

TESIS DEFENDIDA POR  
**Carlos Orión Norzagaray López**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera  
*Director del Comité*

---

M. C. Vicente Ferreira Bartrina  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Juan Manuel López Mariscal  
*Miembro del Comité*

---

Dr. José Martín Hernández Ayón  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Axayácatl Rocha Olivares  
*Coordinador del programa de posgrado en  
Ecología Marina*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

12 de marzo de 2010

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ECOLOGÍA MARINA**

---

**PRODUCCIÓN POTENCIAL DE CARBONATO DE CALCIO POR *Porites*  
*panamensis* EN DOS COMUNIDADES ARRECIFALES DEL PACÍFICO  
MEXICANO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

**CARLOS ORIÓN NORZAGARAY LÓPEZ**

Ensenada, Baja California, México, Marzo de 2010.

**RESUMEN** de la tesis de **Carlos Orión Norzagaray López**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Ecología Marina. Ensenada, Baja California. Marzo 2010.

**PRODUCCIÓN POTENCIAL DE CARBONATO DE CALCIO POR *Porites panamensis* EN DOS COMUNIDADES ARRECIFALES DEL PACÍFICO MEXICANO**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera  
Director de Tesis

Se evaluó la producción potencial (Pn) de  $\text{CaCO}_3$  por *Porites panamensis* en dos comunidades arrecifales del Pacífico mexicano, a partir de muestreos biológicos y cálculo de parámetros de crecimiento esquelético. La Pn promedio fue  $0.21\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$  y  $0.16\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ , para Cabo Pulmo (CP), BCS e Islas Marietas (IM), Nay., respectivamente. La densidad esquelética promedio (+DT, en todos los casos) fue diferente entre ambas localidades (CP= $1.35\pm 0.09\text{ gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ , IM= $1.20\pm 0.07\text{ gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $p<0.01$ ), así como también la extensión esquelética promedio (CP= $0.92\pm 0.33\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ , IM= $0.37\pm 0.13\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ,  $p<0.01$ ). En noviembre de 2008 la cobertura de coral vivo de esta especie en CP varió entre 0-5.8% ( $1.68\pm 1.89\%$ ) y en IM en marzo de 2009 entre 0-12% ( $3.72\pm 3.69\%$ ). Se han reportado varios morfotipos para esta especie en el Pacífico mexicano, una forma masiva caracterizada por mayor crecimiento vertical en el Golfo de California y otra forma incrustante plana en la región del sur (costas de Nayarit). Las diferencias en parámetros de crecimiento encontradas dependen de la morfología colonial, la cual puede deberse a distintas condiciones ambientales y adaptaciones biológicas. Los cambios en la tasa de calcificación de esta especie pueden ser útiles como indicadores de cambios climáticos ya que tiene una amplia distribución en el Pacífico mexicano.

**Palabras Clave:** Producción potencial de carbonato, crecimiento esquelético, *Porites panamensis*, Pacífico mexicano

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Carlos Orión Norzagaray López** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Marine Ecology. Ensenada, Baja California, México. March 2010.

**POTENTIAL PRODUCTION OF CALCIUM CARBONATE BY *Porites panamensis* IN TWO MEXICAN PACIFIC REEF COMMUNITIES**

We evaluated the potential production (Pn) of CaCO<sub>3</sub> by *Porites panamensis* in two reef communities of the Mexican Pacific from coral cover transects and skeletal growth parameters. The average Pn was 0.21kg·m<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup> in Cabo Pulmo (CP), BCS and 0.16kg·m<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup>, and Islas Marietas (IM) Nay. The average skeletal density ( $\pm$ SD) was different between the two locations (CP= 1.35 $\pm$ 0.09 gCaCO<sub>3</sub>·cm<sup>-3</sup>, IM= 1.20 $\pm$ 0.07 gCaCO<sub>3</sub>·cm<sup>-3</sup>, p <0.01), as well as the average skeletal extension (CP= 0.92 $\pm$ 0.33 cm·year<sup>-1</sup>, IM= 0.37 $\pm$ 0.13cm·year<sup>-1</sup>, p <0.01). In November 2008, the coral cover of this species in CP ranged between 0-5.8% (1.68  $\pm$ 1.89%) and IM in March 2009 from 0-12% (3.72  $\pm$ 3.69%). Several morphotypes for this species has been reported in the Mexican Pacific, a massive form characterized by high vertical growth in the Gulf of California and a flat encrusting form in the southern region (coast of Nayarit). The differences in growth parameters depend on the colonial morphology, which may be due to different environmental conditions and biological adaptations. Changes in calcification rate of this species could be useful as an indicator of global change since this species is widely distributed along the Pacific.

**Keywords:** Potential carbonate production, coral growth rate, *Porites panamensis*, mexican Pacific

## DEDICATORIAS

A mis *padres*, quienes siempre me apoyaron con gran amor y dedicación, inculcándome las ganas de superarme y hacer más. Gracias por darme todo el apoyo para iniciar y finalizar este proyecto en mi vida *¡Muchísimas gracias jefes!*

A *Miguel*, por tu apoyo incondicional y el gran esfuerzo para que saliera adelante en este y muchos otros retos. Gracias por tu amistad, por las visitas refrescantes, por el apoyo cuando lo ocupé y por la ayuda genial con la tesis, *¡NQN!*

A *Marcela*, por tu amistad en los momentos grises y por tus palabras de aliento siempre presentes (sin tus porras nunca hubiese terminado). Gracias por tu compañía y dedicación, siempre estuviste aquí conmigo, ya fuera estudiando o en el mar, y *¡por hacer fiesta en tu casa cada vez que fui!*

A *Miguelin* mi hermano menor, por su apoyo moral y por estar presente, a veces como amistad y muchas otras en complicidad, *¡Gracias carnal!* A mis hermanos *JuanM* y *DavidF* por estar a mi lado, aunque fuese a distancia.

A *Lupy*, por compartir conmigo risas y tristezas, diversiones y preocupaciones, pero más que nada, por darme una visión diferente de todo. Gracias por tu apoyo y amor incondicional en esta travesía de dos años, *¡SQTA!*

## AGRADECIMIENTOS

Al *Dr. Luis Calderón*, por darme la oportunidad de trabajar juntos y por brindarme tanto apoyo durante todo mi proceso de formación, como estudiante y como persona. Por tu tiempo para escucharme, los consejos y más que todo, por la amistad.

A *CONACYT*, por la beca que me proporcionaron para llevar a cabo mis estudios de maestría.

A *Vicente Ferreira*, por su invaluable apoyo moral, intelectual, técnico, y en muchos otros aspectos durante la preparación de esta tesis. Gracias por los consejos y cuestionamientos.

A *J.P. Carricart* por su increíble apoyo y disponibilidad en mi estancia en Chetumal, que sin conocerme me abrió su casa y laboratorio, me brindó su tiempo, su experiencia y amistad. A *Aurora Beltrán* por su disponibilidad y hacer de mi estancia más amable.

A mis asesores, el *Dr. Martín Ayon* y el *Dr. Manuel Mariscal*, por su apoyo en la elaboración de este escrito.

A *Jenny* de Ecología Marina por sus constructivas opiniones sobre el escrito.

A los *coraleros* que realizaron la colecta de muestras en Islas Marietas y Cabo Pulmo. ¡Gracias por los datos y espero conocernos pronto!

A *Victor Moreno* por su apoyo en los cortes de corales y en otras actividades de laboratorio, muchas gracias.

A todos mis *profesores* por su gran aporte humano y conocimientos. En especial a *Gisela H*, por la práctica de campo y su dinamismo en clase, pero más por invitarme a ICMME.

A los recién MC's, *Salvador Tomassinny* y *Hemeterio*, por abrirme su hogar en Chetumal, pasar buenos ratos esnorqueando y buenas pláticas. Gracias, los espero por acá.

A *Fredo y familia*, por su apoyo durante mi estancia en Qroo.

A las chicas de biblioteca (*Lupita, Cecy, Edith, etc*) por su gran trabajo y momentos gratos.

A *Luis Carlos*, mi radiólogo de cabecera, que siempre me dedico su tiempo, salud y paciencia para repetir y repetir y repetir las radiografías.

A *Luis Calderón y Adriana Azcárraga*, por su apoyo en las lecturas de edad de los corales.

A *Alejandro Ruceda, Adriana A., Pablo Hernández y Mario Salinas*, por su compañía y apoyo en la colecta de muestras en Bahía de los Ángeles.

A *Pablo Hernández F* por los datos de temperaturas y las largas conversaciones sobre corales.

A *Blico, Aletx, Karla, Lupita, etc.* del CICESE que siempre estuvieron dando buenos ratos y motivos para divertirse.

Al *Sr. Motorota* por facilitarme interminables, pero intermitentes horas de internet-underground.

A *Alejandra, Raul y Denise* por su amistad y buenos momentos.

A *Lupita Gómez* por su apoyo con el trabajo de gabinete, pláticas sobre oceanología y comentarios sobre estadística. Gracias por las desveladas, amanecidas, pinteadas, escapadas, pachangas y viajecillos, ¡¡la estancia así fue más que genial!!

A *ICMME*, que me brindó muchísimas satisfacciones y experiencias.

A mis amigos *Hermosillenses, Alamenses, Ensenadenses, Chilangos* y muchos otros que se han desparramado por todo el mundo. ¡Gracias por su amistad!

A mi familia, *mis Tres queridas Emes (MMM)*, por apoyarme en todos los aspectos y estar a mi lado en las buenas, en las malas y en las peores.

Al *Océano*, por darme la oportunidad de aprender sobre la vida y su inmensidad, que antes solo imaginaba en cuentos.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
I.1. Biología y distribución de corales hermatípicos.....	1
I.2. <i>Porites panamensis</i> .....	3
I.3. Parámetros de crecimiento de corales hermatípicos.....	4
I.3.1. Densidad esquelética.....	4
I.3.2. Crecimiento en extensión anual.....	6
I.3.3. Tasa de calcificación anual.....	7
I.3.4. Factores ambientales que controlan el crecimiento en los corales.....	9
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	<b>13</b>
II.1. Producción potencial de CaCO <sub>3</sub> en arrecifes coralinos.....	13
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>IV. HIPÓTESIS</b> .....	<b>16</b>
<b>V. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
V.1. Objetivo general.....	16
V.2. Objetivos particulares.....	16
<b>VI. MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	<b>17</b>
VI.1. Área de estudio.....	17
VI.2. Trabajo de campo.....	18
VI.2.1. Colecta de muestras.....	18
VI.2.2. Evaluación de la cobertura de coral.....	19
VI.3. Densitometría óptica en radiografías.....	20
VI.3.1. Preparación de muestras y estándar de aragonita.....	20
VI.3.2. Procesado de radiografías.....	22
VI.3.3. Medición de parámetros de crecimiento.....	26
VI.4. Estimación de la producción potencial de carbonato de calcio.....	35
VI.5. Validación del conteo de bandas anuales.....	36
VI.6. Estimación de porcentaje de erosión.....	37
VI.7. Análisis estadístico.....	38
<b>VII. RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
VII.1. Determinación de edad en las colonias colectadas.....	40
VII.2. Descripción de parámetros de crecimiento de <i>Porites panamensis</i> .....	41
VII.2.1. Densidad esquelética.....	42
VII.2.1.1. Densidad esquelética por colonia.....	42
VII.2.1.2. Densidad esquelética por localidad.....	48
VII.2.2. Extensión esquelética anual.....	51
VII.2.2.1. Extensión esquelética por colonia.....	51

## CONTENIDO (continuación)

VII.2.2.2. Extensión esquelética por localidad .....	52
VII.2.3. Tasa de calcificación anual .....	55
VII.2.3.1. Calcificación por colonia .....	55
VII.2.3.2. Calcificación por localidad .....	56
VII.2.4. Correlación entre parámetros de crecimiento .....	57
VII.3. Cobertura de coral .....	60
VII.4. Producción potencial de carbonato de calcio por <i>Porites panamensis</i> .....	61
VII.5. Estimación de porcentaje de erosión .....	64
<b>VIII. DISCUSIÓN</b> .....	<b>66</b>
<b>IX. CONCLUSIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>79</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>82</b>
<b>ANEXO B</b> .....	<b>87</b>
<b>ANEXO C</b> .....	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	Esquema de la vista lateral de un pólipo (p) y coralito (cl). Teca (t), septas(s), lóbulos paliformes (pl), columnela (cm), diseptimentos (d), (flecha negra) zona de contacto entre esqueleto y pólipo (Modificado de Veron, 2000)	2
2	Esquema de metodologías de muestreo para evaluar cobertura coralina. En A se muestra la técnica muestreo de transecto de cuadrantes (rectángulos), en B se muestra la técnica PIT y el punto de observación (líneas) (Modificado de Roelfsema <i>et al.</i> , 2004)	12
3	Localización de sitios de estudio. En A el arrecife de Cabo Pulmo, B.C.S., en B el arrecife de Islas Marietas, Nay. Imagen tomada el día 20/07/2009 con el programa Google Earth ( <a href="http://earth.google.com/">http://earth.google.com/</a> )	17
4	Imagen de colonias de coral colectadas. En A se muestra el proceso de colecta, en B una colonia colectada en Cabo Pulmo donde se aprecia la forma semiesférica y en C una colonia colectada en Islas Marietas con una forma incrustante de menor tamaño	19
5	Esquema de corte de colonia de coral. Vista lateral de orientación del crecimiento vertical de la colonia (línea discontinua; A), vista superior con mayor extensión horizontal (línea discontinua; B), selección de corte de aprox. 8mm de grosor (líneas discontinuas)	21
6	Proceso de corte de lascas de coral	21
7	Lascas de coral. En A se muestran las lascas lavadas y en B las lascas secadas a 80°C por 36h	22
8	Imágenes de radiografías de contacto de lascas de coral. Se muestra en A una radiografía de Cabo Pulmo y en B de Islas Marietas	23
9	Imagen de radiografía y grafica de color de gris vs. distancia en área sobre el bloque 4 de estándar de aragonita. Muestra tres secciones con escala de gris diferente dentro de bloque de aragonita, producto del efecto de borde	24
10	Grafica de la densidad laminar vs. logaritmo natural de densidad óptica ( $\ln(DO)$ ). Se presenta el modelo lineal y el grado de ajuste ( $r^2$ )	25
11	Imagen en negativo de radiografía del coral CP_3. Se presenta el área de estudio ( <i>track</i> , banda amarilla) sobre el eje principal de crecimiento, se aprecia el bandeo de densidad con bandas hialina (baja densidad) y oscura (alta densidad)	27

### LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
12	Gráfica de perfil de densidad óptica. Se presenta la densidad óptica (intensidad de gris) y distancia por píxel (cm), la oscilación del perfil de densidad representan las bandas de alta y baja densidad	28
13	Gráfica de perfil de densidad suavizado. Se presenta la densidad óptica (línea azul discontinua) y la densidad óptica promediada cada 0.2cm (línea roja continua)	29
14	Gráfica y ajuste polinomial de la densidad vs. distancia de la sección lateral del bloque de aragonita de mayor grosor. Se muestra la densidad a lo largo del perfil (línea azul continua), la curva ajustada (línea discontinua), área sin influencia del efecto de borde (recuadro rojo), modelo propuesto y grado de ajuste de datos ( $r^2$ )	31
15	Gráfica y ajuste lineal de la densidad vs. distancia hasta el punto de inflexión del efecto de borde. Se muestra la densidad a lo largo del perfil (línea azul), la línea ajustada (línea punteada), el modelo propuesto y el ajuste de los datos ( $r^2$ ); valores mínimo y máximo de densidad en la recta (línea roja)	32
16	Perfil de densidad con altas y bajas densidades identificadas. En perfil de densidad (línea azul) se marcaron picos de alta densidad (flecha discontinua) y baja densidad (flecha continua) sobre una imagen del área de medición de la laja de coral	33
17	Esquema de una curva de densidad anual. Se muestra los valores puntuales medidos, densidad (círculo rojo), baja densidad inicial (DB_Inicial), baja densidad final (BD_Fina) como valles de la curva y alta densidad (AD) como cresta; la proporción de la alta densidad (Prop_AD) y la extensión esquelética fueron calculados	35
18	Imagen de radiografía para medida de erosión. En A se muestra la medición del área de la laja, en B se presenta la medición del área de una huella de erosión	38
19	Gráfica de caja de la variable densidad promedio (Den_Prom) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	43
20	Gráfica de caja de la variable alta densidad (AD) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	44

### LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
21	Gráfica de caja de la variable baja densidad (BD) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	44
22	Gráfica de caja de la variable proporción de la alta densidad (Prop_AD) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	45
23	Gráfica de caja de la variable densidad promedio (Den_Prom) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	46
24	Gráfica de caja de la variable alta densidad (AD) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	47
25	Gráfica de caja de la variable baja densidad (BD) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	47
26	Gráfica de caja de la variable densidad promedio (Den_Prom) a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	48
27	Gráfica de caja de la variable alta densidad (AD) a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	49
28	Gráfica de caja de la variable baja densidad (AD) a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	50
29	Gráfica de caja de la variable extensión esquelética medido en el eje principal de crecimiento a nivel colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	51

**LISTA DE FIGURAS (continuación)**

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
30	Gráfica de caja de la variable extensión esquelética medido en el eje principal de crecimiento a nivel colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	52
31	Gráfica de caja de la variable extensión esquelética medido en el eje principal de crecimiento a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	53
32	Gráfica de caja de la tasa de crecimiento esquelético promedio fuera (FE) y sobre eje de crecimiento principal (SE) para las localidades de Cabo Pulmo (A) e Islas Marietas (B). Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas); la escala del eje de las ordenadas ( $\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) es diferente para cada localidad (A y B)	54
33	Gráfica de caja de tasa de calcificación a nivel colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	55
34	Gráfica de caja de tasa de calcificación a nivel colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	56
35	Gráfica de caja de tasa de calcificación a nivel localidad. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	57
36	Relación entre la tasa de calcificación y la extensión esquelética anuales para la localidad de Cabo Pulmo. La tendencia de los valores tienen una alta correlación ( $r=0.99$ ) entre las variables	58
37	Relación entre la tasa de calcificación y la extensión esquelética anuales para la localidad de Islas Marietas. La tendencia de los valores tienen una alta correlación ( $r=0.99$ ) entre las variables	58
38	Relación entre la tasa de calcificación y la densidad promedio (Den_Prom) para la localidad de Cabo Pulmo. La tendencia de los valores tienen una correlación media ( $r=0.38$ ) entre las variables	59
39	Relación entre la tasa de calcificación anual y la densidad promedio (Den_Prom) para la localidad de Islas Marietas. La tendencia de los valores tienen una alta correlación ( $r=0.61$ ) entre las variables	59

**LISTA DE FIGURAS (continuación)**

<i>Figura</i>		Página
40	Grafica de caja de la producción potencial de CaCO <sub>3</sub> (Pn) por <i>Porites panamensis</i> por localidad. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas)	63
41	Gráfica de barras del porcentaje de erosión a nivel colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presenta la media (línea discontinua), la colonia CP_3 presentó menor erosión (flecha)	64
42	Gráfica de barras del porcentaje de erosión a nivel colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presenta la media (línea discontinua)	65
43	Temperatura superficial del mar (TSM) promedio por mes para las localidades de Bahía de Banderas y Cabo Pulmo en el periodo de 2002-2009. Datos de <i>Aqua MODIS</i> 9 km.; se presentan la media promedio (punto central) y desviación estándar (barra gris) (Hernández-Fonseca, comunicación personal)	70

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
I	Tasas de densidad esquelética de corales masivos reportados por especie ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Se presenta media $\pm$ desviación estándar y número de colonias medidos (n)	6
II	Tasas de extensión esquelética de corales masivos reportados por especie ( $\text{cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presenta media $\pm$ desviación estándar y número de colonias medidos (n)	7
III	Tasas de calcificación anual de corales masivos reportados por especie ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presenta media $\pm$ desviación estándar y número de colonias medidos (n)	9
IV	Valores de producción potencial de carbonato de calcio ( $\text{kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) estimados mediante muestreos biológicos en diferentes ambientes	14
V	Número de colonias colectadas por localidad	18
VI	Características por transecto de cuadrantes realizados en las diferentes zonas de Cabo Pulmo. Se muestra $N_{\text{tran}}$ = número de transectos, $\text{Long}_{\text{tran}}$ = longitud de transecto y $N_{\text{cuadr}}$ = número de cuadrantes por transecto por sitio de estudio	20
VII	Medidas de precisión en la determinación de la edad medidas a nivel de colonia para las localidades de Cabo Pulmo (CP) e Islas Marietas (IM). Se presentan los resultados por laja de coral de Edad= promedio de edad, APE= porcentaje de error promedio por coral, CV= coeficiente de variación por coral, el número de bandas incluidas en el análisis densitométrico y el número de perfiles de densidad medidos por coral. (*) Colonia con una lectura de edad	41
VIII	Estadística descriptiva de las variables de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) por localidad. Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y $\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar	50
IX	Estadística descriptiva a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo para la variable extensión esquelética ( $\text{cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) medida sobre eje de crecimiento principal de la laja. Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y $\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar	53
X	Estadística descriptiva a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo para la variable extensión esquelética ( $\text{cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) medida en secciones laterales de la laja. Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y $\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar	54

## LISTA DE TABLAS (continuación)

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
XI	Estadística descriptiva de la tasa de calcificación ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) por localidad. Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y $\pm \text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar	57
XII	Estadística descriptiva del porcentaje de cobertura de <i>Porites panamensis</i> por sitio para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan $N_{\text{tran}}$ = número de transectos, $N_{\text{cuadr}}$ = número de cuadrantes, media, desviación estándar y mínimo-máximo	60
XIII	Estadística descriptiva del porcentaje de cobertura de <i>Porites panamensis</i> por transecto para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan $N_{\text{cuadr}}$ = número de cuadrantes, media, desviación estándar y mínimo-máximo	60
XIV	Porcentaje de cobertura de <i>Porites panamensis</i> por transecto para la localidad de Islas Marietas	61
XV	Cálculo de la producción potencial de $\text{CaCO}_3$ (Pn) por <i>Porites panamensis</i> a nivel transecto para la localidad de Islas Marietas ( $\text{kg} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presentan Cobertura= porcentaje de cobertura por transecto, tasa de calcificación, $\text{Pn}_{\text{tran}}$ = producción potencial de $\text{CaCO}_3$ por transecto ( $\text{kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) y media+desviación estándar de Pn entre transectos	62
XVI	Cálculo de la producción potencial de $\text{CaCO}_3$ (Pn) por <i>Porites panamensis</i> a nivel transecto para la localidad de Cabo Pulmo ( $\text{kg} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presentan Cobertura= porcentaje de cobertura por transecto, tasa de calcificación, $\text{Pn}_{\text{tran}}$ = producción potencial de $\text{CaCO}_3$ por transecto ( $\text{kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) y media+desviación estándar de Pn entre transectos	62
XVII	Estadística descriptiva de la producción potencial de $\text{CaCO}_3$ (Pn) por <i>Porites panamensis</i> por localidad ( $\text{kg} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presentan media+desviación estándar (número de transectos) de porcentaje de cobertura y tasa de calcificación anual ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ); para Pn ( $\text{kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) media, desviación estándar, mediana, mínimo-máximo y $\pm \text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar	63
XVIII	Estadística descriptiva por localidad del área de laja y porcentaje de erosión por localidad. Se presenta N= número de lajas, media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación y mínimo-máximo	64

## **I. INTRODUCCIÓN**

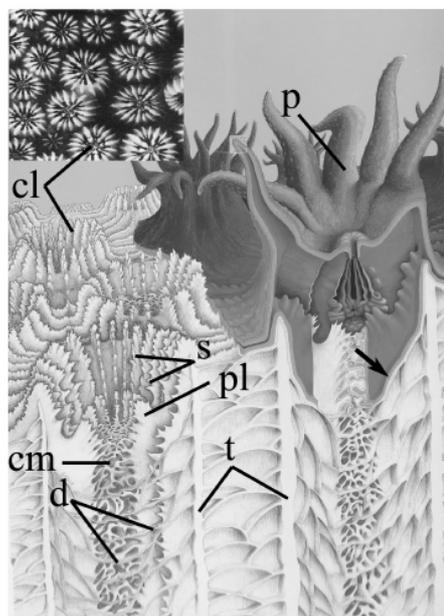
### **I.1. Biología y distribución de corales hermatípicos**

Los arrecifes de coral son ecosistemas complejos e importantes, ya que representan uno de los ambientes biológicamente más diversos sobre la tierra y proveen de hábitats a muchas especies marinas. La distribución geográfica de los corales hermatípicos se restringe a hábitats costeros dentro del cinturón intertropical, delimitado latitudinalmente por los 30° norte y sur (Veron, 2000; Calderón-Aguilera *et al.*, 2007).

Los corales hermatípicos son organismos simbios que requieren dinoflagelados para completar sus procesos metabólicos; estos animales están constituidos por pequeñas subunidades conocidas como pólipos, las cuales se encuentran permanentemente comunicadas mediante un sistema gastrovascular llamado cenosarco. Los pólipos se encuentran conformados por una doble capa tisular que comprende el ectodermo y endodermo (Veron, 2000; Cohen y McConnaughey, 2003). El tejido ectodérmico consta de dos tipos de tejido: 1) el tejido calicoblástico es la parte inferior del pólipo que tiene contacto con el esqueleto y es donde se cree que ocurre la calcificación (Figura 1) (Johnston, 1980 citado por Cohen y McConnaughey, 2003); y 2) mesoglea, tejido conectivo acelular.

Una colonia de coral es esencialmente una agregación de esqueletos individuales o coralitos (tomado por su nombre en inglés *corallite*) con pólipos residentes. El coralito consta de una estructura tubular llamada teca, que es interceptada por placas en arreglo vertical (septas) (Figura 1).

A medida que el coral crece, "jala" o eleva las paredes del coralito dejando atrás un diseptimento formado (diseptimento, placa delgada horizontal de carbonato), mismo que es formado por el tejido calicoblástico (ubicado en la base del pólipo). La formación de nuevos diseptimentos sobre el eje vertical separa al tejido vivo del esqueleto vacío o no-ocupado. Con lo anterior se ha argumentado que sólo los primeros milímetros del esqueleto son ocupados por tejido vivo, y es en esta capa de tejido donde se lleva a cabo la calcificación (Figura 1) (Cohen y McConnaughey, 2003).



**Figura 1.** Esquema de un pólipo (p) y coralito (cl). Donde se aprecia la teca (t), (s) septas, lóbulos paliformes (pl), columnela (cm), diseptimientos (d), (flecha negra) zona de contacto entre esqueleto y pólipo (Modificado de Veron, 2000).

Los corales obtienen una gran parte de la energía y nutrientes requeridos a partir de productos fotosintéticos de las zooxantelas, y el resto, de la captura e ingestión directa de zooplancton y otras partículas orgánicas del agua (Lesser, 2004). La fotosíntesis y la calcificación son dos procesos metabólicos importantes que coexisten en los corales. El primero resulta de la traslocación de productos sintetizados por el alga simbiote hacia el coral, y el segundo proceso de la incorporación de carbonato de calcio en sus esqueletos (Smith y Buddemeier, 1992).

Una parte de la energía obtenida por fotosíntesis es utilizada por los corales para el crecimiento, y su variabilidad es controlada por dos componentes:

- a) la disponibilidad de energía para el depósito activo de material calcáreo en esqueletos y
- b) la ruta en que es usado el material, ya sea inversión en crecimiento lineal o densidad esquelética (Carricart-Ganivet, 2007a).

El crecimiento de corales escleractinios muestra un patrón anual, revelado en radiografías de cortes longitudinales, en los que se distinguen bandas de alta (oscura) y baja densidad (clara) (Knuston, 1972). Un par de bandas oscura y clara representan un año de

crecimiento, y provee información sobre las tasas de crecimiento y las condiciones medioambientales que influenciaron este crecimiento (Carricart-Ganivet y Merino, 2001; Carricart-Ganivet, 2007a; Dávalos-Dehullu *et al.*, 2008).

### **I.2. *Porites panamensis***

El genero *Porites* se encuentra entre las principales especies edificadoras de arrecifes en el Indo-Pacífico. En el Pacífico mexicano está ampliamente distribuido a lo largo de un gradiente de temperatura desde latitudes templadas a regiones de altas temperaturas (18-32°C).

*Porites panamensis* tiene una amplia distribución latitudinal en las costas del Pacífico, abarcando desde la desembocadura del Río Colorado (31°N) hasta Colombia (3°N), así como también en la costa oeste de la península de Baja California a partir de Bahía Magdalena (24°N), no se le encuentra en islas oceánicas a excepción de Islas de Revillagigedo (Reyes-Bonilla *et al.*, 2007).

En el Golfo de California, la cobertura de este coral varía entre 1-7% del sustrato, en algunas zonas se presenta en parches densos de colonias y en otras zonas está ausente. (Reyes-Bonilla y Calderón-Aguilera, 1994; Halfar *et al.*, 2005). Para la región sur del Pacífico mexicano (costas de Nayarit) Carriquirry y Reyes-Bonilla (1997) reportaron coberturas de 1% aproximadamente.

Esta especie presenta cuatro formas coloniales: 1) una forma de crecimiento masiva, 2) nodular o columnar, 3) incrustante y 4) ramificada. Anteriormente las formas de crecimiento habían sido descritas como especies diferentes. Posteriormente las diferentes formas de crecimiento fueron considerados ecotipos, resultado de adaptaciones a diferentes profundidades, y análisis subsecuentes las clasificaron como *P. panamensis* (Paz-García, 2005).

El morfotipo columnar (considerada como forma de crecimiento “masiva” en este estudio) ha sido reportado sólo en la región del Golfo de California, mientras que la forma incrustante se distribuye desde el Golfo de California hasta Panamá (Reyes-Bonilla, 2003). Visualmente las colonias pueden variar de color verde brillante hasta gris. Morfológicamente los corallitos presentan cálices pequeños (<1.5 mm diámetro) con paredes gruesas y comúnmente porosas (Figura 1); presenta dos ciclos de septos (12

comunes, de 10-22). Los septos lateral, dorsal y ventral están igualmente desarrollados y son más robustos que el resto del esqueleto. La columnela puede ser esponjosa o estar ausente.

La especie presenta un crecimiento lento ( $0.4-1\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ), con alta tasa de reclutamiento y mortalidad, lo anterior reportado en Bahía de la Paz ( $24^\circ\text{N}$ ), Cabo Pulmo ( $23^\circ\text{N}$ ) y las costas de Oaxaca ( $15^\circ\text{N}$ ). Comúnmente esta especie se encuentra a profundidades no mayores de 30m. (Reyes-Bonilla y Calderón-Aguilera, 1994; Reyes-Bonilla *et al.*, 2007).

### **I.3. Parámetros de crecimiento de corales hermatípicos**

Cada par de bandas anuales (alta y baja densidad) provee información sobre tres aspectos del crecimiento del coral: 1) tasa de extensión esquelética anual ( $\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ), 2) densidad esquelética, en forma de cantidad de carbonato de calcio depositado por unidad de volumen ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), y 3) la calcificación, que es la cantidad de carbonato de calcio depositado, producto de la extensión y la densidad ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ) (Lough y Barnes, 1997; 2000).

#### **I.3.1. Densidad esquelética**

La densidad esquelética es una medida de la cantidad de material acumulado en los esqueletos de una colonia ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), mostrando un patrón anual de densidades que alternan una banda de alta densidad y una banda de menor densidad. Knuston *et al.* (1972) realizó los primeros estudios sobre corales del género *Porites*, y basándose en marcas radioactivas en corales de las Islas Marshall (Pacífico central), demostró que el patrón de densidades seguía una temporalidad anual. Los géneros *Porites* y *Montastrea*, en sus formas masivas, forman bandas de alta densidad que han sido relacionadas con incrementos estacionales de temperaturas, y bandas de baja densidad durante periodos de bajas temperaturas (Wörum *et al.*, 2007).

Se han descrito diversos métodos para estimar la densidad en corales (Tabla I): Qi *et al.* (2008) emplearon la técnica de peso en agua vs. peso en aire para determinar la densidad de colonias completas, pero no mencionan la variación encontrada por esta técnica. Carricart-Ganivet *et al.*, (2000 y 2001) emplearon los cambios de peso y el volumen de agua acumulado mediante congelamiento, con un error menor al 5% de variación para

determinar la densidad de cada banda. Chalker y Barnes (1990) y Barnes y Lough (1992; 1997; 2000) emplearon la gamadensitometría (rayos gama), la cual se basa en el grado de atenuación de un haz de rayos gama sobre el material incidente, y al ser calibrado con un estándar de aragonita de densidad conocida, permite determinar la densidad del material a lo largo de un área del coral. Carricart-Ganivet y Barnes (2007c) modificaron la técnica densitométrica en imágenes radiográficas, ésta se basa en la densidad óptica medida en imágenes de radiografías de rayos X. Esta técnica relaciona la densidad óptica (color de gris) de imágenes radiográficas de una laja de coral, con la densidad y escala de gris de un estándar de aragonita de densidad conocida, reportando una alta correlación (>90%) con la técnica de rayos gama.

La densidad de corales ha sido interpretada como una variable indicadora de cambios en el ambiente, ya que al conocer la fecha de colecta de una colonia, y definiendo los picos de alta y baja densidad, se pueden fechar cada par de bandas retrospectivamente y así obtener una serie histórica de valores de densidad.

La variabilidad anual en bandas de alta y baja densidad ha sido explicada por medio del estudio de los factores que controlan el crecimiento, entre los cuales resaltan factores físicos, como la temperatura superficial del mar (TSM), la cantidad de luz, y factores químicos, como el grado de saturación de aragonita y el sistema de carbonato en el mar (Cooper *et al.*, 2008). Lough y Barnes (2000) relacionaron la densidad de varias especies de *Porites* con variables oceanográficas en 44 arrecifes de la Gran Barrera, reportando una correlación positiva con la temperatura superficial del mar.

**Tabla I. Tasas de densidad esquelética de corales masivos reportados por especie ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ). Se presenta media $\pm$ desviación estándar y número de colonias medidos (n).**

Referencia	Especie	Arrecife	Media $\pm$ Desv.Est. (n)	Técnica
<b>Porites</b>				
Barnes y Lough, 1992	<i>P. lutea</i> , <i>P. lobata</i> , <i>P. solida</i> , <i>P. australensis</i>	Pandora, Aus	1.33 $\pm$ 0.21 (12)	Rayos gama
		Rib, Aus	1.41 $\pm$ 0.13 (15)	
		Myrmidon, Aus	1.56 $\pm$ 0.16 (11)	
Guzmán Cortés 1989 en Reyes-Bonilla, 1993	<i>P. panamensis</i>	Cabo Pulmo, BC	1.22 ( $\dot{?}$ )	( $\dot{?}$ )
Lough y Barnes, 1997	<i>Porites sp.</i>	35 arrecifes, Aus	1.17 $\pm$ 0.1 (35)	Rayos gama
Lough y Barnes, 2000	<i>P. lutea</i> , <i>P. lobata</i> , <i>P. solida</i> , <i>P. australensis</i>	44 arrecifes, Aus	1.28 $\pm$ 0.16 (245)	Rayos gama
Halfar et al., 2005	<i>Porites panamensis</i>	1 comunidad arrecifal, Bahía de los Ángeles, BC	0.92 ( $\dot{?}$ )	Volumen desplazado (colonia)
Carricart-Ganivet et al, 2007	<i>Porites sp.</i>	Rib, Aus	1.4 $\pm$ 0.2 (24)	Rayos gama
Qi et al, 2008	<i>P. lutea</i> <i>Porites sp.</i>	Luhuitou, China	1.31 $\pm$ 0.16 (10)	Peso aire-Peso agua (colonia)
Lough, 2008	<i>Porites sp.</i>	49 arrecifes. Aus, N. Guinea, Golfo Arab.	1.37 $\pm$ 0.19 (260)	Rayos gama, revisión
<b>Otras especies</b>				
Carricart-Ganivet et al., 2000	<i>Montastrea annularis</i>	2 arrecifes, Caribe mexicano	1.74 (12)	Congelamiento (banda de densidad individual)
Carricart-Ganivet y Merino, 2001	<i>Montastrea annularis</i>	6 arrecifes, Caribe mexicano	1.61 $\pm$ 0.24 (20)	

### I.3.2. Crecimiento en extensión anual

La extensión esquelética se considera una medida de crecimiento anual de las colonias de coral ( $\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ), también reportada como crecimiento en extensión. En estudios previos se medían las distancias lineales entre dos bandas de alta o baja densidad directamente en impresiones de contacto de imágenes de radiografías (Barnes y Lough, 1992).

La extensión anual, medida en perfiles de densidad en imágenes radiográficas de cortes longitudinales de colonias de coral, esta representada como la distancia lineal entre dos máximos (ó mínimos según el género de coral estudiado) de densidad sucesivos (Barnes y Lough, 1999). Comúnmente los valores de extensión reportados para el género *Porites* se encuentran menores a  $2 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$ , presentando una alta variabilidad a nivel arrecife (Tabla II). Esta variable ha sido empleada para evaluar condiciones ambientales cambiantes, Barnes y Lough (1999) relacionaron una tasa de extensión disminuida en

varias especies de *Porites* con un aumento de la turbidez del agua por actividades antropogénicas.

Dentro de una colonia, la extensión esquelética varía según el lugar donde sea medida; sobre el eje de crecimiento<sup>1</sup> puede ser mayor hasta un 11%, en comparación con secciones laterales de la colonia (Lough y Barnes, 2000). En estudios publicados se presentan análisis que se basan en mediciones realizadas en el eje principal de crecimiento, ya que las secciones fuera de este eje presentan una extensión disminuida, debido a la curvatura de colonias con forma semiesférica (Lough y Barnes, 2000).

**Tabla II. Tasas de extensión esquelética de corales masivos reportados por especie (cm·año<sup>-1</sup>). Se presenta media±desviación estándar y número de colonias medidos (n).**

Referencia	Especie	Arrecife	Media±Desv.Est. (n)
<i>Porites</i>			
Barnes y Lough, 1992	<i>P. lutea, P. lobata, P. solida, P. australensis</i>	Pandora, Aus	1.35±0.35 (12)
		Rib, Aus	1.23±0.24 (15)
		Myrmidon, Aus	0.82±0.1 (11)
Reyes-Bonilla, 1993	<i>P. panamensis</i>	Cabo Pulmo, BC	1.0 (¿?)
Lough y Barnes, 1997	<i>Porites sp.</i>	35 arrecifes, Aus	1.48±0.32 (35)
Lough y Barnes, 2000	<i>P. lutea, P. lobata, P. solida, P. australensis</i>	44 arrecifes, Aus	1.29±0.34 (245)
Halfar <i>et al.</i> , 2005	<i>Porites panamensis</i>	1 comunidad arrecifal, Bahía de los Angeles, BC	0.5 (¿?)
Carricart-Ganivet <i>et al.</i> , 2007	<i>Porites sp.</i>	Rib, Aus	0.93±0.16 (24)
Qi <i>et al.</i> , 2008	<i>P. lutea</i> <i>Porites sp.</i>	Luhuitou, China	1.72±0.42(57)
<i>Otras especies</i>			
Hubbard y Scaturo, 1985	<i>Montastrea annularis</i>	Islas vírgenes, EU	1.4±0.37 (198)
Carricart-Ganivet <i>et al.</i> , 2000	<i>Montastrea annularis</i>	2 arrecifes, Caribe mexicano	0.87 (12)
Carricart-Ganivet y Merino, 2001	<i>Montastrea annularis</i>	6 arrecifes, Caribe mexicano	2.09±0.09 (20)

### I.3.3. Tasa de calcificación anual

La calcificación es un proceso químico de importancia para la construcción de arrecifes, y juega un rol importante en la química del agua, la cual es influenciada por el intercambio de CO<sub>2</sub> con la atmósfera (Al-Horani *et al.*, 2007).

<sup>1</sup> Es la región central de una laja de coral donde se observa la mayor extensión, las secciones laterales presentan una menor extensión esquelética.

La calcificación es un proceso metabólico que es llevado a cabo por el pólipo. A escala de días se reconocen dos tipos de calcificación: 1) aquella en la que interviene la luz del día y 2) la que se lleva a cabo durante la noche. Este tipo de estudios son medidos mediante isótopos estables (p.e.  $\text{Ca}^{45}/\text{Ca}^{40}$ ) o química del agua (alcalinidad-pH) (Al-Horani *et al.*, 2007).

La calcificación a nivel de colonia se mide basándose en el análisis de los esqueletos de los corales y es interpretada como la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  depositado anualmente por unidad de área. En estudios de densitometría, el cálculo de la calcificación se obtiene por el producto de la densidad promedio y la extensión esquelética por cada par de bandas.

Lough y Barnes (1997) reportan la densidad promedio (*bulk density* en inglés) como la media aritmética entre la máxima alta densidad y la mínima baja densidad observadas en cada par de bandas (obscura y clara); y la extensión esquelética anual como la distancia (cm) entre dos mínimas bajas densidades, o dos máximas altas densidades continuas, a lo largo de un perfil de densidad.

El estudio del bandeo anual de densidad provee un medio para analizar retrospectivamente tasas de crecimiento y calcificación. En la tabla III se presentan valores de calcificación reportados para diferentes especies y regiones.

**Tabla III. Tasas de calcificación anual de corales masivos reportados por especie ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presenta media  $\pm$  desviación estándar y número de colonias medidos (n).**

Referencia	Especie	Arrecife	Media $\pm$ Desv. Est. (n)
<i>Porites</i>			
Barnes y Lough, 1992	<i>P. lutea</i> , <i>P. lobata</i> , <i>P. solida</i> , <i>P. australensis</i>	Pandora, Aus	1.77 $\pm$ 0.26 (12)
		Rib, Aus	1.71 $\pm$ 0.25 (15)
		Myrmidon, Aus	1.28 $\pm$ 0.12 (11)
Lough y Barnes, 1997	<i>Porites sp.</i>	35 arrecifes, Aus	1.72 $\pm$ 0.36 (35)
Lough y Barnes, 1999	<i>Porites sp.</i>	Isla Misima, Papua Nueva Guinea	1.71 $\pm$ 0.34 (25)
Lough y Barnes, 2000	<i>P. lutea</i> , <i>P. lobata</i> , <i>P. solida</i> , <i>P. australensis</i>	44 arrecifes	1.63 $\pm$ 0.38 (245)
Halfar et al., 2005	<i>Porites panamensis</i>	1 comunidad arrecifal, Bahía de los Ángeles, BC	0.46 ( $\bar{x}$ ?)
Carricart-Ganivet et al., 2007	<i>Porites sp.</i>	Rib, Aus	1.3 $\pm$ 0.3 (24)
Qi et al., 2008	<i>P. lutea</i> <i>Porites sp.</i>	Luhuitou, China	2.25 $\pm$ 0.62 (10)
<i>Otras especies</i>			
Carricart-Ganivet et al., 2000	<i>Montastrea annularis</i>	2 arrecifes, Caribe mexicano	1.5 (12)
Carricart-Ganivet y Merino, 2001	<i>Montastrea annularis</i>	6 arrecifes, Caribe mexicano	1.38 $\pm$ 0.28 (20)

### I.3.4. Factores ambientales que controlan el crecimiento en los corales

Ciertos factores ambientales pueden controlar los parámetros de crecimiento de los corales (extensión esquelética, densidad y calcificación). Entre los factores físicos se han reportado principalmente la luz y la TSM; y el estado de saturación de aragonita resalta como el principal factor químico ( $\Omega_{\text{Arag}}$ ) (Barnes y Lough, 1992; Kleypas et al., 1999; Lough y Barnes, 2000; Veron, 2000; Carricart-Ganivet et al., 2007b).

La luz es un factor que define el desarrollo de los arrecifes, al funcionar como un iniciador de alta productividad y mejora la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  en las colonias de corales (Falkowski, 2000; Marubini et al., 2001).

Se ha observado que un control importante sobre el crecimiento esquelético en corales es la TSM. En *Porites* la calcificación aumenta con la TSM promedio, encontrándose una relación directa con la extensión esquelética (aumenta) e inversa con la densidad esquelética (disminuye) (Lough y Barnes, 2000; Carricart-Ganivet, 2004). Lough y Barnes (2000) analizaron los parámetros de crecimiento de varias especies de *Porites*,

concluyendo que existe una relación positiva entre la TSM y la calcificación, bajo un gradiente latitudinal en la Gran Barrera de Arrecifes (*GBR*, por sus siglas en inglés).

#### **1.4. Cobertura de coral**

Se realizan muestreos biológicos para obtener información que es usada principalmente para evaluar la pérdida de riqueza biológica ó evaluar el estado de salud de los organismos (Buckland *et al.*, 2007).

Los arrecifes coralinos son estudiados para investigar y documentar el estado de salud que presentan los ecosistemas a diferentes escalas y tiempos. Sin embargo, estos estudios tienen limitaciones en varios aspectos, tales como: corta duración, estrechos en escala espacial, con reducidos tamaños de muestra, el empleo de diferentes metodologías, entre otros, haciendo difícil el análisis de tendencias espaciales o temporales (Hoarea y Tsokos, 2009).

Las metodologías de muestreo para estimar la cobertura de coral presentan limitaciones como: 1) el esfuerzo del observador, 2) pericia y habilidades necesarias para coleccionar y registrar información bajo el agua, 3) distancia de la costa –profundidad-, 4) error de paralaje intra-inter observadores, y 5) otras relacionadas con condiciones climáticas y la visibilidad (Segal y Clovis, 2001).

Las metodologías visuales son las comúnmente usadas para estimar cobertura de coral, incluyen dos aproximaciones:

a) aquellas metodologías que basan sus muestreos en el análisis del área ocupada por organismos, como son: transecto de cuadrantes y transectos de banda (Figura 2A). Este tipo de muestreos tienen una dimensión relacionada con la abundancia (p.e. a nivel de especie se reporta la cantidad de organismos por unidad de área ó porcentaje por  $m^2$ ). Son usualmente empleados con objetivos de identificación de especies, para evaluar la riqueza de especies y el análisis de coberturas; presenta la ventaja de detectar especies raras o con poca cobertura, pero por otra parte, se ha observado que presenta información sesgada debido a la interpretación visual del cuadrante por parte del coleccionador (paralaje), además de abarcar áreas o distancias de menor tamaño que otros métodos; cabe mencionar que este método es el predilecto en estudios de coberturas de coral (Nadon y Stirling, 2006).

b) y las metodologías que son adimensionales, también llamados métodos de análisis de distancias (sin-áreas). Estos se basan en la evaluación de la densidad de los organismos a lo largo de transectos lineales como: transecto de punto-intersección, transecto de línea y combinaciones de los anteriores. Este método se ha vuelto cada vez más popular, debido a que ofrece ciertas ventajas con respecto a otros: brinda la oportunidad de abarcar grandes distancias en una corta duración de tiempo, el error de paralaje se ve reducido ya que evalúa de manera puntual la información, reduciendo errores en la medición. Pero por otro lado, no detecta la presencia de especies poco comunes y la interpretación es subjetiva con relación a la escala, ya que carece de dimensiones. (Segal y Clovis, 2001).

Dentro de la gama de técnicas adimensionales, el método de transecto de punto-intersección (PIT por sus siglas en inglés *point-intersept transect*) (Figura 2B) provee información sobre la presencia o ausencia de la especie a lo largo de una serie de puntos. Esta metodología mide la frecuencia de ocurrencia de la especie objetivo a lo largo de un transecto lineal, y es calculada por el cociente de la cuenta de interceptos, es decir, el número de “encuentros” de la especie, y el número total de interceptos examinados. Esta proporción es interpretada como una aproximación de la cobertura a nivel arrecife.

Se ha reportado que ambas aproximaciones presentan valores similares de cobertura (Segal y Clovis, 2001; Nadon y Stirling, 2006). Contrariamente, Olhorts (1988) reportó que los métodos de cuadrantes tendían a subestimar la cobertura de especies, mientras que Segal y Clovis (2001) encontraron más eficiente el método PIT al comparar coberturas entre sitios de muestreo.

La elección del método de muestreo está en función del objetivo del estudio, pero tal decisión se ve influenciada por diversos factores como: la facilidad de ejecución en campo, la capacidad de cubrir grandes distancias por unidad de tiempo, que brinden un menor sesgo causado por distribución heterogénea de los organismos ó por la relación de costo-beneficio.

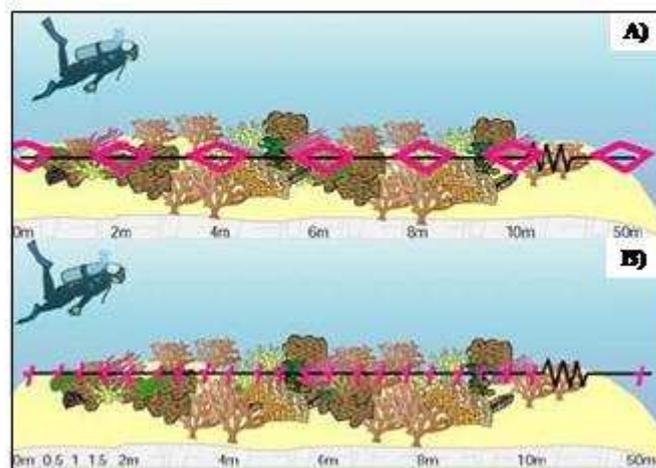


Figura 2. Esquema de metodologías de muestreo para evaluar cobertura coralina. En A se muestra la técnica muestreo de transecto de cuadrantes (rectángulos), en B se muestra la técnica PIT y el punto de observación (líneas) (Modificado de Roelfsema *et al.*, 2004).

## II. ANTECEDENTES

### II.1. Producción potencial de $\text{CaCO}_3$ en arrecifes coralinos

La producción de carbonato en los arrecifes ha sido comúnmente medida por métodos hidroquímicos (p.e. reducción de alcalinidad) alcanzando valores alrededor de  $10\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$  en regiones superficiales (pocos metros de profundidad), arrecifes de relieve sumergidos y parches de arrecife (Kinsey, 1985 citado por Vecsei, 2001). Estas mediciones químicas indican la cantidad de carbonato precipitado y la cantidad de erosión temprana o inmediata al momento del estudio, mismos que son reflejados en el agua a corta distancia sobre la superficie arrecifal (Vecsei, 2001).

Otra línea de estudio sobre la producción de carbonato está basada en muestreos biológicos, los cuales utilizan tasas de crecimiento, densidad esquelética y la cobertura de coral de las principales especies, donde la cantidad total de carbonato de calcio producido en un arrecife es función de: 1) la abundancia de organismos calcificadores, 2) el área ó superficie total que estos organismos ocupan, y 3) las tasa de producción de  $\text{CaCO}_3$  de cada organismo (Hubbard *et al.*, 1990). En la tabla IV se presentan valores de producción de carbonato reportados empleando muestreos biológicos.

En estudios sobre producción de carbonato realizados a escala de arrecife (Chave *et al.*, 1972; Hubbard *et al.*, 1990; Qi *et al.*, 2008; 2009), a escala regional (Vecsei, 2001; Calderón-Aguilera *et al.*, 2007) o escala global (Kleypas *et al.*, 1999), muestran resultados basándose en múltiples generalizaciones y supuestos, debido a la complejidad o insuficiencia de información relacionada con tasas de crecimiento de las especies, cobertura de coral y dimensiones de los arrecifes.

Hubbard *et al.* (1990) y Qi *et al.* (2008) describieron el cálculo de la producción gruesa de carbonato (tomado del inglés *gross carbonate production*), la se refiere a la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  producido por los organismos que habitan el arrecife, estos incluyen principalmente corales y algas coralinas. Esta medida relaciona la tasa individual de calcificación de cada taxa y la superficie del arrecife que ocupa, es expresada en toneladas de carbonato producidas en un arrecife anualmente por unidad de área.

**Tabla IV. Valores de producción potencial de carbonato de calcio ( $\text{kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) estimados mediante muestreos biológicos en diferentes ambientes.**

<b>Sitio</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Pn</b>	<b>Referencia</b>
Hipotético	Arrecife plano	3 - 8	Chave <i>et al.</i> , 1972
Islas Vírgenes	0-40m, arrecife plano	0 - 5.78	Hubbard <i>et al.</i> , 1990
Pacífico mexicano	Varios arrecifes	2 - 20	Calderón-Aguilera <i>et al.</i> , 2007
Bahía de los Ángeles, BC	Comunidad arrecifal ( <i>P. panamensis</i> )	0.14	Halfar <i>et al.</i> , 2005
Luhuitou, China	0-10, arrecife plano y pendiente	1.16 - 3.52	Qi <i>et al.</i> , 2008

### III. JUSTIFICACIÓN

Los arrecifes de coral son ecosistemas con una alta riqueza biológica y son considerados prestadores de bienes y servicios ambientales, por su papel en el ciclo del carbono como hipercalcificadores, es decir, que tienen la habilidad de extraer cantidades masivas de  $\text{CaCO}_3$  del agua marina y formar esqueletos.

Los arrecifes del Pacífico mexicano son manejados con diversas categorías de protección (áreas naturales protegidas), y están amenazados por impactos antropogénicos en una escala local como el turismo o sobreexplotación, así como por efectos de cambio global a escala planetaria (Calderón-Aguilera *et al.*, 2007).

El estudio sobre crecimiento del género *Porites* es extenso y de sus conclusiones resaltan la alta variabilidad interespecífica. Para *Porites panamensis* la información de los parámetros de crecimiento y densidad esquelética es escasa, así el presente estudio aporta resultados sobre una de las especies de corales masivos más importantes y ampliamente distribuidas en el Pacífico mexicano.

Este estudio tiene como finalidad generar información sobre parámetros de crecimiento y tasas de calcificación de *Porites panamensis* en dos localidades del Pacífico mexicano -Cabo Pulmo e Islas Marietas-, y obtener una aproximación de la tasa de producción potencial de carbonato de calcio en las dos comunidades arrecifales. Este trabajo se desprende del proyecto de investigación “Vulnerabilidad de los arrecifes coralinos de las costas mexicanas por el efecto del cambio global y posibles consecuencias socioambientales” (Ref. SEMARNAT - INE - CONACYT 22390).

#### IV. HIPÓTESIS

Si al evaluar los parámetros de crecimiento (densidad, extensión esquelética y calcificación) y la producción de carbonato de calcio de *Porites panamensis*, en las comunidades arrecifales de Cabo Pulmo (B.C.S.) e Islas Marietas (Nay.), se encuentra que las colonias de un mismo arrecife presentan características en común pero, las localidades presentan diferencias sistemáticas, estas diferencias podrían explicarse en relación a la diferente forma de crecimiento colonial que presentan ambas localidades.

En ese sentido, las preguntas conductoras de esta investigación fueron:

1. ¿Cuál es la tasa de crecimiento en extensión de *Porites panamensis* en dos localidades del Pacífico mexicano separadas por 3 grados de latitud y 562 km?
2. ¿Existen variaciones en la densidad esquelética de esta especie dentro una misma localidad y entre localidades?
3. ¿Ha habido cambios temporales en la tasa de calcificación en estas localidades?

#### V. OBJETIVOS

##### V.1. Objetivo general

Evaluar la producción potencial de carbonato de calcio en dos comunidades arrecifales del Pacífico mexicano.

##### V.2. Objetivos particulares

- Determinar la tasa de extensión esquelética de *Porites panamensis* en las localidades de estudio.
- Determinar la densidad esquelética de *Porites panamensis* en las dos localidades.
- Calcular la producción potencial con base en las tasas de crecimiento, densidad y cobertura de coral observadas.

## VI. MATERIALES Y MÉTODO

### VI.1. Área de estudio

En la costa del Pacífico mexicano los arrecifes de coral están presentes en aguas someras (0 a 25 m de profundidad), desde el sur del Golfo de California hasta Oaxaca y las Islas Revillagigedo, generalmente construyendo estructuras de poco relieve (menos de 3 m de espesor; Reyes Bonilla, 2003). En el presente trabajo se estudiaron dos comunidades arrecifales del Pacífico mexicano: Cabo Pulmo e Islas Marietas.

El arrecife de Cabo Pulmo, B.C.S. (CP) esta situado a los 23°30'N y 109°30'W (Figura 3A), al sureste de la península de Baja California. Este arrecife de franja fue declarado Parque Nacional en 1995 (CONANP, 2006), cubre un área aproximada de 300 ha, de la cual la superficie arrecifal abarca aproximadamente 150 ha (Reyes-Bonilla y Calderón-Aguilera, 1994; CONANP, 2006). La temperatura media anual en el arrecife es de 25°C (en un intervalo entre 17-31°C en 1987), no obstante, se han registrado temperaturas extremas eventualmente en relación con procesos locales (como las surgencias generadas en el cañón de Los Frailes) o bien, por factores extrínsecos (como los incrementos en la temperatura causados por el evento oceanográfico de El Niño) (CONANP, 2006).



**Figura 3. Localización de sitios de estudio. En A el arrecife de Cabo Pulmo, B.C.S., en B el arrecife de Islas Marietas, Nay. Imagen tomada el día 20/07/2009 con el programa Google Earth (<http://earth.google.com/>)**

El arrecife de Islas Marietas (IM) está situado a los 20°42'N y 105°33'W (Figura 3B), cerca de las costas del estado de Nayarit. Consta de dos islas (Isla Larga y Redonda), abarcando una superficie aproximada de 78 ha. La región se localiza en una zona de confluencia de 3 masas de agua, la Corriente de California, la Corriente Costera de Costa Rica y la masa de agua del Golfo de California (Carrquiry y Reyes-Bonilla, 1997). La región de Bahía de Banderas, donde se encuentran las Islas Marietas, presenta temperaturas promedio anuales 26.4°C, variando estacionalmente entre 20°C (invierno-primavera) y 30°C (septiembre), los decrementos rápidos durante el invierno y primavera son debidos principalmente a la actividad de las surgencias en el sur de Bahía de Banderas (CONANP, 2007).

## VI.2. Trabajo de campo

### VI.2.1. Colecta de muestras

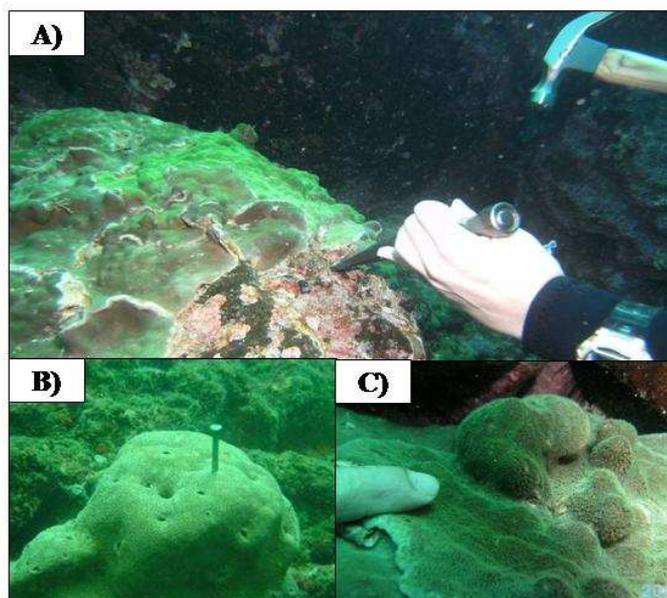
Se colectaron un total de 20 colonias de *Porites panamensis* entre 2-25cm de altura en las localidades de estudio (Tabla V). En Cabo Pulmo (CP) la colecta fue en febrero de 2009 a profundidades menores de 10m; en Islas Marietas (IM) las colonias se colectaron en marzo de 2009 a profundidades menores a 11m.

Las colonias fueron removidas del sustrato usando cincel y martillo (Figura 4A), procurando que estuvieran separadas al menos 5m entre ellas (Tabla V). Las colonias de CP presentaron una forma semiesférica característica de especies masivas, reportada anteriormente para Cabo Pulmo (Reyes-Bonilla, 1993; Reyes-Bonilla y Calderón-Aguilera, 1994) (Figura 4B), Paz-Díaz (2005) reporta esta forma como “columnar”.

Mientras que las colonias colectadas de IM presentaron una forma incrustante, reportada anteriormente para la región sur del Pacífico mexicano (López-Pérez *et al.*, 2003; Reyes-Bonilla *et al.*, 2005), Paz-Díaz (2005) reporta esta forma de crecimiento como “masiva-incrustante” (Figura 4C).

**Tabla V. Número de colonias colectadas por localidad.**

Localidad	Número de colonias
Cabo Pulmo (CP)	12
Islas Marietas (IM)	8



**Figura 4.** Imagen de colonias de coral colectadas. En A se muestra el proceso de colecta, en B una colonia colectada en Cabo Pulmo donde se aprecia la forma semiesférica y en C una colonia colectada en Islas Marietas con una forma incrustante de menor tamaño.

#### **VI.2.2. Evaluación de la cobertura de coral**

Con el propósito de calcular la producción potencial de carbonato de calcio, se evaluó el porcentaje de cobertura de *P. panamensis* en ambas localidades. Es importante resaltar que el mismo equipo que realizó estos muestreos ha realizado evaluaciones anuales de cobertura desde 1998 en los principales arrecifes del Pacífico mexicano (ver [www.mexlter.org.mx](http://www.mexlter.org.mx), para una descripción más extensa).

En Cabo Pulmo se evaluó la cobertura de coral entre 12-14 de noviembre de 2008, empleando la técnica de transecto de banda por cuadrantes. Se evaluaron un total de 7 transectos (completando un total de 557 cuadrantes) en 4 sitios representativos de la comunidad arrecifal (la Sirenita, el Cantil, la Barra I y Barra II) (Reyes-Bonilla y Calderón-Aguilera, 1994) (Tabla VI).

**Tabla VI. Características por transecto de cuadrantes realizados en los diferentes sitios del arrecife de Cabo Pulmo. Se muestra  $N_{\text{tran}}$ = número de transectos,  $\text{Long}_{\text{tran}}$ = longitud de transecto y  $N_{\text{cuadr}}$ = número de cuadrantes por transecto por sitio de estudio.**

Sitio	$N_{\text{tran}}$	$\text{Long}_{\text{tran}}$ (m)	$N_{\text{cuadr}}$
La Sirenita	2	50	73
Cantil	1	250	124
Barra 2	2	75, 200	149
Barra 1	2	200, 225	211
Total	7	---	557

Para obtener porcentaje de cobertura a nivel de transecto se calculó el promedio de cobertura entre cuadrantes ( $\% \cdot \text{m}^{-2}$ ), y para el cálculo de la cobertura a nivel de sitio (p.e. Barra I) se empleó el promedio de cobertura entre transectos.

El monitoreo de la cobertura de *P. panamensis* en IM se realizó durante los días 27-28 de marzo de 2009; se empleó la técnica de PIT con un total de 18 transectos lineales de 25m de longitud, evaluando la presencia-ausencia de la especie objetivo cada 0.25m (con un total de 100 puntos u observaciones por transecto), abarcando una longitud de 450m. Los transectos fueron aleatorios e independientes sin hacer distinción en sitios de estudio.

Para el cálculo de la cobertura a nivel de localidad se utilizó el promedio de los transectos realizados. Los cálculos de cobertura coralina a nivel de transecto presentan valores entre 0-100%, cuando no hubo presencia de la especie y cuando la totalidad de los puntos fueron ocupados, respectivamente. La técnica arroja como valor de cobertura mínimo de 1% debido a la presencia-ausencia de la especie (p.e. relación 1%:1presencia/100 observaciones).

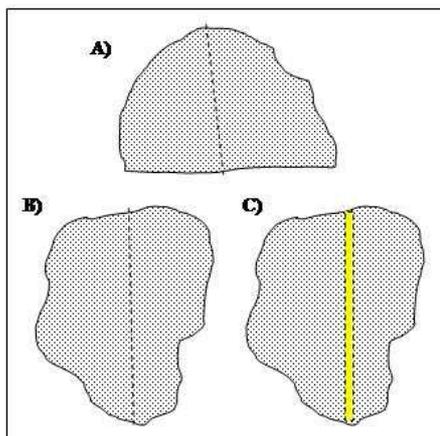
### **VI.3. Densitometría óptica en radiografías**

#### **VI.3.1. Preparación de muestras y estándar de aragonita**

##### Corte y secado de lajas de coral

Las colonias colectadas (Figura 4B, 4C) fueron lavadas con agua dulce y secadas al sol para evitar la contaminación por hongos. Posteriormente se evaluaron las colonias visualmente para seleccionar el eje de crecimiento vertical, mismo que es representado por una cresta en la parte superior de la colonia (zona apical) y que aparece aproximadamente perpendicular a la base (Figura 5). Las colonias fueron cortadas con sierra de diamante de 5

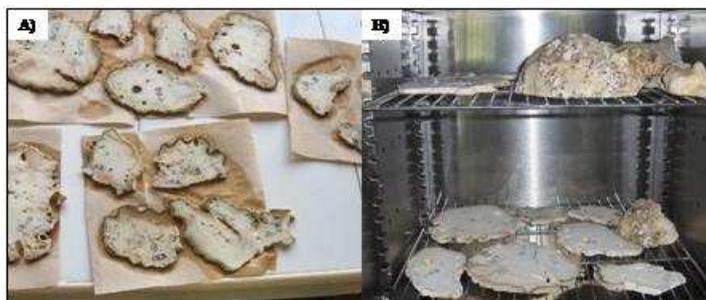
mm de grosor en la parte central de la colonia, usando agua corriente como lubricante (Figura 6). De cada colonia se extrajo una laja de ~8mm de grosor de la sección central de la colonia (Figuras 5C y 7A). Las lajas fueron lavadas con agua dulce para eliminar lodos generados durante el corte y posteriormente secadas a 80°C por 36h para desecar el tejido vivo y evitar contaminación por hongos (Figura 7B).



**Figura 5. Esquema de corte de colonia de coral. Vista lateral de orientación del crecimiento vertical de la colonia (línea discontinua; A), vista superior con mayor extensión horizontal (línea discontinua; B), selección de corte de aprox. 8mm de grosor (líneas discontinuas).**



**Figura 6. Proceso de corte de lajas de coral.**



**Figura 7.** Lajas de coral. En A se muestran las lajas lavadas y en B las lajas secadas a 80°C por 36h.

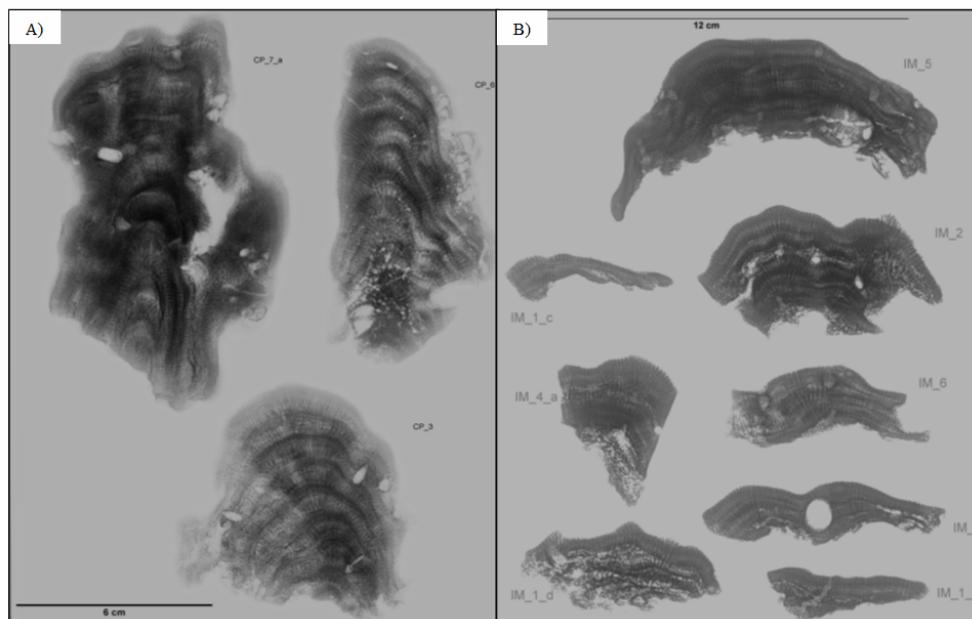
#### Elaboración de estándar de aragonita

Ocho piezas o bloques de aragonita fueron cortados de concha de almeja *Tridacna maxima*. Los bloques fueron aproximadamente de 2.5cm<sup>2</sup> y variaron en grosores de 9 a 118mm. A los ocho bloques del estándar se les asignó una misma densidad (2.826g·cm<sup>-3</sup>) antes reportada (Chalker y Barnes, 1990; Carricart-Ganivet y Barnes, 2007c), suponiendo esa densidad constante en cada bloque (Figura 9).

### **VI.3.2. Procesado de radiografías**

#### Radiografiado de lajas de coral

Las lajas de coral fueron radiografiadas con un equipo de rayos X para mamografía digital Semographe 600 T Semix HiF, con 34-40 kVp con un tiempo de exposición a una distancia de la fuente de 30cm y se emplearon diferentes *films* o casetes de radiografías. Cada radiografía fue acompañada del estándar de aragonita. Al final se obtuvieron un total de 8 radiografías (Figura 8), de las cuales 5 fueron incluidas en el análisis de densitometría y de 3 no se obtuvo un ajuste óptimo de la escala de densidad, por lo que fueron excluidas del análisis de densidades.



**Figura 8.** Imágenes de radiografías de contacto de lajas de coral. Se muestra en A una radiografía de Cabo Pulmo y en B de Islas Marietas.

#### Escalado de imágenes

Las imágenes en formato TIFF de 16 MP en escala de gris (0-255 grises), sin ningún tipo de filtrado, fueron escaladas con el programa de libre acceso ImageJ (*NIH Asoc.*)<sup>2</sup>, arrojando imágenes digitales con  $\sim 200 \text{ pixel}\cdot\text{cm}^{-1}$  de resolución, equivalente a un tamaño de píxel de 0.005cm. La dimensión de las imágenes fue 17x23cm.

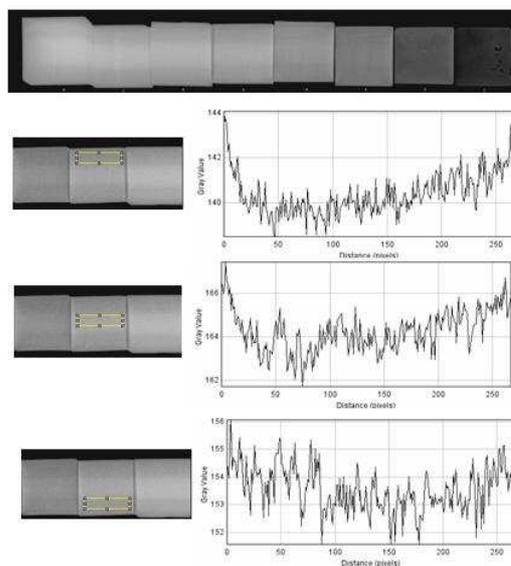
#### Uniformidad del estándar de aragonita

Se evaluó la uniformidad de los bloques del estándar de aragonita entre radiografías por medio de los valores de gris medidos en un área de 0.4x0.4cm en la parte central del bloque. Se encontraron diferencias en los valores de gris de cada bloque entre radiografías (Tabla 1 en Anexo A) con un coeficiente de variación promedio del 9% (intervalo de 2-37% entre radiografías), se observó que una radiografía (Rx\_2) presentó mayores valores de variación dentro de los bloques de aragonita. Al excluir del análisis esa radiografía (Rx\_2), la variación disminuyó a 7%, con rango entre 2-16%. Las imágenes de los bloques con menor grosor presentaron una mayor variación promedio ( $\sim 10\%$ ).

<sup>2</sup> <http://rsb.info.nih.gov/ij/>

La falta de uniformidad dentro de los bloques del estándar provino de variaciones debidas a un efecto de proyección, a manera de borde, presente en la totalidad de radiografías y estándar. Este efecto (se menciona como “efecto de borde” de aquí en adelante) genera un gradiente de color de gris en los márgenes de las imágenes, atenuando la intensidad de gris en el primer centímetro (aproximadamente) alrededor de los cuerpos. En el estándar de aragonita el efecto de borde delimitó tres secciones (Figura 9); en cada sección se midió un área de 0.12x0.4cm en cada bloque de aragonita, encontrándose diferencias significativas (Tabla 1 en Anexo A). Debido a este efecto se generó una escala de gris (espectro de gris) para cada sección del bloque (sección superior, media e inferior).

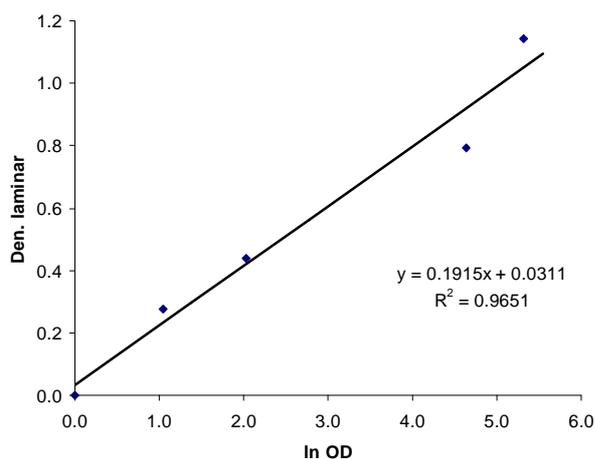
Al evaluar la variación de color de gris por medio del CV, en cada sección de cada bloque de aragonita entre radiografías, la variación estuvo entre 25-29%, el bloque de menor grosor presentó la mayor dispersión de los valores (60%) entre radiografías. Se generaron tres ajustes de grises para estimar la densidad (uno por sección del bloque, Figura 9) para cada radiografía y no se promediaron los valores de grises de las tres con el fin de reportar el error debido al efecto de borde.



**Figura 9.** Imagen de radiografía y grafica de color de gris vs. distancia en área sobre el bloque 4 de estándar de aragonita. Se muestra tres secciones de un bloque, resultado del efecto de borde, y el perfil de valor de gris.

### Ajuste de escala de densidad

Los valores de la escala de gris ó densidad óptica (DO) fueron transformados al logaritmo natural ( $\ln(\text{DO})$ ), se obtuvo un ajuste lineal ( $y=ax+b$ ) y coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de la densidad laminar y el  $\ln(\text{DO})$  (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007c). Esta curva es asintótica cuando el estándar llega a la saturación de gris. La densidad laminar se obtuvo mediante el producto del grosor y la densidad del bloque del estándar (grosor x densidad,  $\text{gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ , eje de las ordenadas en figura 10), también reportada como densidad de masa (Chalker, 1990). Los valores de gris de  $\ln\text{DO}$  del estándar de aragonita fueron puntuales, ya que provienen de 8 piezas del estándar y el fondo de la radiografía (bloque de grosor 0.00cm) (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007c). La elección del número de valores de  $\ln(\text{DO})$  a usar en el ajuste lineal (eje x en figura 10) se basó en el mejor ajuste de datos en el modelo ( $r^2=0.87-0.98$ ).



**Figura 10.** Grafica de la densidad laminar vs. logaritmo natural de densidad óptica ( $\ln(\text{DO})$ ). Se presenta el modelo lineal y el grado de ajuste ( $r^2$ ).

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

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

Donde  $a$  y  $b$  son las constantes del ajuste lineal;  $a$  representa el factor de ajuste de densidad,  $b$  intercepto o densidad mínima por radiografía.

Los grosores del estándar de aragonita, antes empleados por Carricart-Ganivet y Barnes (2007), fueron basados de tal manera que los valores de lnDO de las lajas de coral cayeran en el intervalo de grises del estándar.

Cabe mencionar que: 1) el efecto de borde ocurre en los márgenes de las imágenes de los cuerpos, y 2) el ajuste de lnDO vs. densidad laminar arrojó una diferencia en la densidad calculada ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) de aproximadamente 15% entre 4 o 5 valores del estándar.

Para las lajas de CP, contenidas en 4 radiografías, se emplearon 5 valores del estándar (lo cual es interpretado como una escala de grises), ya que al seleccionar 4 valores de grises la densidad resultaba  $\sim 1 \text{ gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$  y con 6, la densidad aumentaba hasta  $\sim 2 \text{ gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , lo cual no es congruente con la densidad reportada para corales del género *Porites*; mientras que las muestras de IM, con tamaños reducidos de lajas, estuvieron influenciados casi en su totalidad por el efecto de borde, por ello se verificó cuál de los dos ajustes se emplearía para el cálculo de densidad (ver Anexo B para mayor detalle).

Basándose en los resultados presentados en el anexo B, los corales colectados en IM presentan un mayor tamaño de coralito (evaluando área y diámetro calculado en base al perímetro) que los corales de CP. Lo anterior se supone está relacionado con una mayor amplitud de los espacios entre septos y posiblemente menor grosor de teca, por lo tanto, pudiera ser un indicador de una menor densidad esquelética de IM con respecto a CP. Con esto, se seleccionó un ajuste de grises menor a CP, es decir, un ajuste de densidad con utilizando 4 valores del estándar, ya que de escoger 5 valores de gris la densidad fue muy similar a CP, aun siendo influenciado por el efecto de borde. Se asumió una subestimación de la densidad esquelética calculada por el efecto de borde entre  $\sim 13\text{-}15\%$  (Ver Anexo B para mayor detalle).

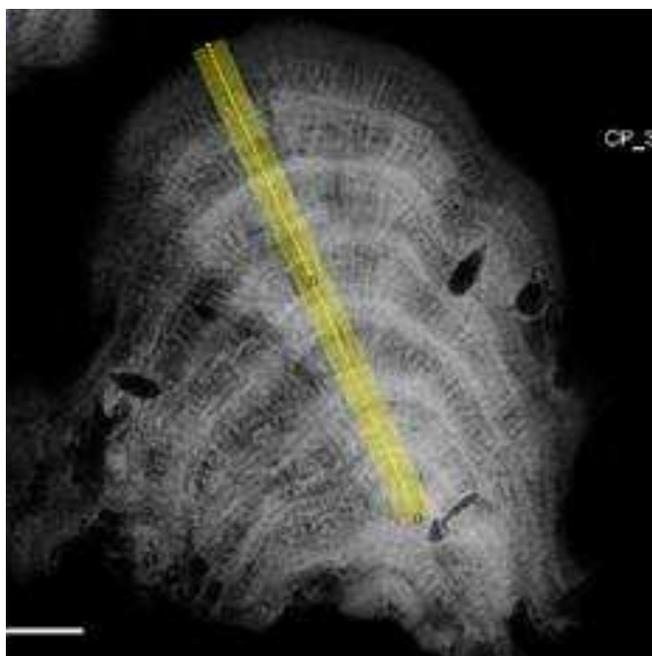
### **VI.3.3. Medición de parámetros de crecimiento**

#### **Selección de perfil de densidad**

Para obtener un perfil de densidad óptica de cada imagen de coral, se trazó un área de 4 mm de ancho y longitud variable sobre el eje de crecimiento principal (eje vertical, Figura 11). La selección del área para la medición de densidad (*track* o perfil de densidad)

en cada laja se basó en las siguientes características (Barnes y Lough, 1992; Lough y Barnes, 2000):

- 1) el área debe presentar bandeo de densidad,
- 2) estar ubicada dentro de la región del eje de crecimiento principal, identificable como zona donde el bandeo presenta una mínima curvatura,
- 3) estar perpendicular al bandeo de densidad,
- 4) presentar la menor erosión posible, y
- 5) no presentar sobre-crecimiento de coral u otras imperfecciones en la macroarquitectura del bandeo.



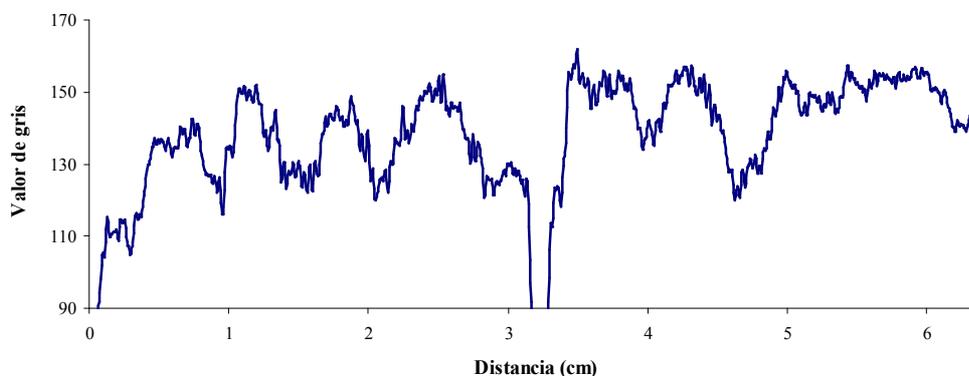
**Figura 11. Imagen en negativo de radiografía del coral CP\_3. Se presenta el área de estudio (*track*, banda amarilla) sobre el eje principal de crecimiento, se aprecia el bandeo de densidad con bandas hialina (baja densidad) y oscura (alta densidad).**

#### Perfiles de densidad esquelética

Se obtuvo la intensidad de gris<sup>3</sup> sobre la distancia (cm) por píxel a lo largo del área de interés, con esto se genera un perfil de densidad óptica (Figura 12), donde cada píxel en el perfil es el promedio de 80 píxeles a lo ancho del área de medición.

---

<sup>3</sup> Promedio de 80 píxeles de ancho.



**Figura 12. Gráfica de perfil de densidad óptica. Se presenta la densidad óptica (valor de gris) y distancia por píxel (cm), la oscilación del perfil de densidad representan las bandas de alta y baja densidad.**

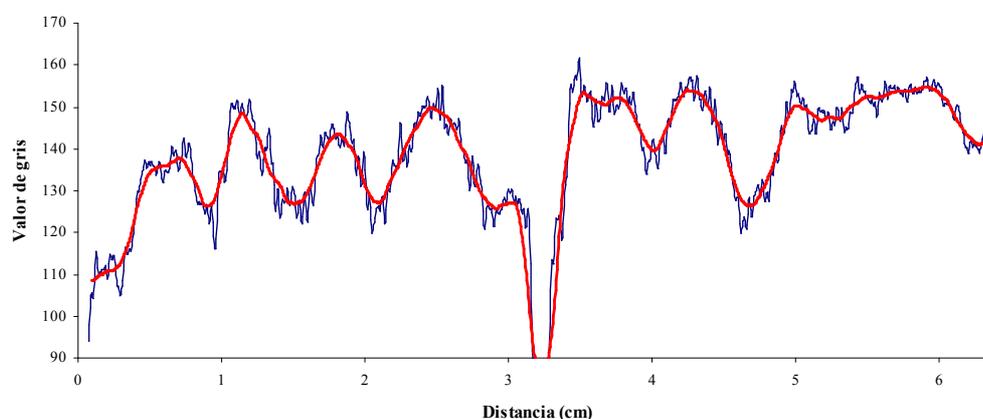
En un perfil de densidad cada píxel tiene asociado un valor de intensidad de gris (0-256); con el fin de aumentar el tamaño de muestra la serie de datos de cada perfil medido (con un ancho de 80 píxeles o 0.4cm) fue seccionado en tres conjuntos de datos o tres perfiles de densidad de menor tamaño (con un ancho de 0.10cm o 20 píxeles) separados 0.05cm (10 píxeles) entre sí. En estudios previos se ha medido sólo un perfil de densidad en cada laja de coral, para obtener parámetros de crecimiento (extensión, densidad y calcificación) en colonias del género *Porites* (Barnes y Lough, 1992; Lough y Barnes, 1997; 2000; Cooper *et al.*, 2008).

Se midió el grosor de la laja cada centímetro a lo largo del perfil de densidad con un micrómetro digital (*Mitmutoyo Inc.*; 0.1mm de precisión). Para obtener un grosor de laja continuo por cada píxel del perfil, se interpolaron los valores mediante regresión lineal entre intervalos medidos adyacentes. Otros autores reportan mediciones cada 10mm sobre el perfil (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007c).

Los valores de densidad óptica transformados al logaritmo natural, fueron promediados cada 0.2cm sobre el perfil<sup>4</sup> con el fin de obtener una mejor definición de la variación anual, al reducir el efecto de la porosidad observada en las imágenes (Figura 13). La media móvil es un filtro de paso bajo que en este caso produce una reducción de la señal

<sup>4</sup> Media móvil de 41 píxeles ó 0.2cm.

de densidad, es decir, los picos de alta densidad se reducen y los picos de baja densidad aumentan (eje Y o valor de gris) (Figura 13).



**Figura 13.** Gráfica de perfil de densidad suavizado. Se presenta la densidad óptica (línea azul discontinua) y la densidad óptica promediada cada 0.2cm (línea roja continua).

Se establece la siguiente ecuación (2) cuando la exposición (energía de rayos X y tiempo de exposición) de una laja de coral fue igual al estándar de aragonita en una misma radiografía:

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

Así la densidad del coral ( $P_{\text{coral}}$ ) y su grosor ( $X_{\text{coral}}$ ) son equivalentes a la densidad ( $P_{\text{estándar}}$ ) y grosor del estándar ( $X_{\text{estándar}}$ ), permitiendo conocer la densidad del coral (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007c):

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

Al combinar la ecuación 3 y 1 del ajuste de la escala de gris, se obtiene una ecuación (4) que permite calcular la densidad esquelética para las lajas de coral dentro de una radiografía:

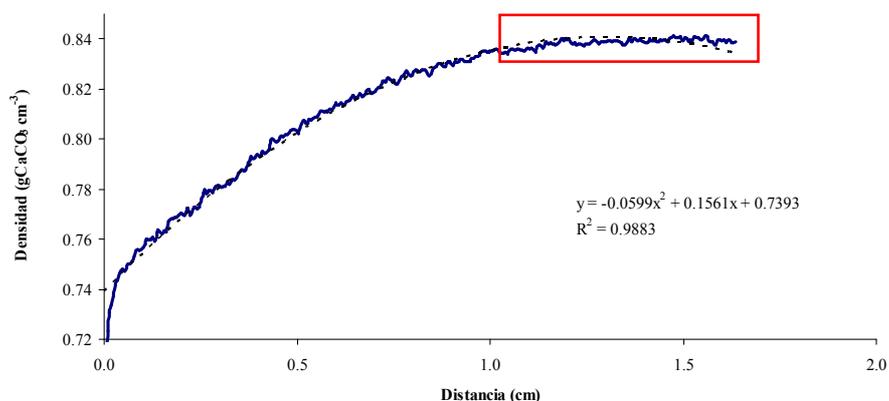
$$P_{\text{coral}} = [ (\ln DO - b) / a ] / X_{\text{coral}} \quad (4)$$

Los tres ajustes de escala de grises en cada bloque arrojaron densidades diferentes con una baja variación en cada radiografía ( $CV < 5\%$ ), resultado del efecto de borde, por lo

que se utilizó el promedio de los tres ajustes de densidad para describir un solo perfil por laja de coral.

Para estimar la densidad de las muestras de IM –las cuales fueron analizadas en una sola radiografía- las densidades fueron corregidas para el efecto de borde, para lo cual se supuso que:

- 1) el efecto de borde es similar al *heel effect* (efecto de talón) descrito por Carricart-Ganivet y Barnes (2007c), con esto se consideró que: a) puede ser corregido en el área de la imagen de la laja de coral, basándose en la medición del efecto en un material estándar, en este caso se usó el bloque de aragonita de mayor grosor (1.19cm) al no tenerse otro estándar en la radiografía (p.e. estándar de aluminio), y b) que tal corrección fuera estimada y aplicada para cada radiografía,
- 2) el efecto de borde es constante, tanto en el eje ánodo-cátodo, como en el eje lateral (derecha-izquierda), es decir, aunque no se pudo precisar se asume que no presenta variación con relación a la orientación. Con esto, se midió el efecto de borde en la sección central (Figura 11) sobre el eje lateral derecho de la imagen del bloque de aragonita de mayor grosor. En esta orientación el efecto sólo afectó un lado del bloque, a diferencia de la orientación del eje ánodo-cátodo, el cual abarca gran parte del área de la pieza,
- 3) se supone que la atenuación de la intensidad de gris, provocada por el efecto de borde, presenta un ajuste polinomial de segundo orden ( $y=ax^2+bx+c$ ) en todos los cuerpos presentes en la radiografía, el cual describe una curva en aumento de la intensidad de gris hasta la asíntota, donde se asume no está influenciada por el efecto (recuadro rojo en figura 13). En la radiografía de las colonias de IM el ajuste fue alto (99%) (Figura 14),

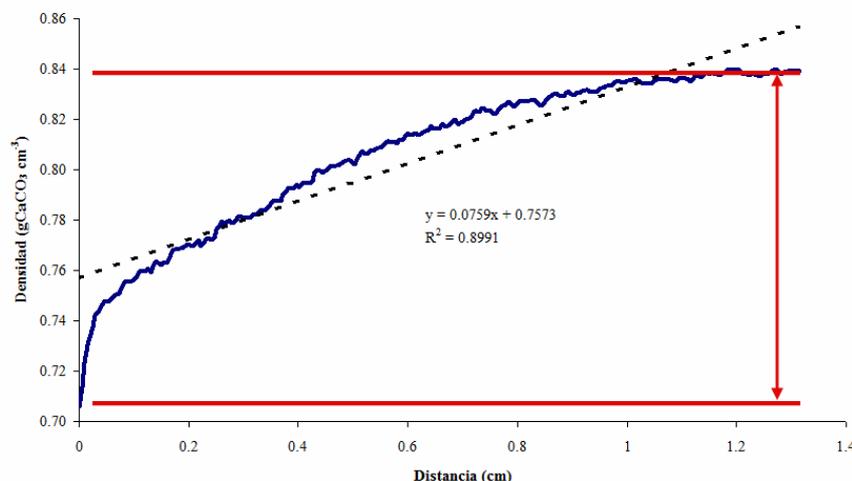


**Figura 14.** Gráfica y ajuste polinomial de la densidad vs. distancia de la sección lateral del bloque de aragonita de mayor grosor. Se muestra la densidad a lo largo del perfil (línea azul continua), la curva ajustada (línea discontinua), área sin influencia del efecto de borde (recuadro rojo), modelo propuesto y grado de ajuste de datos ( $r^2$ ).

4) se supuso que el ajuste polinomial del perfil de densidad, puede segmentarse en dos líneas rectas. Se identificó el máximo de la curva (primera derivada), el cual indica la distancia a la cual la curva de densidad se vuelve asintótica (1.2–1.3cm) con una densidad  $\sim 0.84 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>5</sup> (Figura 17),

5) el conjunto de datos del perfil de densidad del bloque presentan un ajuste lineal hasta el máximo de la curva ( $r^2=0.90$ ), es decir, hasta donde comienza el comportamiento asintótico de los datos; del ajuste lineal se obtuvieron el valor mínimo y máximo de densidad observados (Figura 15) para establecer que, los valores dentro del área estaban subestimados en  $\sim 15\%$  con respecto a la zona sin efecto aparente,

<sup>5</sup> La densidad del bloque de mayor grosor presentada no es la correcta, debido a que sus valores de gris estuvieron por fuera del intervalo de la escala, pero fue de utilidad para analizar la pendiente de la curva del efecto de borde.



**Figura 15.** Gráfica y ajuste lineal de la densidad vs. distancia hasta el punto de inflexión del efecto de borde. Se muestra la densidad a lo largo del perfil (línea azul), la línea ajustada (línea punteada), el modelo propuesto y el ajuste de los datos ( $r^2$ ); valores mínimo y máximo de densidad en la recta (línea roja).

6) para efecto de generar un factor de corrección (aún subestimado), se supuso que el efecto subestimaba la totalidad del área de las lajas en una misma orientación, así como también, que la parte central de la recta es afectada en un 11.98% (Figura 15); así, los perfiles de densidad fueron corregidos multiplicándolos por un factor de 1.1198 a nivel de píxel en el perfil de densidad vs. distancia.

Las densidades corregidas con un factor de 1.1198 (11.98%) se suponen aproximadas, pero menores, a los posibles valores de densidad de los corales de IM; Carricart-Ganivet y Barnes (2007c) sugieren que las correcciones de los efectos deben ser realizados con estándares en la misma radiografía, debido a que existen múltiples fuentes de la variación entre radiografías.

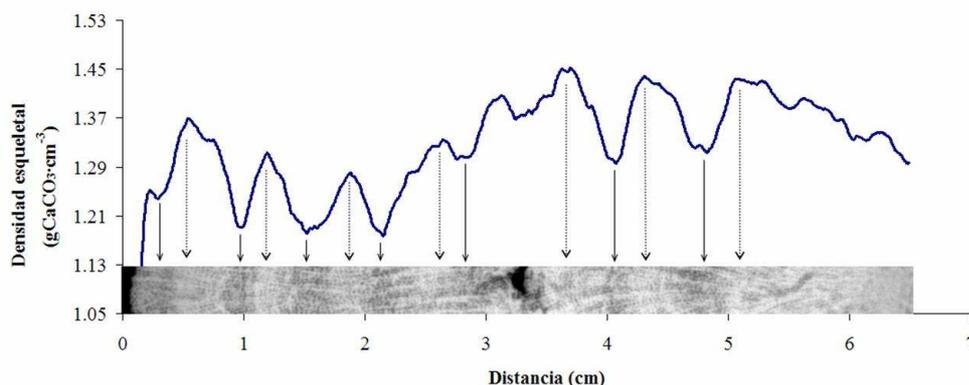
Los perfiles de densidad de los corales de CP no fueron corregidos por las siguientes razones: 1) las lajas de coral eran de mayor tamaño, 2) el efecto de borde afectaba el primer centímetro de la imagen y las bandas en el primer centímetro no fueron medidas.

### Medición de parámetros de crecimiento esqueletal

Para el género *Porites* se reporta un crecimiento anual de las colonias, evidenciado como un par de bandas oscura y clara en imágenes de radiografías, formando bandas de alta densidad en verano y baja densidad en invierno (Knuston, 1975 citado por Barnes y Lough, 1992).

Para este estudio se supuso que un par de bandas de distinta densidad (hialina y oscura) representa un año de crecimiento y que las bandas de baja densidad son formadas en invierno. En los perfiles de densidad se identificaron los picos de alta y baja densidad (Figura 16), un par de bandas fue incluido cuando:

- 1) las bandas hialina y oscura estuvieran definidas,
- 2) no presentaran erosión<sup>6</sup>,
- 3) el par de bandas fuera continua a lo largo del contorno de la imagen de la laja.



**Figura 16.** Perfil de densidad con altas y bajas densidades identificadas. En perfil de densidad (línea azul) se marcaron picos de alta densidad (flecha discontinua) y baja densidad (flecha continua) sobre una imagen del área de medición de la laja de coral.

Para propósitos del cálculo de la producción potencial, los parámetros de densidad y crecimiento en extensión fueron medidos en curvas de densidad anuales sin relacionarlos con la fecha, es decir, no se realizó el análisis esclerocronológico, ya que las colonias presentaron un alto grado de erosión; en el Anexo C se presentan los perfiles de densidad

<sup>6</sup> Cuando las marcas de erosión eran de tamaño reducido se ubicaron en el perfil de densidad y fueron eliminados los valores de píxel correspondientes.

de cada laja de coral analizada. A continuación se definen las variables medidas y en la figura 17 se presenta un esquema de una curva de densidad:

*Parámetros de densidad*

1. Alta densidad anual (AD)= Valor puntual del máximo de densidad observado, identificable como una cresta en la curva de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ).
2. Baja densidad anual (BD)= Valor mínimo de densidad esquelética medido, identificable como una depresión en la curva de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ); con el fin de reportar la menor densidad observada en cada par de bandas, esta variable se midió sin definir baja densidad inicial o final.
3. Baja densidad inicial (BD\_Inicial)= Valor de densidad inmediato a la baja densidad del año anterior ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ).
4. Baja densidad final (BD\_Final)= Valor de baja densidad final del año analizado ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ).
5. Densidad promedio anual (Dens\_Prom)= Promedio aritmético entre la alta densidad (AD) y baja densidad (BD) medidas  $[(AD+BD)/2]$ . Reportada como *bulk density* por Lough y Barnes (1997), en este trabajo se empleó la media aritmética debido a que representa el valor central de los valores distribuidos entre el valor máximo (AD) y mínimo de densidad (BD) medidos en una curva ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ).
6. Diferencia entre la mínima y máxima densidad anuales (Dif\_AD-BD)= Magnitud de la diferencia entre la alta (AD) y la baja densidad observada (BD) ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ).
7. Proporción de la alta densidad (Prop\_AD)= Ubicación de la alta densidad (AD) con respecto a la baja densidad inicial (BD\_Inicial) como proporción de la curva, sus valores son menores a 1.

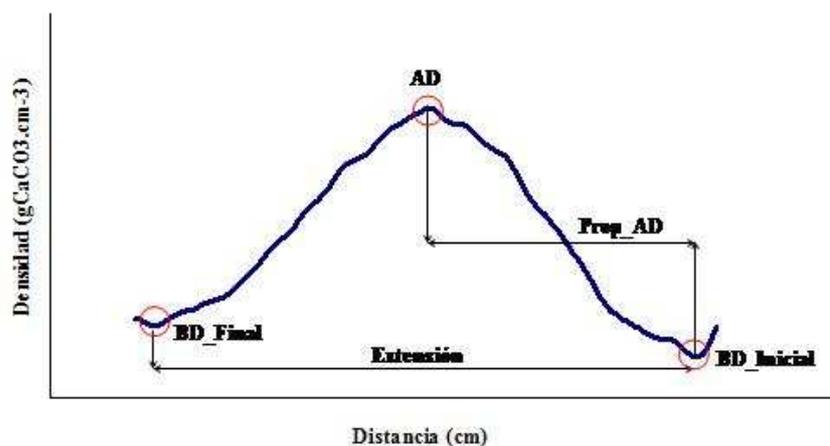


Figura 17. Esquema de una curva de densidad anual. Se muestra los valores puntuales medidos, densidad (círculo rojo), baja densidad inicial (DB\_Inicial), baja densidad final (BD\_Fina) como valles de la curva y alta densidad (AD) como cresta; la proporción de la alta densidad (Prop\_AD) y la extensión esquelética fueron calculados.

#### *Tasa de extensión esquelética*

8. Extensión esquelética anual (Extensión) = Distancia lineal entre dos bajas densidades adyacentes (BD), mide el crecimiento del coral en el lapso de aproximadamente un año, calculada como  $Extensión = BD\_Inicial - BD\_Final$  ( $cm \cdot año^{-1}$ ).

La extensión esquelética fue medida sobre el eje principal de crecimiento (SE= sobre eje) y en secciones laterales fuera de este (FE= fuera de eje) en un área con 0.1cm de grosor.

#### *Tasa de calcificación*

9. Tasa de calcificación anual (Calcificación) = Cantidad de  $CaCO_3$  depositado por unidad de área anualmente, calculada como el producto de la extensión y densidad promedio anual (Dens\_Prom) ( $gCaCO_3 \cdot cm^{-2} \cdot año^{-1}$ ).

### **VI.4. Estimación de la producción potencial de carbonato de calcio**

Se evaluó la producción potencial de carbonato de calcio (Pn) con dos aproximaciones:

- 1) A nivel localidad se calculó como el producto de la tasa de calcificación anual promedio y el promedio de cobertura de coral por localidad:

$$Pn = (\text{Promedio de tasa de calcificación}) \times (\% \text{ promedio de cobertura de coral total}) \quad (5)$$

2) A nivel de transecto de cobertura por localidad, se calculó la Pn como el producto de la tasa de calcificación anual y el porcentaje de cobertura de coral por transecto (Ec. 6) para obtener valores de dispersión e intervalos de confianza de la producción potencial.

$$Pn = (\text{Promedio de tasa de calcificación}) \times (\% \text{ promedio de cobertura por transecto}) \quad (6)$$

### VI.5. Validación del conteo de bandas anuales

Se realizó una lectura por tres lectores independientes para determinar el número de par de bandas por coral en imágenes de 20 radiografías de laja del coral, asumiendo que un par de bandas (hialina y oscura) representan un año. Los lectores no tenían experiencia en la determinación de edad (número de par de bandas), por lo que se esperaba una alta variación en la determinación de la edad a niveles de colonia y localidad.

Los lectores recibieron un entrenamiento introductorio sobre la metodología para el conteo de bandas y la interpretación de las muestras, así como un ejercicio de conteo de años en una laja de coral. Se realizaron los conteos aisladamente en una sola sesión (octubre de 2009). Para el conteo de bandas anuales se utilizaron imágenes de radiografías de contacto de los corales en formato impreso y digital, con el máximo contraste posible; las imágenes fueron arregladas de manera aleatoria sin definir el sitio de procedencia, y escaladas con respecto al tamaño de la imagen (~15x20cm) para disminuir el sesgo con relación al tamaño-número de bandas. Para el análisis se escogieron los corales cuando tenían 2 o más conteos de bandas, es decir, si un coral presentaba sólo una lectura (un lector) se excluyó del análisis.

Ante la ausencia de sesgos demostrables, debido a la subjetividad del patrón de bandeo anual, del lector y de sus habilidades, se emplearon medidas de precisión para evaluar la variación interlectores para cada laja. Beamish y Fournier (1981, citado por Campana *et al.*, 1995) propone el uso del porcentaje de error promedio a nivel de organismo (*APE* por sus siglas en inglés) de la siguiente manera:

$$APE_j = 100 \times 1/R \sum_{i=1} (X_{ij} - X_j) / X_j \quad (7)$$

Donde:

$APE_j$ : porcentaje de error promedio a nivel de muestra,  
 $X_{ij}$ : la i-esima determinación de la edad de la j-esima muestra,  
 $X_j$ : promedio de edad de la j-esima muestra,  
 R: número de veces que la muestra fue leída.

Chang (1982, citado por (Campana *et al.*, 1995) propuso un índice con base a la desviación estándar, modificando la ecuación 6 para obtener el coeficiente de variación (CV) (Ec. 8) a nivel organismo, como una proporción de la desviación estándar sobre el promedio:

$$CV_j = 100 \times [\sqrt{\sum(X_{ij} - X_j)^2 / R-1}] / X_j \quad (8)$$

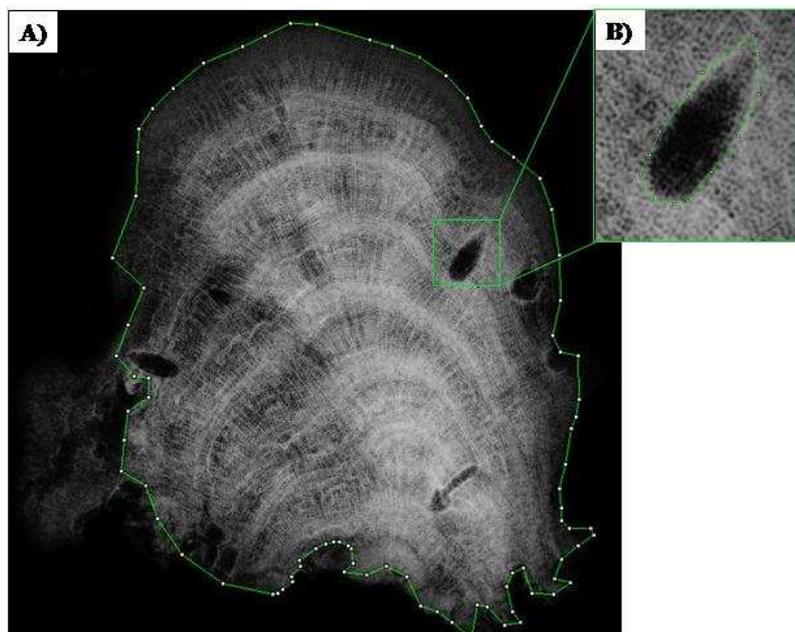
Donde:

$CV_j$ : coeficiente de variación a nivel de muestra,  
 $X_{ij}$ : la i-esima determinación de la edad de la j-esima muestra,  
 $X_j$ : promedio de edad de la j-esima muestra,  
 R: número de veces que la muestra fue leída.

Debido al corto tiempo para realizar este trabajo y a la disponibilidad de lectores independientes, sólo se realizó un conteo de bandas.

#### **VI.6. Estimación de porcentaje de erosión**

Para estimar el porcentaje de erosión presente en las lajas de coral; para esto se midió el área total (cm<sup>2</sup>) de la laja en la imagen de radiografía, siguiendo el contorno del coral con el programa ImageJ y excluyendo secciones de laja que presentaran erosión superficial (Figura 18A). Posteriormente se midió el área de las huellas o rastros de erosión dentro de la imagen de la laja (Figura 18B). El porcentaje de erosión por laja de coral se calculó como el cociente de la suma de las áreas de huellas de erosión medidas y el área total de la laja. Se usó la laja de coral real como referencia para verificar los límites de cada área medida. No se clasificó el origen de las huellas de erosión encontradas.



**Figura 18.** Imagen de radiografía para medida de erosión. En A se muestra la medición del área de la laja, en B se presenta la medición del área de una huella de erosión.

### VI.7. Análisis estadístico

Los parámetros de crecimiento se analizaron en dos niveles: 1) a nivel colonia, valores de parámetros de crecimiento agrupados por colonia, con el fin de conocer las posibles diferencias entre las muestras colectadas, y 2) a nivel localidad, incluye la totalidad de valores sin hacer distinción de colonias con el objetivo de obtener parámetros de crecimiento y densidad que representen la localidad.

A nivel colonia se compararon las variables de densidad, extensión y calcificación entre colonias mediante el estadístico H de Kruskal-Wallis, alternativa no-paramétrica de análisis de varianza de una vía, para probar la hipótesis de que no existen diferencias en la distribución de las medianas entre colonias para cada variable.

Se presentan  $\text{media} \pm \text{desviación estándar}$  en los resultados y gráficos, ya que las distribuciones fueron aproximadas a la curva normal al ser evaluadas en histogramas, gráficas de normalidad e índice de asimetría.

A nivel localidad se compararon los valores promedio de la totalidad de las muestras de las variables de densidad, extensión y calcificación mediante el estadístico T de

Student para muestras independientes. Las variables mostraron distribuciones aproximadas a la normal y se presentan media±desviación estándar en resultados y gráficos; se definió significancia para  $p < 0.05$ . Para evaluar la relación entre parámetros de crecimiento se utilizó el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson, definiendo correlación alta cuando  $r > 0.30$ . Los resultados a nivel localidad se presentan con intervalo de confianza bootstrap estándar (95%) con 10,000 remuestras (Manly, 2007).

Las variables de edad y medidas de precisión de edad se presentan descritas por media±desviación estándar en tablas y gráficos. Para comparar la tasa de erosión se utilizó el estadístico U de Mann-Whitney, pero se presentan media±desviación estándar en tablas y gráficos.

## VII. RESULTADOS

### VII.1. Determinación de edad en las colonias colectadas

Se determinó la edad de las colonias de coral colectadas por localidad mediante un conteo del número de par de bandas (hialina y oscura) en 20 lajas de coral; para las muestras de CP (n=12), la colonia CP\_1 no mostró patrón de bandeo, posiblemente debido a un corte de laja fuera del eje de crecimiento, y las colonias, CP\_2 y CP\_9 fueron excluidas de los análisis por que sólo tenían resultados de un lector; en IM se incluyeron la totalidad de las colonias colectadas (n=8). La edad promedio del total de colonias colectadas en ambas localidades fue  $5.2 \pm 2.3$  años.

A nivel colonia la edad promedio en CP (Tabla VII) fue de entre 3-8.3 años, con error porcentual alto (>5%). El CV entre lectores fue igualmente alto: entre 13.9-71.6%; sólo en la colonia CP\_4 los lectores coincidieron en la determinación de la edad (4 años); para IM (Tabla VII) la edad promedio de las colonias se presentó entre 2-5.7 años, con errores inter lector altos (>5%), el CV fue alto (9.1-43.3%).

A nivel de localidad, las colonias de IM presentaron una edad promedio ( $\pm$ DT) menor a CP ( $4.3 \pm 1.5$  y  $6 \pm 2.7$  años, respectivamente), el APE promedio por coral para CP fue 24.3% y 13.3% para IM, el CV promedio fue mayor en las colonias de CP (34.7%) que IM (17.7%).

Posteriormente se realizó un análisis más detallado de cada par de bandas encontradas en cada colonia por un solo lector; esto debido a la alta variación entre lectores, arrojando que la colonia CP\_12 presentó la mayor edad (15 años) y las demás colonias de CP presentaron menor número de pares de bandas (ver Anexo C para mayor detalle de los perfiles de densidad).

**Tabla VII. Medidas de precisión en la determinación de la edad y número de pares de bandas medidas a nivel de colonia para las localidades de Cabo Pulmo (CP) e Islas Marietas (IM). Se presentan los resultados por laja de coral de Edad= promedio de edad, APE= porcentaje de error promedio por coral, CV= coeficiente de variación por coral, el número de bandas incluidas en el análisis densitométrico y el número de perfiles de densidad medidos por coral. (\*) Colonia con una lectura de edad.**

Localidad	Código de laja de coral	Edad (años)	APE (%)	CV (%)	Bandas medidas	Perfiles de densidad medidos
CP	CP_1	4.5	40.7	71.6	1	3
	CP_2*	5.0	---	---	---	---
	CP_3	6.7	26.7	37.7	5	15
	CP_4	4.0	0.0	0.0	2	6
	CP_5*	3.0	---	---	---	---
	CP_6	6.7	23.3	31.2	4	12
	CP_7	5.3	45.8	60.3	3	9
	CP_8	8.3	10.7	13.9	5	15
	CP_9	---	---	---	---	---
	CP_10	4.7	19.0	24.7	3	9
	CP_11	6.3	17.5	24.1	5	14
	CP_12	8.3	34.7	48.5	6	18
IM	IM_1	2.0	0.0	0.0	1	2
	IM_2	6.3	7.0	9.1	5	11
	IM_3	2.3	19.0	24.7	---	---
	IM_4	4.0	16.7	25.0	---	---
	IM_5	5.7	7.8	10.2	4	12
	IM_6	4.3	10.3	13.3	3	8
	IM_7	5.3	33.3	43.3	---	---
	IM_8	3.7	12.1	15.7	2	6

## VII.2. Descripción de parámetros de crecimiento de *Porites panamensis*

Se presentan los resultados de las tasas de crecimiento y densidad calculadas en dos niveles: a) a nivel de colonia y b) a nivel localidad. Como se mencionó anteriormente en materiales y métodos (medición de parámetros de crecimiento), para efecto de aumentar el tamaño de muestra, se midió sobre el eje principal de crecimiento un perfil de densidad de 0.4cm de ancho en cada laja, el cual fue dividido en tres perfiles de menor grosor (0.10cm) para obtener varios perfiles de densidad individuales por cada laja (Tabla VII, Anexo C). Con esto se obtuvieron un máximo de tres valores de densidad, extensión y calcificación para cada par de bandas en cada laja.

Para IM se incluyeron un total de 15 pares de bandas (39 perfiles de densidad), en un intervalo entre 1 (IM\_1) a 5 (IM\_2) pares de bandas por muestra; para CP se incluyeron

34 pares de bandas (101 perfiles de densidad) en un intervalo entre 1 (CP\_1) a 6 (CP\_12) bandas.

### **VII.2.1. Densidad esquelética**

#### **VII.2.1.1. Densidad esquelética por colonia**

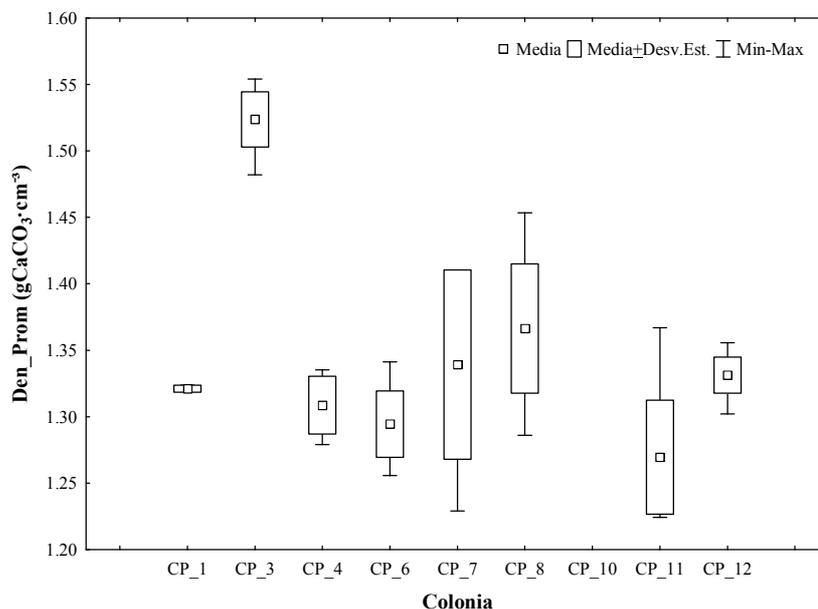
##### Cabo Pulmo

Se midieron los valores de densidad presentes en la curva de densidad suponiendo crecimiento anual por par de bandas. Se omitieron del análisis comparativo los valores de densidad de la colonia CP\_1 por su reducido tamaño de muestra (número de perfiles y bandas) y de la CP\_10 debido a que no se obtuvo un ajuste óptimo de escala de densidad.

La densidad promedio (Den\_Prom) presentó diferencias significativas entre colonias ( $H=58.3$ ,  $p=0.00$ ); la colonia CP\_3 mostró una densidad aproximadamente 16% mayor ( $1.52 \pm 0.02 \text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) al resto de las colonias, las cuales se distribuyeron en densidades promedio entre  $1.22$ - $1.40 \text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , los valores elevados de esta colonia fueron independientes con respecto al resto de lajas en la misma radiografía (CP\_6 y CP\_7) y no estuvo relacionado con un mayor grosor de laja; la dispersión de los valores con respecto a la media (evaluada mediante  $CV^7$ ) fue menor a 5.3% por colonia (Figura 19, Tabla 2 en Anexo A).

---

<sup>7</sup> Coeficiente de variación.



**Figura 19.** Gráfica de caja de la variable densidad promedio (Den\_Prom) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

Para la variable de alta densidad (AD) se presentaron valores entre 1.27 y  $1.61\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  (Tabla 2 en Anexo A). Se encontraron diferencias significativas entre las colonias ( $H=54.0$ ,  $p=0.00$ ), en las que CP\_3 gráficamente mostró los valores más altos ( $1.58\pm 0.02\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) aproximadamente 14% mayor al promedio del resto de las colonias ( $\sim 1.38\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) (Figura 20). El CV en promedio estuvo por debajo del 5% lo que señala una baja dispersión dentro de cada colonia.

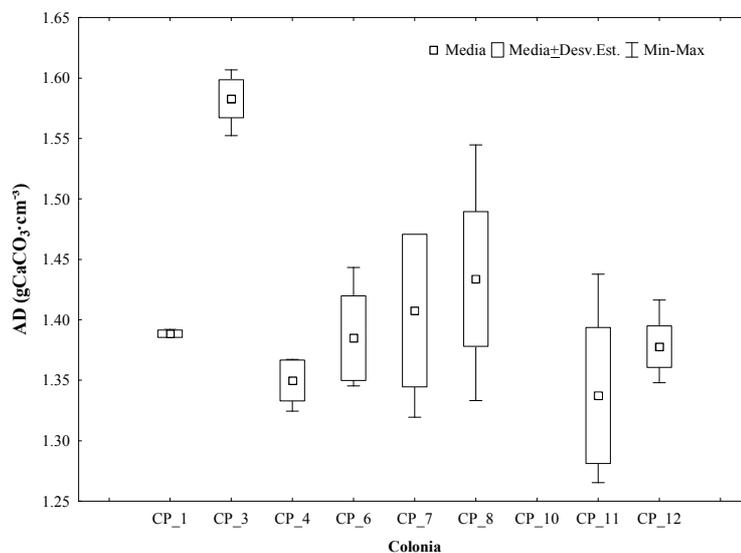


Figura 20. Gráfica de caja de la variable alta densidad (AD) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

De manera similar, la variable baja densidad (BD) fue diferente entre colonias ( $H=59.2$ ,  $p=0.00$ ) (Tabla 2 en Anexo A) distribuyéndose entre  $1.14$  y  $1.52$   $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , la colonia CP\_3 mostró la tendencia a presentar valores promedio de BD altos ( $1.46 \pm 0.03$ ) con relación al resto de las colonias ( $\sim 1.25$   $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) (Figura 21).

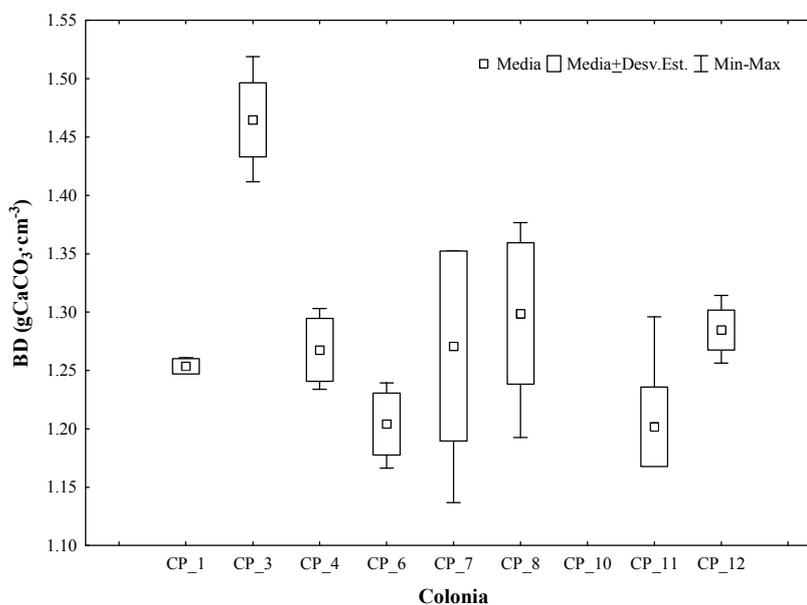
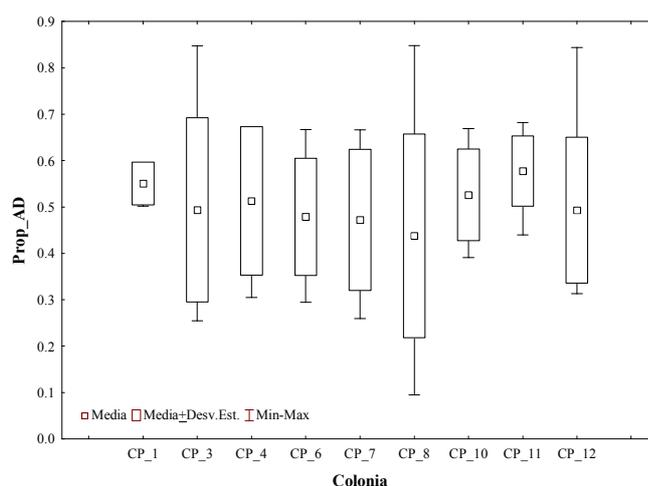


Figura 21. Gráfica de caja de la variable baja densidad (BD) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

La baja densidad inicial (BD\_Inicial) fue significativamente diferente entre colonias ( $H=60.8$ ,  $p=0.00$ ), los valores promedio se hallaron entre  $1.21$  y  $1.50\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ . De manera similar en la BD\_Inicial las colonias presentaron diferencias significativas ( $H=53.2$ ,  $p=0.00$ ) y sus valores promedio se encontraron entre  $1.23$  y  $1.49\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  dentro de un intervalo similar. No se pudo comprobar si las diferencias entre estas BDs (inicial y final) eran constantes entre colonias, debido al incumplimiento de las condicionantes que requiere un análisis de varianza de dos vías, mismo que ayudaría a explicarlo. Sin embargo, en ambas BDs los CVs promedio entre colonias fueron menores a 5% (Tabla 2 en Anexo A), más adelante se presentan los resultados sobre la diferencia entre ambas variables dentro de cada localidad.

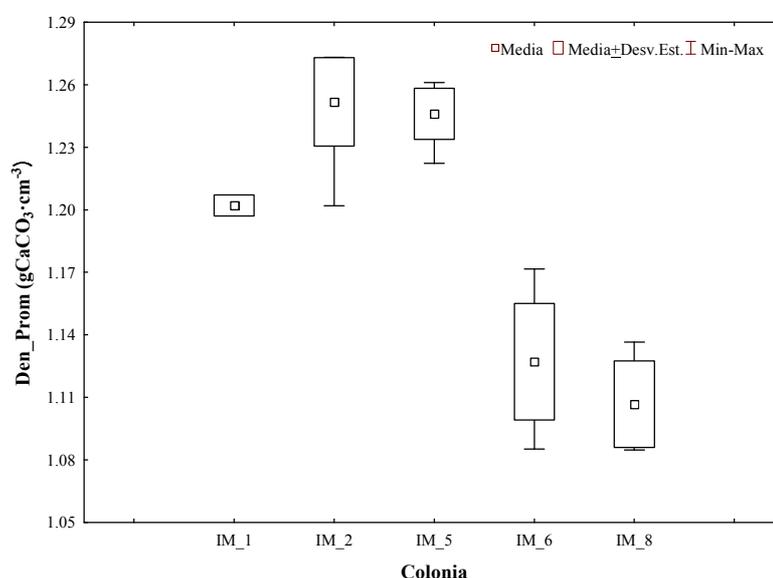
Otro parámetro de interés fue la proporción donde se ubicó la alta densidad (Prop\_AD), calculada con respecto a la BD\_Inicial (Figura 17). Ésta señala que para CP la ubicación de la AD en la curva de densidad fue diferente entre colonias ( $H=55.5$ ,  $p=0.00$ ) con un promedio entre  $0.44\pm 0.22$  y  $0.58\pm 0.08$  (CP\_8 y CP\_11 respectivamente), con alta variación ( $CV\sim 30\%$ ); el mayor CV lo presentó la colonia CP\_8 (Figura 22; Tabla 2 en Anexo A). Al revisar la imagen y el perfil de densidad en distintos sitios de la laja se pudo observar que la alta variabilidad en la Prop\_AD pudiera deberse a que la laja fue cortada fuera del eje de crecimiento, lo cual influyó en la medición de esta variable (30% de sus valores de Prop\_AD fueron menores a 0.25).



**Figura 22.** Gráfica de caja de la variable proporción de la alta densidad (Prop\_AD) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

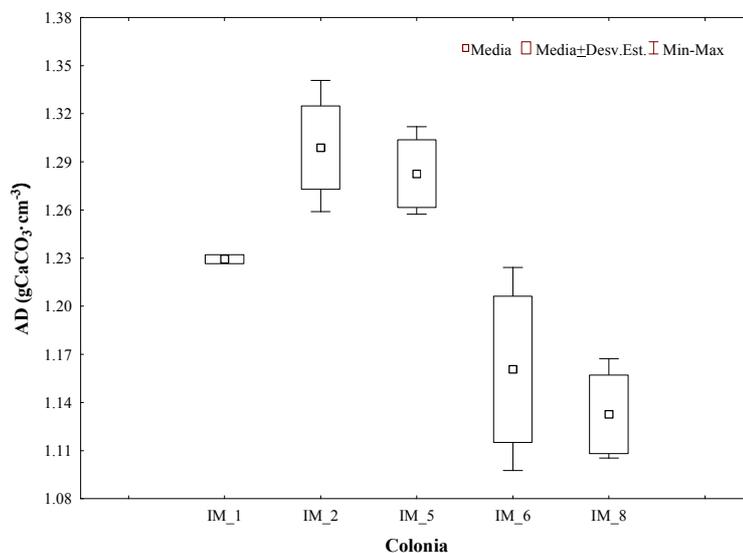
### Islas Marietas

Se excluyeron del análisis 3 colonias (IM\_3, IM\_4 e IM\_7) debido que no presentaron un bandeo de densidades claro, y la colonia IM\_1 por el reducido tamaño de muestra. Al comparar la densidad promedio de las colonias de IM (Figura 23, 4 colonias) se observaron diferencias ( $H=26.5$ ,  $p=0.00$ ), con valores entre  $1.11$  y  $1.25 \text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$  por colonia, la dispersión dentro de las colonias con respecto a su media (CV) pudiera deberse a dos factores, al efecto de borde y a la variabilidad interanual de la densidad, en todas las colonias fue menor a 5% (Tabla 3 en Anexo A).



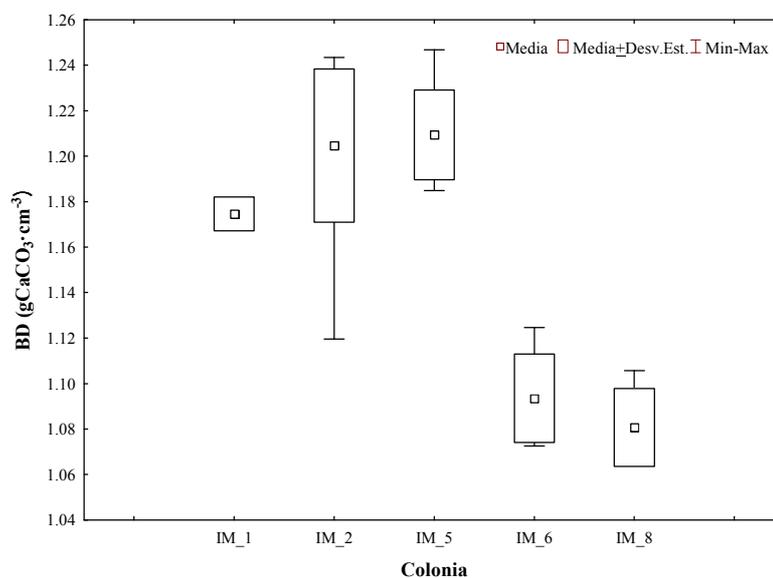
**Figura 23.** Gráfica de caja de la variable densidad promedio (Den\_Prom) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

La alta (AD) y la baja densidad (BD) medidas fueron diferentes entre colonias ( $H=26.2$ ,  $p=0.00$ ) (Figura 24 y 25). La diferencia entre la alta y baja densidad (Dif\_AD-BD) no fue significativa entre colonias ( $H=5.21$ ,  $p=0.16$ ); las diferencias fueron de  $\sim 0.07 \text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .



**Figura 24.** Gráfica de caja de la variable alta densidad (AD) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

La baja densidad inicial y final fueron diferentes entre colonias ( $H=25.5$ ,  $p=0.00$  y  $H=24.6$ ,  $p=0.00$ , respectivamente), algunos de los valores dentro de la colonia CP\_2 pudieran estar influenciados por el efecto de borde (Tabla 3 en Anexo A), evidenciado por una alta dispersión de los valores de BD\_Final, los cuales en su mayoría se encontraban cercanos al margen de la laja.



**Figura 25.** Gráfica de caja de la variable baja densidad (BD) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

La proporción en la que se ubicó la AD (Prop\_AD) no fue significativamente diferente entre colonias ( $H=7.03$ ,  $p=0.07$ ); las cuatro colonias presentaron la cresta de AD entre el 0.3-0.5 del perfil de densidad (Tabla 3 en Anexo A).

### VII.2.1.2. Densidad esquelética por localidad

La estadística descriptiva calculada anualmente para las variables de densidad por localidad, está presentada en la tabla VIII. La densidad promedio (Den\_Prom) de CP fue mayor a IM ( $T=9.69$ ,  $p=0.00$ ) en aproximadamente 11%. La variación dentro de cada localidad fue relativamente baja ( $CV=5-6\%$ ), la densidad promedio para CP se distribuyó en un intervalo entre 1.34 y 1.37  $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$  ( $1.35 \pm 0.09 \text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) y para IM entre 1.18 y 1.22  $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$  ( $1.20 \pm 0.07 \text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) utilizando valores corregidos (Figura 26). Esta diferencia aún puede estar sesgada por el efecto de borde. Sin embargo, esta tendencia se observó en el análisis de coralitos realizado (Anexo B). La distribución de la densidad promedio de CP presentó un sesgo hacia valores de densidad altos poco frecuentes (asimetría=0.90), a diferencia de IM con un sesgo con valores bajos de densidad poco frecuentes (asimetría=-0.59).

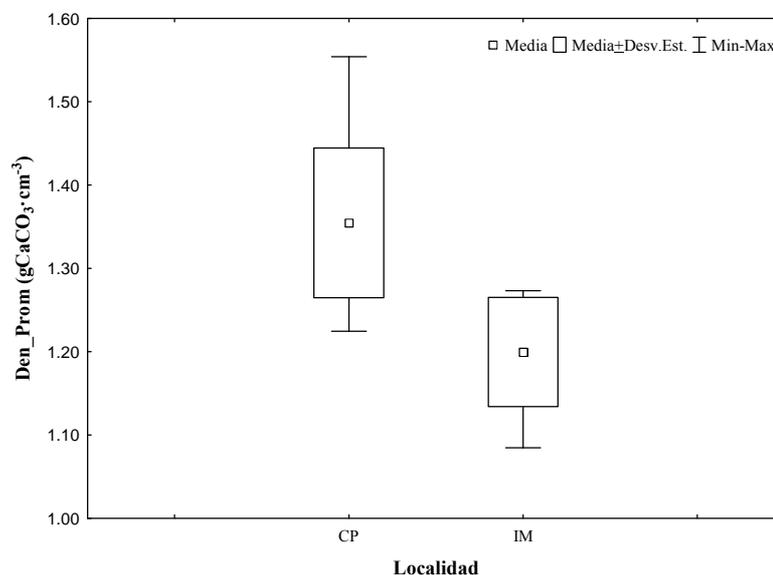
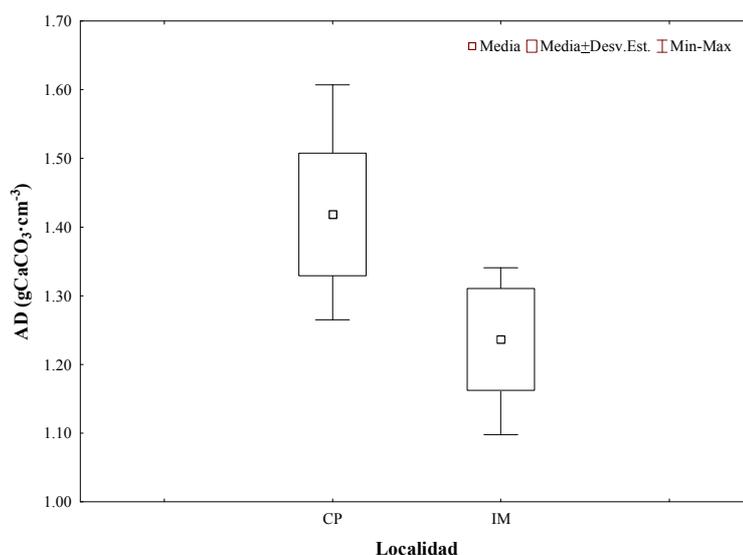


Figura 26. Gráfica de caja de la variable densidad promedio (Den\_Prom) a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

La alta densidad (Figura 27) presente en CP fue mayor que en IM ( $T=11.14$ ,  $p=0.00$ ), CP se encontró en el intervalo  $1.40$  y  $1.44\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $1.42\pm 0.09\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), mientras que IM entre  $1.21$  y  $1.26\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $1.24\pm 0.07\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), la variación intralocalidad fue baja ( $CV\sim 6\%$ ). La variable alta densidad estuvo sesgada hacia valores altos en CP debidos a 1 colonia en particular (CP\_3), pero la localidad está representada por una densidad máxima promedio de  $1.42\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ .



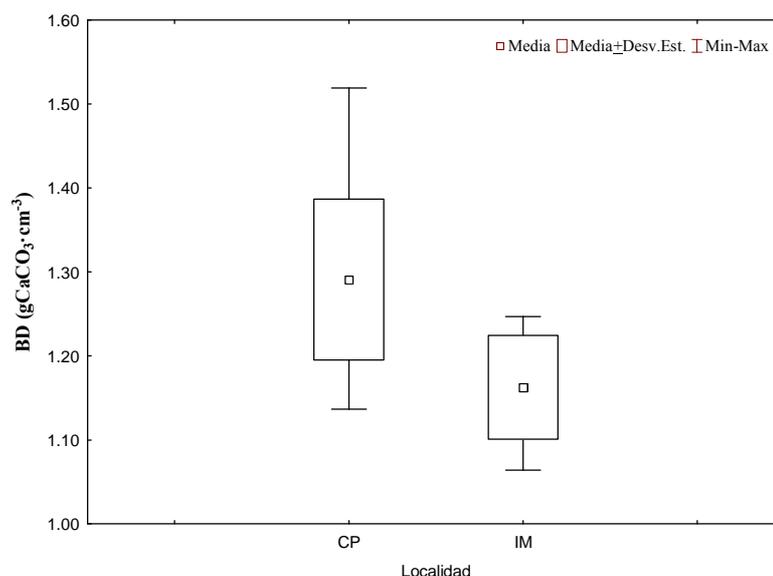
**Figura 27.** Gráfica de caja de la variable alta densidad (AD) a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

Igualmente la baja densidad (BD) fue significativamente mayor para CP que IM ( $T=7.67$ ,  $p=0.00$ ; Figura 28), en CP se ubicó entre  $1.27$  y  $1.31\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $1.24\pm 0.10\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), en IM las densidades se encontraron en un intervalo de  $1.14$  y  $1.18\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $1.16\pm 0.06\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ). La diferencia entre la alta y baja densidad observadas (Dif\_AD-BD) fueron significantes entre localidades ( $T=6.50$ ,  $p=0.00$ ), ya que el cálculo de esta variable refleja las diferencias entre la alta y baja densidad antes descritas.

La baja densidad inicial (BD\_Inicial) fue diferente entre las localidades ( $T=7.47$ ,  $p=0.00$ ), al igual la baja densidad final ( $T=7.85$ ,  $p=0.00$ ). Dentro de cada localidad la diferencia entre el promedio de la baja densidad inicial vs. final no fue significativa para CP ( $T=0.63$ ,  $p=0.52$ ), y de igual manera en IM ( $T=0.76$ ,  $p=0.45$ ) (Tabla VIII).

**Tabla VIII.** Estadística descriptiva de las variables de densidad por localidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y  $\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar.

Localidad	Variable	N	Media	Desv. Est.	CV	Mediana	Mín.	Máx.	Asim.	$\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$
CP	Den_Prom	89	1.35	0.09	6.6%	1.33	1.22	1.55	0.90	1.34 1.37
	AD	89	1.42	0.09	6.3%	1.39	1.27	1.61	0.78	1.40 1.44
	BD	89	1.29	0.10	7.4%	1.28	1.14	1.52	0.78	1.27 1.31
	Dif_AD-BD	98	0.13	0.04	35.2%	0.12	0.05	0.24	0.61	0.12 0.14
	BD_Inicial	89	1.32	0.10	7.8%	1.30	1.17	1.56	0.65	1.30 1.34
	BD_Final	89	1.31	0.10	7.6%	1.30	1.14	1.56	0.87	1.29 1.33
	Prop_AD	98	0.50	0.16	31.6%	0.51	0.10	0.85	-0.08	0.46 0.53
IM	Den_Prom	39	1.20	0.07	5.5%	1.23	1.08	1.27	-0.59	1.18 1.22
	AD	39	1.24	0.07	6.0%	1.26	1.10	1.34	-0.57	1.21 1.26
	BD	39	1.16	0.06	5.3%	1.19	1.06	1.25	-0.38	1.14 1.18
	Dif_AD-BD	39	0.07	0.04	49.9%	0.06	0.02	0.16	0.58	0.06 0.09
	BD_Inicial	39	1.19	0.07	5.5%	1.21	1.06	1.26	-0.54	1.16 1.21
	BD_Final	39	1.17	0.06	5.5%	1.19	1.07	1.26	-0.32	1.15 1.19
	Prop_AD	39	0.44	0.17	38.5%	0.44	0.06	0.82	-0.22	0.39 0.49



**Figura 28.** Gráfica de caja de la variable baja densidad (AD) a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

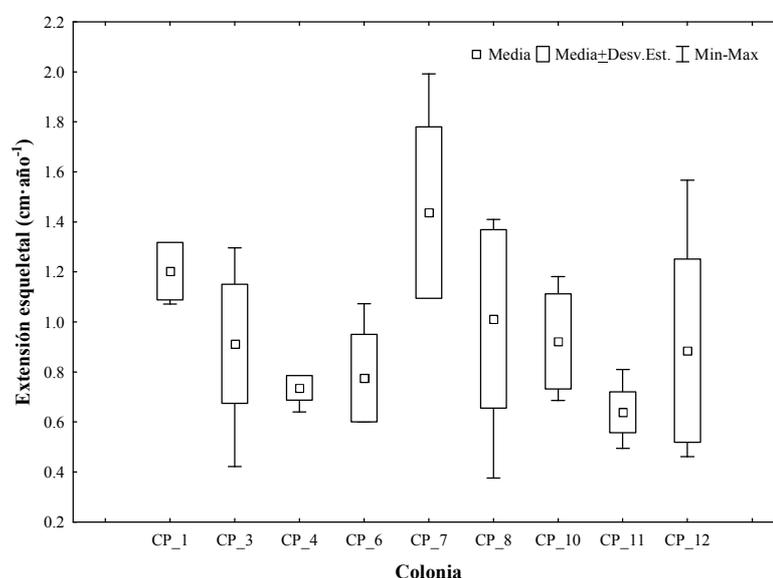
La proporción de la alta densidad fue similar en las dos localidades ( $T=1.78$ ,  $p=0.07$ ), para CP se encontró en el intervalo 0.46 y 0.53, en IM entre 0.39 y 0.49, es decir, la alta densidad se ubica cercana a la parte central de la curva de densidad. Los coeficientes de variación fueron altos ( $>30\%$ ) en ambas localidades.

## VII.2.2. Extensión esquelética anual

### VII.2.2.1. Extensión esquelética por colonia

#### Cabo Pulmo

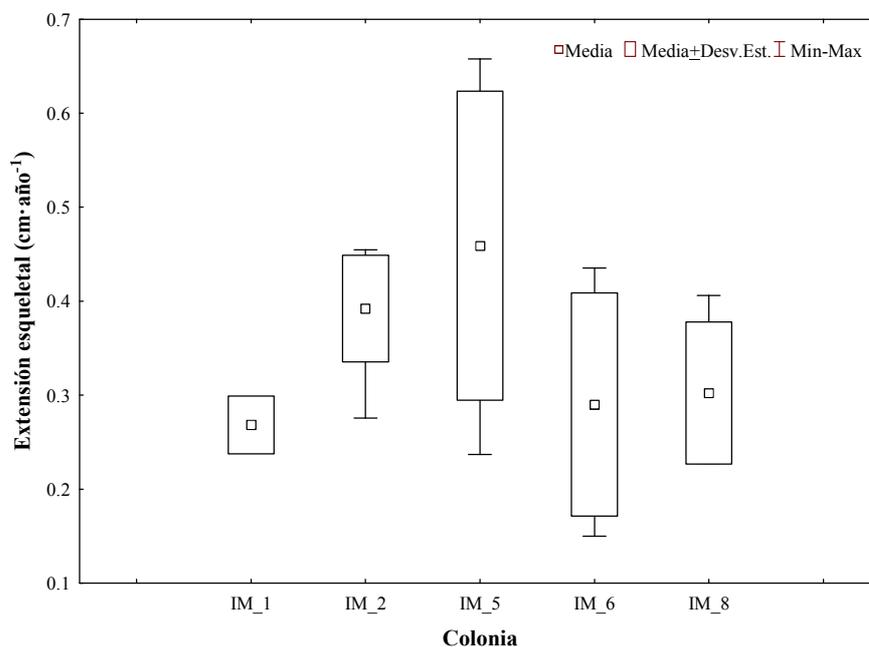
Para CP el crecimiento en extensión anual medido sobre el eje principal de crecimiento observado en las radiografías presentó diferencias a nivel de colonias ( $H=35.79$ ,  $p=0.00$ ) con valores promedio entre  $0.64$  y  $1.44\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ , las colonias mostraron altos coeficientes de variación entre 7-41% (Figura 29; Tabla 4 en Anexo A). La tasa de extensión más alta la tuvo CP\_7 con 30% de sus valores (3/9 valores) mayores a  $1.8\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ .



**Figura 29.** Gráfica de caja de la variable extensión esquelética medido en el eje principal de crecimiento a nivel colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

#### Islas Marietas

En IM las tasas de extensión esquelética medidas sobre el eje principal de crecimiento a nivel de colonias no presentaron diferencias significativas ( $H=9.61$ ,  $p=0.050$ ) con valores promedio entre  $0.27$ - $0.46\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ , las colonias mostraron coeficientes de variación entre 11-41% (Figura 30; Tabla 5 en Anexo A).



**Figura 30.** Gráfica de caja de la variable extensión esquelética medido en el eje principal de crecimiento a nivel colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

#### VII.2.2.2. Extensión esquelética por localidad

Se presentan los resultados de extensión esquelética medidos sobre el eje de crecimiento y fuera de este eje (perfiles en secciones laterales de la laja).

##### *Crecimiento en extensión en eje de crecimiento*

En la tabla IX se presenta la estadística descriptiva de las tasas de extensión esquelética a nivel localidad para Cabo Pulmo e Islas Marietas. La localidad de CP presentó una tasa de crecimiento anual en un intervalo entre  $0.85$  y  $0.99\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$  ( $0.92\pm 0.33\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ), con distribución sesgada hacia valores altos ( $>1.2\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ , asimetría=  $0.84$ ). En IM la extensión esquelética se presentó en un intervalo entre  $0.33$  y  $0.41\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$  ( $0.37\pm 0.13\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) con un sesgo derecho hacia valores altos (asimetría= $0.59$ ) (Figura 31). Las diferencias entre localidades fueron significantes ( $T=10.0$ ,  $p=0.00$ ), el promedio de extensión de CP fue mayor un  $59\%$  (diferencia de  $0.54\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) con respecto a IM, los coeficientes de variación para ambas localidades fueron similares y altos (CV CP= $36.0\%$  y IM= $35.4\%$ ).

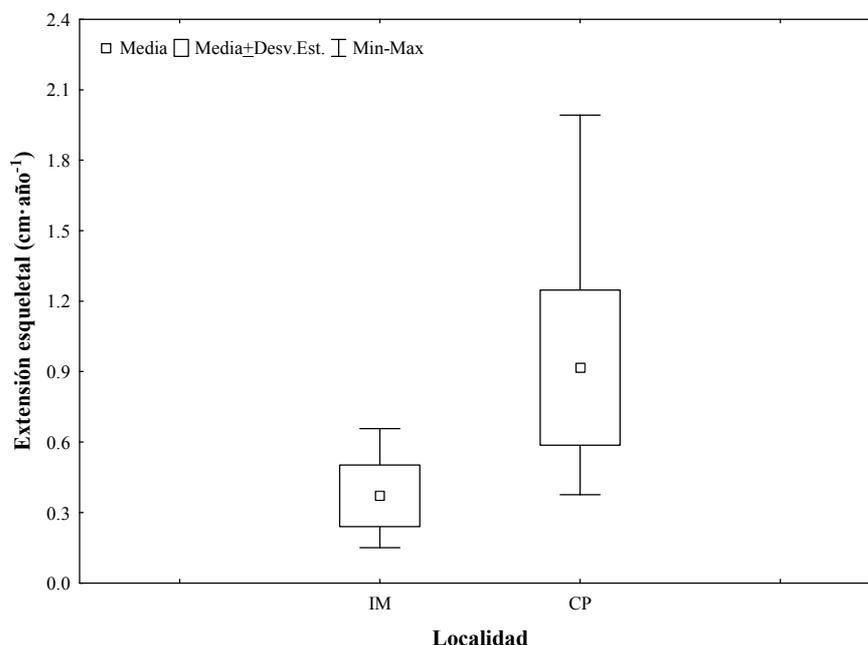


Figura 31. Gráfica de caja de la variable extensión esquelética medido en el eje principal de crecimiento a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

Tabla IX. Estadística descriptiva a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo para la variable extensión esquelética medida sobre eje de crecimiento principal de la laja ( $\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y  $\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar.

Localidad	N	Media	Desv.Est.	CV	Mediana	Mín.	Máx.	Asim.	$\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$
CP	98	0.92	0.33	36.0%	0.84	0.38	1.99	0.84	0.85 0.99
IM	39	0.37	0.13	35.4%	0.35	0.15	0.66	0.59	0.33 0.41

#### *Crecimiento en extensión en secciones laterales de la colonia*

El crecimiento esquelético medido en secciones laterales de la colonia, fuera del eje principal de crecimiento, fue significativamente diferente entre localidades ( $T=9.7$ ,  $p=0.00$ ), el promedio de extensión de CP fue mayor un 50% (diferencia de  $0.39\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) con respecto a IM, los coeficientes de variación para ambas localidades fueron altos (CV CP 42.1% y IM 33.6%).

En la tabla X se presenta la estadística descriptiva de las tasas de extensión esquelética medidas fuera del eje de crecimiento a nivel localidad para CP e IM; CP presentó una tasa de crecimiento anual en un intervalo de confianza entre  $0.74$  y  $0.81\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$

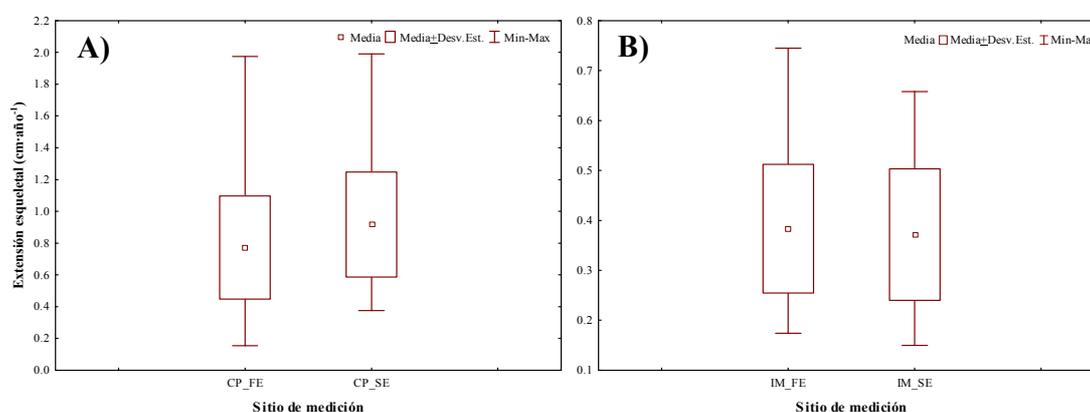
( $0.77 \pm 0.32 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ), con distribución sesgada hacia valores altos (11% de los valores fueron mayores a  $1.2 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$ , asimetría=0.84). En IM el crecimiento en extensión presentó un intervalo 0.35 y  $0.41 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $0.38 \pm 0.13 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) con un sesgo hacia valores altos, 59% de los datos estuvieron entre  $0.2-0.4 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$  (asimetría=1.01).

**Tabla X.** Estadística descriptiva a nivel localidad para Islas Marietas y Cabo Pulmo para la variable extensión esquelética medida en secciones laterales de la laja ( $\text{cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y  $\pm \text{IC}_{Bz}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar.

Localidad	N	Media	Desv. Est.	CV	Mediana	Mín.	Máx.	Asim.	$\pm \text{IC}_{Bz}$
CP	335	0.77	0.32	42.1%	0.72	0.16	1.97	0.84	0.74 0.81
IM	68	0.38	0.13	33.6%	0.35	0.17	0.74	1.01	0.35 0.41

#### *Comparación del crecimiento en extensión fuera y sobre el eje de crecimiento*

Las colonias de CP presentaron mayor extensión esquelética promedio al ser medidas sobre el eje de crecimiento ( $\text{SE} = 0.92 \pm 0.33 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) que fuera de él ( $\text{FE} = 0.77 \pm 0.32 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) (Figura 34A). Contrariamente, en IM la extensión medida fuera y sobre el eje de crecimiento fueron similares (Figura 32B).



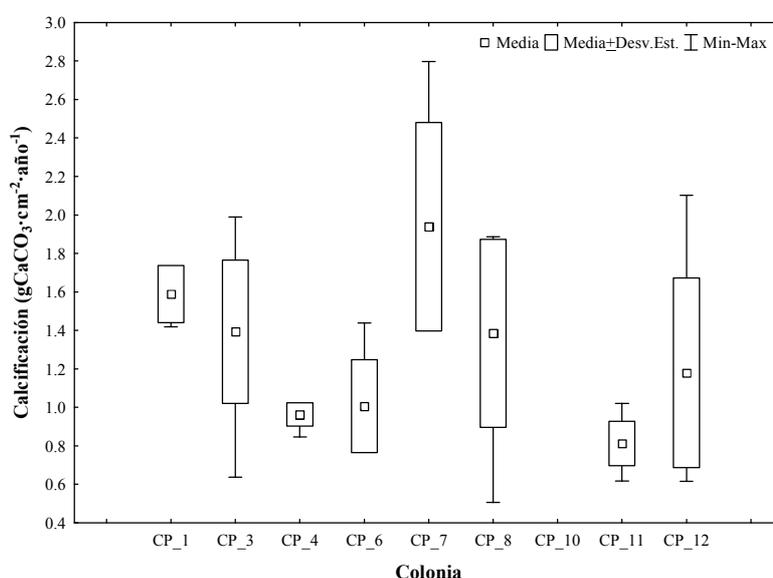
**Figura 32.** Grafica de caja de la tasa de crecimiento esquelético promedio fuera (FE) y sobre eje de crecimiento principal (SE) para las localidades de Cabo Pulmo (A) e Islas Marietas (B). Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas); la escala del eje de las ordenadas ( $\text{cm} \cdot \text{año}^{-1}$ ) es diferente para cada localidad (A y B).

### VII.2.3. Tasa de calcificación anual

#### VII.2.3.1. Calcificación por colonia

##### Cabo Pulmo

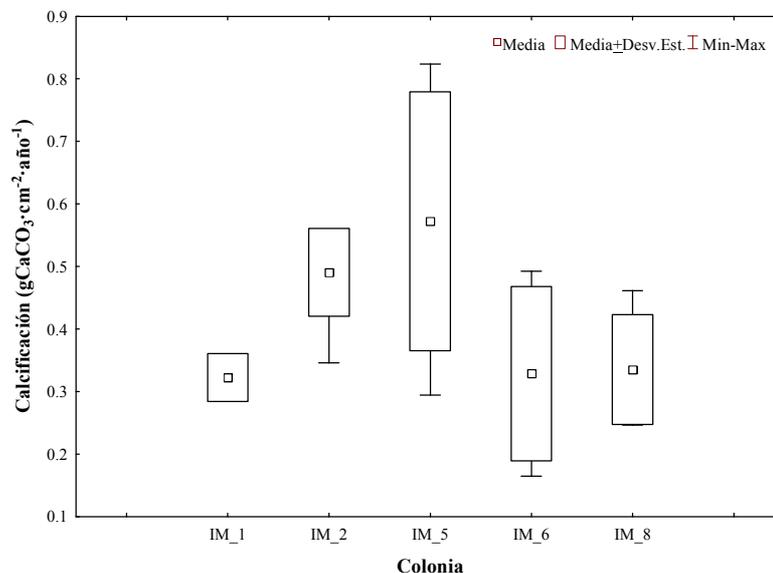
En las colonias de CP la tasa de calcificación anual a nivel de colonias fue diferente ( $H=34.0$ ,  $p=0.00$ ), con valores promedio entre  $0.81$  y  $1.94\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ , las colonias mostraron valores de CV entre 9.4-41.8% (Figura 33; Tabla 6 en anexo A). La tasa de calcificación más alta la presentó CP\_7 con  $1.94\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ .



**Figura 33.** Gráfica de caja de tasa de calcificación a nivel colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

##### Islas Marietas

En IM las colonias presentaron tasas de calcificación anual diferentes ( $H=12.3$ ,  $p=0.006$ ) con promedios entre  $0.32$  y  $0.57\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ , con valores de CV entre 11.9-42.4% (Figura 34; Tabla 7 en Anexo A). La colonia IM\_5 presentó una tasa de calcificación promedio mayor con  $0.57\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ .



**Figura 34.** Gráfica de caja de tasa de calcificación a nivel colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

### VII.2.3.2. Calcificación por localidad

El cálculo de la tasa de calcificación es el producto de la extensión esquelética y la densidad promedio (Dens\_Prom) anuales medidas en cada par de bandas de densidad. En la tabla XI se presenta la estadística descriptiva de la tasa de calcificación anual a nivel localidad, la tasa de calcificación promedio entre localidades fue significativamente diferente ( $T=9.90$ ,  $p=0.00$ ; Figura 35).

La localidad de CP presentó una tasa de calcificación promedio  $1.25 \pm 0.45 \text{ gCaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$  con un intervalo entre  $1.15$  y  $1.35 \text{ gCaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ , con un mínimo de  $0.51$  y máximo de  $2.8$ , cerca del 70% de los datos se encontró entre  $0.5$  y  $1.5 \text{ gCaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$  con un sesgo hacia valores mayores poco frecuentes (asimetría=0.82). En IM la tasa de calcificación promedio fue significativamente menor que CP ( $0.45 \pm 0.17 \text{ gCaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ), con un mínimo de  $0.16$  y máximo de  $0.82$ , el intervalo se encontró entre  $0.39$  y  $0.51 \text{ gCaCO}_3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ; los CVs fueron altos en ambas localidades (>30%).

Tabla XI. Estadística descriptiva de la tasa de calcificación por localidad ( $\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana, mínimo-máximo, Asim.=índice de asimetría y  $\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$ =intervalo de confianza 95% bootstrap estándar.

Localidad	N	Media	Desv.Est.	CV	Mediana	Mín	Máx	Asim.	$\pm\text{IC}_{\text{Bz}}$
CP	89	1.25	0.49	39.2%	1.24	0.51	2.80	0.82	1.15 1.35
IM	39	0.45	0.17	38.2%	0.42	0.16	0.82	0.60	0.39 0.51

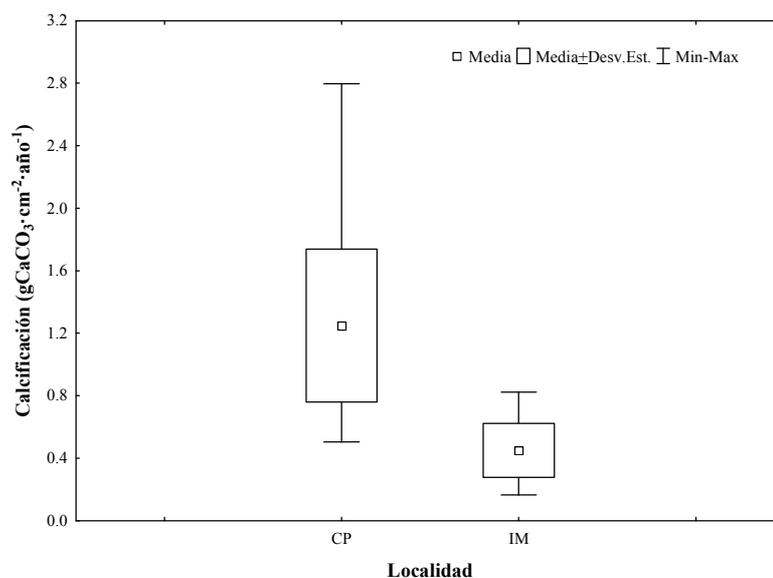
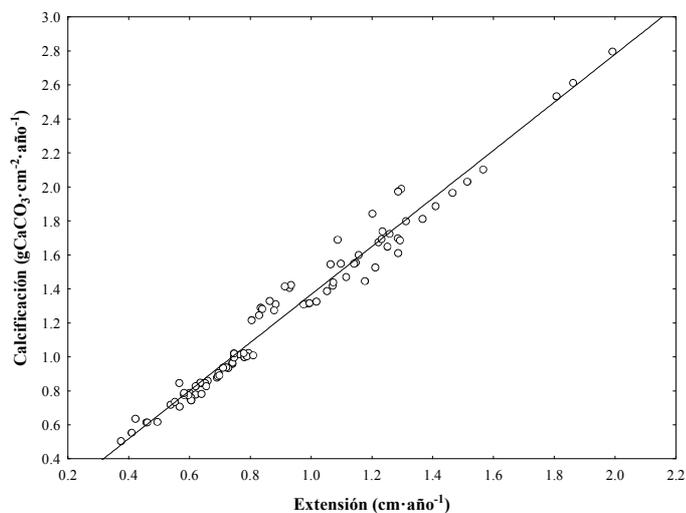


Figura 35. Gráfica de caja de tasa de calcificación a nivel localidad. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

## VII.2.4. Correlación entre parámetros de crecimiento

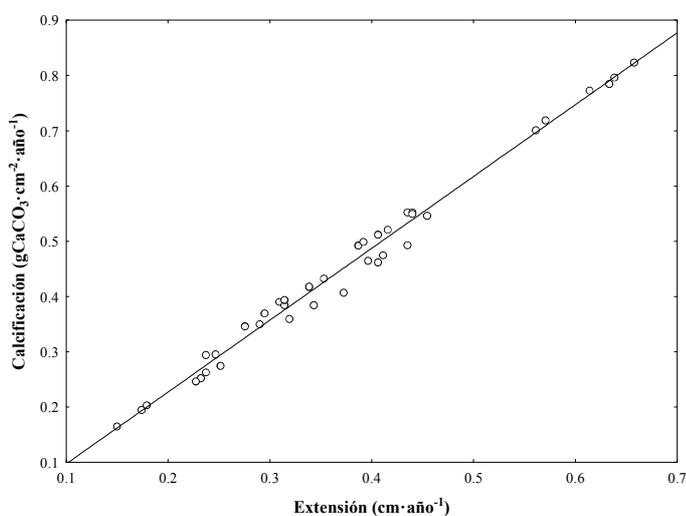
### *Tasa de calcificación anual vs. Extensión esquelética*

En CP la tasa de calcificación anual estuvo altamente correlacionada con la tasa de extensión esquelética ( $r=0.99$ , Figura 36), esta correlación indica dependencia de la calcificación sobre la extensión, es decir, valores altos de extensión esquelética están relacionados con valores de calcificación altos.



**Figura 36.** Relación entre la tasa de calcificación y la extensión esquelética anuales para la localidad de Cabo Pulmo. La tendencia de los valores tienen una alta correlación ( $r=0.99$ ) entre las variables.

En IM la tasa de calcificación anual y la tasa de extensión esquelética presentaron una correlación alta ( $r=0.99$ , Figura 37), es decir, valores altos de extensión esquelética están relacionados con valores de calcificación altos, relación similar a la encontrada en CP.

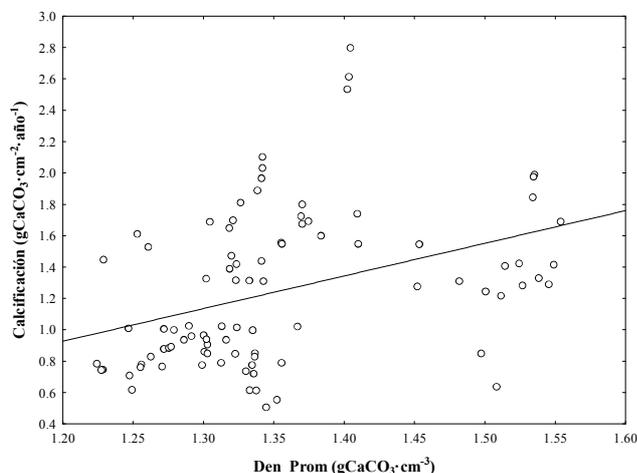


**Figura 37.** Relación entre la tasa de calcificación y la extensión esquelética anuales para la localidad de Islas Marietas. La tendencia de los valores tienen una alta correlación ( $r=0.99$ ) entre las variables.

#### *Tasa de calcificación anual vs. Densidad promedio*

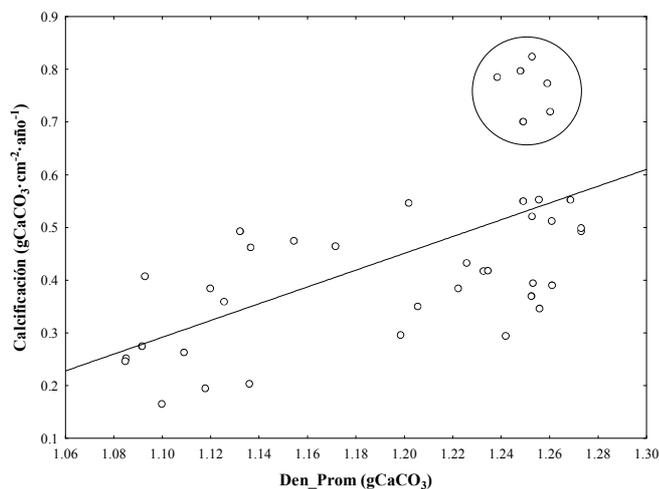
Para CP, la tasa de calcificación anual estuvo correlacionada con la densidad promedio (Den\_Prom) ( $r=0.38$ , Figura 38), mostrando una relación entre la calcificación y

la densidad esquelética, pero en menor grado que con el crecimiento en extensión. La Figura 38 muestra una alta dispersión de valores.



**Figura 38.** Relación entre la tasa de calcificación y la densidad promedio (Den\_Prom) para la localidad de Cabo Pulmo. La tendencia de los valores tienen una correlación media ( $r=0.38$ ) entre las variables.

En IM la tasa de calcificación y la densidad promedio presentaron una correlación alta ( $r=0.61$ ), esto indica que valores altos de densidad estuvieron relacionados con valores de calcificación elevados; el grupo de valores altos señalados en un círculo en la Figura 39 provienen de distintas colonias, posiblemente corresponden a valores de densidad promedio medidos en pares de bandas menos influenciadas por el efecto de borde.



**Figura 39.** Relación entre la tasa de calcificación anual y la densidad promedio (Den\_Prom) para la localidad de Islas Marietas. La tendencia de los valores tienen una alta correlación ( $r=0.61$ ) entre las variables.

### VII.3. Cobertura de coral

#### Cabo Pulmo

En la localidad de CP se encontró un porcentaje cobertura de *P. panamensis* promedio ( $\pm$ DT) de  $1.68 \pm 1.89\%$  ( $N_{\text{tran}}=7$ ) por metro cuadrado, utilizando la metodología de transecto de cuadrantes (Tabla XII); el sitio la Sirenita presentó la mayor cobertura (4.59%).

**Tabla XII. Estadística descriptiva del porcentaje de cobertura de *Porites panamensis* por sitio para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan  $N_{\text{tran}}$ = número de transectos,  $N_{\text{cuadr}}$ = número de cuadrantes, media, desviación estándar y mínimo-máximo.**

Sitio	$N_{\text{tran}}$	$N_{\text{cuadr}}$	Media	Desv.Est.	Min	Max
Sirenita	2	73	4.59	4.36	0	30
Cantil	1	124	0.85	1.53	0	6
Barra 2	2	149	0.59	0.97	0	5
Barra 1	2	211	0.70	1.34	0	9
Total	7	557	---	---	---	---

El porcentaje de cobertura por transecto (Tabla XIII) muestra promedios entre 0 y 5.2%, en 86% de los transectos (6/7) estuvieron presentes colonias de *P. panamensis*. La presencia de una alta cobertura (transecto 2, Tabla XIII) corresponde a un cuadrante posiblemente con una agrupación de colonias. La cobertura *P. panamensis* presentó una distribución con sesgo hacia valores de cobertura cercanos a 1%, debido al reducido tamaño de muestra resulta difícil obtener una distribución normal; se presenta la media por sitio y localidad, aunque lo indicado sería describir la tendencia central con la mediana.

**Tabla XIII. Estadística descriptiva del porcentaje de cobertura de *Porites panamensis* por transecto para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan  $N_{\text{cuadr}}$ = número de cuadrantes, media, desviación estándar y mínimo-máximo.**

Transecto	$N_{\text{cuadr}}$	Media	Desv.Est.	Min	Max
1	24	3.33	2.44	0	8
2	49	5.20	4.95	0	30
3	124	0.85	1.53	0	6
4	38	0.39	0.50	0	1
5	111	0.66	1.07	0	5
6	100	1.47	1.64	0	9
7	111	0.00	0.00	0	0
Total	557	---	---	---	---

### Islas Marietas

En la localidad de IM se encontró un porcentaje de cobertura de *P. panamensis* promedio de  $3.72 \pm 3.69$ , en un intervalo entre 0 y 12% (Tabla XIV) utilizando la metodología de transecto punto-intercepción, en 72% (13/18) de los transectos se encontraron colonias de *P. panamensis*. La metodología PIT arroja el porcentaje de cobertura sin unidades de área, pero se asume que es representativo a nivel arrecife. Se reporta que este método sobreestima la cobertura de coral con respecto a otras metodologías.

**Tabla XIV. Porcentaje de cobertura de *Porites panamensis* por transecto para la localidad de Islas Marietas.**

Transecto	% cobertura
1	0.0
2	10.0
3	12.0
4	4.0
5	5.0
6	3.0
7	6.0
8	6.0
9	0.0
10	8.0
11	6.0
12	3.0
13	0.0
14	1.0
15	0.0
16	2.0
17	1.0
18	0.0

### **VII.4. Producción potencial de carbonato de calcio por *Porites panamensis***

La producción potencial de carbonato de calcio (Pn) estimada con base en la tasa de calcificación anual promedio y cobertura es presentada en  $\text{kg} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ . A nivel de transecto de cobertura, en IM se encontraron valores variables entre 0 y  $0.54 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $0.168 \pm 0.166 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Es importante mencionar que el cálculo del Pn promedio a nivel transecto se ve influenciado por la cobertura, ya que éste disminuye ~28% por la presencia de transectos sin cobertura (Tabla XV).

Tabla XV. Cálculo de la producción potencial de  $\text{CaCO}_3$  (Pn) por *Porites panamensis* a nivel transecto para la localidad de Islas Marietas ( $\text{kg}\cdot\text{CaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan Cobertura= porcentaje de cobertura por transecto, tasa de calcificación,  $\text{Pn}_{\text{tran}}$ = producción potencial de  $\text{CaCO}_3$  por transecto y media $\pm$ desviación estándar de Pn entre transectos.

Transecto	Cobertura (%)	Calcificación ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ )	$\text{Pn}_{\text{tran}}$ ( $\text{kgCaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ )	Pn (Media $\pm$ Desv.Est.)
1	0.0		0.000	
2	10.0		0.450	
3	12.0		0.540	
4	4.0		0.180	
5	5.0		0.225	
6	3.0		0.135	
7	6.0		0.270	
8	6.0		0.270	
9	0.0		0.000	
10	8.0	0.45	0.360	0.168 $\pm$ 0.166
11	6.0		0.270	
12	3.0		0.135	
13	0.0		0.000	
14	1.0		0.045	
15	0.0		0.000	
16	2.0		0.090	
17	1.0		0.045	
18	0.0		0.000	

En CP, a nivel transecto, se encontraron valores igualmente variables entre 0 y  $0.65\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$  ( $0.213\pm 0.236\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ), es importante mencionar que el cálculo a nivel transecto de cobertura disminuye  $\sim 14\%$  el Pn promedio por la presencia de transectos sin cobertura (Tabla XVI).

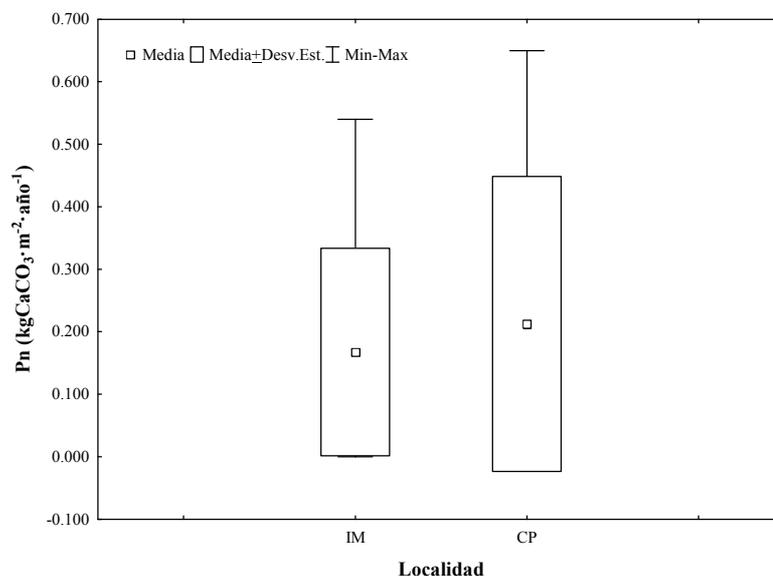
Tabla XVI. Cálculo de la producción potencial de  $\text{CaCO}_3$  (Pn) por *Porites panamensis* a nivel transecto para la localidad de Cabo Pulmo ( $\text{kg}\cdot\text{CaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan Cobertura= porcentaje de cobertura por transecto, tasa de calcificación,  $\text{Pn}_{\text{tran}}$ = producción potencial de  $\text{CaCO}_3$  por transecto y media $\pm$ desviación estándar de Pn entre transectos.

Transecto	Cobertura (%)	Calcificación ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ )	$\text{Pn}_{\text{tran}}$ ( $\text{kgCaCO}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ )	Pn (Media $\pm$ Desv.Est.)
1	3.33		0.416	
2	5.20		0.650	
3	0.85		0.106	
4	0.39	1.25	0.049	0.213 $\pm$ 0.236
5	0.66		0.083	
6	1.47		0.184	
7	0.00		0.000	

En la tabla XVII se presentan los resultados de Pn por localidad, la localidad de CP presenta tasas de producción en intervalo 0 y 0.650 kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, mientras que IM presenta un intervalo entre 0 y 0.540kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> (Figura 40); la diferencia en la producción de carbonato promedio (0.047kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, ~11%) entre localidades están controladas por la cobertura de coral y tasa de crecimiento.

**Tabla XVII.** Estadística descriptiva de la producción potencial de CaCO<sub>3</sub> (Pn) por *Porites panamensis* por localidad (kg·CaCO<sub>3</sub>·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>). Se presentan media±desviación estándar (número de transectos) de porcentaje de cobertura y tasa de calcificación anual; para Pn media, desviación estándar, mediana, mínimo-máximo y ±IC<sub>Bz</sub>=intervalo de confianza 95% bootstrap estándar.

Localidad	% Cobertura	Calcificación	Pn						
			Media	Desv.Est.	Mediana	Min.	Max.	±IC <sub>Bz</sub>	
CP	1.68±1.89 (7)	1.25±0.49	0.213	0.236	0.106	0	0.65	0.000	0.431
IM	3.72±3.69 (18)	0.45±0.17	0.168	0.166	0.135	0	0.54	0.085	0.250



**Figura 40.** Grafica de caja de la producción potencial de CaCO<sub>3</sub> (Pn) por *Porites panamensis* por localidad. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y los valores mínimo-máximo (líneas).

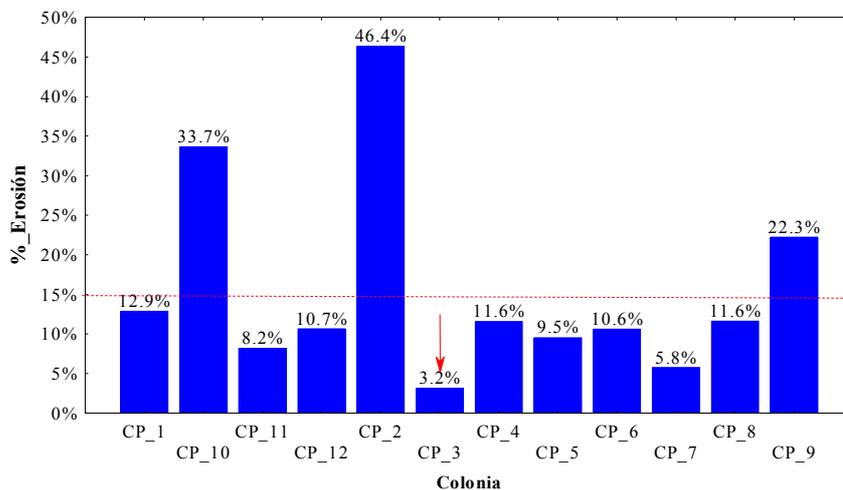
### VII.5. Estimación de porcentaje de erosión

En la tabla XVIII se presenta la estadística descriptiva por localidad del área de laja y porcentaje de erosión medida en imágenes de radiografías, IM presentó un porcentaje de erosión similar que CP (13.9% y 15.5%, respectivamente) ( $U=48$ ,  $p=1.0$ ).

**Tabla XVIII. Estadística descriptiva por localidad del área de laja (cm) y porcentaje de erosión por localidad. Se presenta N= número de lajas, media, desviación estándar, CV=coeficiente de variación y mínimo-máximo.**

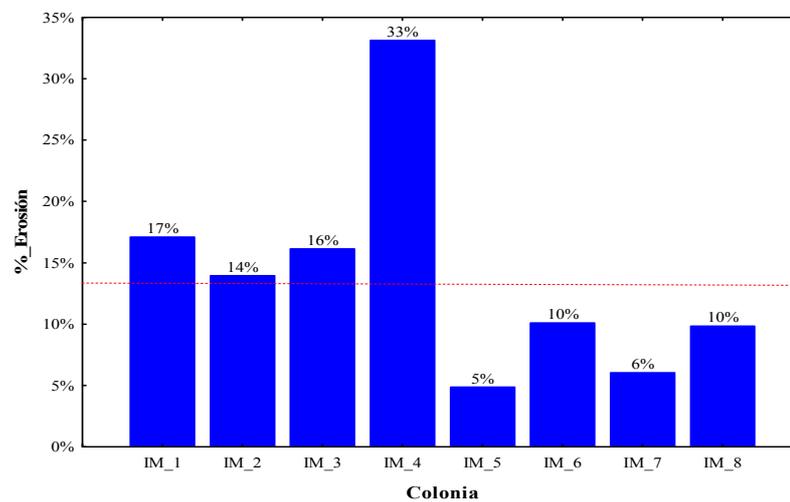
Localidad	Variable	N	Media	Desv. Est.	CV	Mín.	Máx.
CP	Área	12	71.68	37.07	51.7%	37.74	166.68
	%_Erosión	12	15.5%	12.6%	81.2%	3.2%	46.4%
IM	Área	8	13.82	9.88	71.5%	3.52	29.42
	%_Erosión	8	13.9%	8.9%	64.3%	4.9%	33.1%

En la Figura 41 se observa que la erosión promedio a nivel localidad en CP (línea discontinua) se ve influenciada por 3 colonias con porcentajes altos (CP\_2, CP\_9 y CP\_10), las cuales no fueron incluidas en los análisis de densidad, la colonia con menor porcentaje de erosión fue CP\_3 (flecha), misma que presentó valores de densidad mayores (Den\_Prom, AD y BD) al resto de las colonias, indicado que posiblemente pueda existir una relación de alta densidad esquelética con baja erosión para esta colonia.



**Figura 41. Gráfica de barras del porcentaje de erosión a nivel colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presenta la media (línea discontinua), la colonia CP\_3 presentó menor erosión (flecha).**

Las colonias de IM presentaron porcentajes de erosión similares (5-17%, Figura 42), sólo en la colonia IM\_4 se encontró una erosión mayor (33%), en la cual no se midió ningún parámetro de crecimiento.



**Figura 42.** Gráfica de barras del porcentaje de erosión a nivel colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presenta la media (línea discontinua).

## VIII. DISCUSIÓN

### *Problemas con las técnicas empleadas*

Es importante resaltar que la técnica densitométrica empleada, basándose en la densidad óptica en radiografías de rayos X, es una alternativa económicamente accesible, y arroja valores similares al ser comparada con la técnica de rayos gama, la cual es considerada la más confiable hasta el momento. La técnica densitométrica empleada fue apropiada para la estimación de densidad de lajas de corales con alturas mayores a 4cm. A continuación se enumeran algunos problemas y otras complicaciones encontradas:

1) Al comparar la calidad de imagen observada en la lajas de coral<sup>8</sup>, las radiografías convencionales digitalizadas, las cuales requieren revelado con emulsión química y posterior escaneado, presentan una menor calidad con relación a las radiografías de mamografía digital. El hecho de que las radiografías convencionales presentaran una menor definición de imagen (más difuso o “borroso”), es evidencia de una pérdida de información valiosa. Pero por otro lado, esta desventaja permite que las formas observadas (p.e. marcas de erosión) sean menos ambiguas que en imágenes de radiografías digitales, ya que ésta permite observar en detalle características del bandeo y hasta porosidades, agregando “ruido” a la mediciones de densidad óptica.

2) El empleo de diferentes cartuchos o casetes de radiografías aporta una variación alrededor de 4% entre radiografías convencionales (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007c). En este estudio no se pudo medir esta fuente de error, pero se le atribuye gran parte de la variación encontrada.

Chalker y Barnes (1990) comentan que con un estándar de aragonita de almeja gigante se estima una densidad subestimada en un 1-2%, en comparación a la densidad basada en un estándar de piezas de coral pulverizado. Esto tal vez se deba a la diferente composición química de la almeja con compuestos orgánicos e inorgánicos; en este estudio se observó que, las imágenes de los bloques de almeja presentaban marcas o huellas naturales que presentaban diferente densidad óptica, aportando cierta variación a la

---

<sup>8</sup> Se definió alta calidad cuando la definición de imagen (que tan definidas son las formas) y resolución (tamaño de pixel) fuera mayor en una técnica al ser comparada con la otra.

estimación de la DO, pero considerablemente menor a la variación originada por otros efectos de proyección.

3) Se observó un efecto de proyección, efecto de borde, similar al descrito por Chalker (1990), el cual fue diferente para cada radiografía. En este estudio se observó que abarcaba aproximadamente  $1.2 \pm 0.16$  cm, al ser medido en los bloques de aragonita.

La falta de uniformidad dentro de los bloques del estándar provino de variaciones debidas a este efecto de proyección, presente en la totalidad de radiografías. Este efecto de borde influyó en los cálculos de la densidad, en el caso del estándar de aragonita, delimitó tres secciones ó áreas en cada pieza, presentando una variación promedio entre 25-29%, entre radiografías, donde las piezas de menor grosor mostraron una mayor variabilidad. A pesar de la variación entre secciones (diferencias de DO entre radiografías), la variación de la densidad fue baja ( $CV < 5\%$ ) dentro de cada radiografía.

Este efecto también influyó en el cálculo de la densidad en colonias de alturas reducidas, como es el caso de los corales de IM con una forma de crecimiento incrustante. La corrección del efecto de borde llevada a cabo en este estudio, conlleva una serie de supuestos, no del todo fundamentados por la falta de un estándar de mayor tamaño.

La elección de un ajuste óptimo de densidades, mismo que considera una sobre-subestimación de  $\pm 15\%$  entre un espectro de grises mayor a otro, podría ser eliminada al cambiar de un estándar de aragonita formado por bloques, a un estándar con forma de cuña, el cual arrojaría valores de DO y grosor continuo, y no de manera puntual, como es el caso del estándar por bloques. La elección del ajuste de grises para los corales incrustantes de IM, dependió de la comparación del tamaño de coralito, la cual fue subjetiva al basarse en fotografías digitales, arrojando que IM podría presentar menor densidad que CP. A pesar de esto, se supuso que el efecto de borde presentaba una subestimación máxima de  $\sim 13-15\%$ , por lo que se corrigió con un factor menor de  $\sim 12\%$ .

4) La forma de las colonias fue el principal problema al momento de identificar y seleccionar un patrón de densidad confiable. Las colonias de CP presentaban forma semiesférica, lo que provocó que, en gran parte de las lajas esta curvatura deformara el patrón de densidades, idealmente vertical para este tipo de estudios. Sólo la sección central

de cada laja de coral presentó una orientación del bandeo constante y paralela, fue en esta sección donde se midieron los parámetros de crecimiento (ver Anexo C).

5) La ubicación del perfil de densidad dentro de cada laja fue variable y arrojó resultados diferentes; en las radiografías se ubicó la sección de la laja con mayor crecimiento, y se definió como una característica común identificable dentro de cada laja (ver Anexo C). De esta sección se obtuvo un perfil de densidad segmentado en tres perfiles de menor tamaño, así los resultados presentados de densidad y calcificación, describen sólo la región central de las lajas. La variable de extensión esquelética sí fue medida fuera y dentro del eje de crecimiento, con diferencias significativas en colonias de forma semiesférica (CP) y similares en colonias con crecimiento incrustante (IM); para el caso de CP, lo anterior sugiere que la variabilidad (CV) en crecimiento dentro de cada colonia es alta, y probablemente sea mayor a la presentada a nivel arrecife.

#### *Variaciones en densidad y crecimiento esquelético entre localidades*

Los resultados aquí presentados muestran parámetros de crecimiento y densidad aproximados a los posibles valores reales, ya que están basados en la medición de estructuras de la arquitectura interna de colonias. La elección de medir múltiples variables de densidad se basó en la falta de información de la especie, y con esto comprender mejor la relación entre variables de densidad y crecimiento, con los posibles factores que las controlan.

Las colonias de CP fueron colectadas en febrero de 2009 y las colonias de IM en marzo de 2009. Ambas localidades presentaron una banda de alta densidad formada en el margen externo de la colonia (banda oscura en imágenes de contacto), lo cual significa que fue formada en el verano previo a la fecha de colecta. Lo anterior concuerda con la interpretación del bandeo anual observado en el género *Porites*, para el cual reportan bandas de alta densidad formadas en verano (Barnes y Lough, 1992).

Los parámetros de densidad esquelética fueron diferentes entre localidades, aunque la comparación entre morfotipos (forma masiva en CP vs. forma incrustante en IM) no es adecuada, se esperaría que la densidad fuera similar entre localidades, a pesar de presentar dos formas de crecimiento diferentes. La densidad promedio de IM estuvo entre 1.18 y

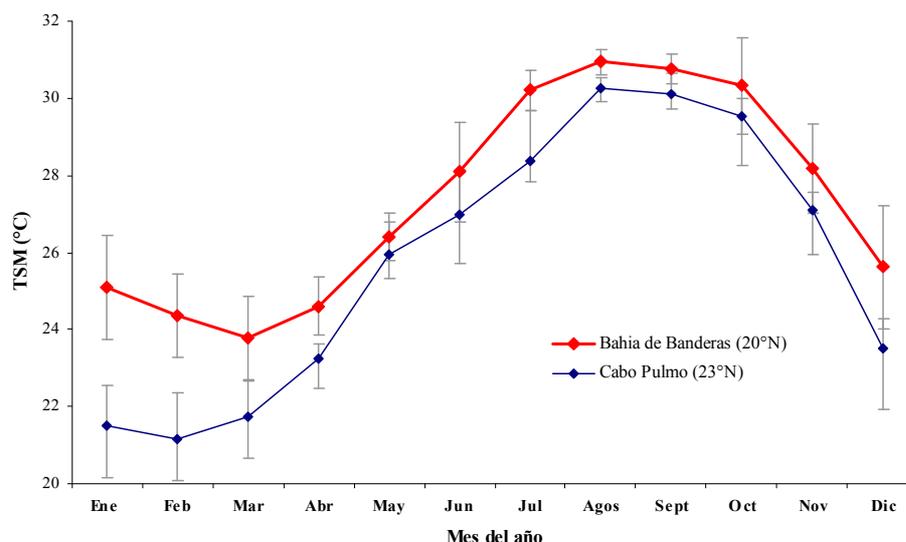
1.22g·m<sup>-3</sup> (intervalo de confianza al 95%), la cual fue menor con respecto a lo encontrado en CP en este trabajo (1.34 y 1.37g·m<sup>-3</sup>), y menor con respecto a valores reportados para el género *Porites* en otros estudios (1.25 y 1.56g·m<sup>-3</sup>) (Barnes y Lough, 1992; Lough y Barnes, 2000; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007b; Qi *et al.*, 2008). Lough y Barnes (1997), reportan una densidad promedio similar a la hallada en IM (media 1.17g·m<sup>-3</sup>, mínimo 0.98 y 1.39 máximo).

La diferencia de aproximadamente 11% en la densidad promedio (Den\_Prom) entre IM (1.22g·m<sup>-3</sup>) y CP (1.35g·m<sup>-3</sup>) reportada en este estudio es significativa, pero tal diferencia pudiera ser menor, debido a que: 1) la densidad de IM está subestimada debido a la técnica (efecto de borde), 2) el reducido número de colonias analizadas en IM (igualmente para CP) pudieran no reflejar el intervalo de densidades posibles para la localidad, es decir, pudieran presentarse colonias de mayor densidad a las reportadas en este estudio, 3) la forma de crecimiento es un factor que influye en la estimación de la densidad, y 4) la técnica radiográfica empleada para calcular la densidad, pudiera estar reflejando una menor densidad relacionada con un mayor tamaño de coralito, mas no una menor densidad de las estructuras internas (corte de laja similar de ~8mm).

A nivel especie, sólo se encontraron dos trabajos que han reportado densidades para *P. panamensis*, en los cuales se emplearon diferentes técnicas densitométricas. La densidad reportada por Halfar *et al.* (2005) para *P. panamensis*, en Bahía de Los Ángeles, BC, fue menor a las medidas en el presente estudio (0.92g·m<sup>-3</sup>). Mientras que Reyes-Bonilla (1993) reportó una densidad menor (1.22g·m<sup>-3</sup>) en Cabo Pulmo a la encontrada en este estudio. Estas diferencias pudieran estar relacionadas con: 1) empleo de diferentes técnicas de estimación de densidad, 2) una diferente región, como es el caso del trabajo en Bahía de los Ángeles, y 3) diferencias entre formas de crecimiento de las colonias como las encontradas (en este trabajo forma masiva en CP y forma incrustante en IM).

La alta densidad, esto es, la máxima densidad observada en el perfil de densidad anual, observada en CP (1.40 y 1.44g·m<sup>-3</sup>) fue mayor en ~13% que IM (1.21 y 1.26g·m<sup>-3</sup>), y en ambas localidades la alta densidad estuvo ubicada aproximadamente en la parte central de cada par de bandas (CP= 0.46-0.53 y IM=0.39-0.49). Lo anterior pudiera sugerir que la señal de la alta densidad, formada bajo temperaturas cálidas, se presenta más

tempranamente en IM que CP, posiblemente debido a que, en CP la TSM promedio máxima (30.2°C) ocurre en agosto (Figura 43), mientras que en IM (30.9°C) se mantiene constante en los meses de julio a octubre (>30°C) (Hernández-Fonseca, comunicación personal). Es importante mencionar que los resultados de TSM reportados podrían no ser representativos, pero sí aproximadas, al patrón de temperaturas costeras.



**Figura 43. Temperatura superficial del mar (TSM) promedio por mes para las localidades de Bahía de Banderas y Cabo Pulmo en el periodo de 2002-2009. Datos de Aqua MODIS 9 km.; se presentan la media promedio (punto central) y desviación estándar (barra gris) (Hernández-Fonseca, comunicación personal).**

La baja densidad fue menor en IM que CP en ~10% (1.14-1.18 y 1.27-1.31 g·m<sup>-3</sup>, respectivamente). Las bajas densidades (inicial vs. final) fueron similares en cada localidad, indicando que son similares dentro de cada sitio. La variación de la densidad, esto es, la diferencia entre la alta y baja densidad, fue mayor en CP que en IM. Lo anterior posiblemente pudiera estar relacionado con el intervalo de la TSM, ya que CP presenta un intervalo mayor (21.2 a 30.2°C, diferencia 9°C) de temperaturas que IM (23.8 a 31.0°C, diferencia 7°C), es decir que CP fue el sitio con un mayor rango de temperaturas y presentó una diferencia en densidad (AD y BD) más abrupta que IM.

Las variables de densidad (baja, media y alta densidad) presentaron baja variación (CV) en ambas localidades (CP~7% y IM~6%), lo que sugiere que las densidades medidas sobre el eje de crecimiento son constantes; esta tendencia de baja variación en las variables

de densidad fue observada en el análisis a nivel de colonia ( $CV < 10\%$ ). Lo anterior también fue reportado en otros estudios en el género *Porites* (Barnes y Lough, 1992; Lough y Barnes, 2000). Existen otros factores, a parte de la TSM, que pudieran explicar la diferencia en densidades como: la disponibilidad de luz, relacionada con turbidez y productividad, misma que afecta al reducir la capacidad de calcificar; la tasa de sedimentación; y posiblemente el movimiento del agua, relacionado con la exposición a la energía del oleaje y mareas (Risk y Sammarco, 1991).

La morfología de las colonias fue la principal causa de la diferencia en la tasa de crecimiento reportadas en las localidades. La tasa de extensión esquelética, medida sobre el eje principal de crecimiento, fue mayor en CP que IM ( $0.85\text{-}0.99$  y  $0.33\text{-}0.41\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ , respectivamente), y es reflejo de las diferentes formas de crecimiento de las colonias en cada localidad (forma masiva en CP y forma incrustante en IM). Los valores encontrados en CP se encuentran dentro del intervalo encontrado para otras especies de *Porites* ( $0.82$  a  $1.72\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) (Barnes y Lough, 1992; Lough y Barnes, 2000; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007b; Qi *et al.*, 2008), sin embargo se encontraron casos aislados de pares de bandas con tasas de crecimiento mayores a  $1.2\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ . Por otro lado, las colonias de IM presentaron un crecimiento menor en  $\sim 59\%$  con respecto a CP.

La tasa de extensión fue diferente al ser medida en varias secciones de la laja de coral para CP, mientras que en IM, el crecimiento en extensión fue constante a lo largo de la laja. Para el caso de CP, la variación se debió a la forma de la colonia, ya que presentó colonias de alturas entre 6-15cm, con forma semiesférica a columnar, característico de una forma de crecimiento masiva. Se presentó una mayor extensión en la parte central (eje principal de crecimiento) que en secciones laterales, lo que coincide con lo reportado por Lough y Barnes (2000) en varias especies de *Porites*. Lo anterior concuerda con la alta variabilidad del crecimiento lineal reportada para colonias semiesféricas del género *Porites*. En este estudio se encontró una variación dentro de cada colonia entre 10-40%, mientras que Lough y Barnes (2000) encontraron una variación del 20-30%; a nivel arrecife y Carricart *et al.* (2007b) del 23%.

Por otro lado, las colonias de IM presentaron una forma de crecimiento incrustante a nodular (reportada como masiva-incrustante por Paz-Díaz, 2005), extendidas con forma de

disco y baja altura (1-3.5cm), reportada anteriormente por Reyes-Bonilla *et al.*, (2005) para la zona sur del Pacífico mexicano. Debido a la forma de crecimiento incrustante de las colonias, la tasa de crecimiento a nivel arrecife fue constante a lo largo de las lajas, pero con una variación similar a CP (CV~35%).

Buddemeier y Kinzie (1976, citado por Lough y Barnes, 1997) realizaron una revisión de reportes sobre tasas de crecimiento en corales masivos, sugiriendo que, especies de corales con tasas de crecimiento entre 1-1.5cm·año<sup>-1</sup>, representan poblaciones creciendo en condiciones sub-óptimas; bajo esta relación de “salud”, las bajas tasas de crecimiento reportadas para la localidad de IM indicaría que están menos “saludables” que los corales de la localidad de CP. Lo anterior pudiera ser válido al comparar tasas de crecimiento de una especie con una forma de crecimiento similar; en este estudio las colonias colectadas, representan a dos arrecifes con formas de crecimiento diferentes, desarrollándose bajo condiciones ambientales distintas. Por lo que, asignarles una categoría de “salud” no es apropiado, y no pueden ser comparables debido a la diferente forma de crecimiento de la especie entre los sitios de estudio.

Con respecto a la forma de crecimiento, la morfología colonial responde a las condiciones ambientales (Huston, 1985 citado por (López-Pérez *et al.*, 2003). Paz-García *et al.* (2008) al evaluar varias poblaciones en las costas del Pacífico mexicano, concluyeron que *P. panamensis* presenta diferenciación genética, y proponen que existen poblaciones diferentes en tres regiones: 1) aquellas poblaciones que habitan dentro del Golfo de California, 2) las poblaciones que habitan en la entrada al Golfo de California, y 3) poblaciones sureñas en las costas de Oaxaca. Se sugiere que las poblaciones dentro del Golfo de California pudieran ser genéticamente homogéneas, y las diferencias encontradas entre las poblaciones sureñas pudieran ser una respuesta a la alta frecuencia de fenómenos naturales como huracanes, surgencias y eventos de El Niño (Paz-García *et al.*, 2008).

Por su parte, López-Pérez *et al.* (2003) realizaron un análisis sobre la morfología del coralito en especies del género *Porites*, incluyendo parches y arrecifes a lo largo del Pacífico mexicano, concluyendo que *P. panamensis* presenta una baja variación en su morfología al ser evaluada bajo un gradiente latitudinal, y en contraste, forma agregaciones

de poblaciones que pudieran presentar características comunes, relacionadas a condiciones oceanográficas regionales.

La diferencia en la morfología de las colonias en ambas localidades puede ser una respuesta a condiciones ambientales locales, y es un factor que afecta la tasa de crecimiento en extensión. Se ha evidenciado que ciertos factores físicos, algunos estudiados localmente bajo un gradiente de costa - mar adentro y otros en un gradiente latitudinal, pueden afectar los parámetros de crecimiento, como:

1) la temperatura superficial del mar, siendo éste el factor principal descrito en la bibliografía como controlador del crecimiento esquelético, en *Porites* se ha correlacionado positivamente con la extensión esquelética (por lo tanto con la calcificación) y negativamente con la densidad (Lough y Barnes, 1992; 2000) bajo un gradiente latitudinal en GBR; aun más, Lough y Barnes (2000) evidenciaron cambios en densidad relacionados con la TSM mínima mensual, más que la TSM promedio,

2) Isdale (1981, citado por Lough y Barnes, 1997), Scoffin (1992, citado por Lough y Barnes, 2000) y Lough y Barnes (1992) analizaron parámetros de crecimiento esquelético de colonias de *Porites* habitando en zonas costeras y colonias mar adentro (fuera de la costa), y encontraron que, la tasa de extensión en *Porites* de la Gran Barrera, era menor en arrecifes con mayor exposición a la energía del oleaje, lo que interpretaron como una relación entre una tasa de extensión esquelética reducida y un incremento en el movimiento de agua,

3) la calidad del agua, relacionada con una mayor turbidez por afluentes continentales, pudiera disminuir la tasa de calcificación la cual es altamente dependiente de la extensión esquelética (Carricart-Ganivet, 2007),

4) la cantidad de luz en la columna de agua la cual esta atenuada en zonas someras costeras por la presencia de nutrientes en la columna de agua, y es mayor en zonas fuera de la costa (Lough y Barnes, 2000).

La tasa de calcificación fue diferente en ambas localidades, y presentó una alta variabilidad a nivel arrecife (>35%), aunque es importante mencionar que la baja tasa de calcificación para IM en comparación a CP, se ve influenciada por la diferente tasa de extensión esquelética debido a la forma de crecimiento de los dos morfotipos estudiados, y

por la subestimación de la densidad con respecto a la técnica. La calcificación para *P. panamensis* en CP se encontró dentro del intervalo reportado para otras especies del género (1.28 a 2.25  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ), pero los valores encontrados en IM fueron menores (0.39 a 0.51  $\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ) comparado con lo reportado por otros autores (Barnes y Lough, 1992; Lough y Barnes, 1997; 2000; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007b; Qi *et al.*, 2008).

En *Porites* se ha observado que la calcificación aumenta con el promedio de TSM, encontrándose una relación directa de la TSM con la extensión esqueletal e inversa con la densidad esqueletal (Lough y Barnes, 2000; Jokiel y Coles citado por Carricart-Ganivet, 2004). Lough y Barnes (2000) analizaron parámetros de crecimiento de *Porites sp.*, concluyendo que existe una relación positiva entre la TSM y la calcificación. Los resultados de este estudio no son comparables con este tipo de trabajos, debido a que los resultados de calcificación presentados son el resultado de diferentes morfotipos de cada localidad; CP presentó una tasa de calcificación mayor (entre 1.15 y 1.35  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ) con un promedio de temperaturas menor, influenciadas por aguas frías provenientes de la Corriente de California; mientras que IM presentó una calcificación menor (entre 0.39 y 0.51  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ) bajo temperaturas más altas, sin embargo, Halfar *et al.* (2005) reportan una calcificación baja para *P. panamensis* de 0.42  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$  a temperaturas frías la mayor parte del año (16-29°C) en Bahía de los Ángeles, BC, pero las poblaciones de esta zona no forman estructuras arrecifales y presentan una forma de crecimiento principalmente de columnar - incrustante.

Para este estudio no fue posible relacionar la tasa de calcificación con un gradiente latitudinal, debido a que sólo se analizaron muestras de dos arrecifes, por lo que no es posible observar una tendencia; en otros estudios se ha observado un decremento de la calcificación hacia latitudes mayores, pero tales decrementos responden principalmente a un decremento latitudinal de la TSM (Lough y Barnes, 1997; 2000). En esos mismos trabajos reportan, bajo un gradiente latitudinal, un aumento de 0.39  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$  en la tasa de calcificación, con el aumento de 1°C en la temperatura promedio anual.

Para *P. panamensis* se encontró una relación positiva alta entre la tasa de calcificación y la tasa de crecimiento en extensión. La densidad esqueletal presentó una relación positiva con la calcificación, pero en menor grado que la extensión esqueletal.

Estas relaciones entre variables de crecimiento están presentes en otras especies del género *Porites* (Lough y Barnes, 2000; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007b), y se han observado que son inversas en otros géneros como *Montastrea* (Carricart-Ganivet, 2004).

#### *Producción potencial de carbonato de calcio*

La estimación de la producción potencial de carbonato de calcio (Pn) ayudó a conocer la contribución individual de *P. panamensis* al sistema de carbonato de cada arrecife, a manera de línea-base, permitiendo hacer comparaciones entre localidades y con otros estudios reportados. En este estudio la localidad de CP presentó una producción potencial de CaCO<sub>3</sub> mayor a IM, con valores promedio de 0.21 y 0.16kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente. Con respecto a lo anterior, la cantidad de carbonato por unidad de área entre localidades fue diferente, ya que el cálculo de Pn presenta una relación de baja calcificación con alta cobertura de coral para IM y una relación inversa en CP, alta calcificación con baja cobertura de coral.

La diferencia en el Pn entre localidades reportada es influenciada por: 1) la distinta forma de crecimiento, lo que conlleva a una alta diferencia en extensión esquelética y relativa menor densidad, 2) diferencias en la cobertura de coral, posiblemente resultado de las diferentes metodologías empleadas.

Halfar *et al.* (2005) encontraron un Pn menor (0.14kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>) en Bahía de los Ángeles (29°N) para *P. panamensis*, pero esta especie no construye estructuras arrecifales en latitudes mayores a CP (23°N), el cual representa la formación arrecifal más septentrional del Pacífico.

Reyes-Bonilla (1993) estimó un Pn para *P. panamensis* en CP entre 0.6-1.5kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, pero este valor no es del todo confiable, debido a que utiliza un valor de densidad obtenido en otra localidad, reportado por Guzmán y Cortés (1989, citado en Reyes-Bonilla, 1993).

Los resultados de la producción de carbonato encontrados en este estudio son relativamente bajos, comparados con lo reportado para el género *Porites* estudiado en arrecifes de franja planos (sin pendiente, 0.12-0.92kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>) (Qi *et al.*, 2008). Dichos

autores concluyen que la producción de carbonato depende fundamentalmente de la cobertura de coral.

La cobertura promedio de *P. panamensis* es reducida en ambas localidades ( $<5\% \cdot m^{-2}$ ), en comparación a otros géneros como *Pocillopora*, que contribuye con  $\sim 50\%$  de la cobertura de coral; con esto, este género más abundante y con una tasa de crecimiento rápida (Qi *et al.*, 2008), aportaría una mayor cantidad de  $CaCO_3$  al balance de carbonato de ambos arrecifes.

Se han reportado arrecifes con producción de carbonato similares a las encontradas en este estudio. Harney y Fletcher (2003, citado por Qi *et al.*, 2008) presentan tasas de producción bajas ( $1.6kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ ), relacionadas a una alta cobertura de especies incrustantes con una reducida tasa de calcificación; en otros estudios reportan entre  $0.12-0.92kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$  relacionadas con coberturas promedio entre 7-10%, en secciones planas de arrecife (Qi *et al.*, 2008). En este estudio, para el arrecife de CP se estimó un Pn bajo relacionado con una cobertura igualmente baja (promedio de  $1.68 \pm 1.89 \% \cdot m^{-2}$ ), mientras que en IM se encontró una cobertura ligeramente mayor (promedio de  $3.72 \pm 3.69 \% \cdot m^{-2}$ ) a CP, pero con un Pn menor, relacionado con una tasa de calcificación baja.

En otros estudios han estimado Pn de varios géneros de coral: Qi *et al.* (2008) obtuvieron estimaciones alrededor de  $1.16kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$  en zonas de arrecife plano, y  $3.52kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$  en la pendiente del arrecife, concluyen que los valores Pn son dependientes de la composición y distribución de las diferentes especies de coral, y de la alta variabilidad de tasas de crecimiento en extensión entre géneros. Vecsei (2001) realizó una revisión de la producción de carbonato a escala regional, donde presenta resultados de Pn dependientes a la forma de crecimiento de coral, los corales ramosos presentaron la mayor producción con  $\sim 10kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ ; en este mismo trabajo sugiere que, para arrecifes del Pacífico, la producción de carbonato es alrededor de  $2.6kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ .

Chave *et al.* (1972) realizaron un análisis de las tasas de producción de carbonato estimadas a partir de escenarios hipotéticos de coberturas y tasas de calcificación estimadas según la forma de crecimiento. Estos autores reportan que un arrecife plano con una alta presencia de coral tendería a presentar un Pn entre  $3-8kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ . Estos consideran la metodología basada en muestreos biológicos como cuestionable, ya que las estimaciones de

Pn y producción gruesa (producción de carbonato estimada en base al área arrecifal) solamente reflejan consideraciones biológicas, es decir, que tanto crece y calcifica una especie o comunidad arrecifal, más no un balance de carbono, el cual incluye varios componentes como: la formación directa de carbonato (múltiples tasas de organismos calcificadores), la alcalinidad del agua y los sedimentos generados por la disolución química y bioerosión.

La estimación de Pn reportada presenta varios puntos cuestionables: 1) las coberturas fueron estimadas a partir de diferentes metodologías para cada localidad; idealmente se debería basar en un mayor número de transectos por localidad, empleando la misma metodología; y 2) la tasa de calcificación se estimó a nivel localidad, a pesar de que se encontró una alta variabilidad a nivel arrecife.

La estimación de la tasa de erosión puede ser una herramienta valiosa para evaluar las condiciones de una comunidad arrecifal, ya que podría ayudar a explicar parte del presupuesto de carbono en estos ecosistemas.

Los resultados obtenidos sobre la estimación de la tasa de bioerosión a nivel localidad con la metodología empleada no son confiables, ya que el cálculo de la erosión a nivel colonia debe realizarse en múltiples lajas de una misma colonia. A pesar de esto, la tasa de erosión fue similar entre localidades (~15%).

## IX. CONCLUSIONES

1) Se encontraron variaciones en la tasa de crecimiento en extensión de *P. panamensis* entre las localidades de estudio, así como dentro de cada localidad; el arrecife de Cabo Pulmo presenta un mayor crecimiento que Islas Marietas, debido que el morfotipo es masivo, mientras que en IM es incrustante.

2) La densidad esquelética fue diferente entre arrecifes, pero constante dentro de cada localidad; contrario a lo esperado, el arrecife de Cabo Pulmo presentó una mayor densidad esquelética que el arrecife de Islas Marietas, a pesar de desarrollarse en un ambiente con menores temperaturas.

3) La tasa de calcificación y el crecimiento en extensión están altamente relacionadas en ambas localidades. No se pudo evidenciar un patrón latitudinal, ni temporal de la tasa de calcificación.

4) La producción potencial de carbonato de calcio por parte de *P. panamensis*, señala una diferencia entre localidades, menor para el arrecife de Islas Marietas que Cabo Pulmo, y es altamente dependiente de la cobertura de coral y en menor grado de la tasa de calcificación entre morfotipos. La producción potencial reportada es información de base para evaluar el balance de carbono en arrecifes del Pacífico, pero es necesario desarrollar la metodología basándose en análisis esclerocronológicos.

5) La técnica de densitometría empleada permite analizar corales masivos con formas semiesféricas. El cálculo de densidad de corales con una forma de crecimiento incrustante presentó complicaciones técnicas debidas a un efecto de proyección; se requiere de un mejor desarrollo de la técnica para estimar con mejor precisión la densidad esquelética de estos corales con forma de crecimiento incrustante.

## REFERENCIAS

- Al-Horani, F. A.; É. Tambutté y D. Allemand. 2007. Dark calcification and the daily rhythm of calcification in the scleractinian coral, *Galaxea fascicularis*. *Coral Reefs* 26:531–538
- Barnes, D. J. y J. M. Lough. 1992. Comparisons of skeletal density variations in *Porites* from the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 155:1-25
- Barnes, D. J. y J. M. Lough. 1999. *Porites* growth characteristics in a changed environment: Misima Island, Papua New Guinea. *Coral Reefs* 18:213 - 218
- Buckland, S. T.; D. L. Borchers; A. Johnston; P. A. Henrys y T. A. Marques. 2007. Line transect methods for plant surveys. *Biometrics* 63:989-998
- Calderón-Aguilera, L. E.; H. Reyes-Bonilla y J. D. Carriquiry. 2007. El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: Estudios en el Pacífico mexicano. En: CICESE (Editores) El carbono en aguas costeras y lacustres. SEMARNAT-CICESE, México, p 215-226
- Campana, S. E.; M. C. Annand y J. I. MacMillan. 1995. Graphical and statistical methods for determining the consistency of age determinations. *Transactions of the American Fisheries Society* 124:131-138
- Carricart-Ganivet, J. P. 2004. Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*:249-260
- Carricart-Ganivet, J. P. 2007a. Annual density banding in massive coral skeletons: result of growth strategies to inhabit reefs with high microborers' activity? *Marine Biology*:1–5
- Carricart-Ganivet, J. P. y D. J. Barnes. 2007c. Densitometry from digitized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 344:67–72
- Carricart-Ganivet, J. P.; J. M. Lough y D. J. Barnes. 2007b. Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive *Porites* from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 351:27-36
- Carricart-Ganivet, J. P. y M. Merino. 2001. Growth responses of the reef-building coral *Montastrea annularis* along a gradient of continental influence in the southern gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science* 133-146
- Carriquiry, J. D.; A. L. Cupul-Magaña; F. A. Rodríguez-Zaragoza y P. Medina-Rosas. 2001. Coral bleaching and mortality in the Mexican Pacific during the 1997-98 El Niño and prediction from a remote sensing approach. *Bulletin of Marine Sciences* 69:237-250
- Carriquiry, J. D. y H. Reyes-Bonilla. 1997. Estructura de la comunidad y distribución geográfica de los arrecifes coralinos de Nayarit, Pacífico de México. *Ciencias Marinas* 23:227-248
- Cohen, A. L. y T. A. McConnaughey. 2003. A geochemical perspectives on coral mineralization. En: Dove M, W. S., de Yoreo J (Editores) *Biom mineralization*, Vol 54. *Rev Mineral Geochem*, p 151-187

- CONANP, (2006) Programa de conservación y manejo, Parque Nacional Cabo Pulmo, México. En: (CONANP), CONANP (Editores). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), México, DF, 134 p
- CONANP, (2007) Programa de conservación y manejo, Parque Nacional Islas Marietas, México. En: CONANP (Editores), México, DF, 159 p
- Cooper, T. F.; G. De'Ath; K. E. Fabricius y J. M. Lough. 2008. Declining coral calcification in massive *Porites* in two nearshore regions of the northern Great Barrier Reef. *Global Change Biology* 14:529-538
- Chalker, B. E. y D. J. Barnes. 1990. Gamma densitometry for the measurement of skeletal density. *Coral Reefs* 9:11-23
- Chave, K. E.; S. V. Smith y K. J. Roy. 1972. Carbonate production by coral reefs. *Marine Geology* 12:123-140
- Dávalos-Dehullu, E.; H. Hernández-Arana y J. P. Carricart-Ganivet. 2008. On the causes of density banding in skeletons of corals of the genus *Montastraea*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 365:142-147
- Falkowski, P. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* (290) 5490:291-296
- Halfar, J.; L. Godinez-Orta; B. Riegl; J. E. Valdez-Holguin y J. M. Borges. 2005. Living on the edge: high-latitude *Porites* carbonate production under temperate eutrophic conditions. *Coral Reefs* 24:582-592
- Hoarea, A. y C. P. Tsokos. 2009. Statistical analysis and modeling of coral reef habitats. *Nonlinear Analysis. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*:e1360-e1369
- Hubbard, D. K.; A. Miller y D. Scaturro. 1990. Production and cycling of calcium carbonate in a shelf-edge reef system (St Croix, US, Virgin Islands): Applications to the nature of reef system in the fossil record. *Journal of sedimentary petrology* 69:335-360
- Lesser, M. P. 2004. Experimental biology of coral reef ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 217-252
- López-Pérez, R. A.; H. Reyes-Bonilla; A. F. Budd y F. Correa-Sandoval. 2003. The taxonomic status of *Porites sverdrupi*, an endemic coral of the Gulf of California. *Ciencias Marinas* 29 (4):677-691
- Lough, J. M. y D. J. Barnes. 1997. Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: A proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 211:29-67
- Lough, J. M. y D. J. Barnes. 2000. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 245:225-243
- Manly, F. J. 2007. Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology, Vol 1. Chapman & Hall, Boca Raton, 455p
- Marubini, F.; H. Barnett; C. Langdon y M. J. Atkinson. 2001. Dependence of calcification on light and carbonate ion concentration for the hermatypic coral *Porites compressa*. *Marine Ecology Progress Series* 220:153-162

- Nadon, M. O. y G. Stirling. 2006. Field and simulation analyses of visual methods for sampling coral cover. *Coral Reefs* 25:177-185
- Díaz-Paz, D. A. 2005. Revisión taxonómica del coral *Porites panamensis* Verrill, 1866 (Anthozoa: Scleractinia) en el Golfo de California, México. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 71p
- Paz-García, D. A.; F. Correa-Sandoval; H. E. Chávez-Romo; H. Reyes-Bonilla; R. A. López-Pérez; P. Medina-Rosas y M. P. Hernández-Cortés (2008) Genetic structure of the massive coral *Porites panamensis* (Anthozoa: Scleractinia) from the Mexican Pacific. En: Symposium, I. C. R. (Editores) Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium. International Coral Reef Symposium, 7-11 de Julio, Ft. Lauderdale, Florida, p 449-453
- Qi, S.; Z. Meixia; Z. QiaoMin; Y. KeFu; C. Tianran; L. Shu y W. HanKui. 2008. Estimate of carbonate production by scleractinian corals at Luhuitou fringing reef, Sanya, China. *Chinese Science Bulletin* 54:696-705
- Reyes-Bonilla, H. 1993. Estructura de la comunidad, influencia de la depredación y biología poblacional de corales hermatípicos en el arrecife de Cabo Pulmo, Baja California Sur. CICESE. 169 p
- Reyes-Bonilla, H. y L. E. Calderón-Aguilera. 1994. Parámetros poblacionales de *Porites panamensis* (Anthozoa:Scleractinia), en el arrecife de Cabo Pulmo, México. *Revista de Biología Tropical* 42:121-128
- Reyes-Bonilla, H.; S. González-Romero; G. Cruz-Piñón y L. E. Calderón-Aguilera. 2007. Corales pétreos. In: Danemann, G., E. Ezcurra (Editores) Bahía de los Ángeles: Recursos naturales y comunidad Línea Base 2007. SEMARNAT, PRONATURA, INE, San Diego NHM, Ensenada, BC, 740 p
- Reyes-Bonilla, H.; J. T. Ketchum-Mejía; G. Cruz-Piñón y E. Barjau-González. 2005. Catálogo de corales pétreos (Anthozoa: Scleractinia) depositados en el Museo de Historia Natural de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (MHNUABCS), Vol. Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, BCS
- Roelfsema, C. M.; K. E. Joyce y S. R. Phinn (2004) Evaluation of benthic survey techniques for validating remotely sensed images of coral reefs. 10th International Coral Reefs Symposium Japanese Coral Reef Society, 10-15 de Julio, Okinawa, Japan p10
- Segal, B. y B. C. Clovis. 2001. A proposed method for coral cover assessment: a case study in Abrolhos, Brazil. *Bulletin of Marine Science* 69:487-496
- Smith, T. H. y W. Buddemeier. 1992. Global change and coral reef ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 23:89-118
- Vecsei, A. 2001. Fore-reef carbonate production: development of a regional census-based method and first estimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 175:185-200
- Veron, J. 2000. Corals of the World, Vol. AIMS y CRR Queensland. vol.1: 463pp
- Worum, F. P.; J. P. Carricart-Ganivet; L. Benson y D. Golicher. 2007. Simulation and observations of annual density banding in skeletons of *Montastraea* (Cnidaria: Scleractinia) growing under thermal stress associated with ocean warming. *Limnology and Oceanography* 52:2317-2323

## ANEXO A

Tabla XIX. Estadística descriptiva de valores de gris (0-256) calculada por sección de bloque. Se presentan media, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), mínimo-máximo, índice de asimetría; sombreado se presentan la comparación entre radiografías, número de radiografías (N(Rx)), estadístico Kruskal-Wallis (K-S) y valor de *p*.

Bloque	Sección de bloque	Media	Desv. Est.	CV	Mín.	Máx.	Asim.	N (Rx)	K-W	p
1	Superior	23.24	13.96	60%	3.06	51.37	0.43	5	1023.4	0.00
	Medio	22.23	13.42	60%	0.00	54.29	0.18	5	911.4	0.00
	Inferior	23.19	13.74	59%	2.29	55.38	0.33	5	1107.3	0.00
2	Superior	56.53	24.59	43%	9.69	83.52	-1.11	5	1151.0	0.00
	Medio	56.82	25.37	45%	8.15	93.36	-1.01	5	1094.7	0.00
	Inferior	57.90	26.54	46%	7.21	86.95	-1.12	5	1146.4	0.00
3	Superior	93.36	27.88	30%	35.99	118.33	-1.34	5	1127.5	0.00
	Medio	109.59	14.76	13%	71.49	128.20	-1.12	5	1129.6	0.00
	Inferior	108.30	6.88	6%	86.88	120.14	-0.45	5	869.3	0.00
4	Superior	115.19	18.89	16%	74.47	135.52	-1.20	5	1143.7	0.00
	Medio	148.00	15.29	10%	131.36	179.71	1.19	5	1144.7	0.00
	Inferior	145.33	29.37	20%	118.05	204.85	1.33	5	1148.1	0.00
5	Superior	137.26	9.26	7%	123.50	154.48	0.40	5	967.6	0.00
	Medio	172.38	27.46	16%	144.62	230.90	1.29	5	1145.8	0.00
	Inferior	161.67	42.10	26%	121.04	245.98	1.33	5	1104.1	0.00
6	Superior	151.22	17.71	12%	126.58	186.80	0.68	5	1147.6	0.00
	Medio	186.34	33.04	18%	145.78	250.41	1.19	5	1151.0	0.00
	Inferior	170.73	43.65	26%	123.47	255.00	1.24	5	1151.2	0.00
7	Superior	153.49	20.80	14%	120.86	194.16	0.45	5	1101.5	0.00
	Medio	188.64	33.39	18%	142.61	252.16	1.03	5	1151.0	0.00
	Inferior	173.17	42.60	25%	127.29	255.00	1.20	5	1158.1	0.00
8	Superior	159.35	35.37	22%	94.11	225.75	0.46	5	1090.4	0.00
	Medio	186.55	37.58	20%	109.17	254.81	0.47	5	967.4	0.00
	Inferior	176.57	43.79	25%	103.14	255.00	0.64	5	1005.8	0.00

**Tabla XX. Estadística descriptiva de variables de densidad esquelética ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo. Se presentan media (sombreada), desviación estándar (Desv. Est.), CV, mediana, mínimo-máximo y tamaño de muestra (N).**

		CP 3	CP 4	CP 6	CP 7	CP 8	CP 11	CP 12
<b>Den_Prom</b>	Media	1.52	1.31	1.29	1.34	1.37	1.27	1.33
	Desv. Est	0.02	0.02	0.03	0.07	0.05	0.04	0.01
	CV	1.4%	1.7%	1.9%	5.3%	3.6%	3.4%	1.0%
	Mediana	1.53	1.31	1.30	1.37	1.36	1.26	1.33
	Mínimo	1.48	1.28	1.26	1.23	1.29	1.22	1.30
	Máximo	1.55	1.34	1.34	1.40	1.45	1.37	1.36
<b>AD</b>	Media	1.58	1.35	1.38	1.41	1.43	1.34	1.38
	Desv. Est	0.02	0.02	0.03	0.06	0.06	0.06	0.02
	CV	1.0%	1.2%	2.5%	4.5%	3.9%	4.2%	1.3%
	Mediana	1.59	1.35	1.38	1.44	1.44	1.32	1.38
	Mínimo	1.55	1.32	1.35	1.32	1.33	1.27	1.35
	Máximo	1.61	1.37	1.44	1.46	1.54	1.44	1.42
<b>BD</b>	Media	1.46	1.27	1.20	1.27	1.30	1.20	1.28
	Desv. Est	0.03	0.03	0.03	0.08	0.06	0.03	0.02
	CV	2.2%	2.1%	2.2%	6.4%	4.7%	2.8%	1.3%
	Mediana	1.47	1.27	1.20	1.30	1.32	1.19	1.29
	Mínimo	1.41	1.23	1.17	1.14	1.19	1.18	1.26
	Máximo	1.52	1.30	1.24	1.35	1.38	1.30	1.31
<b>Dif_AD-BD</b>	Media	0.12	0.08	0.18	0.14	0.14	0.14	0.09
	Desv. Est	0.03	0.01	0.04	0.03	0.06	0.04	0.02
	CV	23.4%	13.9%	20.3%	22.2%	47.2%	26.4%	22.7%
	Mediana	0.12	0.08	0.18	0.13	0.11	0.14	0.10
	Mínimo	0.05	0.06	0.12	0.10	0.05	0.08	0.05
	Máximo	0.14	0.10	0.23	0.18	0.24	0.20	0.13
<b>BD_Inicial</b>	Media	1.50	1.30	1.24	1.31	1.35	1.21	1.30
	Desv. Est	0.04	0.02	0.05	0.09	0.06	0.04	0.02
	CV	2.7%	1.5%	3.8%	6.8%	4.5%	3.2%	1.7%
	Mediana	1.50	1.30	1.24	1.35	1.35	1.19	1.30
	Mínimo	1.43	1.28	1.17	1.19	1.24	1.18	1.26
	Máximo	1.56	1.34	1.31	1.42	1.48	1.31	1.34
<b>BD_Final</b>	Media	1.49	1.27	1.23	1.28	1.31	1.23	1.30
	Desv. Est	0.05	0.03	0.04	0.08	0.06	0.05	0.02
	CV	3.3%	2.1%	3.2%	6.2%	4.6%	4.4%	1.6%
	Mediana	1.50	1.27	1.24	1.30	1.33	1.20	1.31
	Mínimo	1.41	1.23	1.17	1.14	1.19	1.18	1.26
	Máximo	1.56	1.30	1.29	1.38	1.38	1.32	1.34
<b>Prop_AD</b>	Media	0.49	0.51	0.48	0.47	0.44	0.58	0.49
	Desv. Est	0.20	0.16	0.13	0.15	0.22	0.08	0.16
	CV	40.2%	31.2%	26.4%	32.2%	50.1%	13.1%	31.9%
	Mediana	0.46	0.58	0.44	0.50	0.45	0.59	0.46
	Mínimo	0.25	0.31	0.29	0.26	0.10	0.44	0.31
	Máximo	0.85	0.65	0.67	0.67	0.85	0.68	0.84
	N	15	6	12	9	15	13	16

**Tabla XXI. Estadística descriptiva de variables de densidad esquelética ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas. Se presentan media (sombreada), desviación estándar (Desv. Est.), CV, mediana, mínimo-máximo y tamaño de muestra (N).**

		<b>IM_1</b>	<b>IM_2</b>	<b>IM_5</b>	<b>IM_6</b>	<b>IM_8</b>
<b>Den_Prom</b>	Media	1.20	1.25	1.25	1.13	1.11
	Desv.Est.	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02
	CV	0.4%	1.7%	1.0%	2.5%	1.9%
	Mediana	1.20	1.26	1.25	1.13	1.10
	Mínimo	1.20	1.20	1.22	1.09	1.08
	Máximo	1.21	1.27	1.26	1.17	1.14
<b>AD</b>	Media	1.23	1.30	1.28	1.16	1.13
	Desv.Est.	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02
	CV	0.2%	2.0%	1.7%	3.9%	2.2%
	Mediana	1.23	1.30	1.28	1.15	1.13
	Mínimo	1.23	1.26	1.26	1.10	1.11
	Máximo	1.23	1.34	1.31	1.22	1.17
<b>BD</b>	Media	1.17	1.20	1.21	1.09	1.08
	Desv.Est.	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02
	CV	0.6%	2.8%	1.6%	1.8%	1.6%
	Mediana	1.17	1.21	1.21	1.09	1.08
	Mínimo	1.17	1.12	1.18	1.07	1.06
	Máximo	1.18	1.24	1.25	1.12	1.11
<b>Dif_AD-BD</b>	Media	0.05	0.09	0.07	0.07	0.05
	Desv.Est.	0.00	0.04	0.03	0.04	0.01
	CV	8.4%	45.3%	44.8%	62.6%	15.7%
	Mediana	0.05	0.09	0.08	0.05	0.05
	Mínimo	0.05	0.03	0.03	0.02	0.04
	Máximo	0.06	0.16	0.12	0.12	0.06
<b>BD_Inicial</b>	Media	1.20	1.23	1.23	1.11	1.10
	Desv.Est.	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
	CV	1.9%	2.1%	1.8%	2.5%	2.5%
	Mediana	1.20	1.24	1.24	1.12	1.10
	Mínimo	1.18	1.19	1.19	1.07	1.06
	Máximo	1.22	1.26	1.26	1.14	1.13
<b>BD_Final</b>	Media	1.17	1.21	1.22	1.11	1.09
	Desv.Est.	0.01	0.04	0.03	0.03	0.02
	CV	0.6%	3.3%	2.2%	2.5%	2.1%
	Mediana	1.17	1.21	1.22	1.10	1.08
	Mínimo	1.17	1.12	1.18	1.07	1.07
	Máximo	1.18	1.26	1.26	1.14	1.12
<b>Prop_AD</b>	Media	0.26	0.51	0.52	0.36	0.32
	Desv.Est.	0.09	0.09	0.17	0.19	0.14
	CV	33.3%	18.3%	32.3%	52.1%	44.2%
	Mediana	0.26	0.48	0.51	0.47	0.33
	Mínimo	0.20	0.41	0.28	0.06	0.13
	Máximo	0.32	0.67	0.82	0.51	0.49
	N	2	11	12	8	6

**Tabla XXII. Estadística descriptiva a nivel colonia para Cabo Pulmo para la variable extensión esquelética ( $\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan media (sombreada), desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana y mínimo-máximo.**

		CP_1	CP_3	CP_4	CP_6	CP_7	CP_8	CP_10	CP_11	CP_12
<b>Extensión esquelética</b>	Media	1.20	0.91	0.74	0.78	1.44	1.01	0.92	0.64	0.88
	Desv. Est	0.11	0.24	0.05	0.17	0.34	0.36	0.19	0.08	0.37
	CV	10%	26%	7%	23%	24%	35%	21%	13%	41%
	Mediana	1.25	0.88	0.74	0.69	1.23	1.14	0.92	0.61	0.75
	Mínimo	1.07	0.42	0.64	0.60	1.15	0.38	0.69	0.49	0.46
	Máximo	1.28	1.30	0.78	1.07	1.99	1.41	1.18	0.81	1.57
	N	3	15	6	12	9	15	9	13	16

**Tabla XXIII. Estadística descriptiva a nivel colonia para Islas Marietas para la variable extensión esquelética ( $\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan media (sombreada), desviación estándar, CV=coeficiente de variación, mediana y mínimo-máximo.**

		IM 1	IM 2	IM 5	IM 6	IM 8
<b>Extensión esquelética</b>	Media	0.27	0.39	0.46	0.29	0.30
	Desv.Est.	0.03	0.06	0.16	0.12	0.08
	CV	11.5%	14.5%	35.8%	40.9%	25.0%
	Mediana	0.27	0.41	0.45	0.29	0.29
	Mínimo	0.25	0.28	0.24	0.15	0.23
	Máximo	0.29	0.45	0.66	0.44	0.41
	N	2	11	12	8	6

**Tabla XXIV. Estadística descriptiva de la tasa de calcificación a nivel de colonia para la localidad de Cabo Pulmo ( $\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan media (sombreada), desviación estándar (Desv. Est.), CV, mediana, mínimo-máximo y tamaño de muestra (N).**

		CP_1	CP_3	CP_4	CP_6	CP_7	CP_8	CP_11	CP_12
<b>Calcificación</b>	Media	1.59	1.39	0.96	1.01	1.94	1.38	0.81	1.18
	Desv. Est	0.15	0.37	0.06	0.24	0.54	0.49	0.12	0.49
	CV	9.4%	26.7%	6.3%	24.0%	27.9%	35.3%	14.2%	41.8%
	Mediana	1.65	1.33	0.98	0.89	1.67	1.55	0.77	0.98
	Mínimo	1.42	0.64	0.85	0.78	1.45	0.51	0.62	0.61
	Máximo	1.70	1.99	1.01	1.44	2.80	1.89	1.02	2.10
	N	3	15	6	12	9	15	13	16

**Tabla XXV. Estadística descriptiva de la tasa de calcificación a nivel de colonia para la localidad de Islas Marietas ( $\text{gCaCO}_3\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ ). Se presentan media (sombreada), desviación estándar (Desv. Est.), CV, mediana, mínimo-máximo y tamaño de muestra (N).**

		Colonia				
		IM_1	IM_2	IM_5	IM_6	IM_8
<b>Calcificación</b>	Media	0.29	0.48	0.51	0.29	0.30
	Desv.Est.	0.03	0.06	0.18	0.12	0.08
	CV	11.9%	13.6%	36.2%	42.4%	26.2%
	Mediana	0.29	0.49	0.50	0.28	0.28
	Mínimo	0.26	0.35	0.26	0.15	0.22
	Máximo	0.31	0.55	0.74	0.44	0.41
	N	2	11	12	8	6

## **ANEXO B**

### **Descripción de densidad y tamaño de coralitos de las localidades de Islas Marietas y Cabo Pulmo**

#### **1. Planteamiento del problema**

El presente reporte tiene como finalidad describir las dimensiones de los coralitos evaluando el diámetro y área, además un conteo para comparar la densidad de coralitos por unidad de área para las localidades de Islas Marietas (IM) y Cabo Pulmo (CP); esto se desprende del trabajo realizado con los perfiles de densidad, ya que las colonias de IM presentaron valores de densidades distintas con dos diferentes ajustes de color de gris en el estándar.

El estándar de aragonita (piezas de aragonita de almeja gigante) sirve para definir el espectro de grises o escala de grises para la radiografía, y relacionando la escala de grises con el grosor de cada pieza se obtiene la densidad mediante un ajuste lineal; en todas las radiografías se presentó un efecto de borde evidenciado como un gradiente de color de gris que disminuye en los márgenes de cualquier cuerpo en una radiografía, atenuando la intensidad del color de gris en el primer centímetro (aproximadamente) alrededor de los cuerpos, lo que conlleva a un cálculo subestimado de la densidad dentro de la región del efecto de borde.

Las colonias de coral de IM presentaron una altura menor a 3cm con una forma de crecimiento similar a incrustante, esto provocó que la mayor parte de las imágenes de las lajas presentaran efecto de borde; se calculó la densidad (mediante perfiles de densidad) con dos ajustes lineales, primeramente con 4 piezas del estándar con valores de escala de gris entre 20-135 (en las demás radiografías se usaron 4 bloques del estándar con una escala de gris variante), con esto el cálculo de la densidad promedio (Den\_Prom) presentó una media de  $1.28\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  con un intervalo entre  $1.10\text{-}1.54\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ , mientras que la Den\_Prom de CP fue  $\sim 1.35\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Posteriormente se realizó el cálculo de densidades para los corales de IM con 3 bloques del estándar con valores de escala de gris entre 20-110, arrojando una densidad promedio menor a la anterior, con una media de  $1.09\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$  en un intervalo entre

$0.95-1.30\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ , con una diferencia de densidad  $\sim 15\%$  entre los dos ajustes para IM, presentándose dos escenarios:

1) el ajuste lineal con un espectro de grises menor arroja una densidad baja con respecto a CP, lo que indicaría que la densidad de IM se estaría subestimando por el efecto de borde (el cual disminuye la densidad), pero aún con esto, la densidad posiblemente sería menor a la de CP, y

2) un ajuste de densidad con un mayor espectro de grises arroja una densidad similar a CP, aún siendo subestimada por el efecto de borde, indicando que, de corregirse el efecto de borde, con este ajuste la densidad de IM sería igual o tal vez mayor a CP. Cabe mencionar que debido al efecto de borde, el ajuste de 4 piezas del estándar tendería a sobreestimar la densidad, mientras que el ajuste con 3 piezas a subestimarla, pero con esta última se tendría una descripción más aproximada de las densidades de la localidad (IM) al realizarse una corrección de los valores.

Ante tal situación, se optó por decidir cuál de los dos ajustes se utilizaría para describir las densidades de IM, mediante un análisis comparativo de coralitos entre localidades; el análisis de coralitos se basa en que, si IM presenta coralitos de mayor tamaño y mayor densidad por unidad de área con respecto a CP, por lo tanto debería presentar una menor densidad esquelética, esto relacionado morfológicamente con una menor cantidad de material depositado en las estructuras del coralito, como p.e. la pared (teca) y un mayor espacio entre septos.

## **2. Objetivo**

Comparar el tamaño y la densidad por unidad de área de coralitos de colonias colectadas en las localidades de Cabo Pulmo e Islas Marietas.

## **3. Materiales y método**

Para cada localidad se seleccionaron al menos 3 fragmentos y/o la laja de la colonia para analizar la densidad por unidad de área de coralitos a nivel colonia y el tamaño de coralito a nivel localidad. Se eligieron 3 zonas distintas de cada colonia, separadas entre sí, que presentaran definición de los coralitos, sin erosión o daño y lo suficientemente plana para evitar posibles efectos de proyección que pudieran influir en las mediciones, cada área seleccionada fue considerada una muestra a nivel de colonia.

Cada área seleccionada de la colonia fue fotografiada para lo cual se utilizó un microscopio estereoscópico (*Zeiss Inc.*) con 6x de amplificación y una cámara digital para microscopio *Scopephoto DCM510* (*Melsobel Inc.*)<sup>9</sup> con 5 MP de resolución. Para establecer la escala se empleó en cada fotografía un fragmento de acetato graduado milimétrico previamente medido y se colocó adyacente al área de interés; las imágenes fueron seleccionadas cuando presentaron una alta definición de coralitos y escala.

En las imágenes escaladas y en formato TIF (RGB, 32 bits) se seleccionó un área de interés de 25mm<sup>2</sup> (0.5x0.5cm, figura 1) de la cual se obtuvo:

1) Conteo de coralitos (número de coralitos/área-de-interés, número de coralitos·cm<sup>-2</sup>), se contaron los coralitos completos dentro del área de interés, un coralito fue seleccionado cuando fue posible definir la pared y septos (Figura 1), se excluyeron aquellos interceptados por la línea del área de interés;

2) Tamaño de coralito (mm), se seleccionaron por lo menos 3 coralitos por área de interés cuando se pudieron identificar los septos, columna y pared, se marcó cada coralito sobre la parte central del grueso de la pared incluyendo la totalidad de los espacios entre septos (Figura 1B), de cada coralito se obtuvo: a) área, b) perímetro, para estimar el diámetro de la circunferencia medida y c) índice de circularidad.

Se presenta la estadística descriptiva del conteo de coralitos y tamaño (área y diámetro), los cálculos fueron realizados a nivel localidad sin hacer distinción entre colonias, se compararon los valores entre localidades usando la U de Mann-Whitney y se definió significancia cuando  $p < 0.05$ .

---

<sup>9</sup> [www.melsobel.com](http://www.melsobel.com)

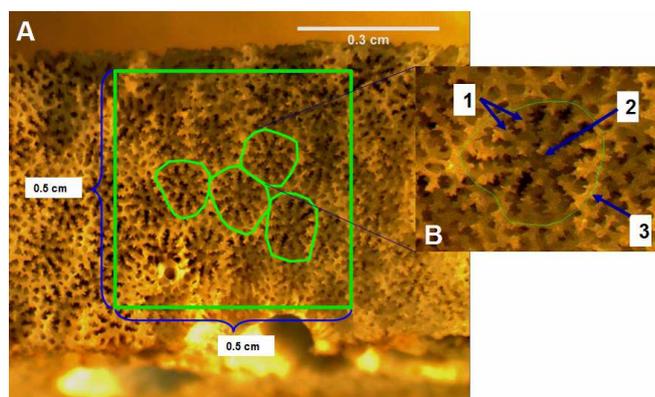


Figura 1. Imagen de un área de laja de coral. En A se presenta el área de interés (0.5x0.5cm) para conteo de coralitos por unidad de área (cuadro verde), en B una imagen ampliada de un coralito medido (línea verde) donde se identifican 1.Septos, 2.Columnela, 3.Pared o teca.

## 4. Resultados

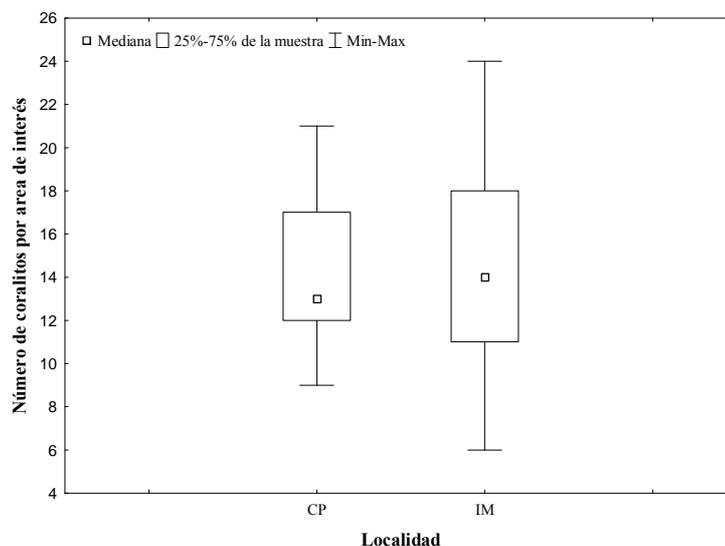
### 4.1. Densidad de coralitos por unidad de área

De un total de 52 imágenes seleccionadas, el 40% (n=21) fueron 8 colonias de CP y 60% fueron 8 colonias de IM (n=31) (Tabla I); la cantidad de coralitos por área de interés (0.25cm<sup>2</sup>) fueron similares entre las localidades, CP (14.24coralitos) e IM (14.26coralitos). Se compararon las medianas del número de coralitos entre localidades y no se encontró deferencia significativa (U=322, p=0.95) (Figura 2).

Tabla XXVI. Estadística descriptiva del número de coralitos por área de interés (0.25cm<sup>2</sup>).

	Localidad	
	CP	IM
N	21	31
Media	14.24	14.26
Desv. Est.	3.40	4.27
CV	24%	30%
Mediana	13	14
Mínimo	9	6
Máximo	21	24

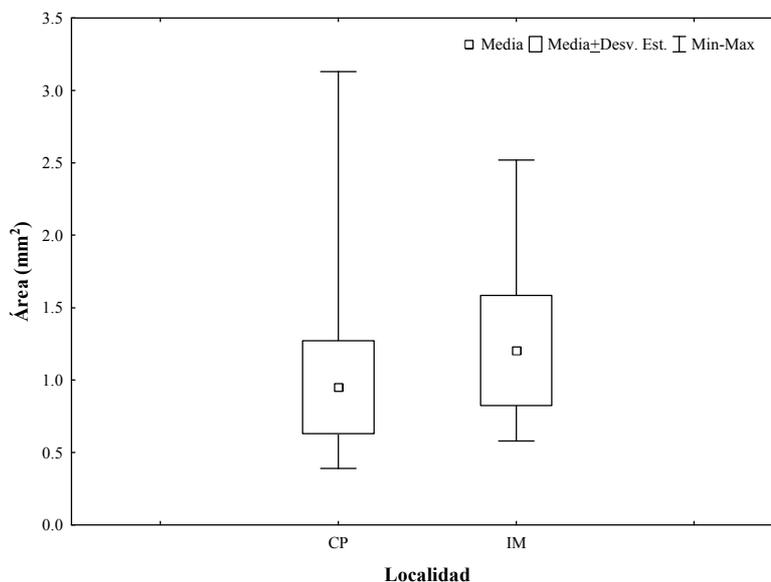
De manera general la localidad de CP presentó una densidad de 56coralitos·cm<sup>2</sup> e IM 59coralitos·cm<sup>2</sup>; IM presentó una mayor dispersión de sus datos (CV=30%) y un intervalo entre 6-24coralitos por área de interés, mientras que CP presentó ligeramente menor dispersión (CV=24%), distribuidos en un intervalo de 9-21coralitos (Figura 2).



**Figura 2.** Número de coralitos por área de interés ( $0.25\text{cm}^2$ ). Se presentan la mediana (punto central), cuartiles 25%-75% (caja) y mínimo-máximo (líneas).

#### 4.2. Tamaño de coralito

Se midieron un total de 579 coralitos, 58% corresponden a IM y 42% a CP, el área de coralito fue diferente ( $U=25,193$ ,  $p=0.00$ ) entre localidades, CP presentó menor área con  $0.95 \pm 0.32\text{mm}^2$  ( $IC_z = 0.91-0.99\text{mm}^2$ ) en comparación a IM que presentó un promedio de  $1.20 \pm 0.38\text{mm}^2$  ( $IC_z = 1.16-1.24\text{mm}^2$ ) (Figura 3).

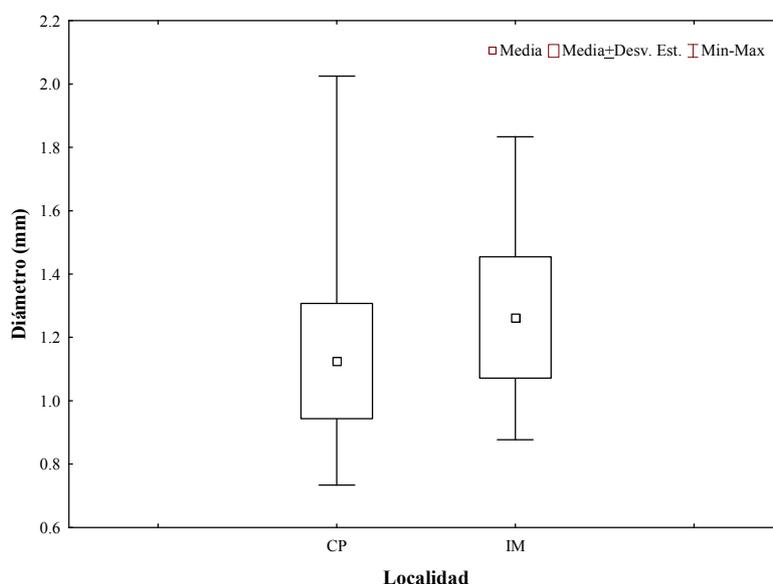


**Figura 3.** Gráfica de área de coralito para las localidades de IM y CP. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y mínimo-máximo (líneas).

**Tabla XXVII. Estadística descriptiva de las variables de área (mm<sup>2</sup>), diámetro (mm) e índice de circularidad de coralito calculada a nivel localidad para IM y CP.**

Localidad	Variable	Media	Desv. Est.	CV	ICz (95%)	Mediana	Mínimo	Máximo
CP	Área	0.95	0.32	33.7%	0.91 - 0.99	0.95	0.39	3.13
	Diámetro	1.13	0.18	16.1%	1.10 - 1.15	1.14	0.73	2.02
	I. circularidad	0.93	0.03	3.0%	0.93 - 0.93	0.94	0.81	0.98
IM	Área	1.20	0.38	31.5%	1.16 - 1.24	1.13	0.58	2.52
	Diámetro	1.26	0.19	15.2%	1.24 - 1.28	1.24	0.88	1.83
	I. circularidad	0.94	0.03	2.7%	0.94 - 0.94	0.94	0.78	0.98

El diámetro de coralito fue significativamente diferente ( $U=25,646$ ,  $p=0.00$ ) entre localidades, CP presentó menor diámetro con  $1.13\pm 0.18\text{mm}$  ( $IC_z= 1.10-1.15\text{mm}$ ) en contraste a IM con un promedio de  $1.26\pm 0.19\text{mm}$  ( $IC_z= 1.24-1.28\text{mm}$ ) (Figura 4).



**Figura 4. Gráfica de diámetro de coralito para las localidades de IM y CP. Se presentan media (punto central), desviación estándar (caja) y mínimo-máximo (líneas).**

El índice de circularidad promedio fue similar entre ambas localidades, indicando que los coralitos medidos presentaron una forma semicircular (aproximadamente 94%).

## 5. Discusión y conclusión

La densidad de coralitos por unidad de área fue igual entre localidades, esto debido posiblemente a que el arreglo de los coralitos y las dimensiones del área de interés no permitieron diferenciar entre localidades. La localidad de IM presentó coralitos de mayor tamaño (área y diámetro calculado en base al perímetro) que CP, López-Pérez (1998)

encontró que *Porites panamensis* a lo largo del Pacífico mexicano presentó valores de diámetro promedio de 1.22mm, en un intervalo entre ~0.9-1.6mm, lo que concuerda con los resultados de este reporte.

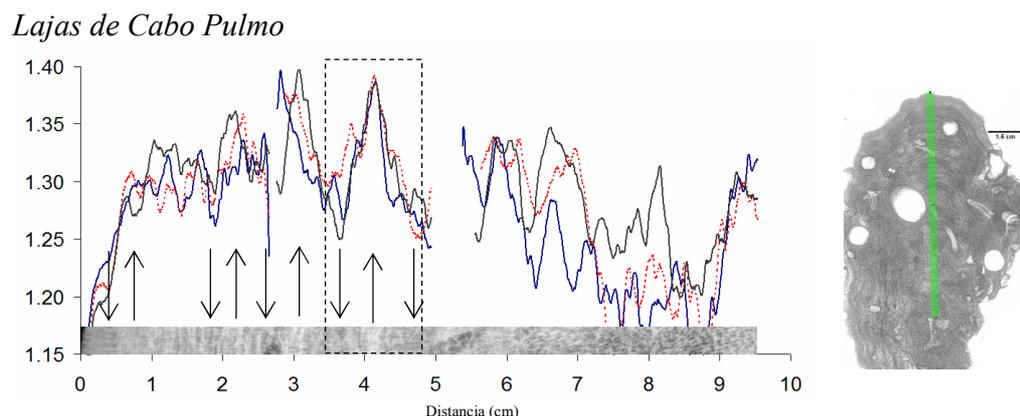
Un tamaño de coralito de IM mayor a CP pudiera ser un indicador de una menor densidad esquelética de IM con respecto a CP, basándose solamente en el cálculo del diámetro y área; un análisis de grosores de estructuras internas como pali, pared, septos y columnela ayudaría a definir con mejor precisión las diferencias encontradas.

## ANEXO C

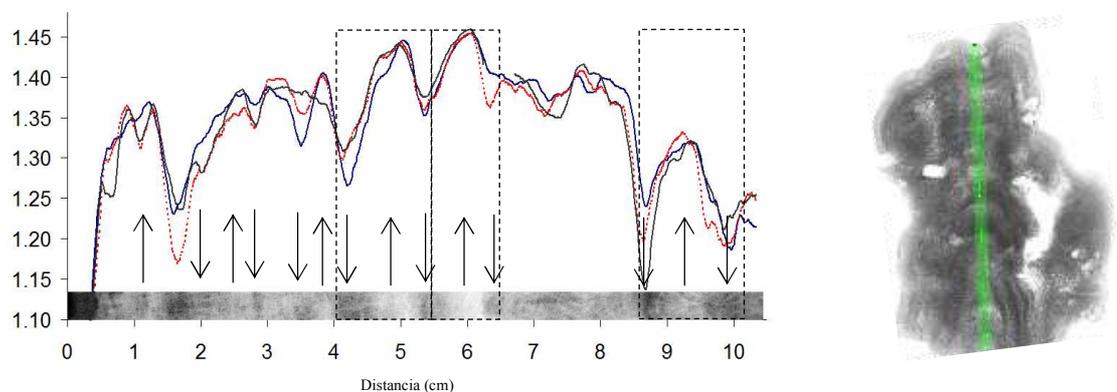
### Perfiles de densidad por laja de coral por localidad

En este anexo se presentan los perfiles de densidad medidos en cada laja de coral, se muestra la densidad calculada por píxel contra distancia o longitud del perfil. Junto al gráfico (perfil de densidad) se presenta una imagen radiográfica de contacto, sin escala, de la laja de coral, en la cual se marca la zona de interés de 0.4cm de grosor con longitud variable (cm). Al dividir la zona de interés (ver Materiales y Métodos) se obtuvieron tres perfiles de densidad presentados (donde, perfil derecho: línea continua color rojo; perfil central: línea punteada; perfil izquierdo: línea continua color azul). En el perfil, los valores de densidad de cada píxel (con un tamaño de 0.005cm), representa la media aritmética de 20 píxeles.

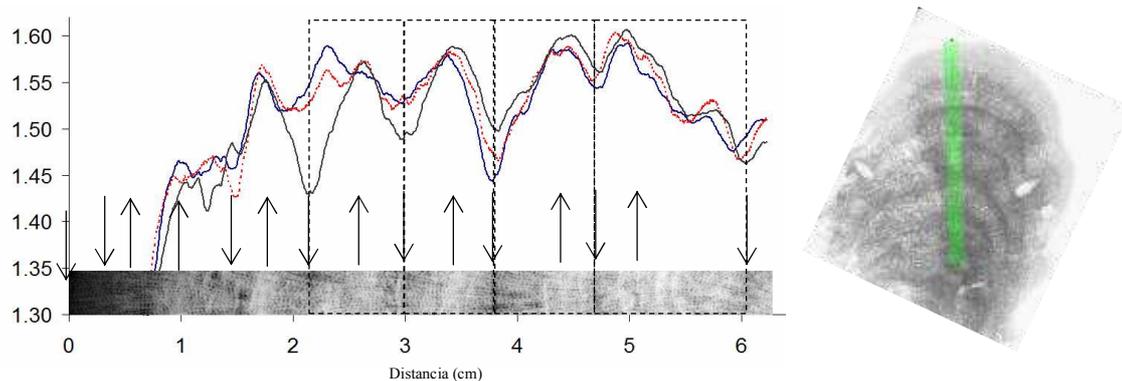
En cada gráfica se presenta la sección de interés seleccionada, como imagen en negativo, la cual se utilizó para identificar y marcar picos de baja (flecha hacia abajo) y alta densidad (flecha hacia abajo), siguiendo los criterios para la inclusión antes descritos; la imagen de la zona de interés representa 0.4cm de grosor y esta escalada según la longitud del perfil de densidad, esto con el fin de presentar una mejor definición del bandeo anual en muestras de reducido tamaño (corales de IM). Debido a lo anterior, algunas imágenes presentan una apariencia distorsionada, especialmente las lajas de IM.



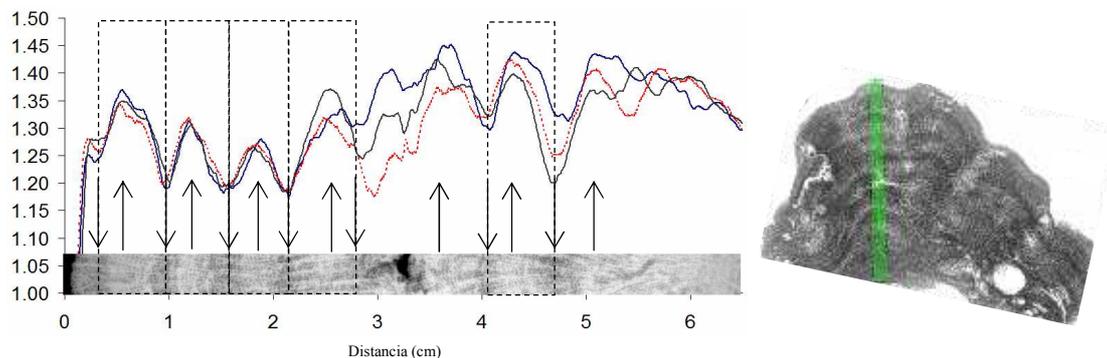
**Figura 1.** Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_1. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro).



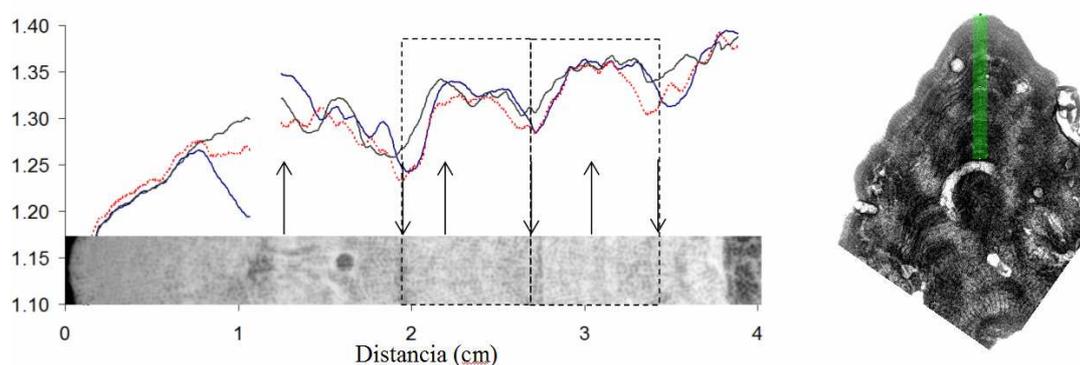
**Figura 2.** Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_7. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro).



**Figura 3.** Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_3. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro).



**Figura 4.** Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_11. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro).



**Figura 5.** Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_4. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro).

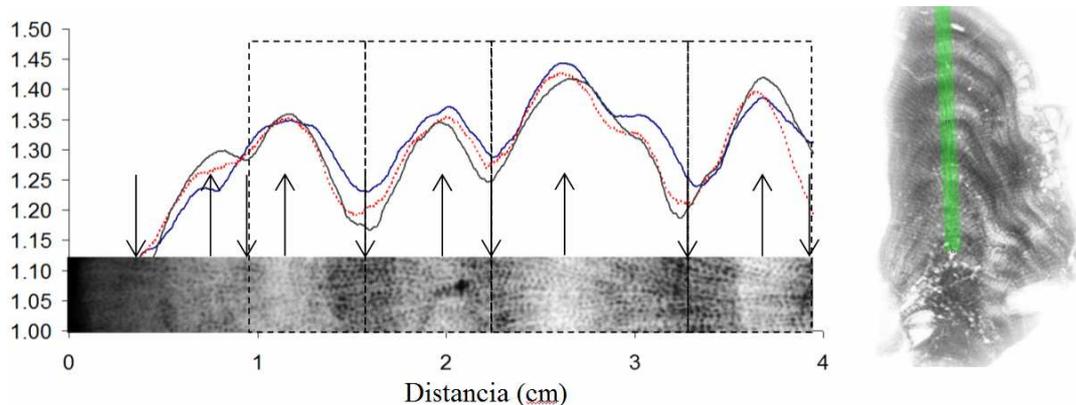


Figura 6. Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_6. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro).

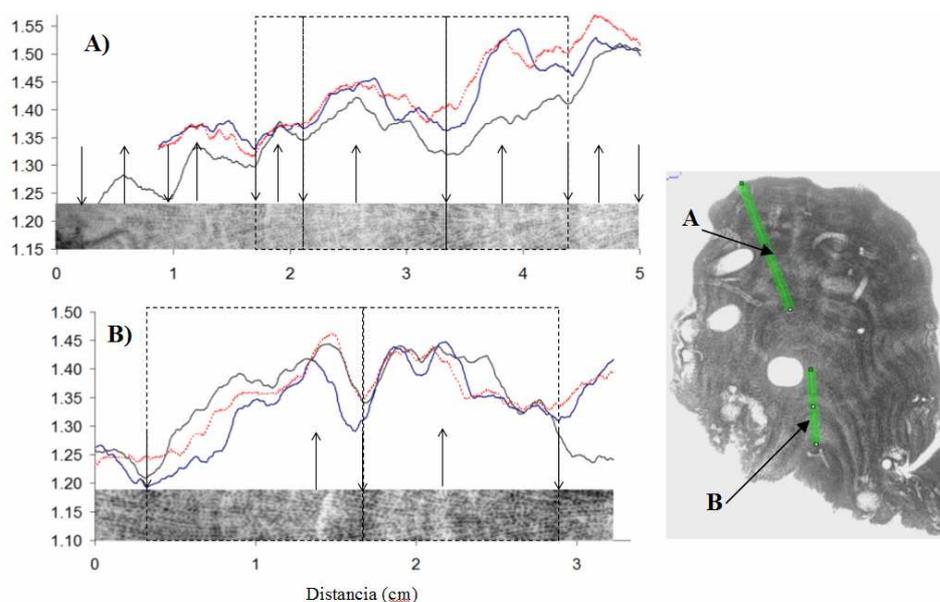


Figura 7. Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_8. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.

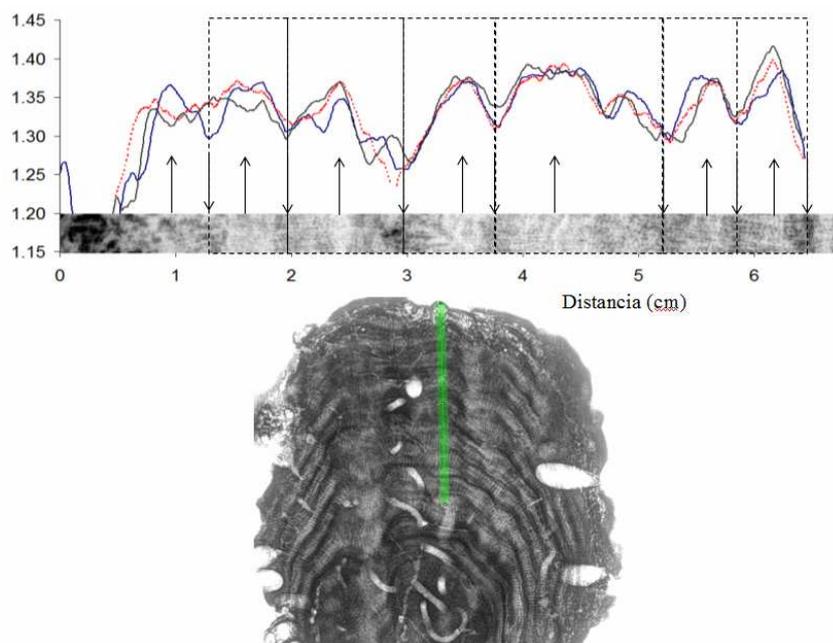


Figura 8. Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja CP\_12. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.

### *Lajas de Islas Marietas*

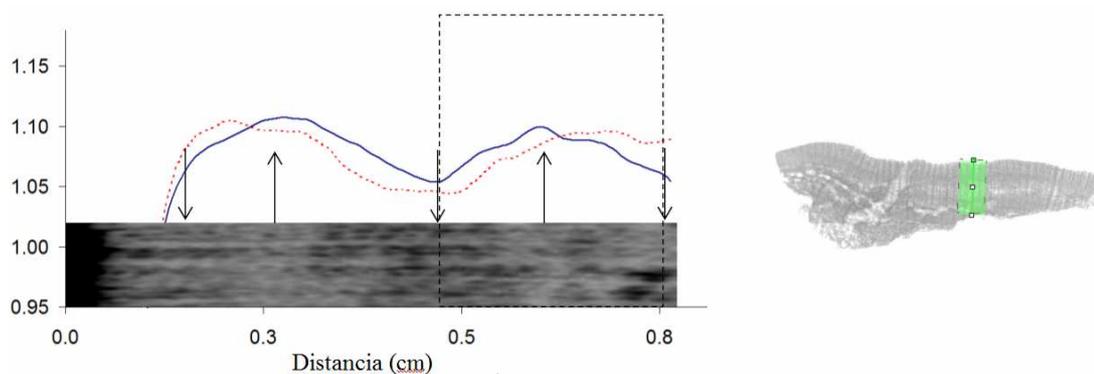


Figura 9. Perfil de densidad vs. ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja IM\_1. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.

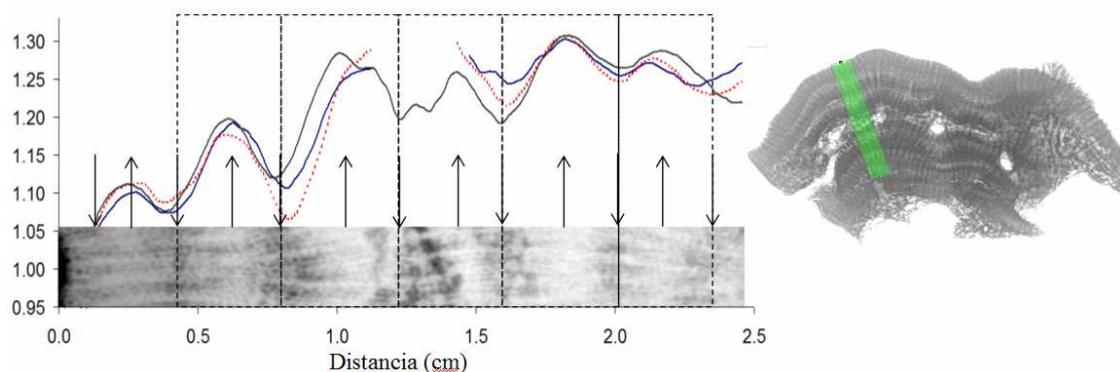


Figura 10. Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja IM\_2. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.

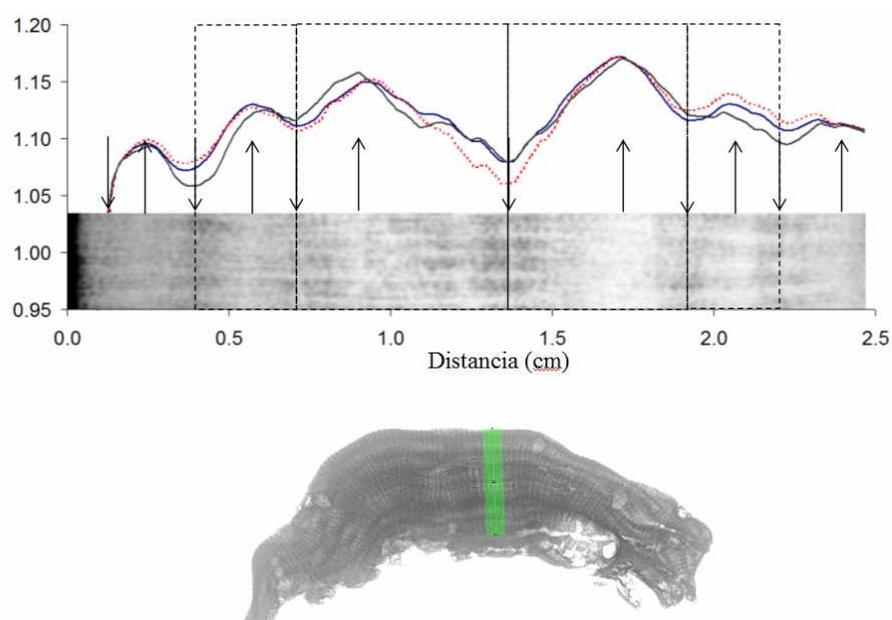
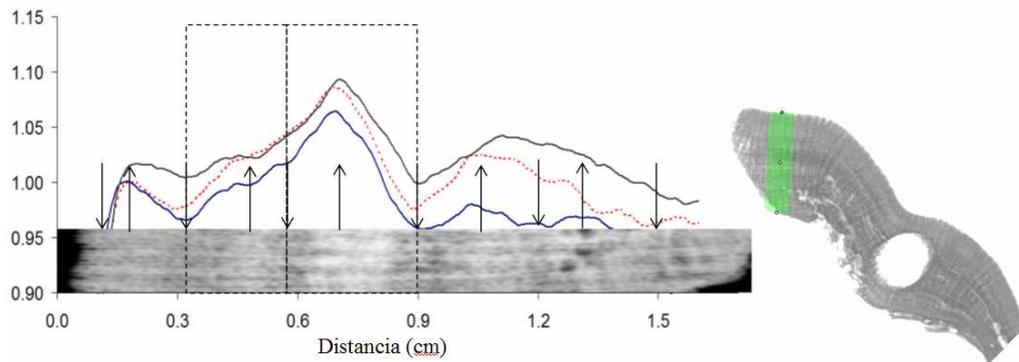
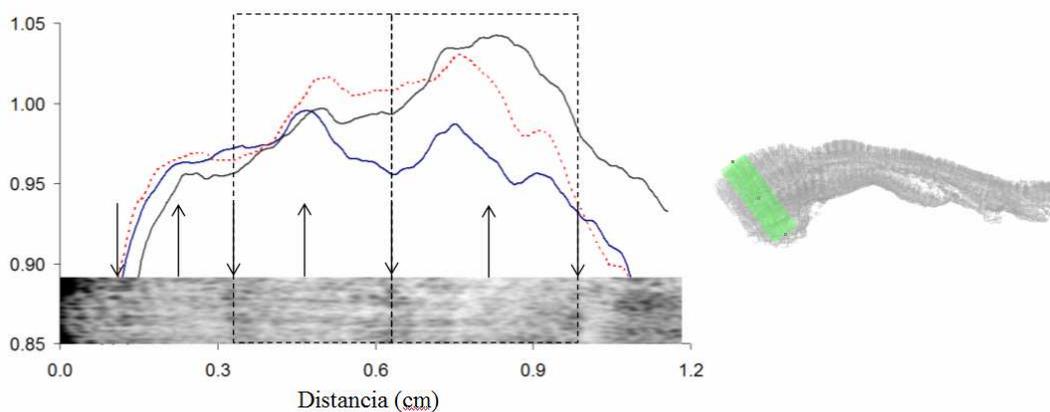


Figura 11. Perfil de densidad vs. ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja IM\_5. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.



**Figura 12.** Perfil de densidad ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja IM\_6. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.



**Figura 13.** Perfil de densidad vs. ( $\text{gCaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) vs. distancia (cm) e imagen de la radiografía de la laja IM\_8. Se presentan tres perfiles por laja, la imagen de rayos X del coral (contacto), imagen del área de interés (negativo), picos de alta (flecha hacia arriba) y baja densidad (flecha hacia arriba), y pares de bandas incluidos (recuadro). A y B son diferentes secciones del perfil.