

3.2.3 Porcentaje de endo-bioerosión.....	26
3.3 Endo-bioerosión en localidades del Pacífico mexicano	30
3.3.1 Bahía de los Ángeles.....	30
3.3.2 Bahía de Concepción	30
3.3.3 La Paz.....	31
3.3.4 Cabo Pulmo	31
3.3.5 Isla Isabel	32
3.3.6 Isla Cleofás.....	32
3.3.7 Islas Marietas.....	33
3.3.8 Zihuatanejo.....	33
3.3.9 Huatulco	34
3.4 Comparación de endo-bioerosión entre localidades, morfotipos, especies	35
3.4.1 Tasas de endo-bioerosión	35
3.4.2 Volumen de endo-bioerosión.....	37
3.4.3 Porcentaje de endo-bioerosión.....	39
3.5 Endo-bioerosión por subregiones	40
3.6 Relación de la endo-bioerosión con la densidad esquelética.....	41
3.7 Relación de la endo-bioerosión con los factores ambientales.....	45
Capítulo 4. Discusión	46
4.1 Endo-bioerosión por regiones.....	46
4.1.1 Tasa de endo-bioerosión.....	46
4.1.2 Volumen de endo-bioerosión.....	47
4.1.3 Porcentaje de endo-bioerosión.....	49
4.2 Endo-bioerosión por localidades.....	50
4.2.1 Tasa de endo-bioerosión.....	50
4.2.2 Volumen y porcentaje de endo-bioerosión	51
4.3 Endo-bioerosionadores	51
4.4 Relación de la densidad con la endo-bioerosión	53
Capítulo 5. Conclusiones	55
Literatura citada	56

Lista de figuras

Figura		Pagina
1	Modelo conceptual de los procesos de producción y erosión de carbonato en los arrecifes coralinos impulsados por cambios ecológicos o ambientales. (Tomado de Perry et al., 2008).	4
2	Principales erosionadores internos encontrados en arrecifes de coral (Modificado de Glynn, 1997). Microbioerosionadores: A. Alga, fungi, bacteria. Macrobioerosionadores: B. Esponjas (<i>Clionidae</i>), C. Bivalvos (<i>Lithophaga</i>), D. Percebes (<i>Lithotrya</i>), E. Sincumpulidos (<i>Aspidosiphon</i>), F. Poliquetos (<i>Eunicidae</i>).....	5
3	Localización de las localidades de estudio en el Pacífico mexicano. Bahía Concepción, Bahía de los Ángeles, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Cleofás, Islas Marietas, Isla Isabel, Huatulco y Zihuatanejo.....	12
4	Fotos de las especies de coral: (a) <i>Pavona varians</i> , (b) <i>Porites lobata</i> , (c) <i>Pavona clavus</i> , (d) <i>Porites panamensis</i> , (e) <i>Pavona gigantea</i>	13
5	Negativo de radiografía rayos-X de laja de coral de <i>Porites lobata</i> . Marcas delimitadas y enumeradas en la laja representan endo-bioerosión en corales. Se muestra el estándar de aragonita en la parte izquierda.	14
6	Imagen de radiografía de rayos-X de la especie <i>Porites panamensis</i> (La Paz), mostrando las marcas erosivas de los principales endo-bioerosionadores (a) moluscos, (b) poliquetos, (c) esponjas. Los moluscos dejan marcas ovaladas con evidencia de desplazamiento, los poliquetos orificios pequeños y galerías largas. Las esponjas perforadoras se evidencian como galerías o pequeñas cámaras que se pueden extender desde el interior hasta la parte externa del coral. Del lado derecho cubos del estándar de aragonita.....	16
7	Tasa de endo-bioerosión ($\text{mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) por regiones (Golfo de California, Pacífico Central, Pacífico Sur). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.....	20
8	Tasa de endo-bioerosión ($\text{mg cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) entre especies <i>Pavona clavus</i> , <i>Pavona gigantea</i> , <i>Pavona varians</i> , <i>Porites lobata</i> y <i>Porites panamensis</i> . Diferencias dadas por <i>Porites lobata</i> . Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.	21
9	Tasa de bioerosión ($\text{mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) por morfotipos (columnar, incrustante, masivo, vida libre). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.	21

10	Tasa de bioerosión $\text{mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ por grupo bioerosionador, esponjas, moluscos y poliquetos. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	22
11	Volumen erosionado (cm^3) por regiones (Golfo de California, Pacífico Central, Pacífico Sur), las diferencias dadas por la sub-región del Pacífico Sur. Color azul fuerte indica diferencias significativas. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	24
12	Volumen erosionado (cm^3) por morfotipos (columnar, incrustante, masivo, vida libre), diferencias dadas por el morfotipo columnar contra el incrustante y de vida libre. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	24
13	Volumen erosionado (cm^3) entre especies (<i>Pavona clavus</i> , <i>Pavona gigantea</i> , <i>Pavona varians</i> , <i>Porites lobata</i> , <i>Porites panamensis</i>). Las diferencias están dadas por <i>Pavona clavus</i> . Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	25
14	Volumen endo-bioerosionado en cm^3 por esponjas, moluscos y poliquetos. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	26
15	Porcentaje (%) erosionado por Sub-región del PM. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	27
16	Porcentaje (%) erosionado por tipo de morfotipo. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	28
17	Porcentaje (%) erosionado por especies (<i>Pavona clavus</i> , <i>Pavona gigantea</i> , <i>Pavona varians</i> , <i>Porites lobata</i> , <i>Porites panamensis</i>). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	28
18	Porcentaje (%) erosionado por grupo erosionador (esponjas, moluscos, poliquetos). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos	29
19	Tasa de endo-bioerosión ($\text{mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) entre localidades (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas, Zihuatanejo y Huatulco), las diferencias entre localidades están dadas principalmente por Zihuatanejo y La Paz. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos,	

	la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.....	36
20	Volumen de endo-bioerosión (cm ³) entre localidades (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Cleofás, Islas Marietas, Zihuatanejo y Huatulco). Diferencia dadas por Huatulco, Isla Cleofás y Zihuatanejo. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.....	38
21	Porcentaje (%) de endo-bioerosión entre localidades (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas, Zihuatanejo y Huatulco). Diferencias dadas por Zihuatanejo. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.....	39
22	NMDS de tasa y volumen de endo-bioerosión por bioerosionadores. Golfo de California: azul, Pacífico Central: verde, Pacífico Sur: naranja, Poliquetos: cuadrado, esponjas: estrellas, moluscos: triangulo. Stress:0.1252	41
23	Gráfico de correlación de Spearman entre las variables: TSM, Chl-a, Den=densidad promedio, Vol= volumen bioerosionado, %=Porcentaje de bioerosión, TBIO=Tasa de endo-bioerosión.....	42
24	A) Regresión lineal entre el promedio de densidad del esqueleto por localidad y de la tasa de endo-bioerosión y B) Regresión lineal entre el promedio de densidad del esqueleto por especie de coral y el promedio de volumen erosionado.	43
25	Regresión lineal entre la densidad del esqueleto y el volumen erosionado en <i>Pavona gigantea</i> y <i>Porites panamensis</i>	43
26	Regresión lineal entre la densidad del esqueleto y la endo-bioerosión por moluscos, para <i>Porites panamensis</i> , <i>Pavona gigantea</i> y <i>Porites lobata</i>	44
27	Valores de promedio anual de clorofila a y temperatura minima mensual para todas las localidades (Bahia de los Ángeles: naranja, Bahia Concepción:verde claro, Cabo Pulmo: verde fuerte, La Paz: azul claro, Isla Cleofas: azul fuerte, Isla Isabel: morado, Islas Marietas: rosa, Zihuatanejo: rojo, Huatulco: amarillo). Basandose en la figura de Halfar et al., 2005. Líneas punteadas indican temperaturas mensuales mínimas y valores máximos de clorofila a requeridos para el buen desarrollo de las comunidades coralinas.....	45

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Localidad, especie, número de colonias, profundidad y fecha de las colonias colectadas.....	13
2 Densidad del esqueleto, volumen bioerosionado, porcentaje de bioerosión, tasa de endo-bioerosión promedio \pm desviación estándar, número de lajas y número de colonias por sitio y especie Den. =densidad del esqueleto, Vol.= volumen bioerosionado, %=Porcentaje de bioerosión, TBIO=Tasa de bioerosión, BLA=Bahía de los Ángeles, BCO=Bahía de Concepción, LAP=La Paz, CP=Cabo Pulmo, IISA=Isla Isabel, CLE=Isla Cleofás, MAR=Islas Marietas, ZIH=Zihuatanejo, HUA=Huatulco	18
3 Promedio \pm desviación estándar de volumen y tasa de endo-bioerosión por bioerosionadores, en el Pacífico mexicano	19
4 Tasas de endo-bioerosión por grupo erosivo en cada subregión del PM.....	20
5 Resultados del PERMANOVA de los efectos de la subregión, morfotipos y especies en la tasa de en-bioerosión. Df = grados de libertad, R ² =Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.....	20
6 PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y la interacción grupo erosionador-sub-región en la tasa de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R ² =Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.....	22
7 Volumen erosionado por grupo erosivo en cada subregión del Pacífico mexicano.....	23
8 Resultados del PERMANOVA de los efectos de subregión, morfotipos y especies en el volumen de bioerosión. Df= grados de libertad, R ² =Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.....	24
9 PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las regiones en el volumen de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R ² =Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.....	25
10 Resultados del PERMANOVA de los efectos de la subregión, morfotipos y especies en el porcentaje de bioerosión. Df= grados de libertad, R ² =Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.....	27

11	PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las regiones en el porcentaje de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	29
12	Promedio de volumen bioerosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Bahía de los Ángeles. No id= no identificado.....	30
13	Promedio de volumen bioerosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Bahía de los Concepción. No id= no identificado.....	30
14	Promedio de volumen bioerosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en la Paz. No id= no identificado.....	31
15	Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Cabo Pulmo. No id= no identificado.....	31
16	Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Isla Isabel. No id= no identificado.....	32
17	Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Isla Cleofás. No id= no identificado	32
18	Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Islas Marietas, en dos especies de coral. No id= no identificado.....	33
19	Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Zihuatanejo, en dos especies de coral. No id= no identificado.....	34
20	Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Huatulco, en tres especies de coral. No id= no identificado.....	34
21	Resultados del PERMANOVA de los efectos de la localidad, morfotipos y especies de coral, en la tasa de endo-bioerosión. Df = grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	35

22	PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las localidades en la tasa de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	36
23	Resultados del PERMANOVA de los efectos de las localidades, morfotipos y especies en el volumen de bioerosión. Df = grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ =Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	38
24	PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las localidades en el volumen de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	38
25	Resultados del PERMANOVA de los efectos de los entre localidades, morfotipos y especies en el porcentaje de bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	39
26	PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las localidades en el porcentaje de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P= <0.05$ en negrita.....	40

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más productivos y biodiversos del planeta, están distribuidos principalmente en zonas someras de mares tropicales y subtropicales, cuya base estructural sirve como hábitat para el 25% de la biodiversidad marina (Glynn et al., 1997). Son localidades de gran importancia biológica y ecológica, ya que en ellos se desarrolla una extensa red de interacciones ecológicas, incluyendo zonas de reproducción, alimentación, crecimiento y refugio de una gran diversidad de especies de peces e invertebrados marinos (Sheppard et al., 2017). A pesar de que se desarrollan generalmente en ambientes oligotróficos, los arrecifes coralinos también pueden prosperar en ambientes con alta productividad (nutrientes) debido al flujo constante de las corrientes oceanográficas, y al eficiente reciclamiento biológico de nutrientes que se lleva a cabo en estos ecosistemas (Salm et al., 2000). Consecuentemente, los sistemas arrecifales proveen recursos pesqueros y económicos a zonas costeras, así como, beneficios sociales, culturales y paisajísticos (Moberg y Folke, 1999). En la actualidad, Se ha calculado el valor de los servicios ambientales de estos ecosistemas por más de US \$ 352,000 ha al año (Costanza et al., 1998 ; de Groot et al., 2012).

Adicionalmente a su importancia y valor económico, los arrecifes coralinos cumplen con diversas funciones geo ecológicas como: desarrollo y mantenimiento de la complejidad estructural del arrecife, la producción de carbonato de calcio como base del ciclo de los carbonatos, la capacidad de mantener su crecimiento vertical en respuesta al aumento del nivel del mar (Kuffner y Toth, 2016), así como, la producción de arena para el mantenimiento playas y zonas adyacentes al arrecife (Perry y Alvarez-Filip, 2019). Aunado a estas funciones, proveen servicios ambientales adicionales como, la captación de CO₂ atmosférico para la formación de CaCO₃ (actuando como sumidero de CO₂), así como, brindar protección y barrera física a la línea costera disipando la energía de las olas y corrientes, previniendo la erosión de playas y el impacto a los asentamientos humanos (Moberg y Folke, 1999).

Las funciones y servicios que brindan los arrecifes de coral dependen principalmente del crecimiento activo de organismos calcificadores, primariamente de corales hermatípicos, y, de manera secundaria, por algas calcáreas, foraminíferos, moluscos, equinodermos y otros invertebrados calcificadores (Moberg y Folke, 1999). Los corales hermatípicos son los que mayormente contribuyen a la estructura física de los arrecifes, aportando gran cantidad de material calcáreo mediante el proceso de la calcificación (Sheppard et al., 2017). Este proceso fisiológico, está mediado en gran medida, por la relación simbiótica que tienen

con micro algas dinoflageladas de la familia symbiodiniaceae, las cuales proveen de energía para el proceso de calcificación (LaJeunesse et al., 2018; Reaka-Kudla et al., 1996). En el proceso de calcificación los corales depositan carbonato de calcio en la región basal a través de un tejido celular llamado epitelio calicoblástico en forma de cristales de aragonita, donde cada pólipo crea una estructura esquelética (coralito), el cual crece apical y radialmente (Allemand et al., 2004; Sheppard et al., 2017). Durante este proceso los corales obtienen iones de calcio y carbonato inorgánico de la columna de agua de mar al sitio de calcificación, de este proceso de mineralización también resultan protones de hidrogeno (H^+): $Ca^{2+} + HCO_3^- = CaCO_3 + H^+$ (Allemand et al., 2011).

La constante precipitación de carbonato promueve el crecimiento de las colonias de coral y a su vez el incremento de la cobertura coralina y matriz arrecifal (Lemus et al., 2014). Estos procesos son controlados principalmente por dos estrategias internas de crecimiento: la cantidad de energía disponible para la precipitación de material calcáreo (tasa de calcificación) y la manera en la que el $CaCO_3$ es utilizado para la construcción del esqueleto (Carricart-Ganivet, 2007; Lough y Cooper, 2011). Por otro lado, la formación y crecimiento de los esqueletos coralinos están influenciados por variables ambientales o externas como la temperatura del mar (que debe ser mayor de $20^\circ C$) y de la alcalinidad, ya que el CO_2 disuelto en el agua se precipita con mayor facilidad como carbonato en condiciones ligeramente más alcalinas y de mayor temperatura (Calderón-Aguilera et al., 2007; KLeypas et al., 1999). Otros factores ambientales que influyen al crecimiento coralinos son la irradiación lumínica, la sedimentación, la concentración de nutrientes, el estado de saturación de aragonita a ($\Omega_{aragonita}$) y el pH (Lough y Cooper, 2011; Medellín-Maldonado et al., 2016). Estos factores físicos pueden modular el crecimiento coralino, el cual se puede presentar en diferentes tipos y formas (morfotipos), tales como masivo, submasivo, columnar, incrustante, laminar, ramificada, nodular e incluso de vida libre (Veron 1996; Rodríguez-Troncoso y Tortolero-Langarica, 2014), dependiendo de la especie, su historia de vida y cambios ambientales, con el fin de aclimatarse y persistir.

1.1.1 Erosión en el sistema arrecifal

El crecimiento, mantenimiento y configuración del arrecife, depende de la dinámica entre los procesos de crecimiento (producción) y erosión (remoción) de carbonatos de calcio, los cuales actúan de diversas formas sobre la acreción de los sistemas coralinos (Sheppard et al., 2017). Un arrecife considerado sano, es aquel cuya tasa de producción es mayor en contraste con su tasa de erosión, y manteniendo un balance

en el presupuesto de carbonato del arrecife, con una producción de CaCO_3 neta positiva (Sheppard et al., 2017). Al igual que la calcificación coralina, la erosión también es determinada por factores ambientales extrínsecos como el entorno fisicoquímico del mar (Lough y Cooper, 2011; P. Glynn, 1997; Tribollet y Golubic, 2011) y adicionalmente la erosión es influenciada por la acción y efectos de factores intrínsecos como densidad del esqueleto y morfología (Cosain-díaz et al., 2021; Highsmith, 1981a). La erosión en el sistema arrecifal es impulsada biológica, física y químicamente. La erosión química implica la disolución de CaCO_3 de las colonias causada, principalmente, por el efecto de la acidificación del océano y los bajos niveles de saturación de aragonita (Kleypas et al., 1999). Por otro lado, la erosión física es causada por el desgaste y remoción de CaCO_3 causado por el movimiento mecánico de oleaje y corrientes (Zundevich et al., 2007). La erosión biológica o bioerosión (Neumann, 1966), es la remoción de CaCO_3 del sustrato coralino, causada directamente por la acción de organismos que desgastan y perforan las colonias debido a su comportamiento y hábitos alimenticios. La bioerosión se considera la fuerza de degradación de mayor influencia en el arrecife, ya que la erosión física y la erosión química se dan en menor medida (Tribollet y Golubic, 2011).

La remoción de carbonato de calcio en los arrecifes coralinos, no es solo un proceso destructivo, este juega un papel importante en la sedimentación del arrecife y ecosistemas marinos, ayudando al reciclamiento del material calcáreo (Ca^{2+} y C), así como al mantenimiento de la diversidad, ya que mediante el proceso de bioerosión se crean cavidades de refugio para diversos organismos (Peter W. Glynn, 1997). Los sedimentos resultantes por la bioerosión ayudan a la solidificación de la matriz arrecifal gracias a los procesos de litificación y cementación arrecifal (Salm et al., 2000). Además, la bioerosión es una parte integral del balance de carbonatos en el arrecife y otros ecosistemas costeros (Tribollet y Golubic, 2011) (Figura 1).

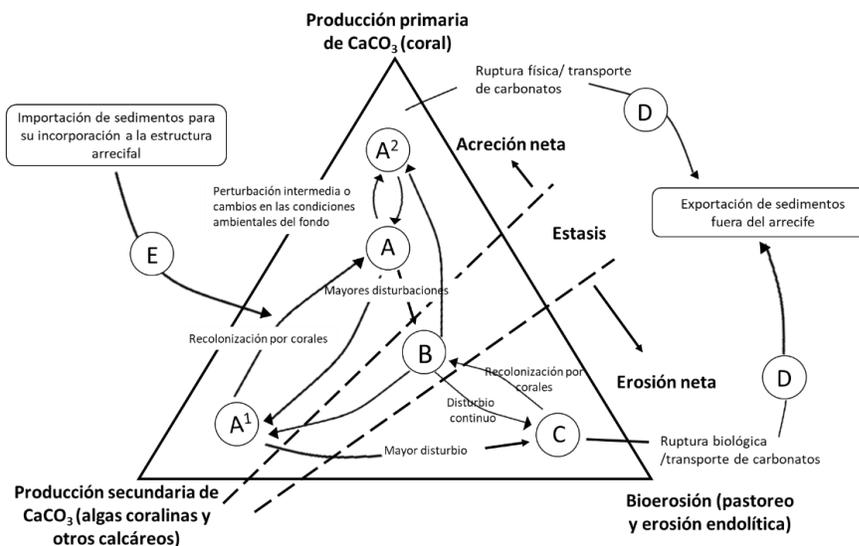


Figura 1. Modelo conceptual de los procesos de producción y erosión de carbonato en los arrecifes coralinos impulsados por cambios ecológicos o ambientales. (Tomado de Perry et al., 2008).

La bioerosión coralina puede ser evaluada y determinada mediante la medición del área/volumen de material calcáreo removido ($\text{g cm}^2 / \text{g cm}^3 \text{CaCO}_3$), así como con la tasa de bioerosión, ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$), la cual es la cantidad media de carbonato que se ha removido del sustrato en una escala de tiempo (DeCarlo et al., 2015). En la actualidad existen diversas metodologías para evaluar la erosión biológica dependiendo del grupo de organismos, tanto para bioerosionadores externos o epilíticos es basado en censos de abundancia, y la estimación de marcas o cicatrices de bioerosión (Glynn y Manzello., 2015, Garzon-Ferreira et al., 2001). Por otro lado, la evaluación de la bioerosión interna o endolítica (definido como endo-bioerosión para este estudio) la técnica más utilizada se basa en el análisis de imágenes de rayos X de lajas del esqueleto del coral, donde se mide el grosor y el área bioerosionada, así como el uso de tomografía computarizada (DeCarlo et al., 2015; Hein et al., 1975), o la inclusión de las colonias con parafina o silicón de los espacios internos erosionados, utilizando la técnica de peso boyante (Cosain-díaz et al., 2021; Manzello, 2010; Norzagaray-López, 2010).

1.1.2 Organismos bioerosionadores

La bioerosión puede ser causada por una gran diversidad de organismos, los cuales, se ha estimado excede la biota visible en los arrecifes (Glynn, 1997; Sheppard et al., 2017). Los bioerosionadores incluyen especies

de diversos tamaños, desde pequeños micro-perforadores (algas, hongos, bacterias) a grandes macro perforadores (esponjas, gusanos poliquetos, sipuncúlidos, moluscos, crustáceos, equinodermos), así como algunas especies de peces (escaridos y peces globo) (Glynn y Manzello, 2015). Los agentes bioerosionadores se pueden clasificar dependiendo de la zona de la colonia de coral que es afectada, clasificándose como (1) bioerosionadores epilíticos, ya que actúan en la parte externa del coral, por ejemplo, organismos herbívoros (peces y equinodermos) que son capaces de excavar sustratos calcáreos, al raspar, morder e incluso disolver el sustrato mientras se alimentan de algas, pólipos y sustratos calcáreos y (2) los bioerosionadores endolíticos, actúan en la parte interna del esqueleto, los cuales son en su mayoría, son suspensívoros o filtradores (p. ej., esponjas, bivalvos, gusanos anélidos, algas endolíticas y cianobacterias) los cuales buscan refugio o alimento causando remoción interna del esqueleto del coral (Nava y Carballo, 2008; Steneck, 1983; Aline Tribollet y Golubic, 2011) (Figura 2).

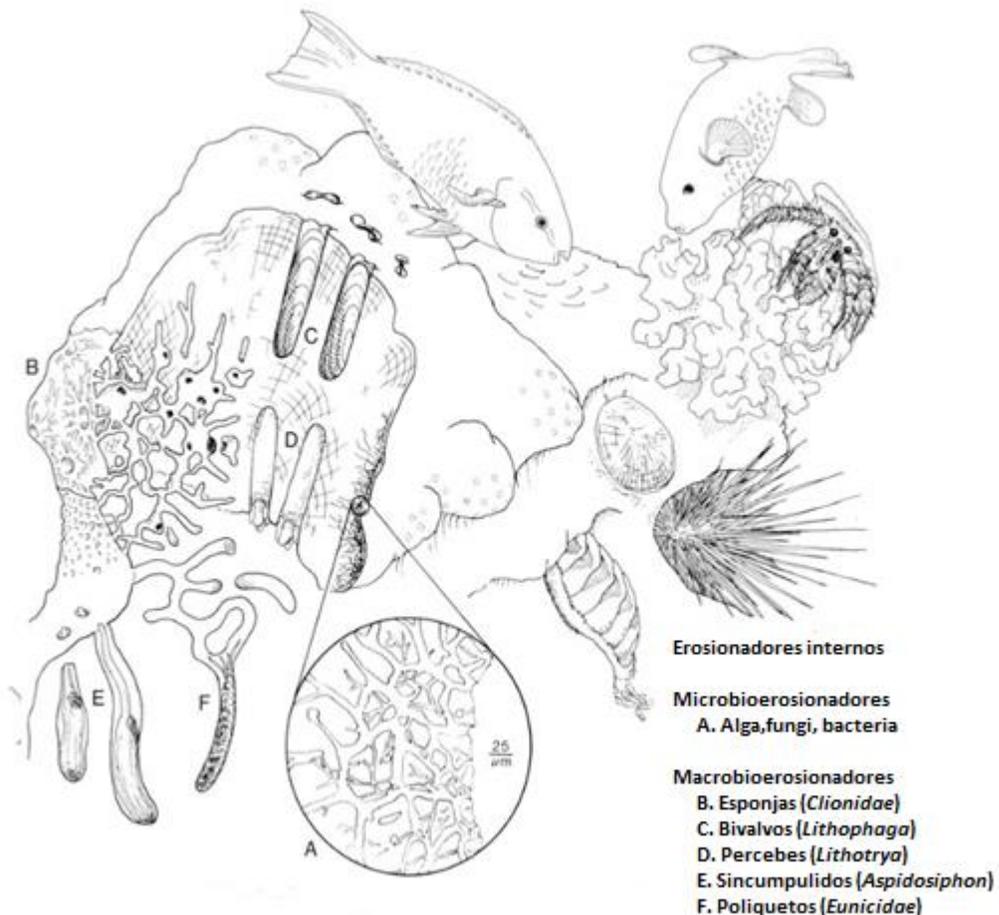


Figura 2. Principales erosionadores internos encontrados en arrecifes de coral (Modificado de Glynn, 1997). Microbioerosionadores: A. Alga, fungi, bacteria. Macrobioerosionadores: B. Esponjas (*Clionidae*), C. Bivalvos (*Lithophaga*), D. Percebes (*Lithotrya*), E. Sincumpulidos (*Aspidosiphon*), F. Poliquetos (*Eunicidae*).

Dentro de los principales y más abundantes endo-bioerosionadores se encuentran las esponjas excavadoras de la Familia Clionidae, los cuales causan mayor erosión en las comunidades coralinas de todo el mundo, quienes forman cámaras de 5-15 mm de diámetro con pequeñas galerías ramificadas desde las cámaras principales, las cuales penetran el esqueleto coralino a ~2 cm de profundidad aproximadamente (Glynn, 1997). Estos organismos pueden erosionar a una tasa de 70 ± 20 g CaCO_3 m^2 al año, registrado tasas de pérdida de carbonato de hasta 23 Kg CaCO_3 m^2 al año por erosión de esponjas en sustratos calcáreos (Neumann, 1996; Perry et al., 2012). Otro grupo de endo-bioerosionadores como los gusanos poliquetos perforadores suelen ser muy abundantes en ciertas zonas arrecifales, y reconocidos como uno de remodeladores más importantes en los arrecifes de coral, principalmente especies de poliquetos de las familias *Cirratulidae*, *Eunicidae*, *Sabellidae* y *Spionidae*, los cuales forman cavidades circulares de 0.5-2 mm de diámetro que penetran en forma de túneles hasta 10 cm en el interior de los esqueletos de coral. Para este grupo de endo-bioerosionadores se estima una tasa de erosión de 1.8 Kg CaCO_3 m^2 al año, con una abundancia de hasta 85,000 ind. m^{-2} regularmente en zonas someras y lagunas arrecifales, así como una tasa de 690 g CaCO_3 m^2 al año, con una abundancia de 13,000 ind. m^{-2} en zonas del arrecife frontal (Davies y Hutchings, 1983). Otro importante grupo endolítico son los moluscos (Glynn, 1997), sus tasas de bioerosión varían según el sitio y la influencia de los parámetros específicos ambientales del mismo, los cuales controlan sus abundancias. Los moluscos bivalvos de especies como *Lithophaga* y *Gastrochaena* (Clase *Pelecypoda*) perforan tanto sustratos coralinos vivos como muertos. Las aberturas sifonales de *Lithophaga* suelen aparentar a un ojo de cerradura en la parte externa del coral, perforan verticalmente creando agujeros circulares en el esqueleto de 1-10 cm de profundidad (Glynn, 1997). En localidades de ambientes con alta productividad como Isla del Caño en Costa Rica se han reportado tasas de erosión para *Lithophaga laevigata* de hasta 9.0 Kg CaCO_3 m^2 al año, así como una abundancia de la población de estos erosionadores de entre 500 y 10,000 ind. m^{-2} (Scott y Risk, 1988).

Las abundancias de organismos bioerosionadores se encuentran relacionados principalmente con factores abióticos, las influencias antropogénicas y climáticas, tales como la química del agua (i.e., acidificación del océano, surgencias), la eutrofización, la temperatura del mar y la irradiación lumínica (Tribollet y Golubic, 2011). La eutrofización puede incrementar los rangos de microerosión y macroerosión (Edinger et al., 2000), así como, la concentración de nutrientes y la sedimentación pueden tener efecto en la abundancia de ciertos organismos como esponjas y bivalvos al presentar condiciones óptimas para su desarrollo (Tribollet y Golubic, 2005). Por otro lado, la absorción de dióxido de carbono (CO_2) de origen antropogénico causa una disminución significativa en el pH del agua de mar (acidificación oceánica) lo que resulta en la disminución en la saturación de aragonita (Ω) (Van Hooijdonk et al., 2014), lo cual afecta negativamente a las tasas de calcificación y también incrementar la disolución de carbonatos y facilitar la bioerosión de

esponjas (KLeypas et al., 1999; Manzello et al., 2014). Por el contrario, los bajos niveles de pH y Ω podrían reducir la actividad erosiva de bivalvos, erizos y peces resultando en tasas positivas de producción de carbonato (Tribollet y Golubic, 2011). Cuando la bioerosión es mayor a la calcificación, puede causar reducciones en la acreción coralina que pueden llevar a los arrecifes de la acumulación neta de CaCO_3 positiva, a un estado negativo de erosión neta y consecuentemente reducir la complejidad y funcionalidad ecológica de los ecosistemas arrecifales y amenazar con su permanencia a largo plazo (Glynn, 1997; Van Hooijdonk et al., 2014).

1.1.3 El Pacífico mexicano

El Pacífico mexicano (PM) es el límite norte de la distribución de corales hermatípicos, hasta los 24° de latitud norte (Glynn y Ault, 2000) y es considerada una de las regiones del Pacífico oriental tropical (POT) con mayor riqueza de especies de corales (18-24 especies) (Héctor Reyes-Bonilla, 2003). En costas del PM los arrecifes coralinos se desarrollan desde el Golfo de California hasta Oaxaca, en un gradiente de profundidad de hasta 25 m (Reyes-Bonilla., 2003; Medina-Rosas, 2015), los cuales crecen en forma de arrecifes de franja o parches aislados ocupando una menor extensión espacial, comparados con las barreras arrecifales del Caribe mexicano (Reyes-Bonilla, et al 2014). En las zonas someras (0 a 25 metros de profundidad) estas comunidades arrecifales están conformadas mayormente por corales del género *Pocillopora* (Cortés, 1997; Guzmán y Cortés, 1989), así como especies de coral masivo de *Porites* y *Pavona* en zonas más profundas (Glynn et al., 2017).

Las comunidades coralinas del Pacífico Mexicano, han sido descritas como altamente resilientes, debido a que tienen una gran capacidad de aclimatación y recuperación ante eventos de estrés (Medina-Rosas, 2015). En el Pacífico mexicano se presentan temperaturas relativamente bajas (producto de múltiples zonas de surgencia), la convergencia de corrientes oceánicas (Corriente de California, Corriente del Golfo de California y Corriente Costera de Costa Rica), y bajos valores de pH superficial (KLeypas et al., 1999), lo cual provoca que sea una zona inestable para el crecimiento de los corales, esto aunado a los fenómenos de estrés térmico ocasionado por El Niño Oscilación del Sur en su fase Cálida del El Niño (C^+) y su fase fría La Niña (C^-). Los corales en esta región se encuentran en estado continuo de estrés, pero esto ha promovido que sobrevivan ante anomalías del pasado, teniendo un potencial de crecimiento en diferentes escenarios de cambio climático (Sheppard et al., 2017). Sin embargo, las condiciones ambientales de esta región pueden promover la abundancia de bioerosionadores durante estos episodios temporales, por lo

que, a pesar de la supervivencia y continuo crecimiento no se ve afectado, este sí puede ser afectado por la bioerosión inconspicua (erosión silenciosa) y debilitar la estructura arrecifal (Wild et al., 2011).

A partir de estas consideraciones la evaluación de los procesos de remoción de carbonato son muy importantes en los arrecifes coralinos (Perry et al., 2012). Por lo que la intención de este trabajo es estimar las tasa de endo-bioerosión de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano, con base en la cuantificación de CaCO_3 removido por los principales organismos endo-bioerosionadores, información que ayudará a determinar el balance neto de los presupuestos de carbono los ecosistemas arrecifales en la región y conocer el estado actual de los arrecifes coralinos del Pacífico mexicano.

1.1.4 Antecedentes

A pesar de la relevancia del tema, existe un número limitado de estudios enfocados a la bioerosión coralina en el Pacífico mexicano. Se ha trabajado en la región mayormente con tasas de bioerosión epilítica en la región Norte del Pacífico Mexicano donde se ha reportado información de densidad y tasas de consumo de tres especies de peces coralívoros (Reyes-Bonilla y Calderon-Aguilera, 1999), los cuales remueven menos del 4% del carbonato en el arrecife de Cabo Pulmo. Por otro lado, en la región sur del Pacífico mexicano, en Huatulco, Oaxaca, Herrera-Escalante et al., (2005) reportaron la bioerosión causada por el erizo *Diadema mexicanum*, obteniendo una tasa de bioerosión de 0.17 a $3.28 \text{ kgCaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, representando una pérdida de menos del 5% de la producción anual de carbonato.

Por otro lado, en cuanto a bioerosión interna existe poca información, en el Pacífico mexicano, Cosain-Díaz et al. (2021) describieron la endo-bioerosión en tres especies de coral masivo (*Pavona gigantea*, *Porites lobata* y *Porites panamensis*) en las islas Marietas y en la isla Isabel. Los resultados de este estudio indicaron que, en *Pavona gigantea*, se presentó un porcentaje de endo-bioerosión de $27.28 \pm 18.05\%$. *Porites lobata* presentó un $16.87 \pm 16.31\%$, y, *Porites panamensis* presentó un $31.127 \pm 29.43\%$ de porcentaje de bioerosión interna, la mayor endo-bioerosión se encontró relacionada con morfología y la edad, en donde las colonias masivas presentaron la mayor densidad del esqueleto, así como a colonias más longevas. Adicionalmente, Antuna (2019) determinó la tasa de bioerosión endolítica promovida por esponjas, moluscos y poliquetos. Los resultados obtenidos mostraron, un volumen de CaCO_3 removido de $23.46 \pm 47.96 \text{ cm}^3$ y una tasa anual de bioerosión de $48.21 \pm 0.68 \text{ mg cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, la contribución de bioerosión a nivel de grupo erosivo fue de 54.04% para esponjas, 33.80% por moluscos, y 0.28% de

poliquetos. Otros estudios se han enfocado a bioerosión particularmente en esponjas perforadoras, Carballo et al., (2004) realizó un trabajo taxonómico de esponjas perforadoras (género *Cliona*) en 58 localidades de la costa del Pacífico Mexicano, identificando y describiendo nuevas especies de esponjas. Nava y Carballo (2008) determinaron la riqueza y frecuencia de invasión de esponjas perforadoras en colonias de *Pocillopora spp*, en el Parque Nacional Isla Isabel, resultando en tasas medias de bioerosión de 4.5 ± 0.9 y 5.1 ± 0.5 kg CaCO₃ m⁻² año⁻¹ para las especies *C. vermifera* y *Cliona flavifodina* respectivamente.

Por otro lado, algunos autores (Highsmith, 1981; Hernández-Ballesteros et al.,2013; Cosain-Díaz et al., 2021) han descrito que la bioerosión tiene una relación positiva con la densidad del esqueleto de los corales. Hernández-Ballesteros et al. (2013) encontraron que el porcentaje en bioerosión por esponjas perforadoras se correlacionó de forma positiva con la densidad del esqueleto de los corales *Montastraea annularis* y *Porites astreoides*, donde a mayor densidad mayor es el porcentaje erosionado en las colonias. En contraste a, DeCarlo et al., (2015), quienes no encontraron una relación directa de la bioerosión con la densidad del esqueleto, en colonias de *Porites spp*. en arrecifes del Indo-Pacífico. Los autores determinaron que las tasas de macrobioerosión, aumentan significativamente en ambientes oligotróficos y en ambientes altos en nutrientes (> 1 µM de nitrato) y a medida que disminuye la saturación de aragonita (Ω).

1.2 Justificación

La producción neta de carbonato en los arrecifes es un balance de los procesos de construcción y erosión de la matriz base del ecosistema arrecifal. En el Pacífico mexicano se han registrado los parámetros de crecimiento y producción para las especies constructoras de arrecifes, no obstante, muy pocos estudios que se enfocan en los procesos de erosión. Consecuentemente, no se ha podido establecer la cantidad de carbonato de calcio removida anualmente en las comunidades arrecifales del PM. Por lo tanto, es necesario evaluar la tasa de endo- bioerosión (mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹), en las principales especies de coral constructoras de arrecife de la región, para obtener los presupuestos netos de carbono en los arrecifes del Pacífico mexicano. Los resultados de esta investigación ayudarán a conocer el estado de salud de los arrecifes y poder realizar proyecciones frente a escenarios de cambio climático. Este trabajo busca cuantificar la endo-bioerosión por macro-bioerosionadores, siendo una parte importante de la erosión neta del sistema.

1.3 Hipótesis

1. Dado que la densidad del esqueleto en las colonias depende del morfotipo se espera que las colonias masivas (al ser las que forman el esqueleto más denso) tendrán mayor porcentaje de endo-bioerosión comparado a colonias incrustantes y columnares.
2. Debido a que se ha reportado una mayor abundancia de organismos endo-bioerosionadores en zonas con mayor flujo de nutrientes, se espera que en áreas con estas condiciones como es el norte del Pacífico mexicano tendrán mayores porcentajes de endo-bioerosión.
3. Diversos trabajos han reportado que el grupo de las esponjas perforadoras son los que contribuyen a la mayor endo-bioerosión en diversas regiones del Pacífico, por lo tanto, se espera que las esponjas perforadoras sean las principales causantes de remoción de CaCO_3 en las localidades de estudio.
4. Se ha reportado que el porcentaje de endo-bioerosión está en función de la densidad del esqueleto de las colonias coralinas, por lo que se espera encontrar que las colonias de coral con alta densidad del esqueleto tengan mayor porcentaje de erosión interna.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Cuantificar la endo-bioerosión en corales masivos a lo largo del Pacífico mexicano y determinar su relación con factores extrínsecos e intrínsecos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la endo-bioerosión (área, volumen y tasa de bioerosión) ocasionada por macro-perforadores en corales constructores de arrecifes en diversas localidades del Pacífico mexicano

(Bahía Concepción, Bahía de los Ángeles, Huatulco y Zihuatanejo, Isla Isabel, La Paz, Cabo Pulmo, Islas Marietas) caracterizadas con diferentes condiciones ambientales.

- Evaluar qué factores intrínsecos (densidad, morfología, especie) o extrínsecos (subregión, factores ambientales) están relacionados con la variación de la endo-bioerosión.
- Determinar los principales organismos endo-bioerosionadores y su contribución específica en la remoción de CaCO_3 en corales masivos.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

El estudio fue conducido a lo largo de la costa del Pacífico mexicano, al norte del Pacífico oriental tropical. Con el fin de comparar las áreas con diferentes características ambientales en el Pacífico mexicano (PM) se obtuvieron muestras de coral en localidades en distintos gradientes latitudinales: Bahía Concepción, Bahía de los Ángeles, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Cleofás, Islas Marietas, Isla Isabel, Huatulco y Zihuatanejo (Figura 3). Las localidades se agruparon a nivel subregiones, en Golfo de California (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo), Pacífico Central (Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas) y Pacífico Sur (Zihuatanejo y Huatulco).

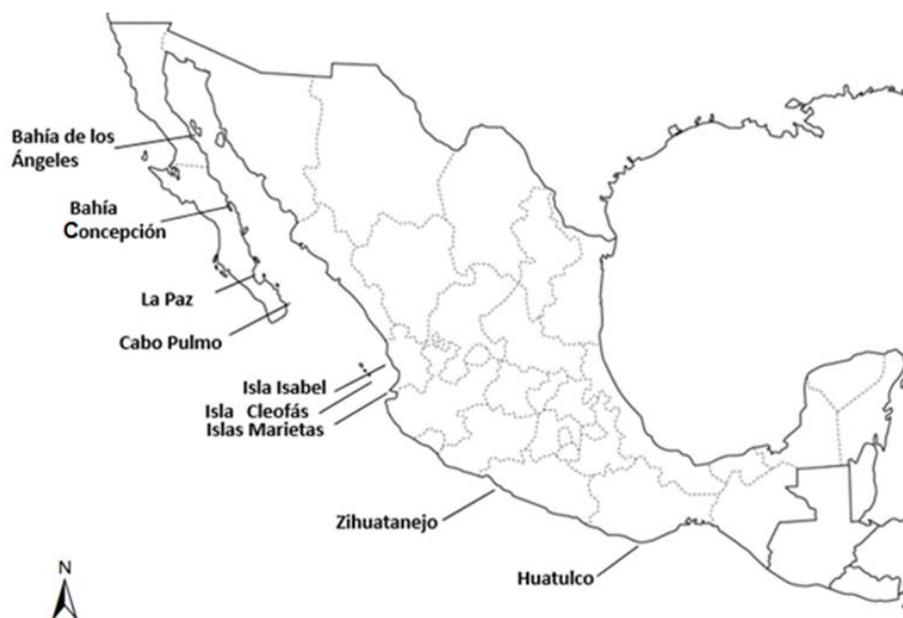


Figura 3. Localización de las localidades de estudio en el Pacífico mexicano. Bahía Concepción, Bahía de los Ángeles, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Cleofás, Islas Marietas, Isla Isabel, Huatulco y Zihuatanejo.

2.2 Recolección y tratamiento de muestras

En cada una de las localidades de muestreo, utilizando equipo SCUBA y con ayuda de martillo y cincel, fueron recolectadas colonias de coral masivo de distintas especies (*Porites lobata*, *Porites panamensis*, *Pavona gigantea*, *Pavona clavus* y *Pavona varians*) (Figura 4), a diferentes profundidades (Tabla 1). Las cuales fueron trasladadas al laboratorio para su posterior procesamiento y análisis.

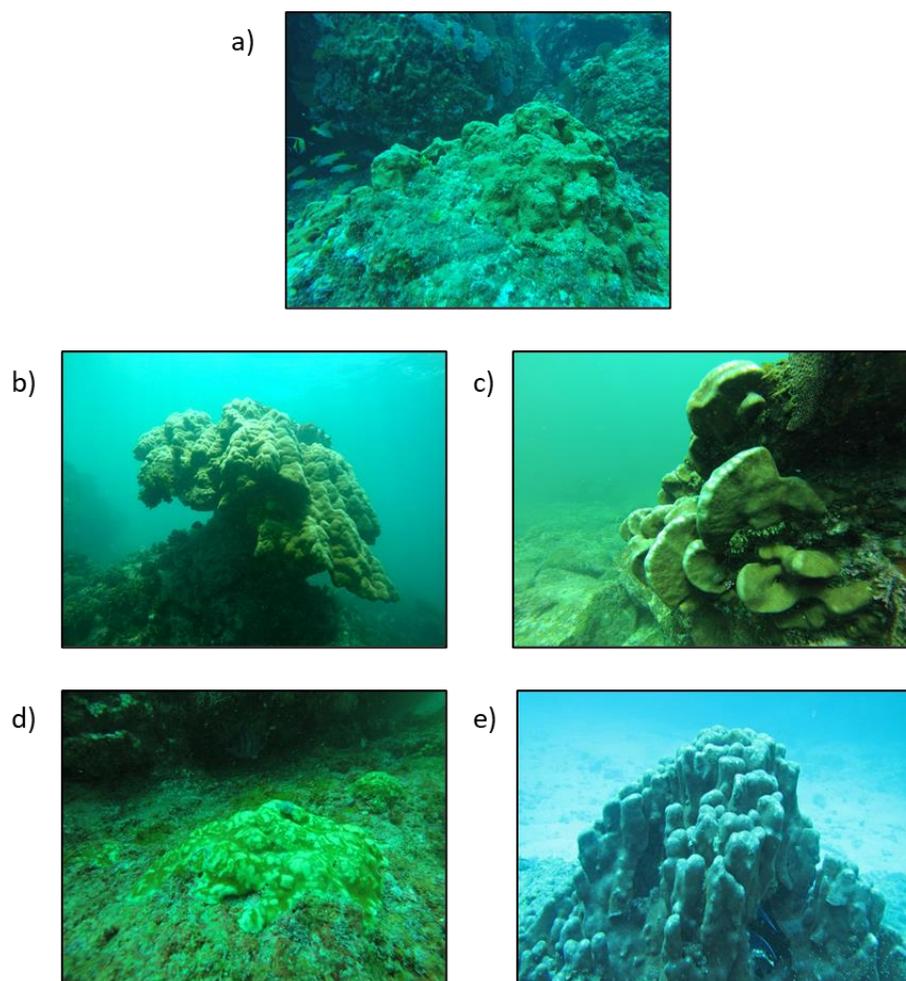


Figura 4. Fotos de las especies de coral: (a) *Pavona varians*, (b) *Porites lobata*, (c) *Pavona clavus*, (d) *Porites panamensis*, (e) *Pavona gigantea*.

Tabla 1. Localidad, especie, número de colonias, profundidad y fecha de las colonias colectadas

Localidad	Especie	Morfotipo	N. de colonias	Prof.	Fecha de recolecta
Bahía Concepción	<i>P. panamensis</i>	Masivo	10	3-5 m	2007
Bahía de los Ángeles	<i>P. panamensis</i>	Columnar	10	3-5 m	2007
Bahía de la Paz	<i>P. panamensis</i>	Columnar	10	3-5 m	2007
Cabo Pulmo	<i>P. panamensis</i>	Masivo	8	< 10 m	2009
Isla Cleofás	<i>Pavona clavus</i>	Masivo	11		2017
Isla Isabel	<i>Porites lobata</i>	Vida libre	11		2007
	<i>Porites lobata</i>	Masivo	26	5-6 m	2014
Islas Marietas	<i>P. panamensis</i>	Incrustante	5	6-12 m	2014
	<i>Pavona gigantea</i>	Masivo	7	12-15 m	2014
Zihuatanejo	<i>Porites lobata</i>	Masivo	5	5.5 m	2011
	<i>Pavona gigantea</i>	Masivo	2	6 m	2011

	<i>Pavona gigantea</i>	Masivo	2		
	<i>Pavona varians</i>	Masivo	4		
Huatulco	<i>P. panamensis</i>	Incrustante	5		
	<i>P. panamensis</i>	Incrustante	4	4.5 m	2011

Cada muestra de coral fue lavada con un flujo de agua continuo y posteriormente secada a 70 °C por 4 horas en un horno convencional para eliminar cualquier tipo de materia orgánica. Posteriormente, cada colonia fue cortada en secciones longitudinales de un grosor de ~7 mm tomando a lo largo del crecimiento axial de la colonia, usando una sierra punta de diamante (Qep). Se obtuvieron radiografías para cada laja de coral usando un equipo de rayos X (GE Hungay Rt. Medical Systems®) con una exposición de 70kv por 20 mAs a 2 m de distancia de la muestra. En la toma de las placas de rayos X, se incluyó un estándar de aragonita, elaborada de concha de *Tridacna máxima*, con una densidad conocida (2.826 g cm^{-3}), en distintos grosores con un ancho de 2.5 cm, para la determinación de la densidad de las colonias (Figura 5).

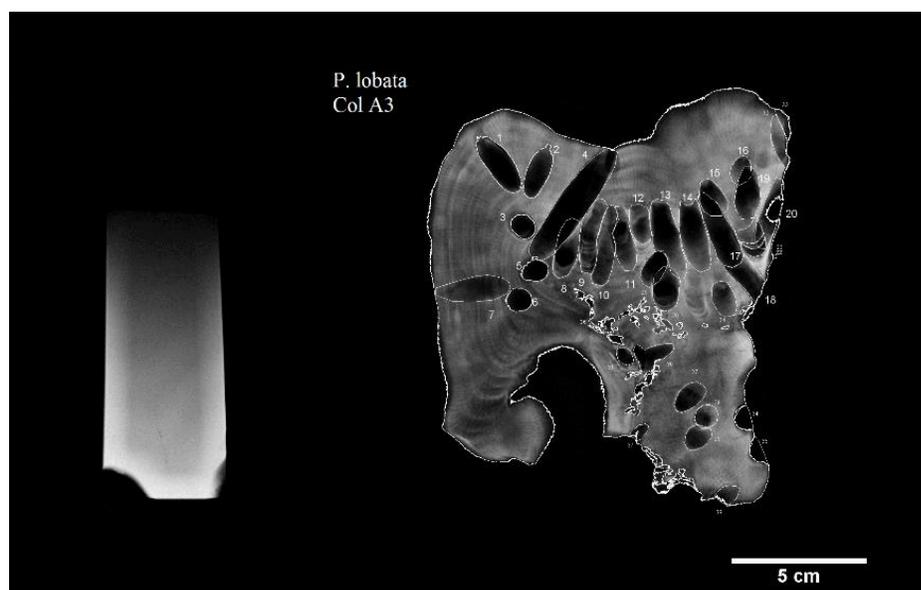


Figura 5. Negativo de radiografía rayos-X de laja de coral de *Porites lobata*. Marcas delimitadas y numeradas en la laja representan endo-bioerosión en corales. Se muestra el estándar de aragonita en la parte izquierda.

2.3 Determinación de volumen y porcentaje de endo-bioerosión

Las imágenes de las radiografías fueron analizadas con el software ImajeJ 1.53k (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>), donde se estableció una escala utilizando una medida conocida (a partir del estándar de aragonita) como referencia para poder determinar el área total (cm²) de cada laja, así como el área (cm²) de cada uno de las marcas erosionados en la misma (Figura 4). Para calcular el grosor (cm) de cada laja de coral como para lo que corresponde a cada uno de estos orificios erosionados (marcas de erosión), se utilizó una función de regresión lineal obtenida a partir del grosor del estándar de aragonita, donde se utilizarán los valores de grosor conocido del estándar de aragonita (cubos y cuña) y el logaritmo natural de densidad óptica (LnOD) que le corresponde a cada grosor entre 0.1-10 cm (precisión, 0.01 cm). El LnOD se obtendrá del promedio de escala de grises (0-255) del estándar de aragonita en la imagen de rayos-X usando el software ImajeJ. Para determinar el volumen total de laja (VI) y el volumen de CaCO₃ removido (Ve) se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$VI = [A(\text{cm}^2) * G (\text{cm})] \quad (1)$$

$$Ve = \sum xi (Aei * Gei) / n \quad (2)$$

Dónde: VI= Volumen de laja (cm³), A = Área (cm²), G= Grosor (cm), Ve= Volumen de CaCO₃ removido, Ae= Área de erosión, Ge= Grosor de erosión, xi= marca erosiva, ni= número de bioerosiones.

Para la determinación del porcentaje de Bioerosión (Pb) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$(Pb) = [(Ve*100) / VI]. \quad (3)$$

2.4 Tasa de endo-bioerosión anual

El cálculo de la tasa de bioerosión anual, fue calculado mediante, el producto del volumen de CaCO₃ removido que se obtenga de cada colonia y la tasa de calcificación (extensión lineal x densidad del esqueleto), empleando la siguiente fórmula descrita por DeCarlo et al. (2015):

$$TBA = \frac{(Ve)(D)}{(A)(T)} \quad (4)$$

Donde: TBA=tasa de Bioerosión anual ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$), A=Área (laja), T=tiempo de vida (años), V_e = volumen erosionado, D=densidad del esqueleto.

2.5 Determinación de endo-bioerosionadores

Subsecuentemente, se determinó el grupo de organismos bioerosionadores causantes de cada marca, fisura o excavación en las imágenes de rayos X para cada colonia, basándose en las características morfológicas de las marcas de bioerosión descritas por (Hein et al., 1975; Glynn, 1997; Hutchings, 1986; Sammarco y Risk, 1990). A partir de esto se determinó la bioerosión con las fórmulas antes mencionadas, el volumen y la tasa de erosión para cada grupo de bioerosionadores (moluscos, poliquetos y esponjas; figura 6).

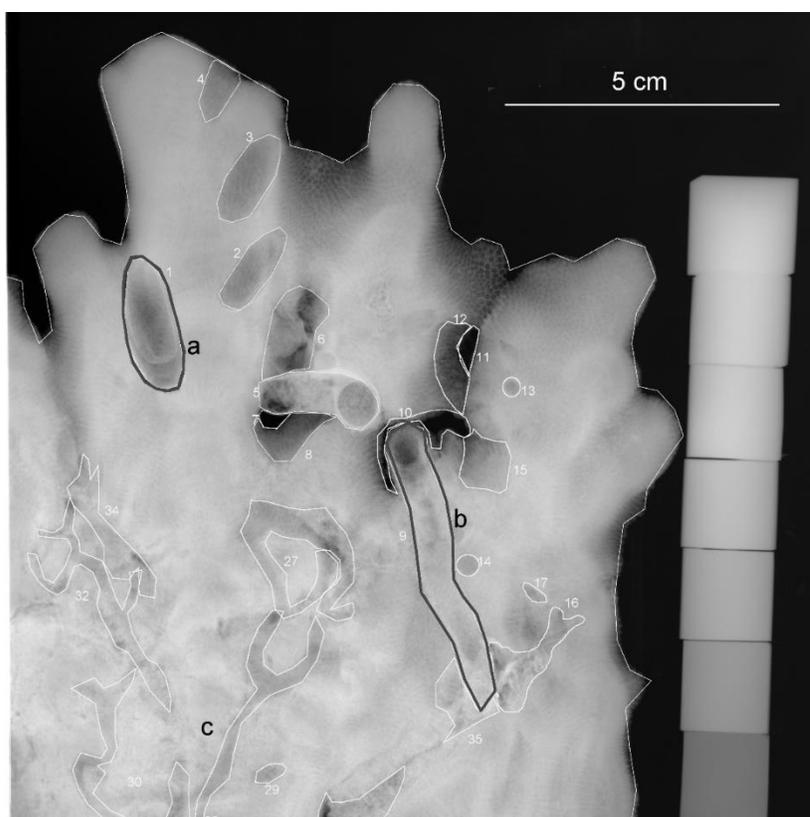


Figura 6. Imagen de radiografía de rayos-X de la especie *Porites panamensis* (La Paz), mostrando las marcas erosivas de los principales endo-bioerosionadores (a) moluscos, (b) poliquetos, (c) esponjas. Los moluscos dejan marcas ovaladas con evidencia de desplazamiento, los poliquetos orificios pequeños y galerías largas. Las esponjas perforadoras se evidencian como galerías o pequeñas cámaras que se pueden extender desde el interior hasta la parte externa del coral. Del lado derecho cubos del estándar de aragonita.

2.6 Factores ambientales

Los datos ambientales de Temperatura de la superficie del mar (TMS) y Clorofila a (Chla-a) fueron utilizados como variables explicativas. Se obtuvieron datos mensuales a partir de imágenes satelitales con una resolución espacial de 4 x 4 km utilizando la interfase giovanni (giovanni.gsfc.nasa.gov) para obtener los datos de MODIS-Aqua de los años correspondientes a la vida de las colonias para cada una de las localidades.

Para determinar en qué localidades las comunidades coralinas tienen un ambiente menos propicio para su crecimiento (estrés por nutrientes y temperatura) basándose en (Halfar et al., 2005), y ver si esto tiene una relación con las tasas de endo-bioerosión por localidades, se obtuvo la temperatura mínima mensual (°C) de los años correspondientes a la vida de las colonias en cada una de las localidades, al igual que el valor promedio de clorofila a (mg m^{-3}). Hallock (2001) determinó una concentración de clorofila a de 0.3 mg Chl a/m^3 como el límite superior para el desarrollo de los arrecifes de coral y (Guinotte et al., 2003) determinó el límite mensual de tolerancia a las bajas temperaturas de 18.4°C .

2.7 Análisis estadísticos

Para probar la homocedasticidad y la normalidad de los datos se utilizaron las pruebas de Barlett y Shapiro-Wilk. Los datos no presentaron homocedasticidad ($P < 0.05$) ni normalidad ($P < 0.05$), por lo que se utilizaron pruebas estadísticas no paramétricas. Todos los parámetros de bioerosión, volumen, porcentaje y la tasa anual, se analizaron para determinar diferencias a nivel de localidades, especies de coral, morfotipos y grupos bioerosionadores, utilizando análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA) de dos y tres vías para determinar la interacción entre estas variables. Para todos los análisis estadísticos se utilizó un nivel de significancia del 95% ($\alpha = 0.05$). Para determinar la agrupación y ordenación espacial (a nivel de zonas/región) de los datos, se realizó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) con los datos de volumen y tasa de endo-bioerosión por grupo bioerosionador. Para determinar la relación entre la densidad del esqueleto de los corales y las variables ambientales con parámetros de bioerosión se realizó una prueba de correlación de Spearman y de regresión lineal. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el software R (versión 3.1.5). Para el análisis NMDS se realizó en el programa estadístico PAST 4.02.

Capítulo 3. Resultados

Se analizaron 173 lajas de coral pertenecientes a 120 colonias de coral (*Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pavona gigantea*, *Pavona clavus*, *Pavona varians*), se obtuvo el volumen y porcentaje de endo-bioerosión, así como la tasa de endo-bioerosión anual para cada una de las especies de coral y localidades estudiadas (Tabla 2). También se determinó el promedio de volumen de CaCO₃ erosionado y la tasa de endo-bioerosión por grupo de endo-bioerosionadores (Tabla 3).

Tabla 2. Densidad del esqueleto, volumen bioerosionado, porcentaje de bioerosión, tasa de endo-bioerosión promedio \pm desviación estándar, número de lajas y número de colonias por localidad y especie. Den. = densidad del esqueleto, Vol. = volumen bioerosionado, %=Porcentaje de bioerosión, TBIO=Tasa de bioerosión, BLA=Bahía de los Ángeles, BCO=Bahía de Concepción, LAP=La Paz, CP=Cabo Pulmo, IISA=Isla Isabel, CLE=Isla Cleofás, MAR=Islas Marietas, ZIH=Zihuatanejo, HUA=Huatulco

Loc.	Especie	Den. (g cm ³)	Vol. (cm ³)	%	TBIO mg (CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	N lajas	N colonias
BLA	<i>P. panamensis</i>	0.88 \pm 0.04	2.87 \pm 2.04	5.70 \pm 3.3	6.24 \pm 5.30	28	10
BCO	<i>P. panamensis</i>	1.07 \pm 0.069	1.67 \pm 15.12	7.46 \pm 5.68	17.00 \pm 13.76	28	10
LAP	<i>P. panamensis</i>	0.94 \pm 0.86	3.72 \pm 2.71	3.41 \pm 2.07	4.13 \pm 3.41	27	10
CP	<i>P. panamensis</i>	1.35	2.66 \pm 2.13	4.29 \pm 2.03	6.73 \pm 4.48	8	8
ISA	<i>Porites lobata</i>	1.14 \pm 0.07	3.79 \pm 5.26	7.6 \pm 7.21	13.1 \pm 16.20	37	37
CLE	<i>Pavona clavus</i>	1.44 \pm 0.20	8.02 \pm 6.30	3.93 \pm 2.46	7.69 \pm 5.63	11	11
MAR	<i>P. panamensis</i>	1.11 \pm 0.18	2.29 \pm 2.07	6.86 \pm 4.23	13.72 \pm 7.65	5	5
	<i>Pavona gigantea</i>	1.63 \pm 0.29	4.75 \pm 3.8	8.59 \pm 6.9	8.17 \pm 5.90	7	7
ZIH	<i>Porites lobata</i>	1.20	0.03 \pm 0.08	0.23 \pm 0.51	0.67 \pm 1.5	5	5
	<i>Pavona gigantea</i>	1.24	0.02 \pm 0.03	0.15 \pm 0.22	0.77 \pm 1.08	2	2
HUA	<i>P. panamensis</i>	1.10 \pm 0.09	0.84 \pm 0.71	11.5 \pm 11.82	46.11 \pm 74.52	9	9
	<i>Pavona gigantea</i>	0.90 \pm 0.01	0.14 \pm 0.07	1.94 \pm 1.09	1.48 \pm 0.64	2	2
	<i>Pavona varians</i>	0.80 \pm 0.299	0.58 \pm 0.45	5.41 \pm 2.54	7.11 \pm 5.52	4	4

3.1 Pacífico mexicano

En el Pacífico mexicano, se determinó una tasa de endo-bioerosión promedio de 9.94 \pm 11.94 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹, un volumen de endo-bioerosión promedio de 3.28 \pm 4.23 cm⁻³ y un porcentaje de erosión de 5.93 \pm 5.32 %. Los moluscos fueron los endo-bioerosionadores dominantes, seguido de las esponjas y por último los poliquetos, los cuales, en algunas localidades, su participación fue mínima (Tabla 3).

Tabla 3. Promedio \pm desviación estándar de volumen y tasa de endo-bioerosión por bioerosionadores, en el Pacífico mexicano.

	Volumen erosionado (cm³)	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹)	Porcentaje erosionado (%)
Poliquetos	0.12 \pm 0.36	0.22 \pm 0.47	0.16 \pm 0.31
Esponjas	0.63 \pm 1.5	1.93 \pm 5.25	1.19 \pm 1.94
Moluscos	2.33 \pm 3.62	4.59 \pm 7.12	4.32 \pm 5.25

3.2 Endo-bioerosión en subregiones del Pacífico mexicano

3.2.1 Tasas de endo-bioerosión

En la subregión del Pacífico central, se obtuvo una tasa de endo-bioerosión de 11.59 ± 13.38 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹, siendo la subregión que obtuvo el mayor promedio, seguido de la subregión del golfo de California con 8.63 ± 9.20 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹ y el Pacífico Sur con 7.50 ± 11.80 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. En cada subregión se obtuvieron las tasas de endo-bioerosión por grupo erosivo (tabla 4). Con el fin de buscar diferencias entre las tasas de endo-bioerosión en las subregiones, se realizó un PERMANOVA el cual señala que, las tasas de bioerosión son diferentes en cada morfotipo explicándose un 6% de la varianza de los datos. El morfotipo con mayor tasa de bioerosión fue el de tipo incrustante con 16.40 ± 15.36 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹, por otro lado, el morfotipo columnar presentó las menores tasas de bioerosión (Figura 9). Cabe mencionar que, de acuerdo con el PERMANOVA, no se encontraron diferencias en las tasas de bioerosión entre regiones (Figura 7), especies (Figura 8), ni en la interacción entre subregión y morfotipos (Tabla 5).

Tabla 4. Tasas de endo-bioerosión por grupo erosivo en cada subregión del PM.

Subregión	Tasa moluscos	Tasa esponjas	Tasa poliquetos
Golfo de California	6.06 \pm 8.48	0.98 \pm 1.61	0.52 \pm 0.66
Pacífico Central	4.42 \pm 6.23	1.63 \pm 3.24	0.06 \pm 0.23
Pacífico Sur	2.27 \pm 6.44	4.63 \pm 11.05	0.10 \pm 0.24

Tabla 5. Resultados del PERMANOVA de los efectos de la subregión, morfotipos y especies en la tasa de endobioerosión. Df = grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R ²	Pr(>F)
Subregión	2	0.03902	0.090
Morfotipos	3	0.06199	0.047
Especies	4	0.07365	0.056
Subregión: morfotipos	2	0.02325	0.204

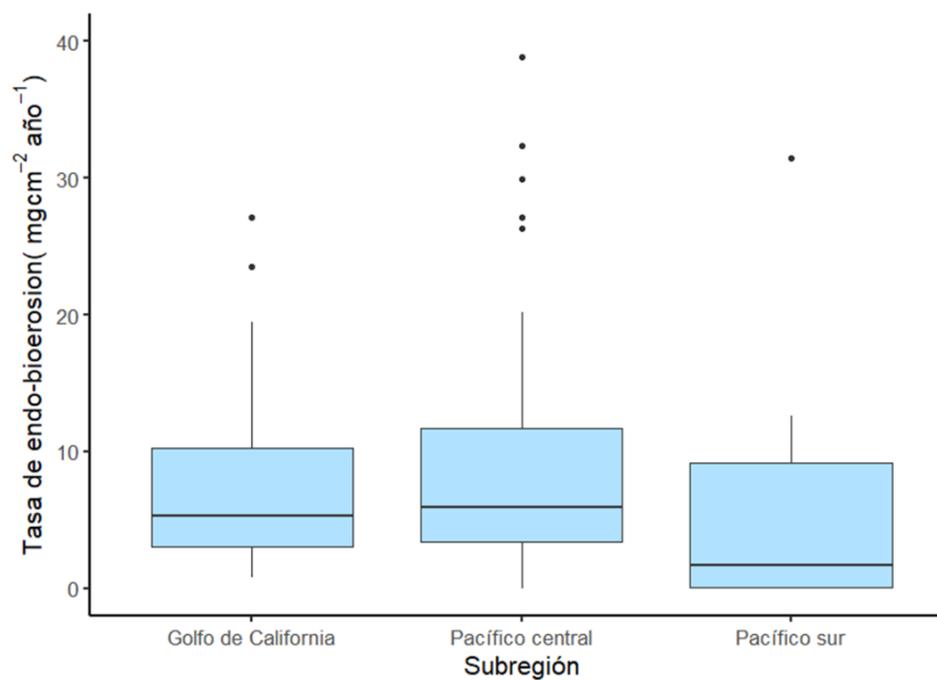


Figura 7. Tasa de endobioerosión ($\text{mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) por subregiones (Golfo de California, Pacífico Central, Pacífico Sur). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

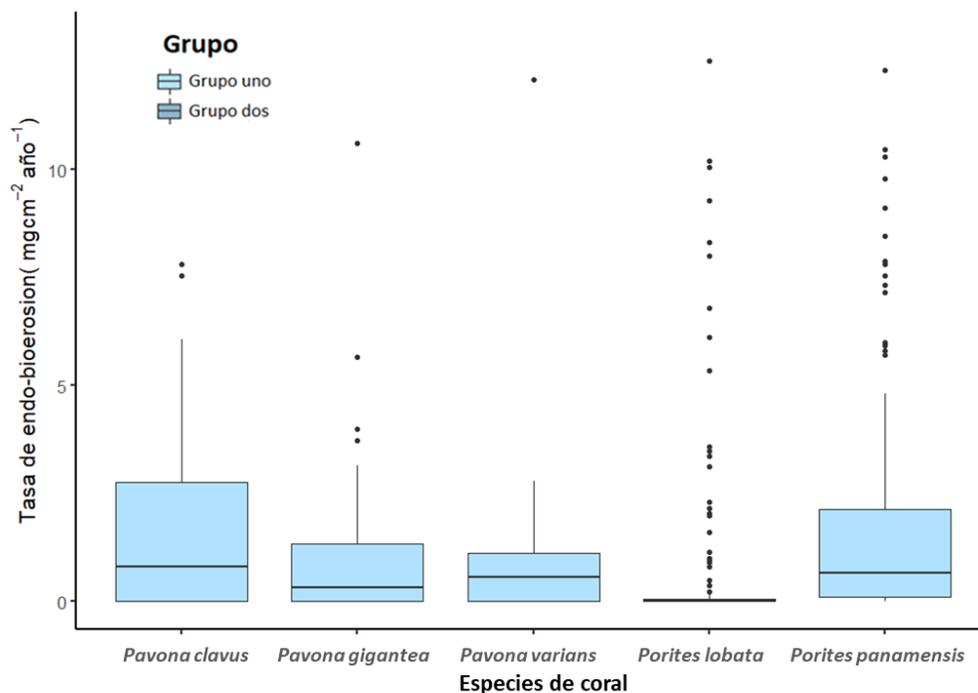


Figura 8. Tasa de endo-bioerosión ($\text{mg cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) entre especies *Pavona clavus*, *Pavona gigantea*, *Pavona varians*, *Porites lobata* y *Porites panamensis*. Diferencias dadas por *Porites lobata*. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

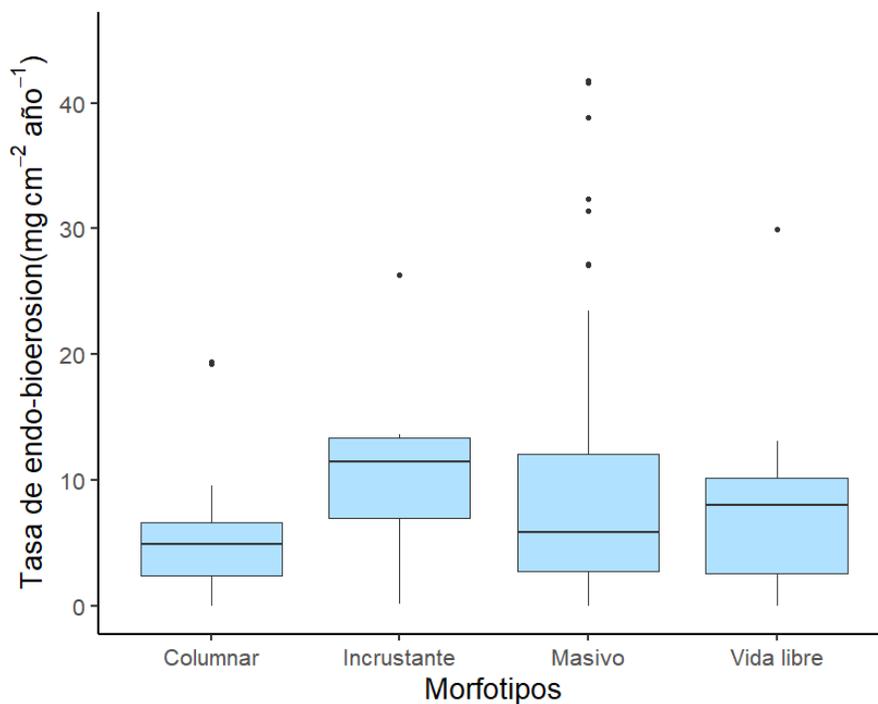


Figura 9. Tasa de bioerosión ($\text{mg CaCO}_3 \text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) por morfotipos (columnar, incrustante, masivo, vida libre). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

Al comparar la tasa de endo-bioerosión entre subregiones y organismos erosionadores el PERMANOVA dio como resultado que las diferencias en la tasa de endo-bioerosión están dadas principalmente por tipo de bio erosionador (Tabla 6). El grupo erosionador explica el 21% de la varianza de los datos, así mismo la interacción subregión: grupo erosionadores explica el 4.75 % de la varianza de los datos. Según el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas por todos los grupos erosionadores (esponjas, moluscos y poliquetos) (Figura 10).

Tabla 6. PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y la interacción grupo erosionador y subregión en la tasa de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R ²	Pr(>F)
Grupo erosionador	2	0.21975	0.001
Grupo erosionador: Subregión	6	0.05953	0.001

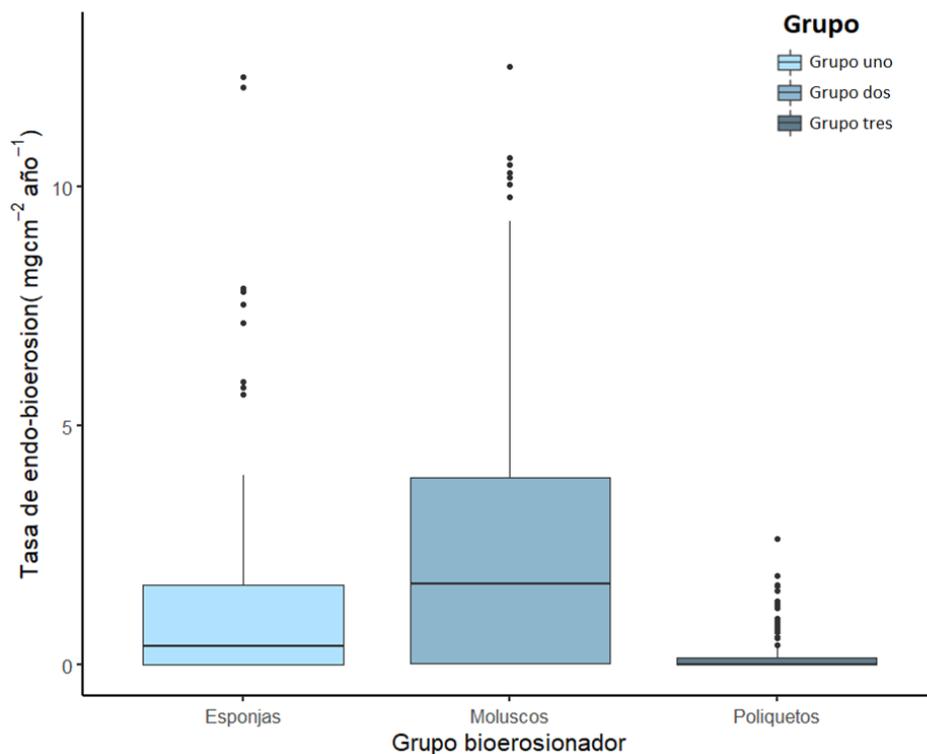


Figura 10. Tasa de bioerosión mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹ por grupo bioerosionador: Grupo 1 esponjas, Grupo 2 moluscos y Grupo 3 poliquetos. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

3.2.2 Volumen de endo-bioerosión

El mayor volumen erosionado con $4.55 \pm 5.33 \text{ cm}^{-3}$ se determinó en la subregión del Pacífico central, seguido de la subregión del golfo de California con $2.80 \pm 1.95 \text{ cm}^{-3}$ y el Pacífico Sur con $0.35 \pm 0.40 \text{ cm}^{-3}$. Para cada subregión se obtuvo el volumen de endo-bioerosión por grupo de erosionadores (Tabla 7). Con el fin de buscar diferencias en el volumen de endo-bioerosión entre las regiones, se realizó un PERMANOVA, el cual señala que las diferencias están dadas principalmente entre regiones, morfotipos y entre especies, no así entre la interacción subregión y morfotipos (Tabla 8), de los tres factores, la subregión es el factor más importante, ya que explica el 22% de la varianza de los datos. De acuerdo con el análisis Post-hoc, las diferencias entre regiones están dadas principalmente por la subregión del Pacífico Sur ($p=0.0015$), la cual es la subregión con menor volumen erosionado (Figura 11). Entre los morfotipos, de acuerdo con el análisis, las diferencias están dadas principalmente entre el morfotipo columnar contra vida libre ($p= 0.036$), los cuales fueron los morfotipos con mayor y menor volumen de bioerosión respectivamente (Figura 12). Así como entre especies, las diferencias de volumen de endo-bioerosión fueron dadas por la especie *Pavona clavus* ($p= 0.01$), la cuál fue la especie con mayor volumen de bioerosión (Figura 13).

Tabla 7. Volumen erosionado por grupo erosivo en cada subregión del Pacífico Mexicano.

Subregión	Vol. (cm ³) moluscos	Vol. (cm ³) esponjas	Vol. (cm ³) poliquetos
Golfo de California	1.59± 1.19	0.38 ± 0.57	0.26± 0.51
Pacífico Central	3.53 ± 4.65	0.93 ±2.01	0.06± 0.28
Pacífico Sur	0.13±0.19	0.19 ±0.32	0.01± 0.03

Tabla 8. Resultados del PERMANOVA de tres vías con los efectos de subregión, morfotipos y especies en el volumen de bioerosión. Df= grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R ²	Pr(>F)
Subregión	2	0.22432	0.001
Morfotipos	3	0.08326	0.002
Especies	4	0.06459	0.025
Región: Morfotipos	2	0.00795	0.503

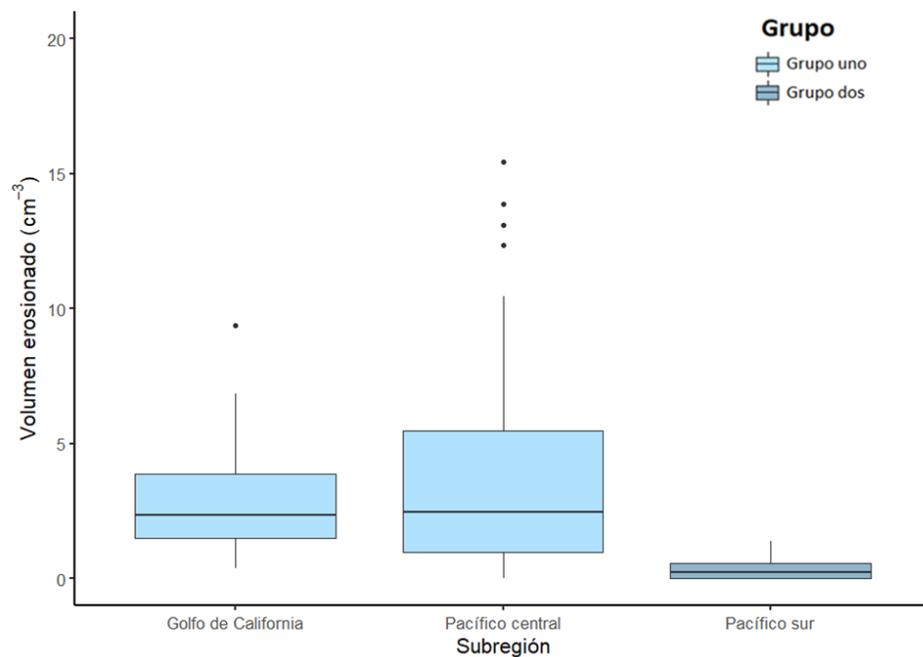


Figura 11. Volumen erosionado (cm^3) por subregiones (Golfo de California, Pacifico Central, Pacifico Sur), las diferencias dadas por la subregión del Pacifico Sur. El color azul fuerte indica diferencias significativas. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

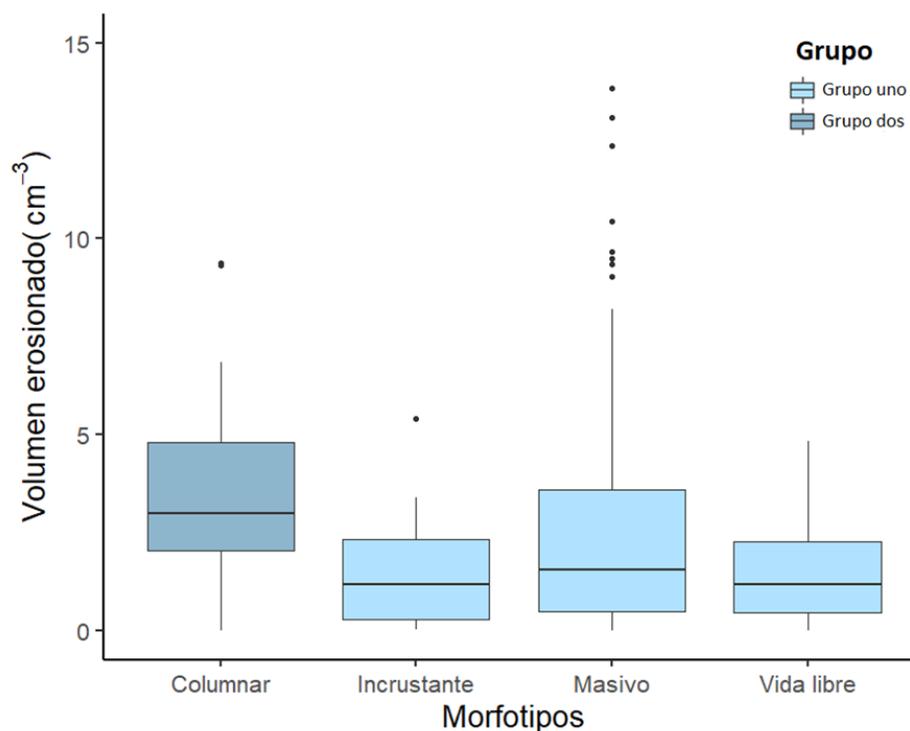


Figura 12. Volumen erosionado (cm^3) por morfotipos (columnar, incrustante, masivo, vida libre), diferencias dadas por el morfotipo columnar contra el incrustante y de vida libre. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

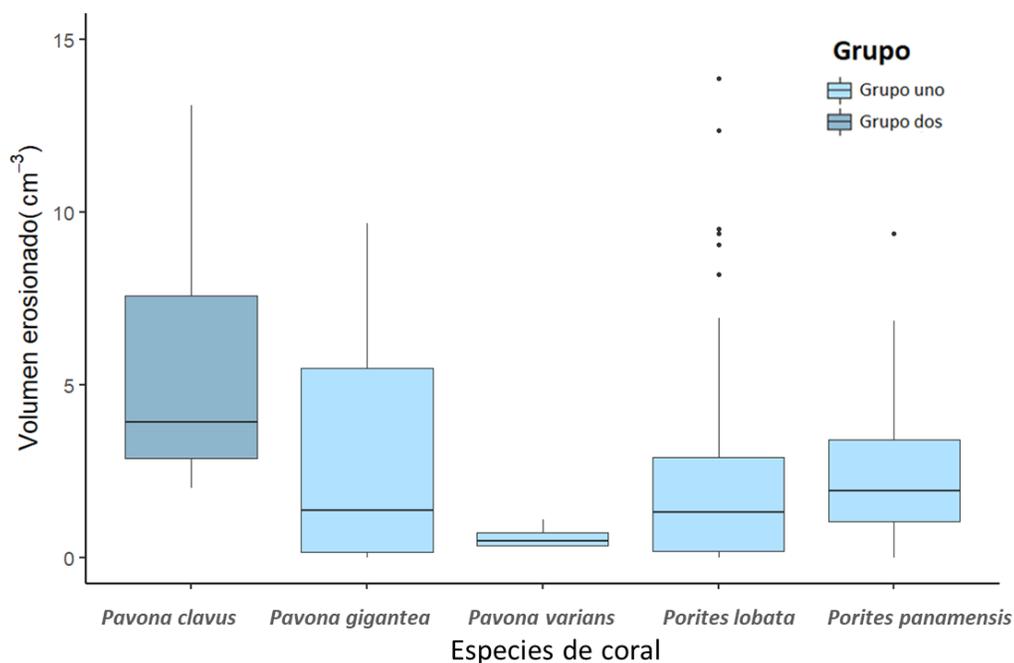


Figura 13. Volumen erosionado (cm^3) entre especies (*Pavona clavus*, *Pavona gigantea*, *Pavona varians*, *Porites lobata*, *Porites panamensis*). Las diferencias están dadas por *Pavona clavus*. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

Al comparar el volumen de endo-bioerosión entre regiones y grupo erosionador el PERMANOVA de dos vías señala que las diferencias del volumen de endo-bioerosión están dadas principalmente entre grupo erosionador y en la interacción de localidades x grupo erosionador (Tabla 9). El grupo erosionador explica el 27% de la varianza de los datos, así mismo la interacción de localidades x grupos erosionadores explica el 12% de esta variación. De acuerdo con el análisis Post-hoc, el volumen de endo-bioerosión las diferencias están dadas principalmente por el Pacífico sur (Figura 11), así como por todos los grupos erosionadores (esponjas, moluscos y poliquetos) (Figura 14).

Tabla 9. PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las regiones en el volumen de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $\text{Pr}(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P < 0.05$ en negrita.

	Df	R^2	$\text{Pr}(>F)$
Grupo erosionador	2	0.27408	0.001
Grupo erosionador: subregión	6	0.12022	0.001

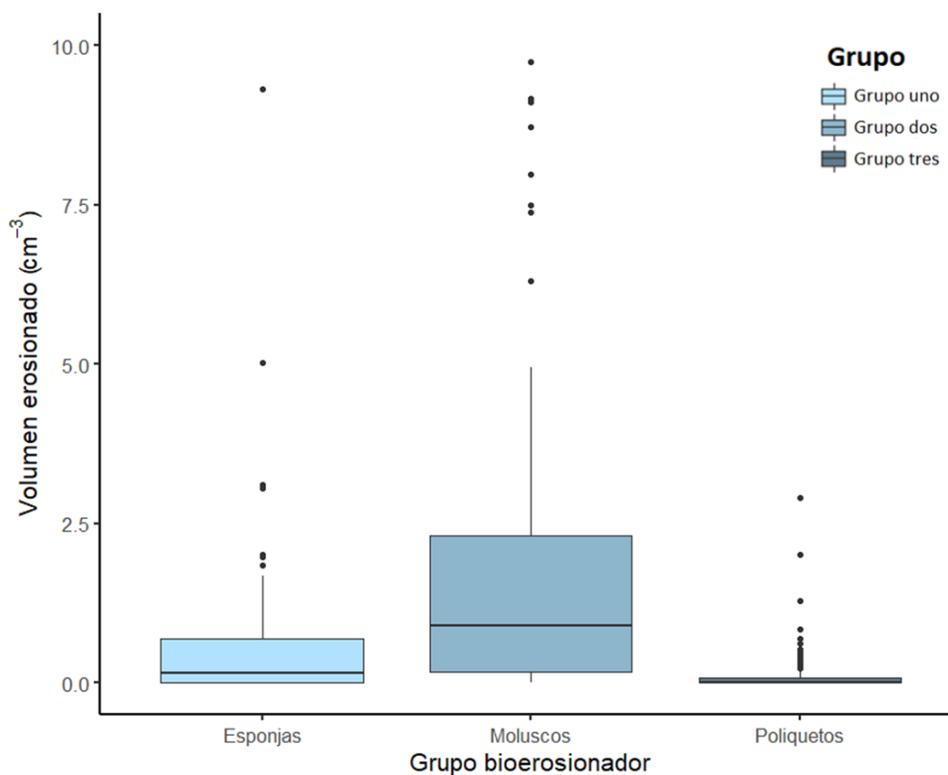


Figura 14. Volumen endo-bioerosionado en cm³ por esponjas, moluscos y poliquetos. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

3.2.3 Porcentaje de endo-bioerosión

El mayor porcentaje de volumen erosionado con $6.98 \pm 6.41\%$ se determinó para la subregión del Pacífico central, seguido de la subregión del golfo de California con $5.34 \pm 3.35\%$ y el Pacífico Sur con $3.88 \pm 4.04\%$ de erosión. Con el fin de buscar diferencias entre el porcentaje de endo-bioerosión en las regiones, se realizó un PERMANOVA de tres vías, el cual dio como resultado que las diferencias están dadas principalmente por las especies de coral explicando un 11% de la varianza de los datos y entre la interacción de subregión y morfotipos (Tabla 10). Por otro lado, el análisis post-hoc no determina cuál de las especies de coral es la que causa las diferencias en el porcentaje de bioerosión (Figura 17). El PERMANOVA no se encontraron diferencias en subregión (Figura 15), ni morfotipos (Figura 16).

Tabla 10. Resultados del PERMANOVA de los efectos de la subregión, morfotipos y especies en el porcentaje de bioerosión. Df= grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R ²	Pr(>F)
subregión	2	0.0195	0.228
Morfotipos	3	0.03856	0.134
Especies	4	0.11349	0.006
Subregión: morfotipos	2	0.07333	0.008

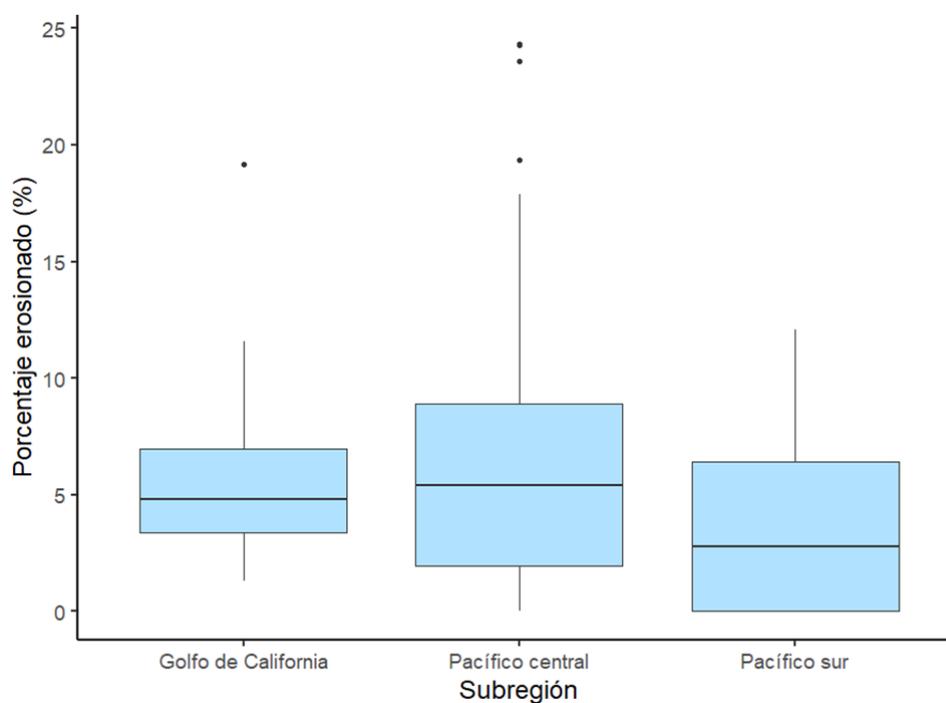


Figura 15. Porcentaje (%) erosionado por subregión del PM. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

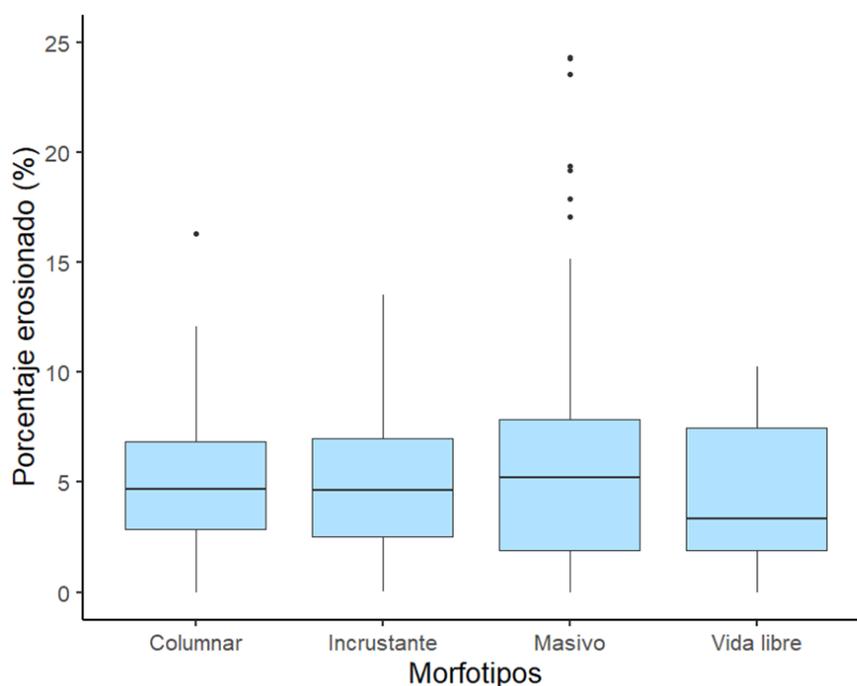


Figura 16. Porcentaje (%) erosionado por tipo de morfotipo. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

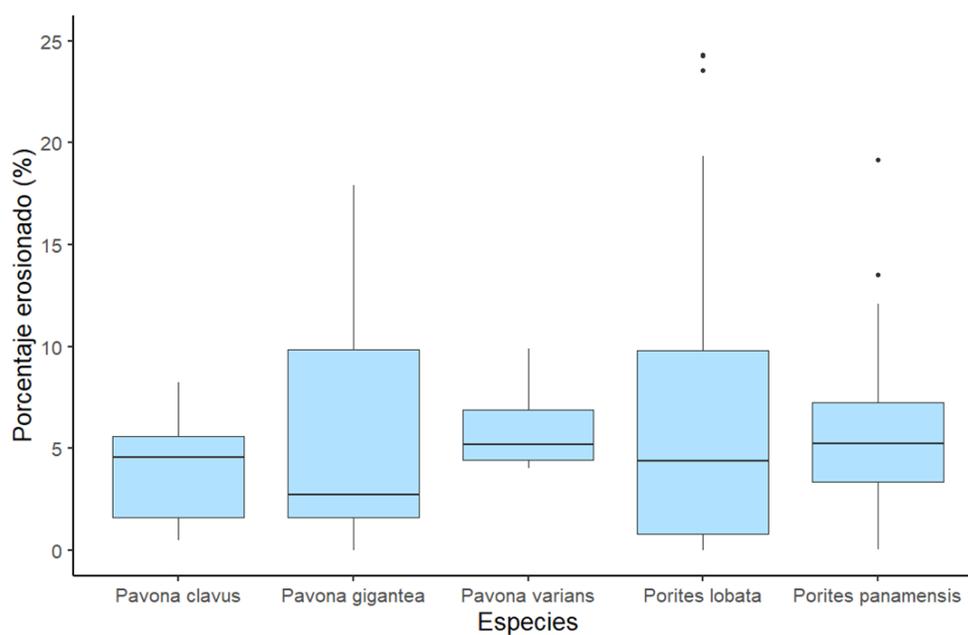


Figura 17. Porcentaje (%) erosionado por especies (*Pavona clavus*, *Pavona gigantea*, *Pavona varians*, *Porites lobata*, *Porites panamensis*). Las cajas muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

Al comparar el porcentaje de endo-bioerosión entre subregiones y grupo erosionador, el PERMANOVA señala que las diferencias del volumen de endo-bioerosión están dadas principalmente por los grupos erosionadores y la interacción de localidades x grupo erosionador (Tabla 11). El factor grupo erosionador, explica el 34% de la varianza de los datos, así mismo la interacción de localidades x grupos erosionadores explica el 0.05% de esta variación. De acuerdo con el análisis Post-hoc, el volumen de endo-bioerosión de los tres organismos erosionadores son diferentes entre sí, siendo los moluscos el grupo erosionador que presentó el mayor volumen de endo-bioerosión (Figura 18).

Tabla 11. PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las subregiones en el porcentaje de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R ²	Pr(>F)
Grupo erosionador	2	0.34219	0.001
Grupo erosionador: Subregión	24	0.05909	0.001

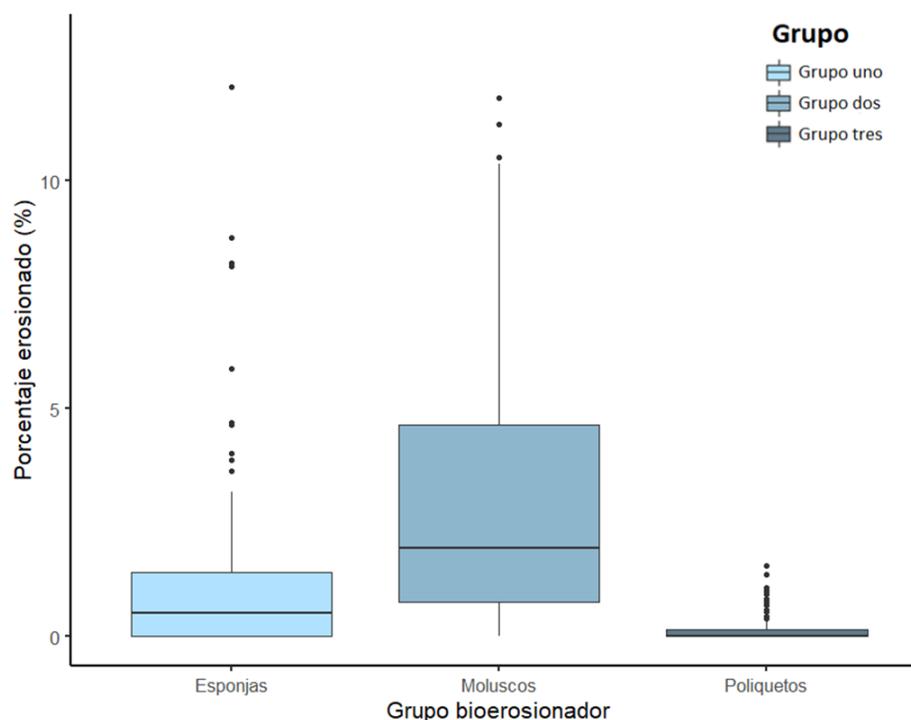


Figura 18. Porcentaje (%) erosionado por grupo bioerosionador (esponjas, moluscos, poliquetos). Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

3.3 Endo-bioerosión en localidades del Pacífico mexicano

3.3.1 Bahía de los Ángeles

Se analizaron un total de 28 lajas de diez colonias del coral *Porites panamensis*. La tasa de endo-bioerosión promedio fue de 6.24 ± 5.30 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Además, se determinó que el principal endo-erosionador en el sitio de estudio son los moluscos bivalvos (*Lithophaga spp.*) ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃. (Tabla 12).

Tabla 12. Promedio de volumen bioerosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Bahía de los Ángeles. No id= no identificado.

	Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos	No Id
Volumen bioerosionado (cm ³)	2.87 \pm 2.04	0.11 \pm 0.17	0.19 \pm 0.23	2.14 \pm 1.29	0.43 \pm 0.79
Tasa de endo-bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	6.24 \pm 5.30	0.27 \pm 0.51	0.37 \pm 0.60	4.47 \pm 3.89	1.79 \pm 2.10
Porcentaje de erosión (%)	5.70 \pm 3.3	0.23 \pm 0.35	0.37 \pm 0.46	4.28 \pm 2.41	0.88 \pm 0.13

3.3.2 Bahía de Concepción

Se analizaron 28 lajas de 10 colonias de *Porites panamensis*. La tasa de bioerosión promedio fue de 17.00 \pm 13.76 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Además, se determinó que los principales endo-erosionadores en el sitio de estudio son los moluscos ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃. (Tabla 13).

Tabla 13. Promedio de volumen bioerosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Bahía de los Concepción. No id= no identificado.

	Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos	No Id
Volumen bioerosionado (cm ³)	1.67 \pm 15.12	0.128 \pm 1.39	0.086 \pm 0.08	1.213 \pm 0.68	0.167 \pm 0.45
Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	17.00 \pm 13.76	0.896 \pm 0.92	1.028 \pm 1.74	13.992 \pm 13.22	1.06 \pm 1.03
Porcentaje de erosión (%)	7.46 \pm 5.68	0.38 \pm 0.36	0.44 \pm 0.47	5.97 \pm 4.64	0.67 \pm 0.67

3.3.3 La Paz

Se analizaron 27 lajas de coral de diez colonias de coral de *Porites panamensis*. La tasa de endo-bioerosión promedio fue de 4.13 ± 3.41 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Además, se determinó que los principales endo-erosionadores en el sitio de estudio son los moluscos ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃ (Tabla 14).

Tabla 14. Promedio de volumen bioerosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en la Paz. No id= no identificado.

	Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos	No Id (x)
Volumen bioerosionado (cm ³)	3.72 \pm 2.71	0.55 \pm 0.86	0.62 \pm 0.31	1.43 \pm 1.03	1.44 \pm 1.45
Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	4.13 \pm 3.41	0.38 \pm 0.29	0.80 \pm 0.55	1.51 \pm 1.44	1.65 \pm 1.12
Porcentaje de erosión (%)	3.41 \pm 2.07	0.39 \pm 0.39	0.69 \pm 0.44	1.28 \pm 1.07	1.05 \pm 1.10

3.3.4 Cabo Pulmo

Se analizaron ocho colonias de *Porites panamensis*. La tasa de endo-bioerosión promedio fue de 6.73 ± 4.48 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Se determinó que los principales endo-erosionadores son los moluscos ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃ (Tabla 15).

Tabla 15. Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Cabo Pulmo. No id= no identificado.

	Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos	No Id (x)
Volumen bioerosionado (cm ³)	2.66 \pm 2.13	0.29 \pm 0.44	0.72 \pm 1.06	1.59 \pm 1.65	0.32 \pm 0.42
Tasa de endo-bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	6.73 \pm 4.48	0.57 \pm 0.67	1.92 \pm 2.73	3.85 \pm 2.33	0.66 \pm 0.50
Porcentaje de erosión (%)	4.29 \pm 2.03	0.33 \pm 0.38	1.12 \pm 1.59	2.27 \pm 1.37	0.57 \pm 0.53

3.3.5 Isla Isabel

Se analizaron 37 lajas de 11 colonias de coral de *Porites lobata*. La tasa de endo-bioerosión promedio fue de 13.11 ± 16.21 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Además, se determinó que los principales endo-erosionadores son los moluscos, ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃ (Tabla 16).

Tabla 16. Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Isla Isabel. No id= no identificado.

	Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos
Volumen bioerosionado (cm ³)	3.79 \pm 5.26	0.01 \pm 0.05	0.26 \pm 0.49	3.48 \pm 5.10
Tasa de endo-bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	13.1 \pm 16.20	0.005 \pm 0.03	0.37 \pm 0.77	3.75 \pm 6.079
Porcentaje de erosión (%)	7.6 \pm 7.21	0.008 \pm 0.03	0.55 \pm 0.86	6.84 \pm 7.13

3.3.6 Isla Cleofás

Se analizaron 11 colonias de coral de *Pavona clavus*. Se obtuvo una tasa de bioerosión promedio de 7.69 ± 5.63 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. Se determinó que los principales endo-erosionadores son los moluscos ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃ (tabla 17).

Tabla 17. Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Isla Cleofás. No id= no identificado.

	Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos
Volumen bioerosionado (cm ³)	8.02 \pm 6.30	0.26 \pm 0.60	0.259 \pm 3.53	5.329 \pm 4.54
Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	7.69 \pm 5.63	0.192 \pm 0.39	2.589 \pm 2.73	5.74 \pm 6.50
Porcentaje de erosión (%)	3.93 \pm 2.46	0.13 \pm 0.26	1.77 \pm 2.33	2.94 \pm 2.50

3.3.7 Islas Marietas

Se analizaron cinco colonias de *Porites panamensis* y siete colonias de *Pavona gigantea*. La tasa de bioerosión promedio fue de 13.72 ± 7.65 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} para *Porites panamensis*, y una tasa de 8.17 ± 5.9 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} para *Pavona gigantea*. Además, se determinó que los principales endo-erosionadores son los moluscos ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO_3 (Tabla 18).

Tabla 18. Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Islas Marietas, en dos especies de coral. No id= no identificado.

		Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos
<i>Pavona gigantea</i>	Volumen bioerosionado (cm^3)	4.75 \pm 3.8	0.12 \pm 0.31	2.16 \pm 3.21	2.31 \pm 2.97
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1})	8.17 \pm 5.90	0.17 \pm 0.44	4.89 \pm 6.58	2.89 \pm 3.79
	Porcentaje de erosión (%)	8.59 \pm 6.9	0.21 \pm 0.58	3.38 \pm 3.97	4.69 \pm 6.33
<i>Porites panamensis</i>	Volumen bioerosionado en (cm^3)	2.29 \pm 2.07	0.007 \pm 0.02	0.55 \pm 0.47	1.67 \pm 1.99
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1})	13.72 \pm 7.65	0.06 \pm 0.14	4.35 \pm 4.64	8.66 \pm 8.55
	Porcentaje de erosión (%)	6.86 \pm 4.23	0.01 \pm 0.03	2.83 \pm 3.45	4.89 \pm 5.56

3.3.8 Zihuatanejo

Se analizaron cinco colonias de coral de *Porites lobata* y 2 colonias de coral de *Pavona gigantea*. La tasa de bioerosión promedio de 0.67 ± 1.5 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} para *Porites lobata*, así como una tasa de 0.77 ± 1.08 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} para *Pavona gigantea*. También se determinó que los principales endo-erosionadores para las colonias de *Porites lobata* son los moluscos, en las cuales no se encontró bioerosión por esponjas ni por poliquetos. En cuanto a *Pavona gigantea* la mayor tasa de endo-bioerosión fue por esponjas (Tabla 19).

Tabla 19. Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Zihuatanejo, en dos especies de coral. No id= no identificado.

		Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos
<i>Porites lobata</i>	Volumen bioerosionado (cm ³)	0.03 \pm 0.08	0	0	0.04 \pm 0.07
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	0.67 \pm 1.5	0	0	0.67 \pm 1.34
	Porcentaje de erosión (%)	0.23 \pm 0.51	0	0	0.23 \pm 0.52
<i>Pavona gigantea</i>	Volumen bioerosionado (cm ³)	0.02 \pm 0.03	0	0.01 \pm 0.02	0.01 \pm 0.01
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	0.77 \pm 1.08	0	0.43 \pm 0.61	0.34 \pm 0.48
	Porcentaje de erosión (%)	0.15 \pm 0.22	0.08 \pm 0.11	0.98 \pm 0.09	1.07 \pm 0.83

3.3.9 Huatulco

Se analizaron 15 lajas de coral (*Porites panamensis*: n= 9, *Pavona varians*: n= 4, *Pavona gigantea*: n= 2), se determinó una tasa de bioerosión promedio de 46.11 \pm 74.52 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹ para *Porites panamensis*, así como una tasa de 1.48 \pm 0.64 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹ para *Pavona gigantea* y para *Pavona varians* una tasa de 7.11 \pm 5.52 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹. También, se determinó que para *Porites panamensis* y *Pavona gigantea* los principales endo-erosionadores son los moluscos (Tabla 20), ya que remueven la mayor cantidad de volumen de CaCO₃ y para la especie *Pavona varians* los principales bioerosionadores son las esponjas.

Tabla 20. Promedio de volumen erosionado y tasa de endo-bioerosión \pm desviación estándar de los principales endo-bioerosionadores en Huatulco, en tres especies de coral. No id= no identificado.

		Total	Poliquetos	Esponjas	Moluscos
<i>Porites panamensis</i>	Volumen bioerosionado (cm ³)	0.84 \pm 0.71	0.02 \pm 0.04	0.25 \pm 0.33	0.57 \pm 0.76
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	46.11 \pm 74.52	0.13 \pm 0.25	9.72 \pm 15.44	47.34 \pm 86.98
	Porcentaje de erosión (%)	11.5 \pm 11.82	0.24 \pm 0.39	3.36 \pm 2.68	3.07 \pm 3.96

<i>Pavona gigantea</i>	Volumen bioerosionado (cm ³)	0.14±0.07	0.006±0.009	0.07±0.001	0.08±0.055
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	1.48±0.64	0.07±0.95	0.75±0.14	0.71±0.45
	Porcentaje de erosión (%)	1.94±1.09	0.08±0.11	0.98±0.09	1.07±0.83
<i>Pavona varians</i>	Volumen bioerosionado (cm ³)	0.58±0.45	0.02±0.05	0.40±0.47	0.13±0.09
	Tasa de endo- bioerosión (mg CaCO ₃ cm ⁻² año ⁻¹)	7.11±5.52	0.20±0.40	3.99±5.48	0.79±0.89
	Porcentaje de erosión (%)	5.41±2.54	0.20±0.42	2.57±1.96	1.80±2.09

3.4 Comparación de endo-bioerosión entre localidades, morfotipos, especies

3.4.1 Tasas de endo-bioerosión

Al comparar la tasa de bioerosión entre localidades, morfotipos y especies, el PERMANOVA señala que las tasas de endo-bioerosión son diferentes en cada localidad ($p < 0.05$) explicando el 18% de la variación de los datos (Tabla 21). De acuerdo con el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas principalmente por la localidad Zihuatanejo, el cual es el sitio que presenta menor tasa de endo-bioerosión ($0.7 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), seguido por la localidad la Paz ($4.19 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), el cual presenta diferencias contra Islas Marietas y Bahía de Concepción (Figura 16). Por otro lado, de acuerdo con el PERMANOVA, no se encontraron diferencias en la tasa de endo-bioerosión entre especies, morfotipos ni en la interacción entre localidad y morfotipos (Tabla 21).

Tabla 21. Resultados del PERMANOVA de los efectos de la localidad, morfotipos y especies de coral, en la tasa de endo-bioerosión. Df = grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R ²	Pr(>F)
Localidades	8	0.18394	0.004
Morfotipos	3	0.02538	0.322
Especies c.	3	0.01361	0.617
Localidades: morfotipos	2	0.03575	0.096

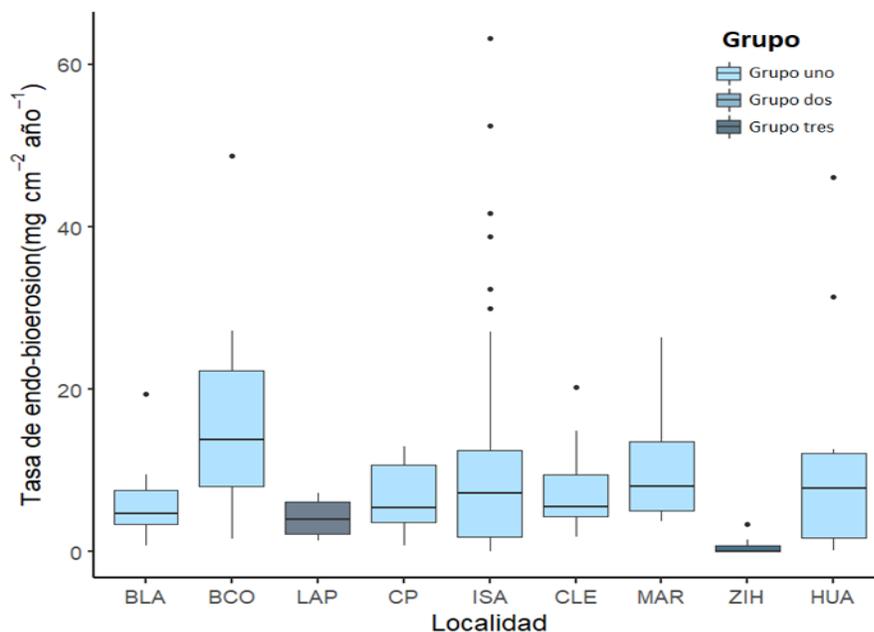


Figura 19. Tasa de endo-bioerosión ($\text{mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) entre localidades (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas, Zihuatanejo y Huatulco), las diferencias entre localidades están dadas principalmente por Zihuatanejo y La Paz. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los vales máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

Al comparar la tasa de endo-bioerosión entre localidades y organismos erosionadores, el PERMANOVA mostró diferencias en la tasa de endo-bioerosión, las cuales están dadas principalmente entre grupo erosionador y entre la interacción de localidades y grupos erosionadores (Tabla 22). El grupo erosionador que explica el 21% de la varianza de los datos, así mismo la interacción de localidades x grupos erosionadores explica el 22% de esta variación. De acuerdo con el análisis Post-hoc, la tasas de endo-bioerosión de los tres organismos erosionadores son diferentes entre sí, siendo los moluscos el grupo erosionador que presentó mayor tasa de endo-bioerosión (Figura 10). Entre localidades, según el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas principalmente Zihuatanejo e Isla Isabel.

Tabla 22. PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las localidades en la tasa de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $\text{Pr}(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P < 0.05$ en negrita.

	Df	R^2	$\text{Pr}(>F)$
Grupo erosionador	2	0.21975	0.001
Grupo erosionador: Localidades	24	0.22198	0.001

3.4.2 Volumen de endo-bioerosión

Al comparar el volumen de endo-bioerosión entre localidades, morfotipos y especies, el PERMANOVA mostró que las diferencias están dadas principalmente por las localidades ($p=0.001$), explicando un 33% de la varianza de los datos, asimismo, la interacción entre los factores localidades y morfotipos explica el 4% de la varianza del volumen de endo-bioerosión (tabla 23). De acuerdo con el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas principalmente por las localidades Huatulco, Zihuatanejo, los cuales presentaron el menor volumen erosionado y por el sitio Isla Cleofás, la cual presenta el mayor volumen bioerosionado (Figura 20). Entre morfotipos de acuerdo con la prueba Post-hoc las diferencias las presenta el morfotipo columnar contra el incrustante y de vida libre, donde el morfotipo columnar presentó mayor volumen erosionado (Figura 12). Por otro lado, de acuerdo con el PERMANOVA, no se encontraron diferencias significativas de volumen de endo-bioerosión entre especies y morfotipos (Tabla 23).

Tabla 23. Resultados del PERMANOVA de los efectos de las localidades, morfotipos y especies en el volumen de bioerosión. Df = grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ =Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P < 0.05$ en negrita.

	Df	R²	Pr(>F)
Localidades	8	0.33957	0.001
Morfotipos	3	0.04473	0.065
Especies	3	0.00114	0.971
Localidades: morfotipos	2	0.04191	0.030

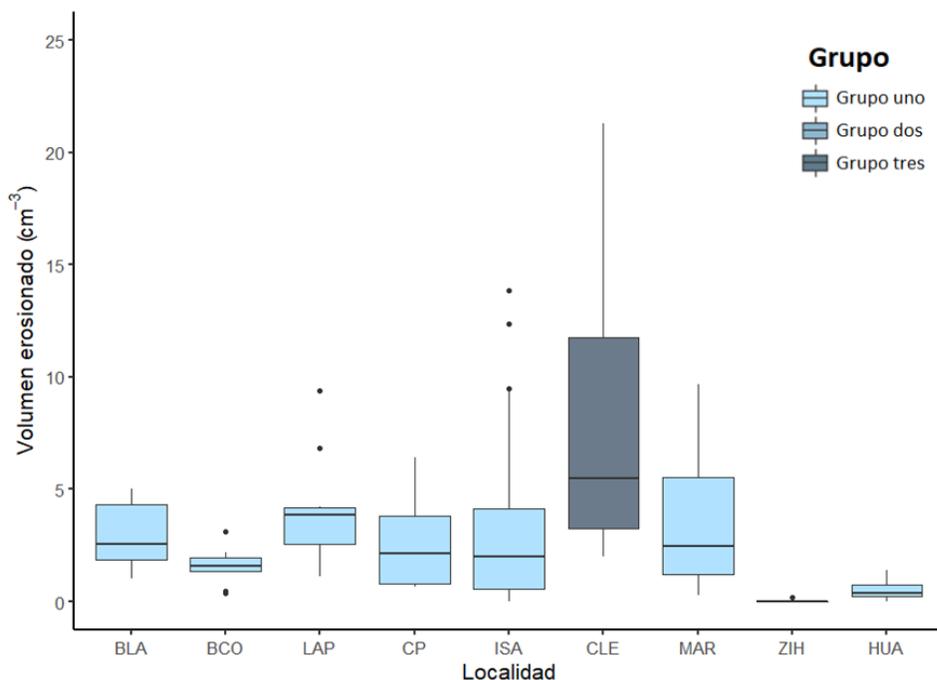


Figura 20. Volumen de endo-bioerosión (cm^3) entre localidades (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Cleofás, Islas Marietas, Zihuatanejo y Huatulco). Diferencias dadas por Huatulco, Isla Cleofás y Zihuatanejo. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

Al comparar el volumen de endo-bioerosión entre localidades y grupo erosionador, el PERMANOVA señala que las diferencias del volumen de endo-bioerosión están dadas principalmente por los grupos erosionadores y la interacción de localidades y grupo erosionador (Tabla 24). El factor grupo erosionador, explica el 27% de la varianza de los datos, así mismo la interacción de localidades x grupos erosionadores explica el 21% de esta variación. De acuerdo con el análisis Post-hoc, el volumen de endo-bioerosión de los tres organismos erosionadores son diferentes entre sí, siendo los moluscos el grupo erosionador que presentó el mayor volumen de endo-bioerosión (Figura 14). Entre localidades, según el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas principalmente por la Isla Cleofás, Zihuatanejo y Huatulco.

Tabla 24. PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las localidades en el volumen de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $\text{Pr}(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P < 0.05$ en negrita.

	Df	R^2	$\text{Pr}(>F)$
Grupo erosionador	2	0.27408	0.001
Grupo erosionador: Localidades	24	0.21824	0.001

3.4.3 Porcentaje de endo-bioerosión

Al comparar el porcentaje de endo-bioerosión entre localidades, morfotipos y especies, el PERMANOVA exhibe que las diferencias están dadas principalmente por las localidades ($p=0.001$), explicando un 23% de la variación de los datos (Tabla 25), así mismo la interacción entre los factores sitio y morfotipos explican un 6% de la variación de los datos. De acuerdo con el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas principalmente por el sitio Zihuatanejo, el cual es el sitio que presenta en menor porcentaje de endo-bioerosión (Figura 21). Cabe mencionar que, de acuerdo con el PERMANOVA, no se encontraron diferencias entre especies y morfotipos (Tabla 25).

Tabla 25. Resultados del PERMANOVA de los efectos de los entre localidades, morfotipos y especies en el porcentaje de bioerosión. Df= grados de libertad, R^2 =Coeficiente de determinación, $Pr(>F)$ = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de $P < 0.05$ en negrita.

	Df	R^2	$Pr(>F)$
Localidades	8	0.23288	0.001
Morfotipos	3	0.04295	0.084
Especies	3	0.03392	0.137
Localidades: morfotipos	2	0.06797	0.007

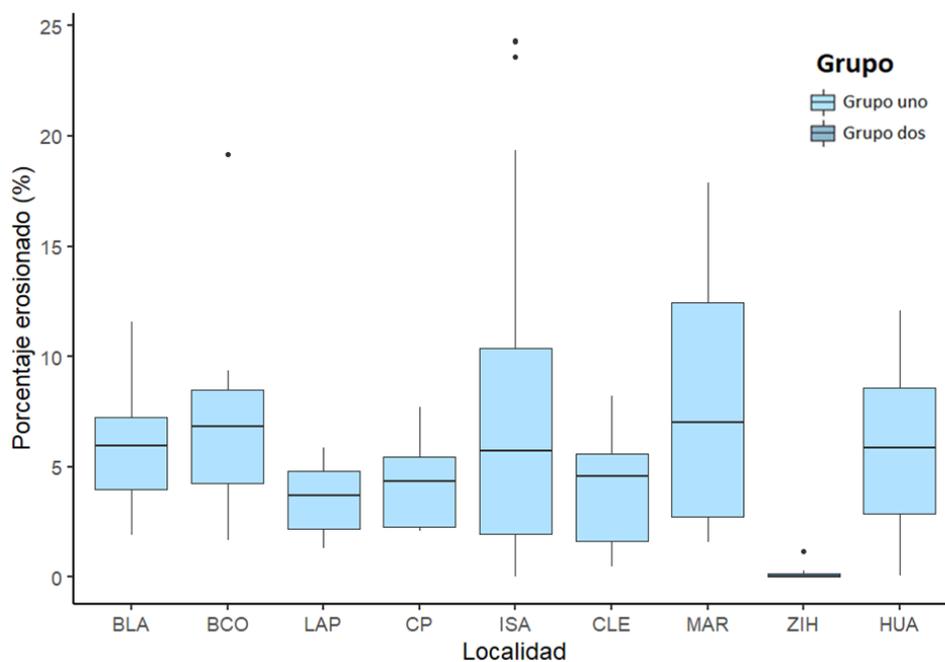


Figura 21. Porcentaje (%) de endo-bioerosión entre localidades (Bahía de los Ángeles, Bahía de Concepción, La Paz, Cabo Pulmo, Isla Isabel, Isla Cleofás, Islas Marietas, Zihuatanejo y Huatulco). Diferencias dadas por Zihuatanejo. Las cajas del boxplot muestran del 1° al 3° cuartil de los datos, la línea central es la mediana, los bigotes muestran los valores máximos y mínimos no atípicos y los puntos los valores atípicos.

Al comparar el porcentaje de endo-bioerosión entre localidades y grupo erosionador, el PERMANOVA señala que las diferencias están dadas principalmente por los grupos erosionadores y la interacción de localidades x grupo erosionador (Tabla 26). El factor grupo erosionador, explica el 34 % de la varianza de los datos, así mismo la interacción de localidades y grupos erosionadores explica el 17 % de esta variación. De acuerdo con el análisis Post-hoc, el volumen de endo-bioerosión de los tres organismos erosionadores son diferentes entre sí, siendo los moluscos el grupo erosionador que presentó el mayor porcentaje de endo-bioerosión (Figura 18). Entre localidades, según el análisis Post-hoc, las diferencias están dadas principalmente por Zihuatanejo.

Tabla 26. PERMANOVA de los efectos del grupo erosionador y las localidades en el porcentaje de endo-bioerosión. Df= grados de libertad, R²=Coeficiente de determinación, Pr(>F) = Probabilidad mayor que el F calculado. Valores de P= <0.05 en negrita.

	Df	R²	Pr(>F)
Grupo erosionador	2	0.34219	0.001
Grupo erosionador: Localidades	24	0.17391	0.001

3.5 Endo-bioerosión por subregiones

Para observar cómo se agrupan los datos por regiones, se realizó un ordenamiento multidimensional no métrico (NMDS) con los datos de volumen y tasa de endo-bioerosión por bioerosionadores (moluscos, esponjas y poliquetos), en el cual se observa una clara agrupación por regiones (Figura 22). El Pacífico Central (figura verde) tiene una zona más amplia en el cual los datos de Isla Isabel se separan, el Golfo de California (figura azul) está agrupado en medio de las regiones y el Pacífico Sur se agrupa en la parte inferior. En cuanto a los bioerosionadores, los poliquetos se agrupan en el centro, mayormente en el Pacífico Central, los moluscos y esponjas se esparcen por todas las localidades, estando en mayor proporción los moluscos.

Se relacionaron los ejes resultantes del NMDS con las variables ambientales (TSM y promedio de clorofila a para cada sitio), se observa que, de manera indirecta, estas variables no tienen efecto sobre el volumen y la tasa de endo-bioerosión, ya que los vectores resultantes son muy pequeños y no se dirigen hacia donde está la mayoría de los datos (Figura 22).

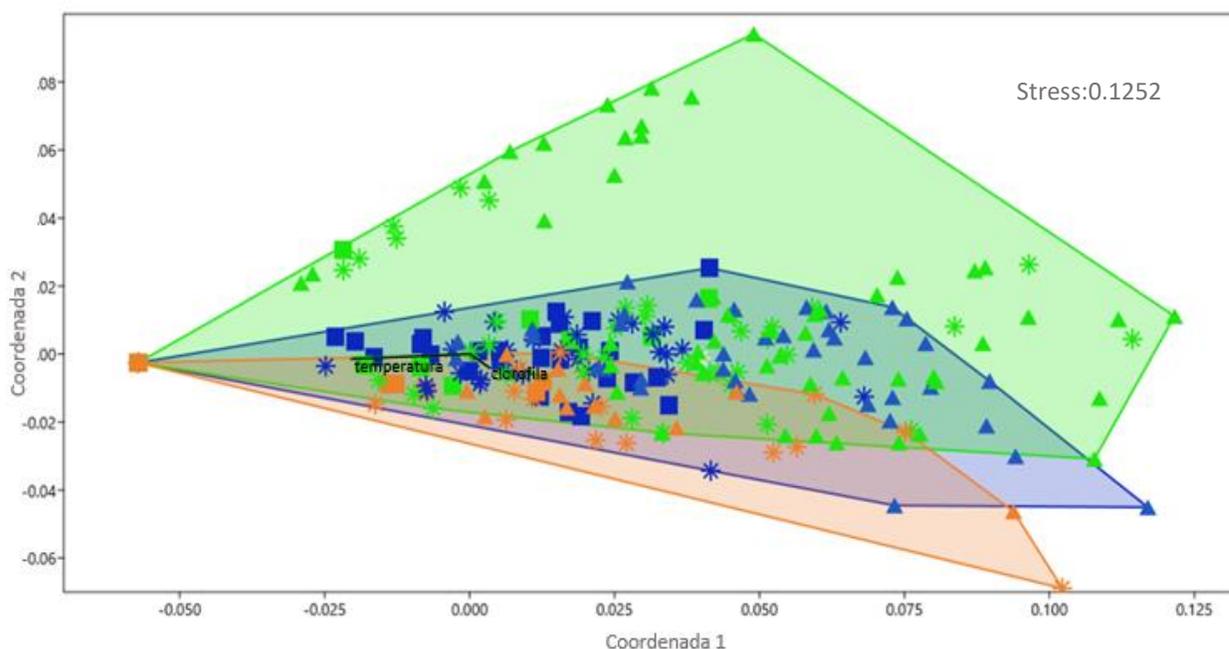


Figura 22. NMDS de tasa y volumen de endo-bioerosión por bioerosionadores. Golfo de California: azul, Pacífico Central: verde, Pacífico Sur: naranja, Poliquetos: cuadrado, esponjas: estrellas, moluscos: triángulo. Stress:0.1252

3.6 Relación de la endo-bioerosión con la densidad esquelética

Se realizó una prueba de correlación Spearman entre las variables ambientales (TSM y Chl-a) de las localidades, la densidad del esqueleto coralino, el volumen, porcentaje y tasa de endo-bioerosión. La densidad del esqueleto presentó una baja correlación negativa con la Chl-a ($\rho = -0.44$; $p < 0.05$). El volumen de bioerosión presentó una baja correlación con la TSM ($\rho = -0.34$; $p < 0.05$) y con la Chl-a ($\rho = -0.18$; $p < 0.05$). Por otro lado, la concentración de Chl-a (mg m^{-3}) se correlacionó negativamente con la TSM ($^{\circ}\text{C}$) (-0.24). La correlación entre la densidad y la tasa de endo-bioerosión no resultó significativa ($p > 0.05$), tampoco entre la densidad y el volumen de bioerosión ($p > 0.05$) (Figura 23).

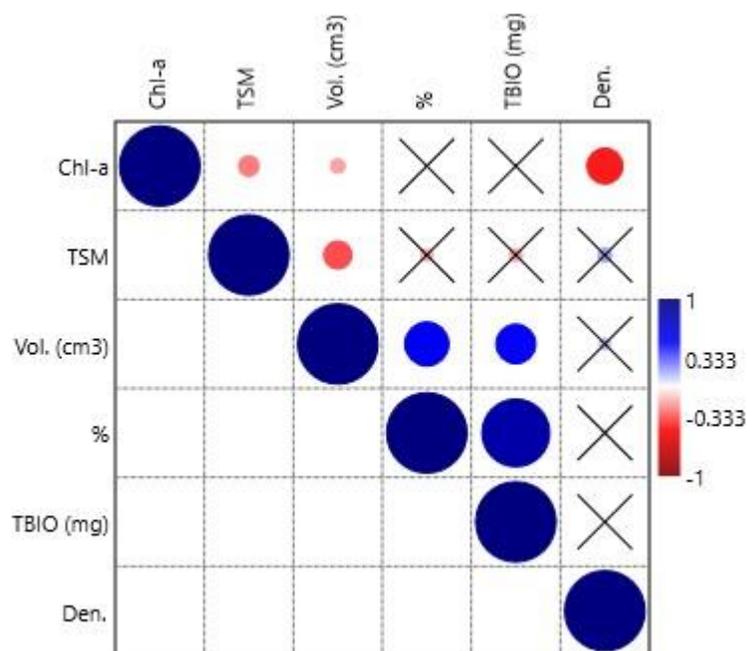


Figura 23. Gráfico de correlación de Spearman entre las variables: TSM, Chl-a, Den=densidad promedio, Vol=volumen bioerosionado, %=Porcentaje de bioerosión, TBIO=Tasa de endo-bioerosión.

Se realizó una regresión lineal para ver la relación entre el promedio de densidad del esqueleto por sitio y el promedio tasa de endo-bioerosión (Figura 24), en la cual, se observa que no hay relación entre los datos, obteniendo un r^2 de 0.0007 ($p=0.92$). De la misma forma entre la densidad del esqueleto y el promedio de volumen erosionado por sitio, se obtuvo un r^2 de 0.2223 ($p=0.07$) (Figura 24), por lo que solo el 22% de los datos del volumen erosionado estarían siendo explicados por los datos de la densidad del esqueleto. Se realizaron también regresiones lineales de densidad y volumen erosionado por especies de coral, mostrando que en *Pavona gigantea* y *Porites panamensis* sí hay una relación lineal significativa ($p<0.05$) positiva y negativa correspondientemente (Figura 25), para las demás especies (*Pavona varians*, *Porites lobata* y *Pavona clavus*) no fue significativa esta relación ($p>0.05$). Al analizar la relación entre la tasa de endo-bioerosión y porcentaje de endo-bioerosión con la densidad del esqueleto no se encontró una relación lineal significativa para ninguna de las especies ($p>0.05$), así como tampoco comparando la densidad con cada uno de los morfotipos agrupados ($p>0.05$).

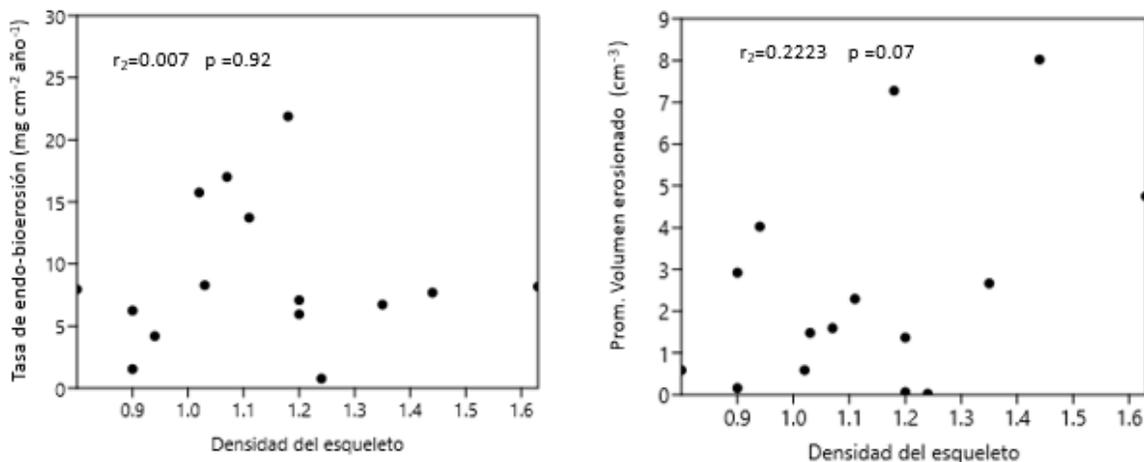


Figura 24. A) Regresión lineal entre el promedio de densidad del esqueleto por localidad y de la tasa de endo-bioerosión y B) Regresión lineal entre el promedio de densidad del esqueleto por especie de coral y el promedio de volumen erosionado.

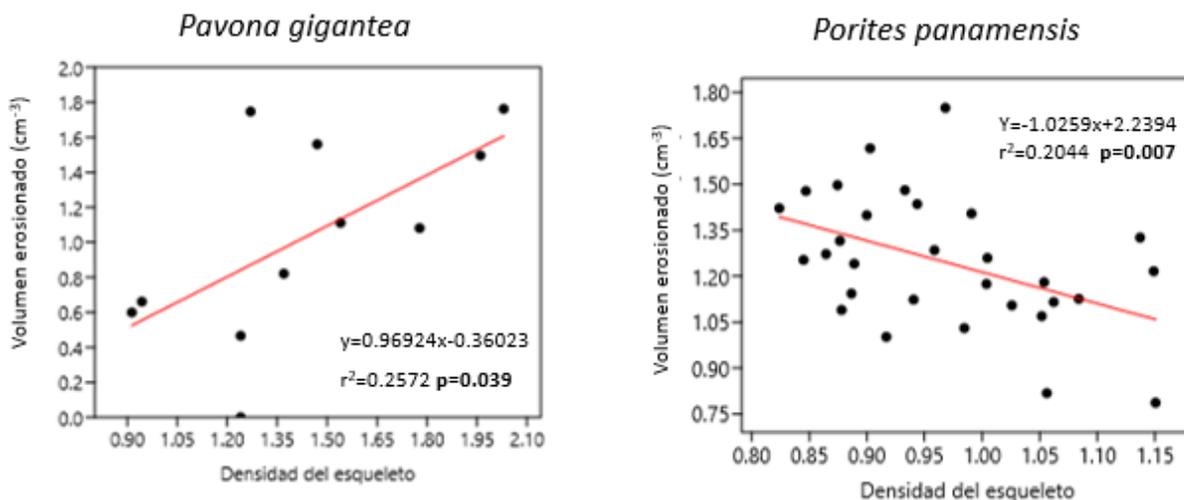


Figura 25. Regresión lineal entre la densidad del esqueleto y el volumen erosionado en *Pavona gigantea* y *Porites panamensis*.

Para ver la relación entre la densidad del esqueleto y la endo-bioerosión por grupo erosionador, se realizó una regresión lineal entre el volumen, porcentaje y la tasa de endo-bioerosión producida por moluscos, esponjas y poliquetos. Para la endo-bioerosión por moluscos, se observó que, en *Porites panamensis* hay una relación positiva entre la densidad del esqueleto y la tasa de endo-bioerosión ($p=0.033$), así como en

la especie *Pavona gigantea*, la relación positiva entre la densidad del esqueleto con la tasa ($p=0.018$) y el volumen de endo-bioerosión ($p=0.021$) fue significativa, y en *Porites lobata*, la densidad del esqueleto se relacionó con la tasa de endo-bioerosión ($p=0.018$) (Figura 26). Para *Pavona varians* y *Pavona clavus* ninguna de las variables de endo-bioerosión se relacionó con la densidad ($p>0.05$). En la endo-bioerosión causada por esponjas y por poliquetos, no se observó una relación significativa con la densidad de los esqueletos, en ninguna de las especies ($p>0.05$).

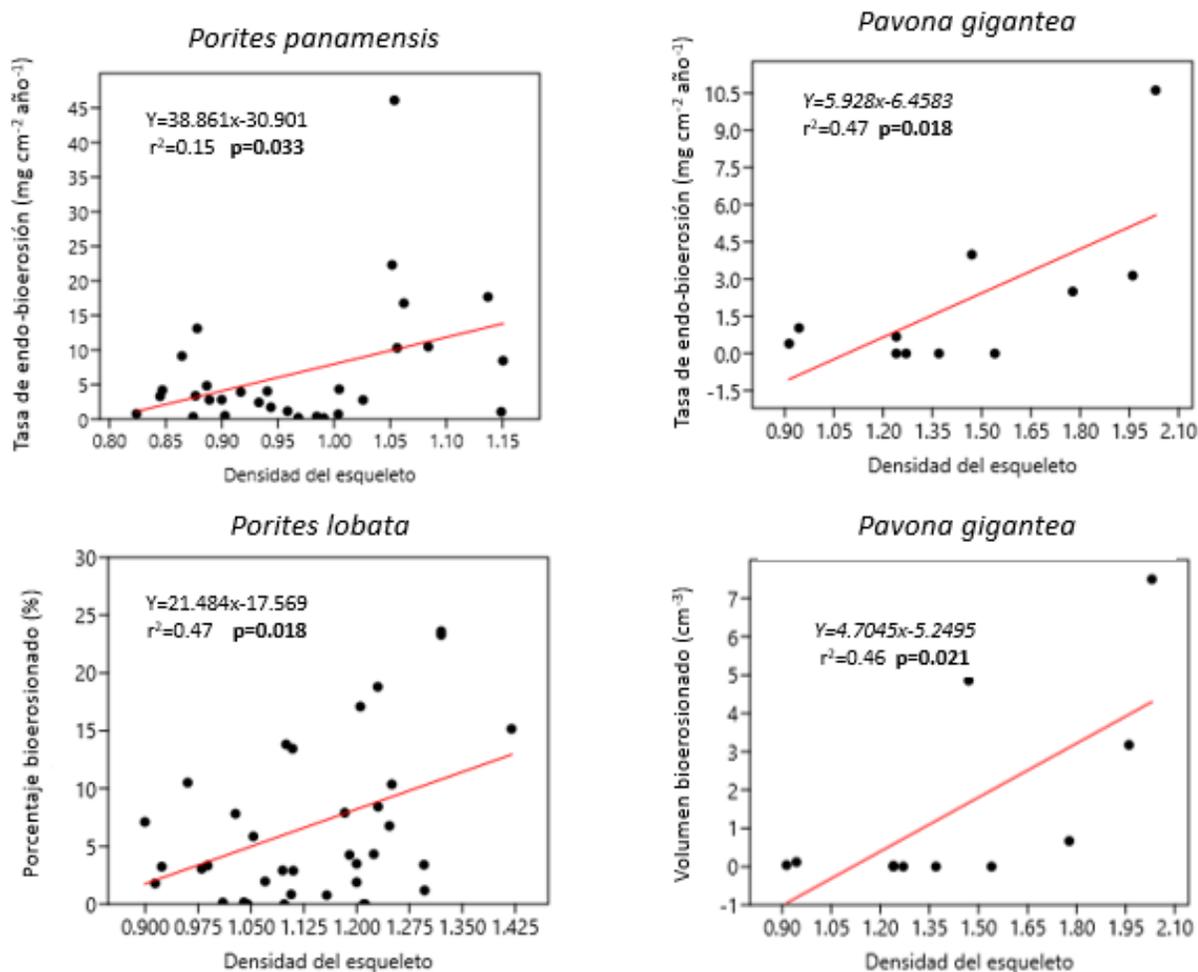


Figura 26. Regresión lineal entre la densidad del esqueleto y la endo-bioerosión por moluscos, para *Porites panamensis*, *Pavona gigantea* y *Porites lobata*.

3.7 Relación de la endo-bioerosión con los factores ambientales

Las localidades se dividieron según el estrés por alto contenido de nutrientes y baja temperatura, utilizando los datos obtenidos de promedio de clorofila a (mg m^{-3}) por año y temperatura mínima mensual ($^{\circ}\text{C}$), en cada localidad, dentro del promedio de los años de vida de cada coral. Las localidades se agruparon en comunidades coralinas con estrés de temperatura (menor a 18.4°C), estrés por nutrientes (mayor a $0.3 \text{ mg Chl a /m}^{-3}$), así como en conjunto, por estrés por temperatura y nutrientes (Figura 26). La zona sombreada en el gráfico, indica un ambiente eutrófico, y la zona sin sombrear mesotrófico (Figura 26). Las localidades que se encuentran en estrés por temperatura y nutrientes son Bahía de los Ángeles y Bahía de Concepción (Figura 23), siendo Bahía de Concepción el sitio que tiene el mayor promedio de tasa de endo-bioerosión. Todas las demás localidades se encuentran en la zona de estrés por nutrientes, siendo que las localidades Islas Marietas, Zihuatanejo, Isla Isabel, Huatulco y La Paz, de acuerdo con el gráfico, se encuentra en condiciones eutróficas, siendo Zihuatanejo y la Paz los que tienen la menor tasa de endo-bioerosión. Por otro lado, Cabo Pulmo e Islas Cleofás, están en el área mesotrófica del gráfico, mostrando valores intermedios de tasas de endo-bioerosión entre las localidades estudiadas (Tabla 2, Figura 12).

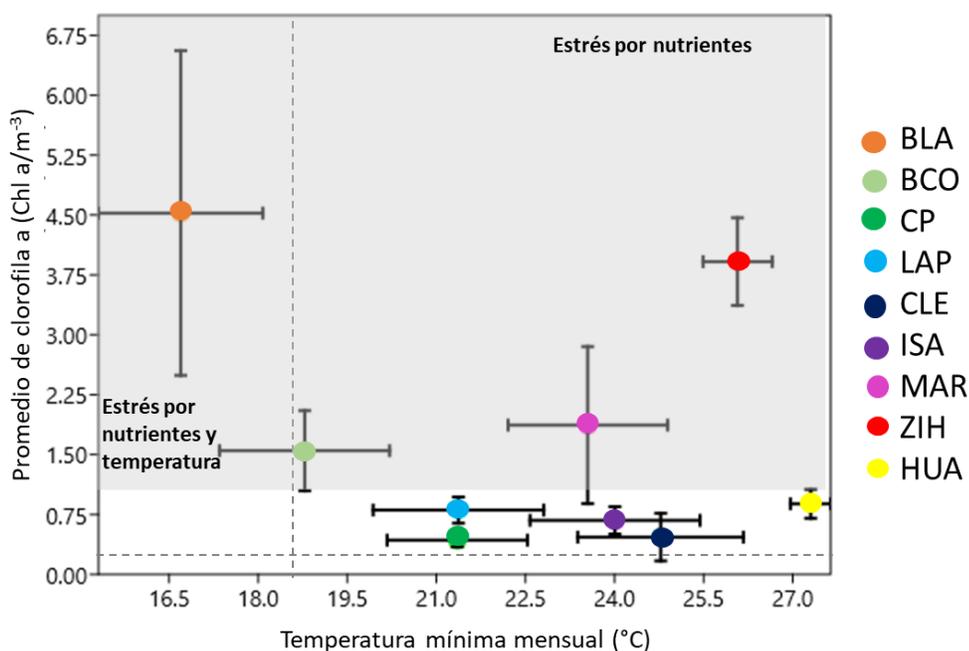


Figura 27. Valores de promedio anual de clorofila a y temperatura mínima mensual para todas las localidades (Bahía de los Ángeles: naranja, Bahía Concepción: verde claro, Cabo Pulmo: verde fuerte, La Paz: azul claro, Isla Cleofas: azul fuerte, Isla Isabel: morado, Islas Marietas: rosa, Zihuatanejo: rojo, Huatulco: amarillo). Basándose en la figura de Halfar et al., 2005. Líneas punteadas indican temperaturas mensuales mínimas y valores máximos de clorofila a (mg m^{-3}) requeridos para el buen desarrollo de las comunidades coralinas.

Capítulo 4. Discusión

4.1 Endo-bioerosión por regiones

4.1.1 Tasa de endo-bioerosión

Este estudio presenta de los primeros reportes de tasas de endo-bioerosión para localidades a lo largo del Pacífico mexicano. Se encontró una alta tasa de endo-bioerosión promedio (\pm DE) de 9.94 ± 11.94 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} . Las tasas de bioerosión reportadas en el Pacífico mexicano, hasta el momento, han llegado hasta los $\sim 18\text{--}23$ kg CaCO_3 m^{-2} año^{-1} en áreas que comprenden todo el arrecife, ocasionadas principalmente por organismos epilíticos (Pari et al., 2002; Glynn, 1997). Davies y Hutchings (1983) reportaron tasas de bioerosión interna, mayores a las encontradas en este estudio, en el Norte de la Gran Barrera de Coral con rangos entre $0.694 - 1.788$ kg m^{-2} año^{-1} (69.4 ± 178.8 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1}), lo cual pudo deberse a que dichos autores midieron tanto micro-erosión como macro-erosión, por lo cual la tasa reportada fue mayor a la del presente trabajo, otra causa podría ser que la medición se basó en bloques de carbonato (*Porites lutea*) con un tiempo de exposición determinado de uno a varios años, dando lugar a una mejor referencia de las tasas anuales. Así mismo, Pari et al., (2002) en el archipiélago de Tuamotu, Polinesia Francesa, registraron una tasa de erosión neta promedio mayor a la de este estudio, siendo de 2.03 ± 0.55 kg de CaCO_3 m^{-2} año^{-1} (203.0 ± 55.0 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1}) la reportada sobre sustratos de carbonato, y de $1.01 - 0.02$ kg m^{-2} año^{-1} , (101.0 ± 2.0 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1}) en las tasas de bioerosión interna por macro-bioerosionadores el cual varió significativamente entre sitios y entre el tiempo que estuvieron expuestos (hasta 60 meses), el estudio se realizó sobre bloques de esqueleto de coral, sin pólipos en su exterior, lo cual propició que la bioerosión se llevará a cabo más fácilmente, ya que los erosionadores atacan mayormente al sustrato muerto. En algunas partes del Pacífico Oriental, donde la mortalidad de los corales es alta y tienen una recuperación de la comunidad coralina lenta, se han observado grandes daños por erosión tanto interna como externa (Glynn, 1997).

El análisis regional mostró que la mayor tasa de endo-bioerosión fue de 11.59 ± 13.38 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} en el Pacífico central, seguido de 8.63 ± 9.20 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} en el Golfo de California y finalmente de 7.50 ± 11.80 mg CaCO_3 cm^{-2} año^{-1} en el Pacífico Sur, asimismo, no se mostraron diferencias significativas en las tasas entre las subregiones, por lo que se asume, que toda la zona de Pacífico mexicano tienen condiciones similares para el asentamiento y desarrollo de endo-erosionadores (Wizemann et al., 2018). Esto puede deberse a que las localidades presentan altos niveles de concentración de nutrientes (Figura 27), debido a zonas de surgencia estacionales y al aporte de aguas continentales propias de cada localidad

(Glynn y Ault, 2000). Generalmente los aumentos de nutrientes y la materia orgánica disuelta tienden ser un factor que aumenta la bioerosión, dado que la mayoría de endo-bioerosionadores son suspensívoros o filtradores, lo que ayuda a desarrollar sus poblaciones (Wizemann et al., 2018). Además este aumento de nutrientes en combinación con la disminución de temperatura no beneficia a las comunidades coralinas, debido a que constantemente causan la mortalidad del tejido coralino y disminuyen su éxito reproductivo (Glynn, 1997).

Los resultados del presente estudio fueron menores a lo encontrado por Londoño-Cruz et al., 2003, en el Pacífico colombiano ($1.5-2 \text{ kg m}^2 \text{ año}^{-1}$) en colonias de *Pocillopora sp.*, estas diferencias debidas a las especies ramificadas, *Pocillopora* presenta una historia de vida diferente (rápido crecimiento) en contraste al crecimiento de corales masivos como *Porites* y *Pavona*. Por otro lado, DeCarlo, (2015) en el Pacífico central obtuvo una tasa de $68 \text{ mg cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en las especies de *Porites*. En la subregión del Pacífico central, Antuna (2019) determinó una tasa de bioerosión interna de $48.21 \pm 0.68 \text{ mg cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, para las especies de *Porites lobata*, *Porites panamensis* y *Pavona gigantea*, siendo mayor a lo registrado durante este estudio. Sin embargo, Antuna (2019) estudió un mayor número de colonias, pero en menos localidades, así como midió el grosor de las erosiones directamente en las lajas, pudiendo haber sobrestimado el grosor de las mismas.

Las tasas de endo-bioerosión fueron mayores en corales con morfotipo incrustante ($16.40 \pm 15.36 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), seguido del morfotipo masivo, con diferencias significativas con los demás morfotipos (columnar y vida libre). Se ha reportado que la bioerosión puede variar entre especies dependiendo del morfotipo y el área basal descubierta en cada uno, en cada especie de coral (Cosain-Díaz et al., 2021). Sin embargo, es importante remarcar que los estudios de este tipo aún se encuentran en etapas iniciales en todos los arrecifes del mundo. Por lo que, las metodologías aun requieren ser estandarizadas con el fin de tener una menor incertidumbre y mejores comparaciones.

4.1.2 Volumen de endo-bioerosión

El volumen erosionado, fue estadísticamente menor en la subregión Pacífico Sur ($0.35 \pm 0.40 \text{ cm}^3$), esto podría deberse al menor número de colonias recolectadas en esta subregión, así como a su menor tamaño en comparación con las colonias recolectadas en el resto de las subregiones. Esto puede deberse a las condiciones ambientales en la zona presentan estrés por nutrientes, pero no estrés por temperatura,

siendo la subregión que presentó el mayor promedio de temperatura mínima mensual. En la subregión Pacífico Sur también se reportaron las menores tasas y porcentaje erosionado del PM (aunque solo el volumen fue diferente estadísticamente a las demás subregiones). En la subregión del Pacífico central se presentó el mayor volumen de endo-bioerosión ($4.55 \pm 5.33 \text{ cm}^{-3}$), el cual es menor a lo reportado por Cosain-Díaz et al., (2021), donde se reporta un volumen erosionado de $36.10 \pm 30.83 \text{ cm}^{-3}$, mostrando que el volumen bioerosionado está relacionado a la especie de coral y a la morfología del mismo, debido a sus diferentes estrategias de crecimiento (Norzagaray-López et al., 2013; Tortolero-Langarica et al., 2016).

Comparando el volumen de endo-bioerosión por especies de coral, en *Pavona clavus* se presentó el mayor volumen erosionado ($8.02 \pm 6.30 \text{ cm}^3$), lo cual es consistente con otros estudios. Cosain-Díaz et al. (2021) reportaron valores de volumen de bioerosión de $71.31 \pm 32.35 \text{ cm}^3$ en *P. gigantea*, en *P. lobata* de $26.60 \pm 4.87 \text{ cm}^3$ y en *P. panamensis* de $29.6 \pm 14.61 \text{ cm}^3$, donde, a nivel de género, *Pavona* presentó los valores más altos en bioerosión y de densidad del esqueleto (1.61 g cm^{-3}), mostrando que el género *Pavona* es mayormente erosionado debido a su alta densidad, ya se teoriza que corales de alta densidad del esqueleto, pueden proporcionar un refugio a los endo-bioerosionadores para protegerse de sus depredadores (Highsmith et al., 1983; Hernández-Ballesteros et al., 2013).

En relación con la comparación en el volumen erosionado por morfología de los corales, en el morfotipo columnar se determinó el mayor volumen erosionado ($3.68 \pm 2.44 \text{ cm}^{-3}$), seguido del morfotipo masivo ($3.56 \pm 4.95 \text{ cm}^{-3}$). Cosain-Díaz et al., (2021) reportaron que el volumen de bioerosión fue mayor en colonias masivas comparado con otras morfologías ($64.02 \pm 31.66 \text{ cm}^{-3}$). La tasa de bioerosión y de calcificación varía con relación a las estrategias de crecimiento y morfotipos (Hernández-Ballesteros et al., 2013 ; Tortolero-Langarica et al., 2016). Los morfotipos masivo, incrustante, columnar, y de vida libre, por sí mismos, tienen diferencias estructurales que ayudan a evitar la erosión, las colonias incrustantes están pegadas al sustrato de forma casi aplanada, cubriendo su parte basal, dando menos sustrato a los erosionadores, a diferencias de especies masiva o columnares que cuentan con un mayor desarrollo y pueden tener más superficie basal expuesta, además de que tienen una mayor densidad comparado con los demás morfotipos (Cosain-Díaz et al., 2021; Tortolero-Langarica et al., 2016). Por otro lado, las especies que forman colonias de vida libre (*Porites lobata*), dejan expuesto diferentes partes de su esqueleto conforme son arrastrados con la corriente de agua, dando menor tiempo a los erosionadores de asentarse, como esponjas o poliquetos, pero permitiéndoles la colonización por diversas vías (Cosain-Díaz et al., 2021).

4.1.3 Porcentaje de endo-bioerosión

El Pacífico Sur presentó el menor porcentaje erosionado, con un 3.88 ± 4.04 % de erosión, seguido del Golfo de California con 5.34 ± 3.35 % y la subregión del Pacífico central con 6.98 ± 6.41 % de carbonato removido. No hubo diferencias significativas en el porcentaje de bioerosión entre regiones. El porcentaje reportado en este trabajo es bajo, en comparación con otros estudios, Cosain-Díaz et al. (2021) reportan un porcentaje erosionado del 20.86 ± 18.96 % en el centro del Pacífico mexicano, siendo que al igual que en el volumen erosionado, las diferencias en el porcentaje de erosión entre localidades y regiones pudo deberse a diferencias en número de muestras y método utilizado. Sammarco y Risk, (1990), determinaron el porcentaje erosionado en varios arrecifes en la zona central de la gran barrera de coral, reportando hasta 12.81 ± 14.35 % de erosión causada por bivalvos, esponjas y gusanos (poliquetos y sipunculidos), encontrando que la bioerosión interna decrece significativamente conforme aumenta la distancia a la costa, debido a la entrada de nutrientes de la zona costera. Aunque en el presente estudio no se tomó como factor la distancia de la costa a los sitios estudiados, podría ser un factor determinante por investigar. Los resultados obtenidos son en porcentaje parecidos a lo determinado en el Atlántico mexicano por Hernández Ballesteros et al., (2013), donde obtuvieron un porcentaje de bioerosión en *Montastraea annularis* y *Porites atreoides* de 2.7% y 5.58% respectivamente, en dicho artículo se utilizó el mismo método para medir la endo-bioerosión.

En cuanto a las especies, el porcentaje erosionado fue mayor para *Porites lobata* 6.72 ± 7.18 %, similar a lo encontrado por Cosain-Díaz et al. (2021) donde *P. lobata* también contó con los mayores porcentajes de erosión en el Pacífico Central (16.87 ± 16.31 %), siendo principalmente erosionada por el molusco *Lithophaga* (los cuales fueron los principales endo-erosionadores), sin embargo *P. lobata* tiene la habilidad de modificar su forma de crecimiento, lo cual le ayuda a mantenerse en el arrecife (Tortolero-Langarica et al., 2016). En cuanto a la comparación por al morfotipo, el tipo columnar presentaron un mayor promedio de porcentaje de bioerosión (44.11 ± 13.30 %), como ya se mencionó las colonias columnares cuentan con un crecimiento vertical y pueden tener más superficie basal expuesta, lo cual aumenta la probabilidad de ser erosionados.

4.2 Endo-bioerosión por localidades

4.2.1 Tasa de endo-bioerosión

A nivel de localidades, Zihuatanejo presentó la menor tasa de endo-bioerosión ($0.7 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), seguido de La Paz ($4.19 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), mostrando diferencias significativas con las demás localidades. Las bajas tasas de endo-bioerosión en Zihuatanejo podrían ser explicadas por la poca cantidad de muestras de esta localidad. La zona arrecifal de Ixtapa-Zihuatanejo tiene las condiciones más estables en TSM (Morales et al., 2008) y en saturación de aragonita (Reyes-Bonilla et al., 2014) que en otras localidades influenciadas por surgencias estacionales (Medellín-Maldonado., 2016). Lo anterior ayuda al continuo crecimiento la cobertura de corales, ya que ésta se ha mantenido de entre 24 a 35% en Playa Manzanillo y en la Isla Ixtapa (Carballo et al., 2012). A pesar de esto en Zihuatanejo se han registrado menores tasas de clasificación, comparándola con las demás localidades, siendo corales no muy densos (Medellín-Maldonado et al., 2016), lo cual podría ayudar que el coral no sea de gran interés para los endo-bioerosionadores, asimismo, se han reportado bajas tasas de erosión ocasionadas por el erizo *Diadema mexicanum* en esta localidad (entre 0.10 and $0.30 \text{ kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$). Por otro lado, aunque en La Paz se ha reportado que es un área de nitrificación (lo que podría ayudar al aumento de erosión), la tasa de endo-bioerosión es baja, y se ha reportado una tasa de calcificación de $1.12 \pm 0.38 \text{ g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Cabral-Tena, 2014), por lo que la endo-bioerosión es mínima comparada con el crecimiento. La variación entre localidades también puede deberse a la composición de especies de cada sitio, pues en La Paz solo se midieron colonias de *Porites panamensis*, y en Zihuatanejo solo tres especies, aunque en menor cantidad de colonias. Por lo que, es necesario incrementar el esfuerzo de muestreo en estas áreas en particular con fin de corroborar la información de este estudio.

La localidad con la mayor tasa de endo-bioerosión fue Bahía de Concepción ($17.00 \pm 13.76 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), aunque no mostró diferencias significativas con las demás localidades. Bahía de Concepción está localizada en un área de surgencia, la cual es una gran fuente de nutrientes y bajas temperaturas (Cabral-Tena, 2014), lo que pudo haber incentivado la erosión, ya que se ha descrito que la bioerosión puede ser mayormente afectada en zonas costeras donde se presente una mayor concentración de nutrientes (DeCarlo et al., 2015; Press y Highsmith, 1980). Por otro lado, aunque Bahía de los Ángeles muestra los más altos niveles de estrés por altos nutrientes y baja temperatura, no presentó altas tasas de endo-bioerosión, siendo que *P. panamensis* en esta localidad, está bien adaptada a cambios anuales de extremos de temperatura y transparencia del agua (Reyes-bonilla et al., 2007). BLA ya se ha reportado como un

entorno inestable con alto contenido de nutrientes (Halfar et al., 2005), y la contribución de *P. panamensis* a la producción de carbonatos es pequeña, dado que moluscos, briozoos y percebes contribuyen la mayoría del sedimento carbonatado en la localidad (Halfar et al., 2005). Todas las localidades de estudio de este trabajo se encontraron en la zona de estrés por nutrientes mostrando valores intermedios de tasas de endo-bioerosión (Figura 27), lo cual no se vio directamente relacionado a los niveles de erosión en cada una de las localidades.

4.2.2 Volumen y porcentaje de endo-bioerosión

Isla Cleofás presentó el mayor volumen erosionado con $8.02 \pm 6.30 \text{ cm}^3$, mostrando diferencias significativas con las demás localidades. En esta localidad la única especie medida fue *Pavona clavus*, la cual fue la especie que obtuvo el mayor volumen de erosión por especies a nivel general, lo que se podría deber a la alta densidad del género *Pavona*, así como porque es un género muy longevo y tiende a ser más bioerosionado al crecer más. Los corales polimorfos como *Pavona gigantea* y *Porites lobata*, utilizan como estrategia sus diversos morfotipos para protegerse de bioerosionadores (Norzagaray López, 2010; Tortolero-Langarica et al., 2016).

De igual forma, Isla María Cleofás presentó el mayor porcentaje erosionado con $3.93 \pm 2.46 \%$, aunque no mostró diferencias estadísticas con las demás localidades, así como Zihuatanejo que obtuvo el menor porcentaje erosionado ($0.21 \pm 0.43\%$). En general el porcentaje de erosión determinado en las localidades es menor a lo que se ha registrado en otros estudios del PM, Norzagaray-López et al., (2010) determinó un 13.9% de erosión en las Islas Marietas, y un 15.5% en Cabo Pulmo, aunque en estos estudios no se determinaron los organismos causantes, y obtuvieron un pequeño número de lajas. El porcentaje erosionado fue mayor en la especie *Pavona clavus*, al igual que en el volumen.

4.3 Endo-bioerosionadores

Los bivalvos fueron los principales endo-bioerosionadores, causantes de la mayor tasa de endo-bioerosión ($4.59 \pm 7.12 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y el mayor volumen bioerosionado ($2.33 \pm 3.62 \text{ cm}^3$), para la mayoría de las localidades, excepto en Huatulco en *Pavona varians* y en Zihuatanejo en *Pavona gigantea*. Wizemann

et al., (2018) en Costa Rica, determinó que el macro-bioerosionador principal es el bivalvo *Lithophagine*, así como (Fonseca- Escalante, 1999) determinó que los bivalvos de la familia *Mytillidae* causan la mayor bioerosión, por su abundancia y volumen, por lo que estos organismos son importantes bioerosionadores en el POT. En el Pacífico, el bivalvo *Lithophaga* presenta una gran abundancia, con 100 individuos por 0.01 m² de superficie de coral, en especial la especie *Porites lobata* está fuertemente infestada por estos organismos (Scott y Risk, 1988). La biomasa de *Lithophaga* está correlacionada con una alta productividad primaria (Highsmith et al., 1983), ya que los bivalvos se asocian constantemente con grandes concentraciones de nutrientes, lo puede estar relacionado a su dominancia en la tasa de endo-bioerosión (este estudio), ya que las localidades presentaron un alto nivel de nutrientes. La bioerosión por bivalvos puede debilitar la estructura las colonias y hacer que se desprendan fácilmente del sustrato (Highsmith, 1980; Sammargo y Risk, 1990), ya que un alto nivel de bioerosión, daña a las comunidades coralinas los hacen más susceptible a dañarse en tormentas y ciclones.

Antuna (2019) determinó la contribución de bioerosión a nivel de grupo erosivo en la zona del Pacífico central mexicano. Donde el 54.04 % de la erosión se atribuyó a las esponjas, el 33.80 % a los moluscos, y el 0.28 % a los poliquetos. En el presente estudio la bioerosión por esponjas estuvo presente en todas las localidades, con un promedio de 1.93 mg CaCO₃ cm⁻² año⁻¹, siendo menor tasa de lo erosionado por moluscos, en la mayoría de las localidades, lo cual rechaza nuestra hipótesis inicial, donde las esponjas serían los principales erosionadores en especies de coral masivo. Las esponjas fueron los principales endo-bioerosionadores en *Pavona varians* en la localidad de Huatulco y en *Pavona gigantea* en Zihuatanejo. La poca incidencia por esponjas en las demás localidades fue inesperada, ya que se ha reportado una fuerte bioerosión por esponjas perforadoras en sustratos coralinos alrededor del mundo (Davies y Hutchings, 1983; Nava y Carballo, 2008; Glynn, 1997). Carballo et al., (2012) sugieren que la erosión de los arrecifes de coral en el Pacífico mexicano está dominada principalmente por esponjas perforadoras, las cuales abundan y ayudan a la creación del sedimento (Carballo et al., 2004; Nava y Carballo, 2008). Pero las esponjas dañan mayormente a especies de coral ramificadas como *Pocillopora*, teniendo tasas medias de bioerosión de 4.5 ± 0.9 y 5.1 ± 0.5 kg CaCO₃ m⁻² año⁻¹ (Nava y Carballo, 2008), siendo mayor a lo reportado para especies masivas. Por otro lado, la composición de la comunidad de endo-bioerosionadores cambia a través de los arrecifes (Sammargo y Risk, 1990), factores como la calidad y el movimiento del agua, así como el suministro de larvas, juegan un papel importante en la abundancia de esponjas perforadoras, así como de otros organismos erosionadores, los cuales van cambiando en abundancia a través del tiempo, debido a variaciones estacionales propias de cada lugar (Pari et al., 2002).

La erosión por poliquetos fue muy baja (o ausente) en las localidades estudiadas, en promedio, la tasa de endo-bioerosión fue de $0.22 \text{ mg CaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, el volumen de $0.12 \pm 0.36 \text{ cm}^3$ y el porcentaje erosionado de $0.16 \pm 0.31\%$. Antuna (2019) determinó, en el Pacífico central, un volumen erosionado de 0.83 cm^3 (1.3%) por poliquetos, siendo también mucho menor a lo erosionado por esponjas y moluscos. Además, Antuna (2019) determinó que *Porites panamensis* (0.75%) fue más erosionado por poliquetos en comparación con las otras especies de coral (0.27%). En Zihuatanejo, los poliquetos, estuvieron ausentes en las colonias analizadas, aunque se han reportado numerosas especies de poliquetos para esta región (Hernandez-Flores, 1985). En el Norte de la Gran Barrera de Coral, Davies y Hutchings, (1983) determinaron que los poliquetos son bioerosionadores dominantes, casi exclusivos, con tasas de erosión de $0.694 - 1.788 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Los poliquetos son los macro perforadores no coloniales más abundantes, en el Caribe, el Atlántico noroeste y la Gran Barrera australiana (Fonseca-Escalante, 1999; Hein et al., 1975; Hutchings, 1986), pero las comunidades pioneras de erosionadores van cambiando según el entorno (Davies y Hutchings, 1983), ya que se ha reportado variación estacional de los mismos (Pari et al., 2002).

4.4 Relación de la densidad con la endo-bioerosión

La densidad del esqueleto coralino es un parámetro importante del crecimiento de corales (Lough y Cooper, 2011). Se ha reportado que los macro-bioerosionadores mayormente habitan en especies de coral con esqueletos de alta densidad, debido a que los corales más densos proporcionan protección de los depredadores más efectiva a los organismos que viven dentro del coral (Highsmith et al., 1983; Hernández-Ballesteros et al., 2013). Sin embargo, el volumen de CaCO_3 removido, ni la tasa de endo-bioerosión, en general, presentaron una correlación con la densidad de los corales. No obstante, cuando se realizó el análisis a nivel de especies, en *Pavona gigantea* y *Porites panamensis*, el volumen erosionado se relacionó de manera lineal con la densidad del esqueleto (Figura 25). En el caso de *Pavona gigantea*, a mayor densidad del coral más volumen de endo-bioerosión presenta, lo cual se ha observado anteriormente, Cosain-Díaz et al., (2021), determinaron una relación positiva del volumen de endo-bioerosión con la densidad esquelética en especies masivas, así como Hernández-Ballesteros et al., (2013), observó que el porcentaje de bioerosión total se relaciona positivamente con la densidad del esqueleto igual a lo reportado previamente por Highsmith, (1981) y Highsmith et al., (1983).

Por grupo erosionador, la endo-bioerosión por moluscos presentó una correlación positiva con la densidad, en las especies *Porites panamensis*, *Pavona gigantea* y *Porites lobata* (figura 26), Highsmith

(1981) determinó que el número promedio de bivalvos perforadores en los corales del Caribe incrementa con el aumento de la densidad esquelética, proponiendo que los organismos erosionadores dependen de la protección del sustrato que penetran, por lo cual buscan mayor protección. En cambio, la endo-bioerosión por esponjas y poliquetos, no presentó una relación directa con la densidad del esqueleto de los corales. Hernández-Ballesteros et al., (2013) determinaron una relación positiva en el porcentaje erosionado por esponjas y la densidad del esqueleto coralino, en las especies *P. astreoides* y *O. annularis*, donde las esponjas fueron el principal erosionador y la erosión por moluscos y poliquetos fue mínima. Estas diferencias podrían deberse a las diferentes especies y localidades estudiadas, las cuales tienen una distinta dinámica ambiental.

Un incremento en la endo-bioerosión en comunidades cerca de la costa, podría incrementar la fragmentación de los corales y acelerar la degradación de la estructura arrecifal, por lo que es recomendable hacer más estudios de endo-bioerosión en el PM con un mayor esfuerzo de muestreo, es decir, aumentar el número de colonias estudiadas y/o experimentos con placas de *Porites*, en experimentos a largo plazo para obtener una mejor comprensión de las tasas de bioerosión y disolución (Pari et al., 2002). Así como, determinar adecuadamente todos los organismos endo-bioerosionadores involucrados, así como sus sucesiones temporales. Finalmente, es importante notar que este estudio es una estimación general de la endo-bioerosión y, por lo tanto, falta tomar en cuenta la bioerosión externa, para determinar la bioerosión total en cada localidad.

Capítulo 5. Conclusiones

Las tasas de bioerosión en los sistemas arrecifales no necesariamente indican un cambio físico y químico en el ambiente, pero la susceptibilidad a factores extrínsecos e intrínsecos de forma combinada. Por tanto, la estimación de la bioerosión puede ser una herramienta valiosa para evaluar las condiciones de una comunidad arrecifal, ya que tiene el potencial de describir parte de la pérdida de carbono en estos ecosistemas. Otros factores como la densidad, morfotipo, especie, localidad influyen en la tasa y porcentaje de volumen erosionado en corales masivos:

- Las colonias con morfotipo masivo y columnar presentan el mayor volumen de endo-bioerosión.
- En las especies *Pavona gigantea* y *Porites panamensis* a mayor densidad del esqueleto, se presenta un mayor volumen de endo-bioerosión. Así como en las especies *Porites panamensis*, *Pavona gigantea* y *Porites lobata*, a mayor densidad del esqueleto presentan una mayor tasa de endo-bioerosión causada por moluscos.
- En cuanto a erosionadores, los moluscos bivalvos causan la mayor tasa, volumen y porcentaje de endo-bioerosión, en los corales masivos en el Pacífico Mexicano.
- En todas las localidades presentaron altos niveles de nutrientes, a pesar de esto se obtuvieron bajas tasas de endo-bioerosión. Aun así, está endo-bioerosión puede incrementar en un futuro, debido a efectos de la acidificación del océano, al generar un aumento en los organismos bioerosionadores, aunado a las bajas tasas de calcificación poniendo en riesgo la estructura física de las comunidades arrecifales.

Literatura citada

- Allemand, D., Éric, T., Zoccola, D. y Tambutté, S. 2011. Coral calcification, cell to reefs. Z. Dubinsky y N. Stambler (Eds.), *Coral Reefs: An ecosystem in transition*. Springer, Dordrecht, pp. 1–552 . doi:10.1007/978-94-007-0114-4
- Allemand, D., Ferrier-Pagès, C., Furla, P., Houlbrèque, F., Puverel, S., Reynaud, S., Tambutté, É., Tambutté, S. y Zoccola, D. 2004. Biomineralisation in reef-building corals: From molecular mechanisms to environmental control. *Comptes Rendus - Palevol*, 3(6-7 SPEC.ISS.), pp. 453–467. doi:10.1016/j.crvp.2004.07.011
- Antuna Roman, D. 2019. Tasa de bioerosión endolítica de tres especies de coral masivo *Porites lobata*, *Porites panamensis* y *Pavona gigantea* en dos áreas insulares de Nayarit. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Bahía de Banderas, pp. 1–61 .
- Cabral-Tena, R. A. 2014. Evaluación de la influencia de la acidificación del mar sobre los arrecifes del pacífico mexicano a partir del análisis retrospectivo del crecimiento de *Porites* (Scleractinea poritidae), utilizando isótopos estables (O18, C13 y N15). (Número 02) . Tesis de doctorado. Cibnor . pp. 147 . <http://www.citeulike.org/user/LNCScatalogo/article/10716051>
- Calderón-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H. y Carriquiry, J. D. 2007. El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: Estudios en el Pacífico mexicano. *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. SEMARNAT/INE, CICESE, México, pp. 215–226 .
- Carballo, J. L., Cruz-Barraza, J. A., Bautista-Guerrero, E., Nava, H. y Chávez, J. A. 2012. Efecto de la bioerosión por esponjas en arrecifes afectados por el cambio climático. En simposio iberoamericano de biodiversidad marina y cambio climático red CYTED BIODIVMAR: 410RT0396, pp. 40–53.
- Carballo, J. L., Cruz-Barraza, J. A. y Gómez, P. 2004. Taxonomy and description of clonoid sponges (Hadromerida, Clonoidae) from the Pacific Ocean of Mexico. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 141(3), pp. 353–397. doi:10.1111/j.1096-3642.2004.00126.x
- 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), pp. 1–5. doi:10.1007/s00227-007-0780-3
- Cortés, J. 1997. Biology and geology of eastern Pacific coral reefs. *Coral Reefs*, 16(SUPPL. 1). doi:10.1007/s003380050240
- Cosain-díaz, J. A., Tortolero-langarica, J. D. J. A. y Rodríguez-, A. P. 2021. Internal bioerosion in massive corals associated with reef communities in the northeastern tropical Pacific : The effect of intrinsic and extrinsic factors. *Bioerosión interna en corales masivos asociados a las comunidades arrecifales del Pacífico mexicano*. *Ciencias Marinas*, 47(1), pp. 33–47. doi:<https://doi.org/10.7773/cm.v47i1.3047>

- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. y Van Den Belt, M. 1998. The value of ecosystem services: Putting the issues in perspective. *Ecological Economics*, 25(1), pp. 67–72. doi:10.1016/S0921-8009(98)00019-6
- Davies, P. J. y Hutchings, P. A. 1983. Initial colonization, erosion and accretion of coral substrate - Experimental results, Lizard Island, Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 2(1), pp. 27–35. doi:10.1007/BF00304729
- de Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L. C., ten Brink, P. y van Beukering, P. 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), pp. 50–61. doi:10.1016/j.ecoser.2012.07.005
- DeCarlo, T. M., Cohen, A. L., Barkley, H. C., Cobban, Q., Young, C., Shamberger, K. E., Brainard, R. E. y Golbuu, Y. 2015. Coral macrobioerosion is accelerated by ocean acidification and nutrients. *Geology*, 43(1), pp. 7–10. doi:10.1130/G36147.1
- Edinger, E. N., Limmon, G. V., Jompa, J., Widjatmokos, W., Heikoop, J. M. y Risk, M. J. 2000. Normal coral growth rates on dying reefs: Are coral growth rates good indicators of reef health? *Marine Pollution Bulletin*, 106(40), pp. 404–425. doi:DOI:10.1016/S0025-326X(99)00237-4
- Fonseca- Escalante, A. 1999. Bioerosión y bioacreción en arrecifes coralinos del Pacífico sur de Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. Universidad de Costa Rica.
- Garzon-Ferreira, J. y Reyes- Nivia, M. C. 2001. Incidencia de la depredación por peces en corales pétreos de cuatro atolones del Archipiélago De San Andres y Providencia (Caribe Colombiano). *Boletín de investigaciones marinas y costeras*, 30, pp. 133–150.
- Glynn, P.W. y Ault, J. S. 2000. Biogeografía de corales del Pacífico Oriental. *Coral Reefs*, pp. 1–23.
- Glynn, Peter W. 1997. Bioerosion and coral reef growth: A dynamic balance. Springer, pp. 69–98. doi:10.1007/978-1-4615-5995-5_4
- Glynn, Peter W. y Manzello, D. P. 2015. Bioerosion and coral reef growth: A dynamic balance. *Coral Reefs in the Anthropocene*. Springer Netherlands, pp. 67–97 . doi:10.1007/978-94-017-7249-5_4
- Glynn, Peter W, Manzello, D. P. y Enochs, I. C. 2017. Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific. Persistence and Loss in a Dynamic Environment. *Coral Reefs*. Vol. 15. Número 2 . <http://link.springer.com/10.1007/BF01771896>
- Guinotte, J. M., Buddemeier, R. W. y Kleypas, J. A. 2003. Future coral reef habitat marginality: Temporal and spatial effects of climate change in the Pacific basin. *Coral Reefs*, 22(4), pp. 551–558. doi:10.1007/s00338-003-0331-4

- Guzmán, H. M. y Cortés, J. 1989. Growth rates of eight species of scleractinian corals in the eastern Pacific (Cost Rica). *Bulletin of Marine Science*, 44(3), pp. 1186–1194.
- Halfar, J., Godinez-Orta, L., Riegl, B., Valdez-Holguin, J. E. y Borges, J. M. 2005. Living on the edge: High-latitude *Porites* carbonate production under temperate eutrophic conditions. *Coral Reefs*, 24(4), pp. 582–592. doi:10.1007/s00338-005-0029-x
- Hallock, P. 2001. *Coral Reefs, Carbonate Sediments, Nutrients, and Global Change*. K. George D. Stanley Jr. (Ed.), *The History and Sedimentology of Ancient Reef Systems*. Academic/Plenum Publishers, pp. 387–427. doi:10.1007/978-1-4615-1219-6_11
- Hein, F. J., Regulator, A. E. y Risk, M. J. 1975. Bioerosion of coral heads: Inner patch reefs, Florida Reef tract. *Bulletin of Marine Science*, 21(1), pp. 133–138.
- Hernández-Ballesteros, L. M., Elizalde-Rendón, E. M., Carballo, J. L. y Carricart-Ganivet, J. P. 2013. Sponge bioerosion on reef-building corals: Dependent on the environment or on skeletal density? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 441, pp. 23–27. doi:10.1016/j.jembe.2013.01.016
- Hernandez-Flores, J. M. 1985. Poliquetos benticos de la zona rocosa de Ixtapa-Zihutanejo, Gro. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 79.
- Herrera-Escalante, T., López-Pérez, R. A. y Leyte-Morales, G. E. 2005. Bioerosion caused by the sea urchin *Diadema Mexicanum* (Echinodermata: Echinoidea) at Bahías de Huatulco, Western Mexico. *Revista de biología tropical*, 53 Suppl 3, pp. 263–273. doi:10.15517/rbt.v53i3.26784
- Highsmith, R. C. 1981a. Notes and comments. Coral bioerosion: Damage relative to skeletal density. *The American Naturalist*, 117(2), pp. 193–198. doi:10.7459/ept/40.2.01
- Highsmith, R. C. 1981b. Coral bioerosion: Damage relative to skeletal density. *The American Naturalist*, University of Chicago Press, 117(2), pp. 193–198. doi:10.1086/283698
- Highsmith, R. C., Lueptow, R. L. y Schonberg, S. C. 1983. Growth and bioerosion of three massive corals on the Belize barrier reef. *Marine Ecology Progress Series*, 13, pp. 261–271.
- Hutchings, P. A. 1986. Biological destruction of coral reefs - A review. *Coral Reefs*. Vol. 4. Número 4. pp. 239–252. doi:10.1007/BF00298083
- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Arher, D., Cattuso, J.-P., Langdor, C. y Opdyke, B. N. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284(April), pp. 118–120.
- Kuffner, I. B. y Toth, L. T. 2016. A geological perspective on the degradation and conservation of western Atlantic coral reefs. *Conservation biology: the journal of the Society for Conservation Biology*, 30(4), pp. 706–715. doi:10.1111/cobi.12725

- Lajeunesse, T. C., Parkinson, J. E., Gabrielson, P. W., Jeong, H. J., Reimer, J. D., Voolstra, C. R. y Santos, S. R. 2018. Systematic revision of symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Current Biology*, Elsevier Ltd., 28(16), pp. 2570-2580.e6. doi:10.1016/j.cub.2018.07.008
- Londoño-Cruz, E., Cantera, J. R., Toro-Farmer, G. y Orozco, C. 2003. Internal bioerosion by macroborers in *Pocillopora spp.* in the tropical eastern Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 265, pp. 289–295. doi:10.3354/meps265289
- Lough, J. M. y Cooper, T. F. 2011. New insights from coral growth band studies in an era of rapid environmental change. *Earth-Science Reviews*, Elsevier B.V., 108(3–4), pp. 170–184. doi:10.1016/j.earscirev.2011.07.001
- Manzello, D. P. 2010. Coral growth with thermal stress and ocean acidification: Lessons from the eastern tropical Pacific. *Coral Reefs*, 29(3), pp. 749–758. doi:10.1007/s00338-010-0623-4
- Manzello, Derek P., Enochs, I. C., Bruckner, A., Renaud, P. G., Kolodziej, G., Budd, D. A., Carlton, R. y Glynn, P. W. 2014. Galápagos coral reef persistence after ENSO warming across an acidification gradient. *Geophysical Research Letters*, 41(24), pp. 9001–9008. doi:10.1002/2014GL062501
- Medellín-Maldonado, F., Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Chapa-Balcorta, C. y Zepeta-Vilchis, R. C. 2016. Calcification of the main reef-building coral species on the Pacific coast of southern Mexico. *Ciencias Marinas*, 42(3), pp. 209–225. doi:10.7773/cm.v42i3.2650
- Medina-Rosas, P. 2015. Estado actual de los estudios y conocimientos sobre corales arrecifales del Pacífico mexicano. L. Cifuentes-Lemus, J. Cupul-Magaña, y F. Germán (Eds.), *Temas sobre investigaciones costeras*. Universidad de Guadalajara, Número October 2014. pp. 82–98 .
- Moberg, F. y Folke, C. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), pp. 215–233. doi:10.1016/S0921-8009(99)00009-9
- Nava, H. y Carballo, J. L. 2008. Chemical and mechanical bioerosion of boring sponges from Mexican Pacific coral reefs. *Journal of Experimental Biology*, 211(17), pp. 2827–2831. doi:10.1242/jeb.019216
- Neumann, A. C. 1966. Observations on coastal erosion in Bermuda and measurements of the boring rate of the sponge, *Cliona Lampa*. *Limnology and Oceanography*, 11(1), pp. 92–108. doi:10.4319/lo.1966.11.1.0092
- Norzagaray-López, O., Ávila-López, M. del C., Chapa-Balcorta, C., Calderón-Aguilera, L. y Hernández-Ayón, M. 2013. Reducida producción de CaCO₃ por *Porites panamensis* en tres comunidades arrecifales del Pacífico mexicano. F. P. Pellat, J. W. Gonzáles, M. Bazan, y V. Saynes (Eds.), *Estado actual del conocimiento del ciclo de carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013*. pp. 437–441 .
- Norzagaray López, C. O. 2010. Producción potencial de carbonato de calcio por *Porites panamensis* en dos comunidades arrecifales del Pácifico mexicano. Tesis de maestría. CICESE, pp. 100 .

- Pari, N., Peyrot-Clausade, M. y Hutchings, P. A. 2002. Bioerosion of experimental substrates on high islands and atoll lagoons (French Polynesia) during 5 years of exposure. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 276(1–2), pp. 109–127. doi:10.1016/S0022-0981(02)00243-5
- Perry, C. T., Edinger, E. N., Kench, P. S., Murphy, G. N., Smithers, S. G., Steneck, R. S. y Mumby, P. J. 2012. Estimating rates of biologically driven coral reef framework production and erosion: A new census-based carbonate budget methodology and applications to the reefs of Bonaire. *Coral Reefs*, 31(3), pp. 853–868. doi:10.1007/s00338-012-0901-4
- Perry, C. T., Spencer, T. y Kench, P. S. 2008. Carbonate budgets and reef production states: A geomorphic perspective on the ecological phase-shift concept. *Coral Reefs*, 27(4), pp. 853–866. doi:10.1007/s00338-008-0418-z
- Perry, Chris T. y Alvarez-Filip, L. 2019. Changing geo-ecological functions of coral reefs in the Anthropocene. N. Graham (Ed.), *Functional Ecology*. Blackwell Publishing Ltd, Vol. 33. Número 6. pp. 976–988 . doi:10.1111/1365-2435.13247
- Press, N. B. y Highsmith, C. 1980. Geographic patterns of coral bioerosion: a productivity hypothesis. *Elsevier*, 46(1973), pp. 177–196. doi:https://doi.org/10.1016/0022-0981(80)90030-1
- Reaka-Kudla, M. L., Feingold, J. S. y Glynn, W. 1996. Experimental studies of rapid bioerosion of coral reefs in the Galápagos Islands. *Coral Reefs*, 15(2), pp. 101–107. doi:10.1007/BF01771898
- Reyes-bonilla, H. y González-romero, S. 2007. Corales pétreos. G. Danemann y E. Ezcurra (Eds.), *Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad*. Línea base, pp. 291–318 .
- Reyes-Bonilla, Héctor. 2003. Coral reefs of the Pacific coast of México. *Latin American Coral Reefs*, pp. 331–349. doi:10.1016/B978-044451388-5/50015-1
- Reyes-Bonilla, Hector y Calderon-Aguilera, L. 1999. Population density, distribution and consumption rates of three corallivores at Cabo Pulmo Reef, Gulf of California, Mexico. *Marine Ecology*, 20(3–4), pp. 347–357. doi:10.1046/j.1439-0485.1999.2034080.x
- Reyes-Bonilla, Héctor, Calderón-Aguilera, L. E., Mozqueda-Torres, M. C. y Carriquiry, J. D. 2014. Presupuesto de carbono de arrecifes coralinos de México. *Interciencia*, 39, pp. 645–650.
- Rodríguez-Troncoso, A. P. y Tortolero-Langarica, J. de J. A. 2014. Corales: organismos base constructores de los ecosistemas arrecifales. J. L. Cifuentes Lemus y F. G. Cupul-Magaña (Eds.), *Temas sobre investigaciones costeras*. Universidad de Guadalajara, p. 326 .
- Rützler, K. 1975. The role of burrowing sponges in bioerosion. *Oecologia (Berl.)*, 19(j), pp. 203–224.
- Salm, R. V., Clark, J. y Siirila, E. 2000. *Marine and coastal protected areas: A guide for planners and managers*. IUCN. Washington DC.

- Sammarco, P. y Risk, M. 1990. Large-scale patterns in internal bioerosion of *Porites*: cross continental shelf trends on the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 59(1986), pp. 145–156. doi:10.3354/meps059145
- Scott, P. J. B. y Risk, M. J. 1988. The effect of *Lithophaga* (*Bivalvia*: *Mytilidae*) boreholes on the strength of the coral *Porites lobata*. *Coral Reefs*, 7(3), pp. 145–151. doi:10.1007/BF00300974
- Sheppard, C., Davy, S., Pilling, G. y Graham, N. 2017. The biology of coral reefs. Oxford University Press. Número 9. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Steneck, R. S. 1983. Escalating herbivory and resulting adaptive trends in calcareous algal crusts. *Paleobiology*, 1(1), pp. 44–61. doi:10.1017/S0094837300007375
- Tortolero-Langarica, J. de J. A., Cupul-Magaña, A. L., Carricart-Ganivet, J. P., Mayfield, A. B. y 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). doi:10.3389/fmars.2016.00179
- Tribollet, A. y Golubic, S. 2005. Cross-shelf differences in the pattern and pace of bioerosion of experimental carbonate substrates exposed for 3 years on the northern Great Barrier Reef, Australia. *Coral Reefs*, 24(3), pp. 422–434. doi:10.1007/s00338-005-0003-7
- Tribollet, Aline y Golubic, S. 2011. Coral reefs: Agents and processes. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, pp. 1–552. doi:10.1007/978-94-007-0114-4
- Van Hooidonk, R., Maynard, J. A., Manzello, D. y Planes, S. 2014. Opposite latitudinal gradients in projected ocean acidification and bleaching impacts on coral reefs. *Global Change Biology*, 20(1), pp. 103–112. doi:10.1111/gcb.12394
- Wild, C., Hoegh-Guldberg, O., Naumann, M. S., Colombo-Pallotta, M. F., Atweberhan, M., Fitt, W. K., Iglesias-Prieto, R., Palmer, C., Bythell, J. C., Ortiz, J. C., Loya, Y. y Van Woesik, R. 2011. Climate change impedes scleractinian corals as primary reef ecosystem engineers. *Marine and Freshwater Research*, 62(2), pp. 205–215. doi:10.1071/MF10254
- Wizemann, A., Nandini, S. D., Stuhldreier, I., Sánchez-Noguera, C., Wisshak, M., Westphal, H., Rixen, T., Wild, C. y Reymond, C. E. 2018. Rapid bioerosion in a tropical upwelling coral reef. *PLOS ONE*, 13(9), pp. 1–22. doi:10.1371/journal.pone.0202887
- Zundevich, A., Lazar, B. y Ilan, M. 2007. Chemical versus mechanical bioerosion of coral reefs by boring sponges - Lessons from *Pione cf. vastifica*. *Journal of Experimental Biology*, 210(1), pp. 91–96. doi:10.1242/jeb.02627