

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**CAMBIOS EN LAS TASAS DE CRECIMIENTO ESQUELETAL DE
CORALES DEL CARIBE MEXICANO EN EL CONTEXTO DE CAMBIO
GLOBAL RECIENTE**

TESIS

Que para obtener el título de:

OCEANÓLOGO

Presenta:

Luis Roberto Robles Jiménez.

Ensenada, B.C., México

Junio del 2010

RESUMEN

En el contexto del Cambio Global reciente, numerosos ecosistemas están siendo afectados principalmente por el aumento en la temperatura. Entre los ecosistemas marinos, por la gran biodiversidad que los compone y por las características ambientales donde se desarrollan, los arrecifes coralinos han sufrido grandes impactos durante los últimos años, destacando eventos masivos de blanqueamiento coralino, con lo cual se pone en riesgo el equilibrio de este importante ecosistema. La presente investigación se realizó con el objetivo de identificar y comprender el efecto que tiene el aumento de la Temperatura Oceánica superficial (TOS) sobre el crecimiento de corales escleractinios del Caribe Mexicano. Se colectaron tres núcleos del género *Montastrea ssp.*, en diferentes localidades del litoral caribeño de Quintana Roo. A las lajas obtenidas de estos núcleos se les realizó un análisis desitométrico con el fin de conocer las tasas de crecimiento anual; densidad media anual, extensión lineal anual y la tasa de calcificación anual. Posteriormente de las mismas lajas, se recuperaron las señales geoquímicas de Sr/Ca y Mg/Ca con las cuales se reconstruyeron las condiciones de temperatura bajo las cuales los organismos colectados crecieron. Se realizaron análisis estadísticos de correlación entre los parámetros de crecimiento y la TOS recuperada de los paleotermómetros. Los resultados no muestran cambios en las estrategias de crecimiento coralino asociados a la variación de la TOS, sin embargo las observaciones en esta investigación, sugieren que hay elementos suficientes para demostrar que bajo condiciones de aumento en la TOS, los corales colectados para este estudio reflejan efectos negativos en sus tasas de crecimiento.

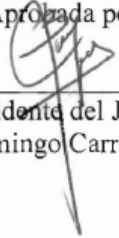
**“CAMBIOS EN LAS TASAS DE CRECIMIENTO ESQUELETAL DE
CORALES DEL CARIBE MEXICANO EN EL CONTEXTO DE CAMBIO
GLOBAL RECIENTE”**

TESIS

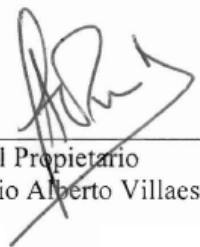
QUE PRESENTA:

LUIS ROBERTO ROBLES JIMÉNEZ.

Aprobada por:



Presidente del Jurado
Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán



Sinodal Propietario
Dr. Julio Alberto Villaescusa Celaya



Sinodal Propietario.
Dr. José Antonio Martínez Alcalá

Dedicatoria

A Constanza Guerra Romani, mi compañera en esta vida.
A Benjamín Robles y Dolores Jiménez mi buenos y amados padres.
A Pablo, Jacob, Emyr, Tihui y Lalo, ellos saben porque.
A mi querido Manya.

Agradecimientos

A mi director el Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán, por el respaldo que en todo momento me brindo durante el desarrollo de este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Julio Villaescusa y Dr. Antonio Martinez, por apoyo y sus consejos.

Al Dr. Guillermo Horta, al M.C. Pedro Castro y a mis compañeros en el grupo de Geoquímica Ambiental quienes facilitaron en gran medida mi trabajo.

Al Dr. Juan Pablo Carricart, por brindarme el material para el desarrollo de este trabajo.

Índice

I.- Introducción	1
II.- Hipótesis.....	5
III.- Objetivo general	6
IV.- Objetivos particulares	6
V.- Área de Estudio.....	7
VI.- Metodología	9
VII.- Resultados	13
a) Densitometría	13
b) Puerto Morelos.....	15
c) Punta Nizuc	18
d) Reconstrucción de la TOS	21
e) TOS vs Tasas de crecimiento	27
VIII.- Discusiones.....	37
a) Relación entre variables de crecimiento.....	37
b) Reconstrucción de la TOS	39
c) TOS vs Tasas de crecimiento.	40
IX.- Conclusiones	47
X.- Referencias	50

Índice de Figuras

Figura 1 Región noreste del estado de Quintana Roo, cuyo litoral es bañado por las aguas del Mar Caribe. Es esta zona donde se encuentran las localidades de Punta Nizuc y Puerto Morelos, de donde fueron obtenidos núcleos coralinos.	7
Figura 2 Radiografía digital PM3y4 En los extremos inferior y superior aparecen barras de aluminio, la laja inferior corresponde a PM3 y la superior a PM4 la cuál fue descartada para este estudio, en medio de ambas se encuentra el juego de estándares de aragonita.....	13
Figura 3 Radiografía PN-M, La laja que aparece en la parte superior es la correspondiente a la localidad de Punta Nizuc, la laja inferior	13
Figura 4 Ajuste del polinomio de segundo grado a la señal de intensidad luminosa obtenida para la barra de aluminio	15
Figura 5 Curva de calibración obtenida a través de los valores corregidos de densidad óptica para los estándares de aragonita, comparados contra los valores conocidos de densidad absoluta	15
Figura 6 Modelo de edad para PM3, la linea azul representa las variaciones estacionales de la densidad a lo largo del crecimiento del coral, los puntos amarillos representan el periodo de verano donde la densidad de CaCO_3 depositado en el esqueleto coralino es mínima.....	16
Figura 7 La tasa de Calcificación anual y la tasa de extensión anual, la r^2 es mayor a 0.95.....	18
Figura 8 La densidad anual contra la tasa de calcificación anual.....	18
Figura 9 Densidad vs extensión lineal	18
Figura 10 Ajuste del polinomio a la señal de intensidad luminosa obtenida para la barra de aluminio, la r^2 tiene un valor muy cercano a 1.....	19
Figura 11 Curva de calibración obtenida a través de los valores corregidos de densidad óptica para los estándares de aragonita, comparados contra los valores conocidos de densidad absoluta	19
Figura 12 Modelo de edad para PN0898, presenta 51 ciclos de variación estacional a lo largo de 32.5 cm del largo de la laja. La linea celeste representa la señal densidad absoluta en la distancia, los puntos anaranjados indican el periodo de verano donde la densidad de CaCO_3 depositada por cm^3 es mínima	21
Figura 13 Tasa de calcificación vs extencion lineal, el valor de r^2 es de 0.984	22
Figura 14 La densidad anual y la tasa de calcificación anual, aparentemente no presentan relación, el valor del coheficiente de determinación es menor a 0.04.....	22

Figura 15 Densidad vs extensión lineal, el valor de r^2 es menor a 0.1	22
Figura 16 Calibración de la señal geoquímica del Sr/Ca para el registro PM3, utilizando datos de TOS instrumental COADS	24
Figura 17 La temperatura del registro satelital (línea continua verde) y la derivada de la señal Sr/Ca (línea azul), presentan diferencia de hasta 1°C en algunos años.....	24
Figura 18 Calibración de la señal geoquímica del Sr/Ca para el registro PN0898, utilizando datos de TOS instrumental COADS.....	24
Figura 19 41 de los 51 ciclos del registro PN0890, fueron medidos en el ICP (línea azul), con los cuales se calculó la temperatura a través de la señal geoquímica de Sr/Ca (línea roja).....	25
Figura 20 TOS vs Tasa de calcificación anual del núcleo PM3. La tasa de crecimiento presenta pendiente positiva, y valor de $r^2 < 0,2$	25
Figura 21 TOS vs Extensión lineal anual del núcleo PM3. Al igual que la tasa de calcificación la extensión presenta características similares de pendiente	27
Figura 22 TOS vs Densidad media anual del núcleo PM3. En este caso la pendiente es negativa, el valor de r^2 0.07	28
Figura 23 TOS vs Tasa de calcificación anual del núcleo PN0898, presenta pendiente ligeramente positiva y r^2 0.02	28
Figura 24 TOS vs Extensión lineal anual del núcleo PN0898. Mantiene las mismas características en cuanto al signo de la pendiente y coeficiente de determinación	29
Figura 25 TOS vs Densidad media anual del núcleo PN0898. Pendiente negativa $r^2 < 0.02$	29
Figura 26 Los valores de la tasa de calcificación mayores a la media más una desviación estándar, del núcleo PM3, presentan una pendiente positiva y r^2 mayor a 0.6.....	31
Figura 27 Los valores de extensión lineal anual mayores a la media más una desviación estándar, del núcleo PM3, presentan una pendiente positiva y r^2 mayor a 0.5.....	31
Figura 28 Los valores de densidad media anual mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PM3, también presentan una pendiente positiva pronunciada y el valor mas alto de r^2 ,0.7	32
Figura 29 Los valores de la tasa de calcificación mayores a la media más una desviación estándar, del núcleo PN0898, presentan una pendiente positiva y r^2 0.05 mientras que los valores menores a la media menos una desviación estándar, presentan pendiente negativa y el valor de r^2 es ligeramente mayor a 0.1.....	32

Figura 30 Los valores de la tasa de extensión lineal anual mayores a la media mas una desviación estándar del núcleo PN0898, presentan características similares de pendiente y valor de r^2 que ocurren con la tasa de clasificación	33
Figura 31 Los valores de densidad media anual mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PN0898 presentan pendiente positiva y valor de r^2 0.02	33
Figura 32 Comparación entre la variabilidad de la TOS media anual obtenida de los registros PM3 (línea roja) y PN0898 (línea azul), el valor de la pendiente es mayor para PM3, los mayores entre un año y otro se presentan en PN0898	35
Figura 33 Bandas dobles de un ciclo anual identificadas en la laja PM3, las marcas amarillas señalan donde aparecen en correspondencia con los datos de TOS mayores a la media mas una desviación estándar	45
Figura 34 Bandas dobles de un ciclo anual identificadas en la laja PN0898, las marcas amarillas señalan donde aparecen en correspondencia con los datos de TOS mayores a la media mas una desviación estándar	45

I.- Introducción

Los arrecifes son considerados como los ecosistemas marinos más diversos y complejos, reconocidos por su belleza, diversidad biológica y alta productividad, han jugado un papel crucial en la formación y desarrollo de ecosistemas que han dominado los mares tropicales, entre los 25°S y 25°N, durante los últimos 200 millones de años (Hoeg-Guldberg 1999). Hoy en día estos ecosistemas se ven amenazados por el actual cambio climático que se caracteriza por el calentamiento de la superficie oceánica y el incremento en los niveles de CO₂ atmosférico, lo cual genera, entre otras cosas, que las aguas tropicales lleguen o incluso sobrepasen las temperaturas de máxima tolerancia en las que pueden vivir los corales.

Los corales son capaces de generar, un registro sofisticado de información sobre su propio crecimiento, así como de las condiciones ambientales en las que este crecimiento tuvo lugar (Carricart-Ganivet y Merino 2001). En particular los corales ofrecen un rico archivo paleoclimático de alta resolución, debido a su distribución y por su capacidad de grabar en su esqueleto una amplia gama de trazadores geoquímicos (Gagan et al. 2000), o bien por su propia naturaleza, ya que al habitar ambientes de un alto grado de estabilidad tienen la facultad de registrar, como una anomalía en su crecimiento y/o estructura, cambios importantes en su ambiente. Estudios recientes han demostrado que los trazadores químicos contenidos en el esqueleto de aragonita del coral son registros altamente precisos de los cambios estacionales interanuales e incluso de larga escala de tiempo de parámetros ambientales como la temperatura superficial del mar, salinidad, dinámica de nutrientes etc. (Dumbar y Cole 1993).

Los corales del orden Scleractinia incluyen a especies solitarias y coloniales de las cuales los pólipos que los componen secretan un exoesqueleto de carbonato de calcio en forma de aragonita (Druffel 1997). La densidad del carbonato de calcio secretado no es la misma a lo largo del año debido a que ocurren cambios que se producen por variaciones estacionales de temperatura y luz, dando lugar a que los esqueletos coralinos muestren bandas de crecimiento estacional, análogas a los anillos de los árboles, siendo visibles a través de rayos X (Ruppert y Barnes 1996), y estas bandas de densidad proveen de una valiosa, rápida y precisa cronología, del crecimiento esquelético (Dumbar y Cole 1993).

Se ha encontrado que a temperaturas menores de 18°C (generalmente en latitudes mayores a 30°) el número de especies coralinas formadoras de arrecifes decrece rápidamente y por lo tanto los arrecifes coralinos no se pueden formar bajo esas condiciones (Hoeg-Guldberg 1999). Sin embargo, es importante destacar que otros factores como la calidad de la luz, la alcalinidad del agua de mar, etc. son también limitantes en el desarrollo de los arrecifes.

Cuando las condiciones del medio no son las ideales para el desarrollo de los corales (por ejemplo, decremento de la salinidad, incremento o decremento de la temperatura y/o la luz) estos organismos se condicionan a un estado de estrés. Los eventos de blanqueamiento de corales, son una de las respuestas más comunes ante condiciones de estrés, se caracteriza por la decoloración del organismo debido a la expulsión y/o pérdida de pigmento del alga simbiote, si el coral no se recupera de esta condición muere (Hoeg-Guldberg 1999; Carriquiry et al. 2001).

Debido a la importancia que representan los corales en los ecosistemas marinos, ya sea por su potencial científico, económico y ecológico, y sobre todo la fragilidad que presentan ante los disturbios ambientales, la comunidad científica se ha planteado la necesidad de conocer el efecto que tendrá en estos organismos el incremento de la temperatura superficial oceánica y el incremento en los niveles de CO₂. El calentamiento de la superficie oceánica en el último siglo (aprox. 1°C) ha puesto a la mayoría de los sistemas arrecifales al límite máximo de su tolerancia térmica, aunque es importante destacar que este límite varía de una región a otra, (Hoeg-Guldberg, 1999).

En cuanto a los niveles de CO₂ contenido en la atmósfera el cual ha incrementado rápidamente a partir de la revolución industrial desde ~280 ppmv hasta los niveles actuales de ~370 ppmv, se espera que para el año 2065 los niveles se hayan duplicado con respecto a los niveles de los años preindustriales y aunque el océano actúe como secuestrador del CO₂ atmosférico, la consecuencia será que el medio marino se vuelva más ácido (Kleypas et al. 1999; Pelejero et al. 2005) y por tanto sea menos favorable para los sistemas coralinos.

De acuerdo con la teoría, con la adición de CO₂ al agua de mar, aumenta la disolución de CaCO₃, por el contrario, cuando hay remoción de CO₂ aumenta la precipitación de CaCO₃. Esta relación está descrita en la ecuación de *estado de saturación* $\Omega(x)=[Ca^{+2}][CO_3^{-2}]/K_{sp}$ donde K_{sp} es la constante de solubilidad para una fase mineral (x), ya sea calcita (calc.), aragonita (arag.) o calcita rica en magnesio (hmc). (Kleypas et al. 1999). Considerando esta ecuación, y que la concentración de Ca²⁺ es cuasi-conservativa en el océano, la formación de la estructura de aragonita de los

corales depende de la concentración del ión CO_3^{-2} disuelto disponible en el medio. (Kleypas et al. 1999; McNeil et al. 2004). Cuando $\Omega(x) > 1.0$, se considera que el medio está supersaturado, por lo tanto, las aguas superficiales de los mares tropicales, cuyo valor de $\Omega(\text{arag})$ oscila entre 3 y 4, son aguas supersaturadas y es por eso que favorecen la formación de arrecifes coralinos (Kleypas et al. 1999).

La concentración de CO_2 en la superficie oceánica depende de la concentración de CO_2 en la atmósfera y la temperatura oceánica superficial (TOS), recordando que, el aumento de CO_2 en el agua de mar reduce la concentración de CO_3^{-2} disuelto, y como consecuencia el valor de $\Omega(x)$ también se reduce. Por lo tanto, el aumento en la concentración de CO_2 y la TOS son dos factores principales que afectan la formación de las estructuras de CaCO_3 de los corales y otros organismos (Kleypas et al. 2005) .

Por otro lado, evidencias recientes confirman que la tasa de calcificación de los corales formadores de arrecifes está fuertemente correlacionado con el $\Omega(\text{arag})$ (Guinotte et al. 2003). Por otra parte se ha encontrado una fuerte relación entre la tasa de calcificación y la tasa de crecimiento (Carricart-Ganivet y Merino 2001), por lo que la calcificación de los corales es entonces regulada por el estado de saturación del CaCO_3 (Ω) y la TOS (McNeil et al. 2004).

Debido a estas evidencias se plantean dos principales escenarios, Por una parte, los corales muestran poca adaptación y/o aclimatación favorable frente al cambio climático (Hoeg-Guldberg 1999), por lo que el incremento de CO_2 , aunado al aumento de la TOS, tendrá un efecto negativo por el decremento del Ω_{arag} . Bajo estas

condiciones, los corales experimentarán decrementos en la tasa de calcificación lo cual traerá como consecuencia que sean ineficientes calcificando, dando lugar a estructuras esqueléticas débiles (Kleypas et al. 1999; Guinotte, et al. 2003). Bajo este escenario la tasa de erosión superará la de calcificación haciendo a los corales cada vez más vulnerables y en estado constante de estrés por las altas temperaturas por lo que también experimentarían eventos de blanqueamiento masivos con mayor frecuencia (Hoeg-Guldberg 1999). En contraste, se ha propuesto que el incremento de la TOS contrarrestará el efecto causado por el incremento de CO_2 , favoreciendo el incremento en la tasa de calcificación de los corales. (McNeil et al. 2004)

Este trabajo tiene como propósito general, ayudar a esclarecer los efectos que sufrirán los ecosistemas coralinos de México de cara al calentamiento global midiendo las tasas anuales de calcificación y recuperando el registro de temperatura mediante la señal de la razón Sr/Ca y Mg/Ca en corales colectados en el Caribe Mexicano.

II.- Hipótesis

Con el cambio global actual, y específicamente, el incremento en la temperatura superficial oceánica, los ecosistemas arrecifales del caribe mexicano están siendo afectados negativamente en su desarrollo. La tendencia al calentamiento en esta zona costera del país, se manifestara con cambios significativos en las tasas de crecimiento de los corales escleroticnios que forman los ecosistemas de la zona de estudio.

III.- Objetivo general

Determinar el efecto causado por el Calentamiento Global reciente en las tasas de crecimiento y calcificación en los corales del Caribe Mexicano mediante el análisis de núcleos coralinos.

IV.- Objetivos particulares

- Calcular las tasas anuales de crecimiento anuales, a partir de núcleos colectados en el Caribe Mexicano para al menos las últimas 3 décadas.
- Reconstruir con los mismos núcleos la TOS, utilizando como trazador la señal geoquímica de la razón Sr/Ca y Mg/Ca, bajo el método descrito en Mitsuguchi et al. (2003).
- Determinar la relación entre las tasas de crecimiento y la TOS encontradas en este estudio.
- Describir los efectos del aumento en la temperatura sobre la tasa de crecimiento.

V.- Área de Estudio

La zona costera del Caribe Mexicano (Fig. 1), comprende una región que comienza en Cabo Catoche en el norte de Quintana Roo hasta Xcalak, en el sur. El clima de la zona es cálido subhúmedo con lluvias todo el año pero principalmente en verano, con una media anual de precipitación de 1490 mm. La temperatura media anual es de 26°C, con una máxima promedio de 28.3°C y una mínima de 24.2°C (Camarena-Lhurs 2003).

De acuerdo a la información actualizada de la base de datos del Instituto Nacional de Ecología (INE), los corales del Caribe Mexicano forman parte del segundo sistema arrecifal mas grande del mundo, que conforman una línea discontinua de arrecifes denominada el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), que se extiende desde Honduras en Centroamérica hasta el norte de la Península de Yucatán.

El Caribe Mexicano es una zona de importancia turística, que cuenta con destinos como Cancún, Isla Mujeres, Isla Cozumel, etc., y donde el crecimiento urbano y el crecimiento de la industria turística, han reclamado espacios naturales importantes, lo que representa una seria amenaza para el equilibrio de los ecosistemas locales. Punta Nizuc pertenece al complejo natural Parque Marino Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, el cual está ubicado dentro de la provincia Península de Yucatán y subprovincia del Carso Yucateco. La batimetría esta descrita por cuencas profundas y separadas por un sistema de crestas paralelas (Carabias-Lillo et al. 1998).

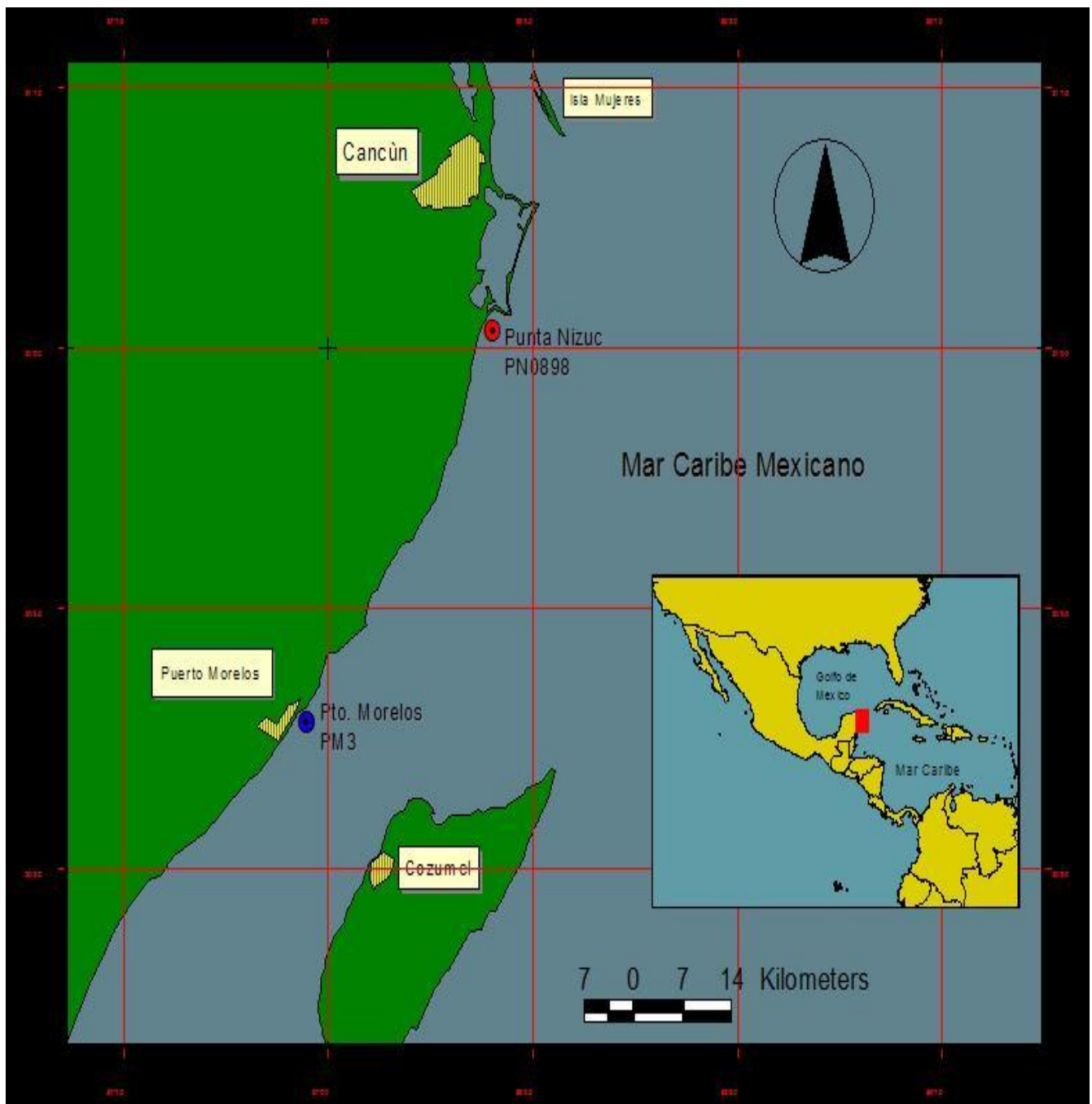


Figura 1. Región noreste del estado de Quintana Roo, cuyo litoral es bañado por las aguas del Mar Caribe. Es esta zona donde se encuentran las localidades de Punta Nizuc y Puerto Morelos, de donde fueron obtenidos núcleos coralinos.

El Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos (PANAPM), limita al norte con Punta Nizuc, debe su nombre al poblado homónimo adyacente a la costa, entre el litoral y la barrera arrecifal se forma una laguna que varía entre 550 y 1500 metros a lo ancho, la barrera se extiende paralela a la costa ~4000 metros (Coronado et al, 2007).

VI.- Metodología

Tres núcleos coralinos de *Montastrea spp* fueron colectados el 20 de abril y 13 de agosto de 1998 en los arrecifes de Majahual y Punta Nizuc respectivamente, y en junio del 2006 en la laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Los núcleos fueron seccionados longitudinalmente con el fin de exponer las bandas de crecimiento. Estas secciones o lajas, se sometieron a un proceso de limpieza en baño ultrasónico y posteriormente fueron radiografiadas usando el contraste más alto posible con el fin de tener una mejor definición entre las bandas de crecimiento de alta y baja densidad. Debido a que cada par de bandas representa un año de crecimiento, se determinó el modelo de edad de cada núcleo contabilizando el total de pares de bandas.

Para realizar las radiografías, se realizó una composición, donde cada laja fue acompañada de un juego de estándares de aragonita de densidad conocida y de varios grosores, así como de una barra de aluminio de grosor constante (~6 mm) colocada en dirección del eje cátodo-ánodo del aparato de rayos X (Carricart-Ganivet y Barnes 2004).

Las radiografías fueron digitalizadas en imágenes de formato .jpg. De esta manera cada imagen fue manipulada en Photoshop v 6.0 a fin de que los archivos fueran transformados a mapa de bits, que es el formato que acepta el software especializado para la construcción de la densitometría, Coral XDS, (Coral X-Radiograph Densitometry System del National Coral Reef Institute y Nova Southeastern University Oceanographic Center, Helmle et al. 2002).

Empleando el programa Coral XDS se generaron valores de densidad óptica, los cuales se convirtieron en valores de densidad absoluta ($\text{gr}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{año}^{-1}$), usando la metodología propuesta por Carricart-Ganivet y Barnes (2007). Mediante el espectro de densidad de cada laja se calculó la tasa de extensión lineal anual ($\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$), para posteriormente calcular la tasa de calcificación anual ($\text{gr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) la cual es el producto de la tasa de extensión anual por la densidad medida.

El proceso para la reconstrucción de la TOS mediante el método de Sr/Ca y Mg/Ca, se inició con la identificación, en cada laja, de las coralitas que mejor trazaron una ruta a través del eje de crecimiento, posteriormente las muestras de resolución milimétrica fueron obtenidas perforando las coralitas con una broca de 0.08mm, obteniendo al muestras de al menos 5 mg de polvo de coral, las cuales fueron transferidas a viales de teflón meticulosamente lavados con solución micro, enjuagados con agua deionizada a 18 Ω y posteriormente en HCl 10%. .

Las muestras de polvo de coral fueron sujetas a un proceso de limpieza que comprende tres pasos, siguiendo una secuencia de tres pasos donde a las muestras se les agrega progresivamente agua deionizada a temperatura ambiente, H_2O_2 30% a 60°C y HNO_3 4mM temperatura ambiente centrifugando y sifonado entre cada paso (Mitsuguchi 2003).

Al final del tratamiento cada muestra fue disuelta en 5 mL de HNO_3 5% quedando lista para el análisis en el equipo de cromatografía por inducción de plasma acoplado (ICP).

Previo al análisis en ICP de las muestras disueltas, se preparó una secuencia de estándares para la curva de calibración variando las concentraciones de Sr y Mg, se dejó fija la de Ca y finalmente, se preparó un estándar de coral.

Los datos generados por el ICP fueron almacenados en formato Excel, con estos datos se construyeron las series de los ciclos geoquímicos para cada registro. Con el fin de construir la cronología de cada núcleo, se hicieron corresponder los ciclos geoquímicos con los ciclos de crecimiento.

Para ajustar las cronologías, las series geoquímicas de Sr/Ca obtenidas fueron contrastadas con la serie de temperatura satelital con resolución mensual (obtenidas de COADS), empleando el programa Analyseries. Esta aplicación permite ajustar series de tiempo mediante métodos de interpolación, de esta manera se obtuvieron nuevas series de los registros geoquímicos con resolución mensual.

Para calibrar la respuesta geoquímica de los corales se aplicó una regresión Williamson entre los registros de Sr/Ca, Mg/Ca y los registros instrumentales de TOS, de acuerdo a Marshall y McCulloch (2002). Con la ecuación obtenida se transformaron las razones molares de Sr/Ca en valores de temperatura.

Con las series de temperatura reconstruidas se obtuvieron los promedios anuales de TOS, éstos fueron comparados contra las tasas de crecimiento con el objetivo de encontrar relación entre sus variaciones.

VII.- Resultados

a) Densitometría

Para obtener la información de densitometría, se seleccionaron tres lajas del género *Montastrea spp.*, cada una perteneciente a una localidad distinta del Caribe Mexicano, se eligieron aquellas cuyas coralitas presentaron los mejores transectos longitudinales. Para la localidad de Punta Nizuc se eligió la laja etiquetada como PN0898, para Puerto Morelos PM3 y para Majahual M0898*. Todas fueron lavadas en ultrasonido antes de ser radiografiadas.

Después del procedimiento de limpieza las lajas fueron radiografiadas, las placas obtenidas fueron digitalizadas y convertidas a archivos de mapa de bits (.bmp). Cabe señalar que la laja del coral de Puerto Morelos (en adelante PM3), como la radiografía digitalizada correspondiente (Fig.2) fueron enviadas por el Dr. Juan Pablo Carricart, mientras que las lajas de Punta Nizuc y Majahual (en adelante PN0898 y M0898), fueron radiografiadas en una sola placa (Fig. 3).

Los datos de densidad, calculados de las radiografías usando el programa CoralXDS, fueron obtenidos de la intensidad luminosa de las imágenes en valor de pixel, con una resolución de 0.02 x 0.02 cm, asumiendo que el logaritmo natural de los valores de intensidad luminosa equivale a los valores de densidad óptica. Como primer paso se obtuvieron los valores de intensidad luminosa para transectos rectos a lo largo de la imagen de las barras de aluminio, de trasectos cortos para cada una de las imágenes de

* Debido al mal estado de la laja M0898 se decidió descartarla para este trabajo.

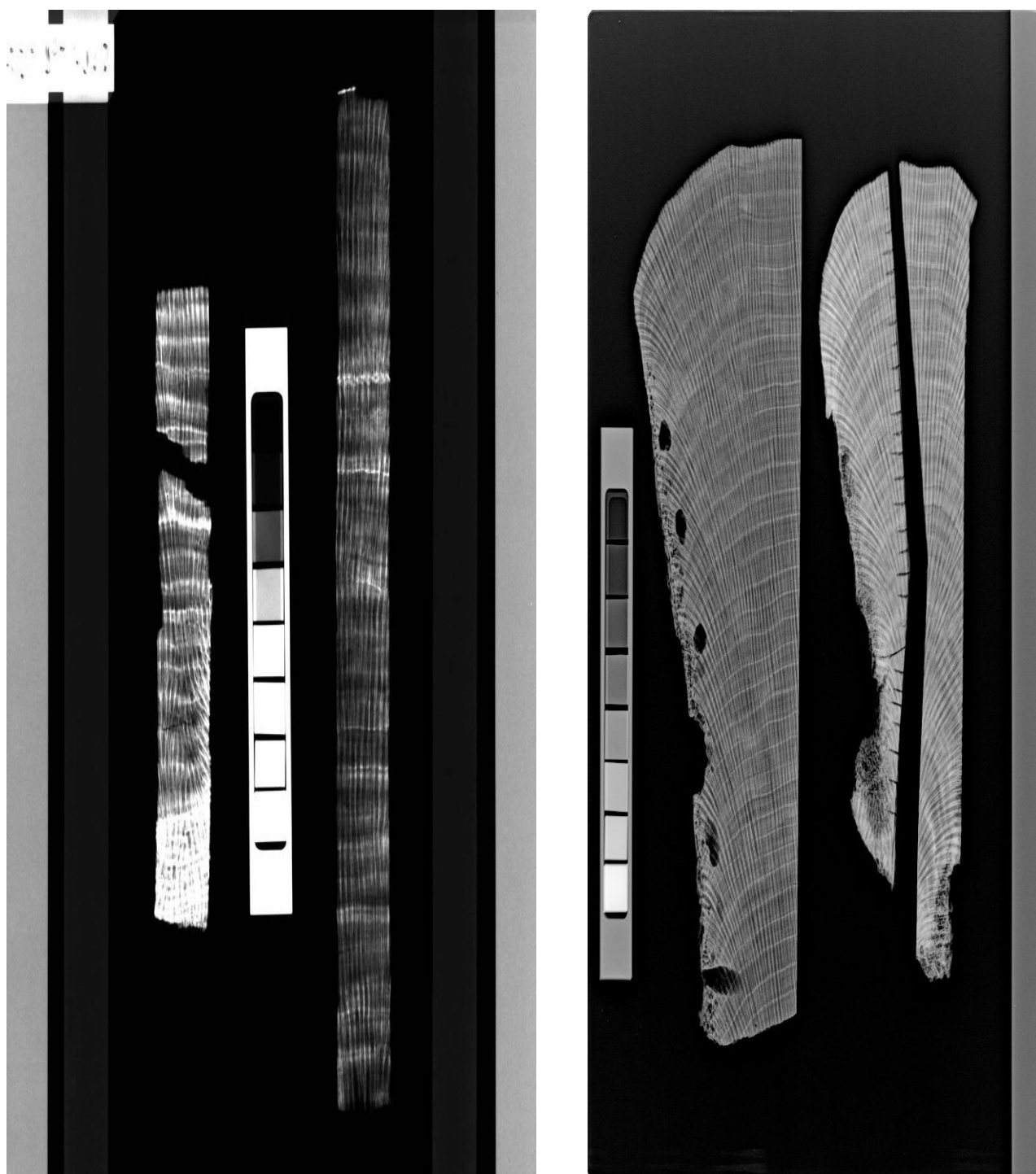


Figura 2. (Izquierda). Radiografía digital PM3y4 En los extremos inferior y superior aparecen barras de aluminio, la laja inferior corresponde a PM3 y la superior a PM4 la cuál fue descartada para este estudio, en medio de ambas se encuentra el juego de estándares de aragonita. Figura 3 (derecha). Radiografía PN-M, La laja que aparece en la parte superior es la correspondiente a la localidad de Punta Nizuc, la laja inferior.

los estándares de aragonita y trasectos rectos u oblicuos (dependiendo las características de las coralitas) sobre las imágenes de las lajas coralinas.

Finalmente, siguiendo la metodología descrita por Carracart-Ganivet y Barnes (2007), se usó la ecuación para la corrección del “efecto tacón” y la ecuación de calibración a partir de los estándares de aragonita, con la que se obtuvo la densidad absoluta de las lajas coralinas.

b) Puerto Morelos

En el caso de PM3 la ecuación para la corrección del “efecto tacón” (Fig. 4) se ajustó con un polinomio de segundo grado obteniendo un valor de 0.89 para el coeficiente de determinación, mientras que el ajuste de la regresión lineal para la curva de calibración tuvo un valor de r^2 de 0.916 (Fig. 5).

Una vez obtenidas las ecuaciones de corrección y calibración, se corrigieron y convirtieron los valores de densidad óptica calculados para la laja PM3, en valores de densidad absoluta. Al graficar la densidad absoluta contra la distancia (Fig. 6) se construyó el modelo de edad para PM3, basado en la variación estacional de la densidad, para lo cual se consideró que los valores mínimos en cada ciclo corresponden a los veranos y en contraposición, los valores mas altos, corresponden a los inviernos.

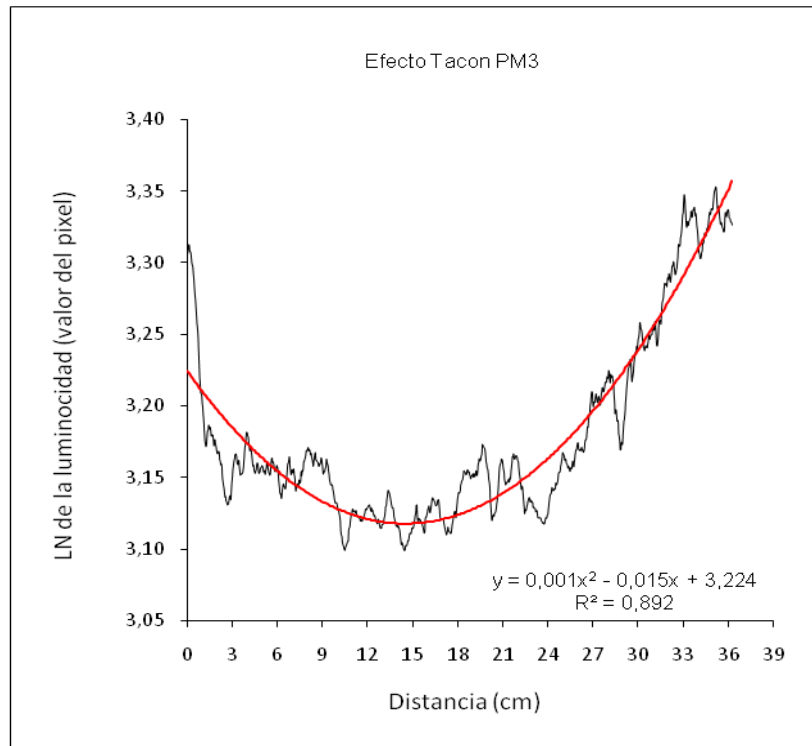


Figura 4. Ajuste del polinomio de segundo grado a la señal de intensidad luminosa obtenida para la barra de aluminio.

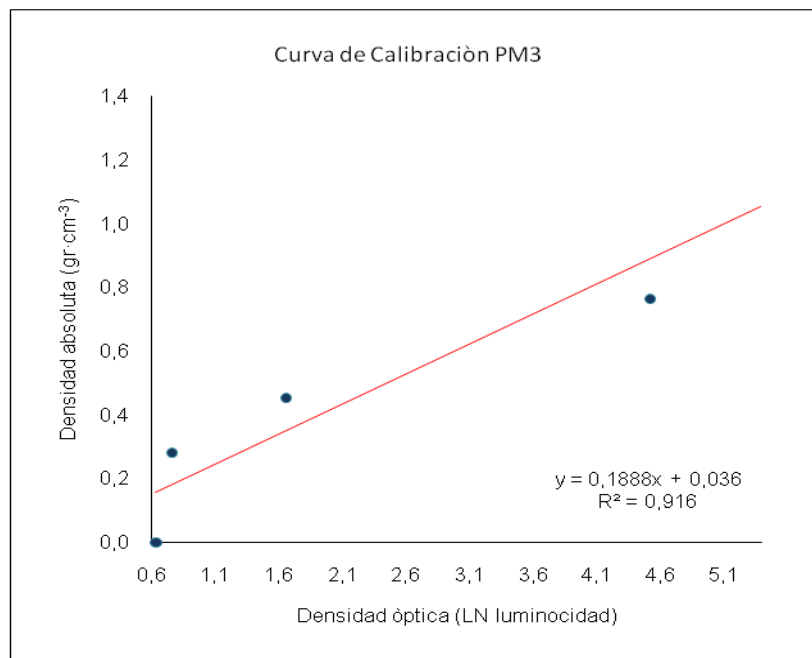


Figura 5. Curva de calibración obtenida a través de los valores corregidos de densidad óptica para los estándares de aragonita, comparados contra los valores conocidos de densidad absoluta.

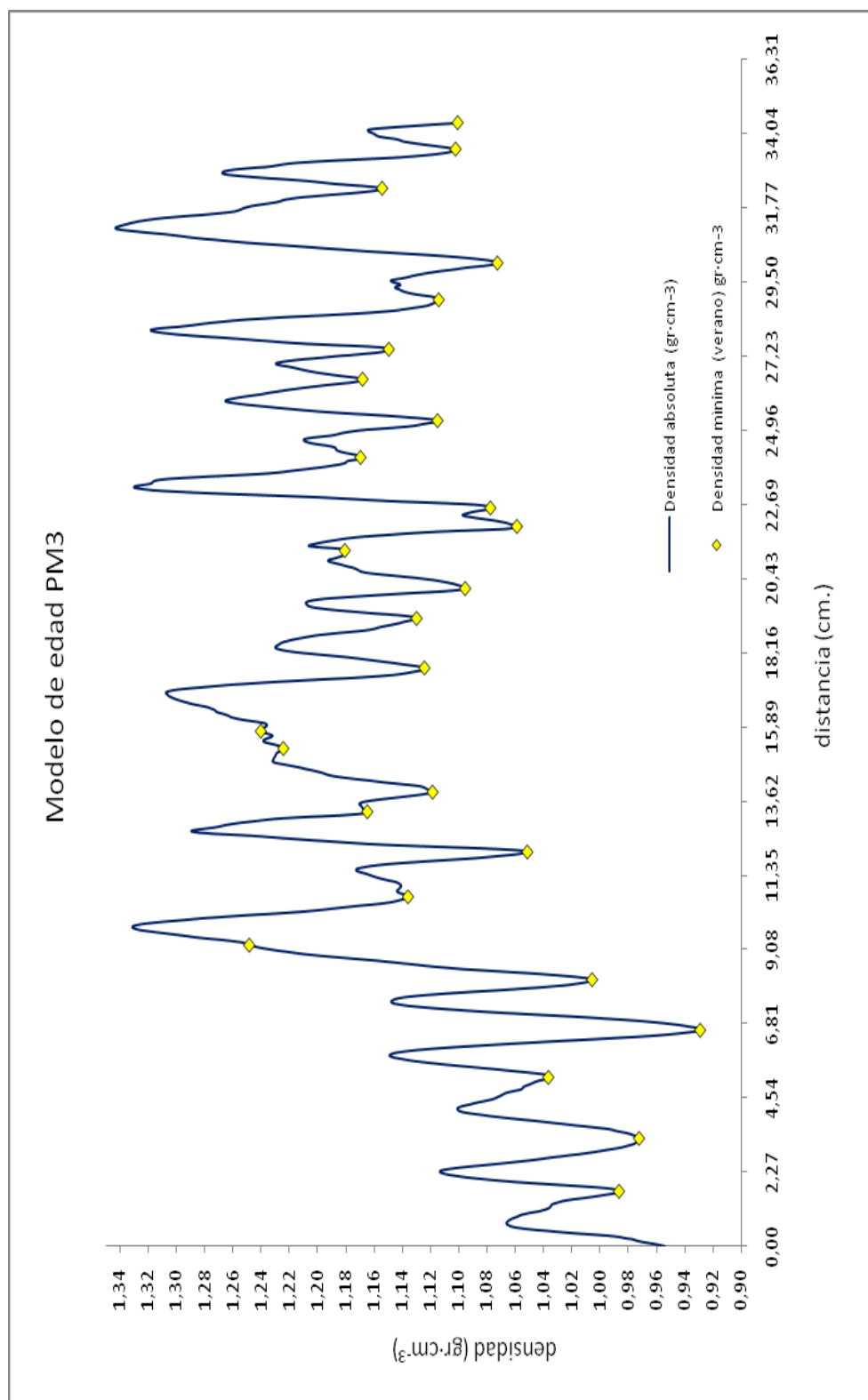


Figura 6. Modelo de edad para PM3, la línea azul representa las variaciones estacionales de la densidad a lo largo del crecimiento del coral, los puntos amarillos representan el periodo de verano donde la densidad de CaCO_3 depositado en el esqueleto coralino es mínima.

En el modelo de edad se contaron un total de 27 ciclos anuales, donde el dato mas reciente corresponde a julio del 2006 y el más antiguo al verano de 1979. Con este modelo se conoce además la distancia que hay entre el inicio de cada ciclo anual, con lo cual se obtuvo la tasa de extensión lineal y el promedio anual de la densidad (Tabla I, anexos). Usando el producto de la extensión lineal por la densidad media anual, se obtuvo la tasa de calcificación anual. Finalmente, se calcularon los promedios de densidad ($1.158 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{año}^{-1}$), extensión ($1.273 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$) y calcificación ($1.473 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de los 27 años de crecimiento.

Se realizaron análisis de correlación lineal con un nivel de confianza del 99% (Tabla II, anexos) entre los tres parámetros de crecimiento, obteniendo el coeficiente de determinación mas alto (0.955) y encontrando correlación estadísticamente significativa, entre la tasa de extensión lineal anual y la tasa de calcificación anual, (Fig. 7), mientras que estos mismos parámetros comparados con la densidad anual (Fig. 8 y 9), mostraron un valor de r^2 menor a 0.05 en ambos casos sin relación estadísticamente significativa.

c) Punta Nizuc

El procedimiento para calcular las tasas de crecimiento esquelético para la laja PN0898, fue igual que en PM3, con la excepción de que esta laja presentó coralitas oblicuas, por lo que fue necesario construir mediante secciones de transectos oblicuos la señal completa de la densidad. El polinomio de corrección del efecto tacón para este caso, se ajustó con un valor de r^2 , 0.99 (Fig. 10) mientras que la regresión para la curva de calibración que tuvo una r^2 de 0.96 (Fig. 11).

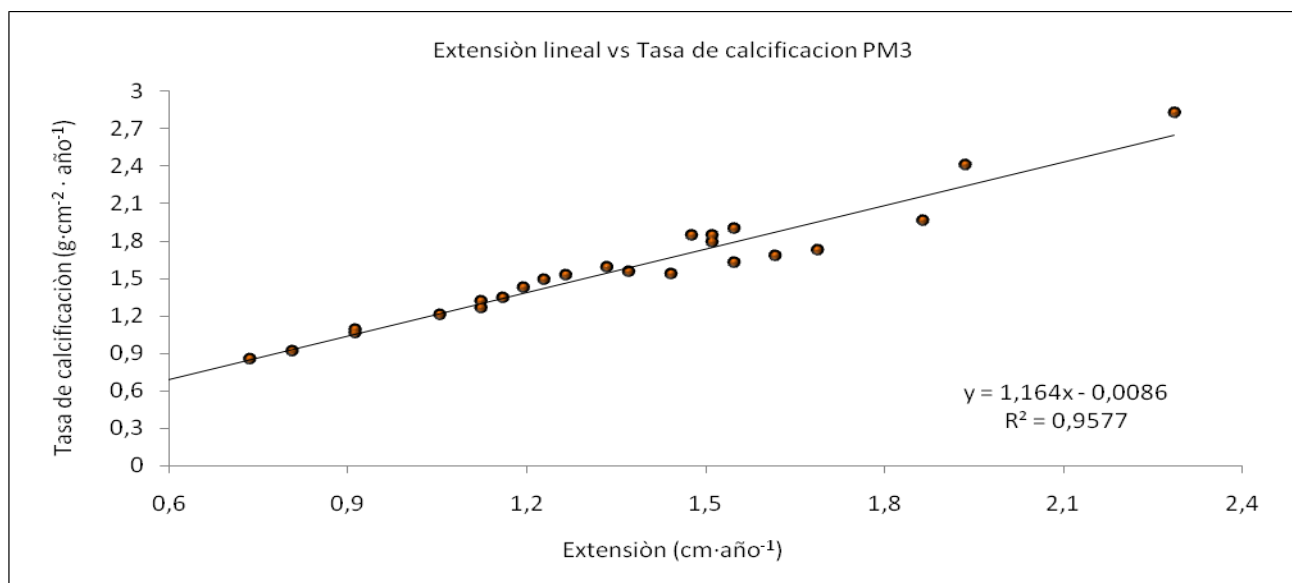


Figura 7.- La tasa de Calcificación anual y la tasa de extensión anual, la r^2 es mayor a 0.95.

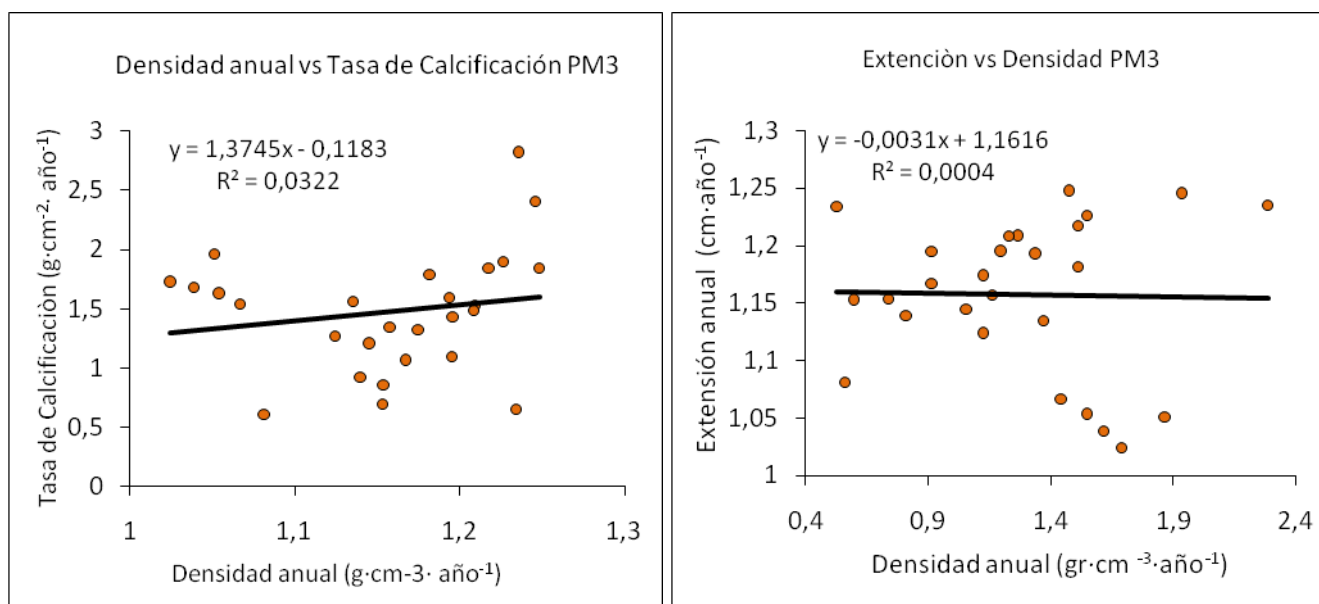


Figura 8. (Izquierda) La densidad anual y la tasa de calcificación anual no tienen una relación aparente, el coeficiente de determinación para este caso es apenas mayor a 0.03. Figura 9. (derecha) Al igual que pasa con la tasa de calcificación anual, la densidad y la extensión lineal no tienen relación aparente.

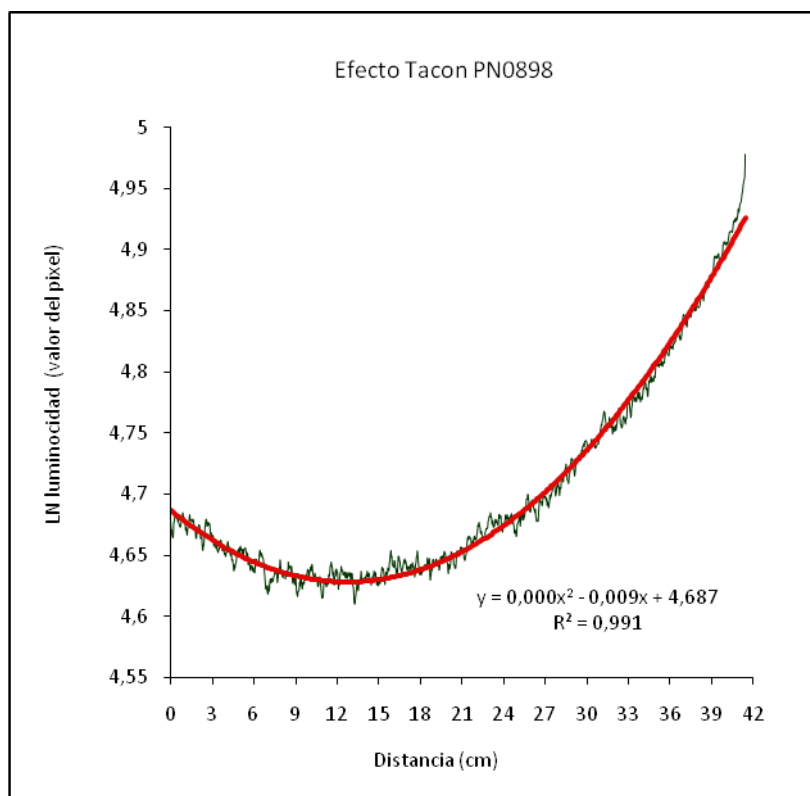


Figura 10. Ajuste del polinomio a la señal de intensidad luminosa obtenida para la barra de aluminio, en este caso r^2 tiene un valor muy cercano a 1.

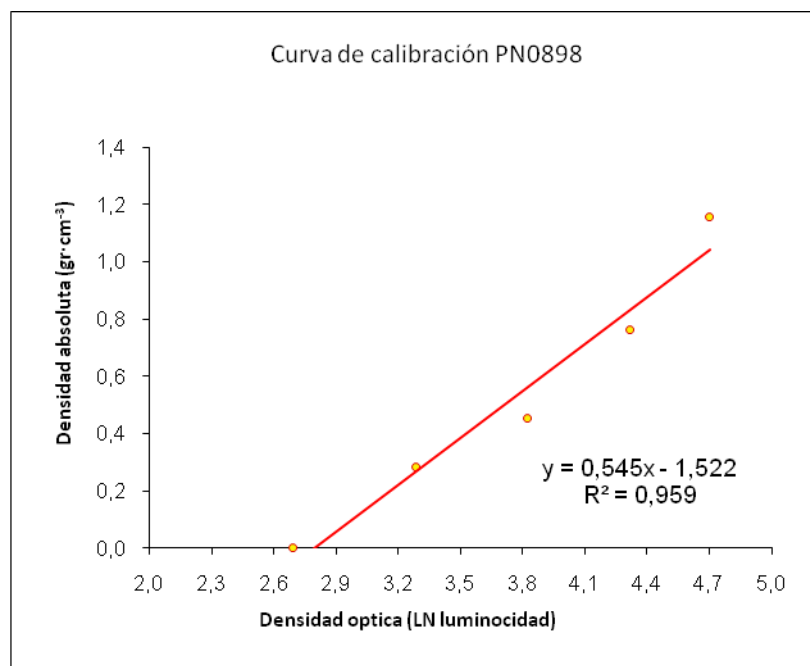


Figura 11. Curva de calibración obtenida a través de los valores corregidos de densidad óptica para los estándares de aragonita, comparados contra los valores conocidos de densidad absoluta.

El modelo de edad obtenido para PN0898 (Fig. 12) indica que existen un total de 51 ciclos anuales por lo que el registro para esta laja comprende las variaciones estacionales desde el verano de 1947 hasta la fecha de colecta, agosto de 1998. Cabe señalar que algunos ciclos no se definieron claramente, debido a la corta distancia que hay entre uno y otro. Al igual que en el caso de PM3, se calcularon las tasas de crecimiento anual (tabla III, anexos) para PN0898, encontrando una densidad media de $1.288 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{año}^{-1}$ una tasa de extensión lineal media de 0.0604 cm y una tasa de calcificación media de $0.778 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$.

El análisis de correlación entre los parámetros de crecimiento (tabla IV, anexos) indica nuevamente que existe correlación estadísticamente significativa entre la tasa de extensión lineal y la tasa de calcificación anual, el valor de r^2 para este caso fue de 0.98, (Fig. 13). En el análisis de correlación entre la extensión lineal y la densidad anual así como la tasa de calcificación anual y la densidad se encontró que no existe relación estadísticamente significativa y los valores de r^2 fueron <0.05 (Fig. 14 y 15).

d) Reconstrucción de la TOS

La reconstrucción del registro de temperatura se hizo por medio de la señal de Sr/Ca, tanto para PM3 como para PN0898. La señal Sr/Ca reflejó claramente los ciclos de variación anual, mientras que la señal de Mg/Ca presentó patrones erráticos que dificultaron el análisis. Por lo tanto, para la reconstrucción de la temperatura, solo se emplearon los valores de la serie de Sr/Ca.

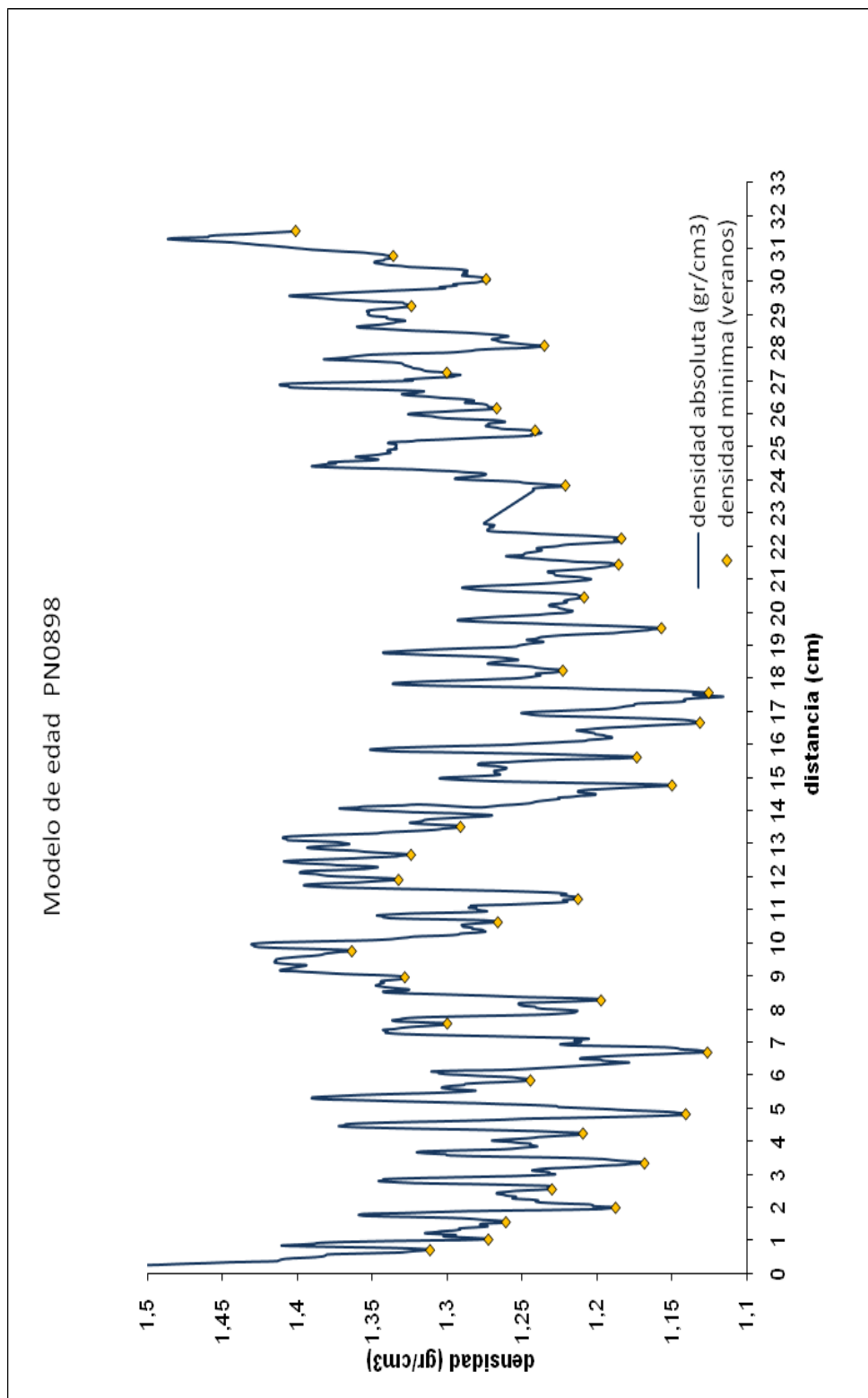


Figura 12. Modelo de edad para PN0898, presenta 51 ciclos de variación estacional a lo largo de 32.5 cm del largo de la laja. La línea celeste representa la señal densidad absoluta en la distancia, los puntos anaranjados indican el periodo de verano donde la densidad de CaCO_3 depositada por cm^3 es mínima.

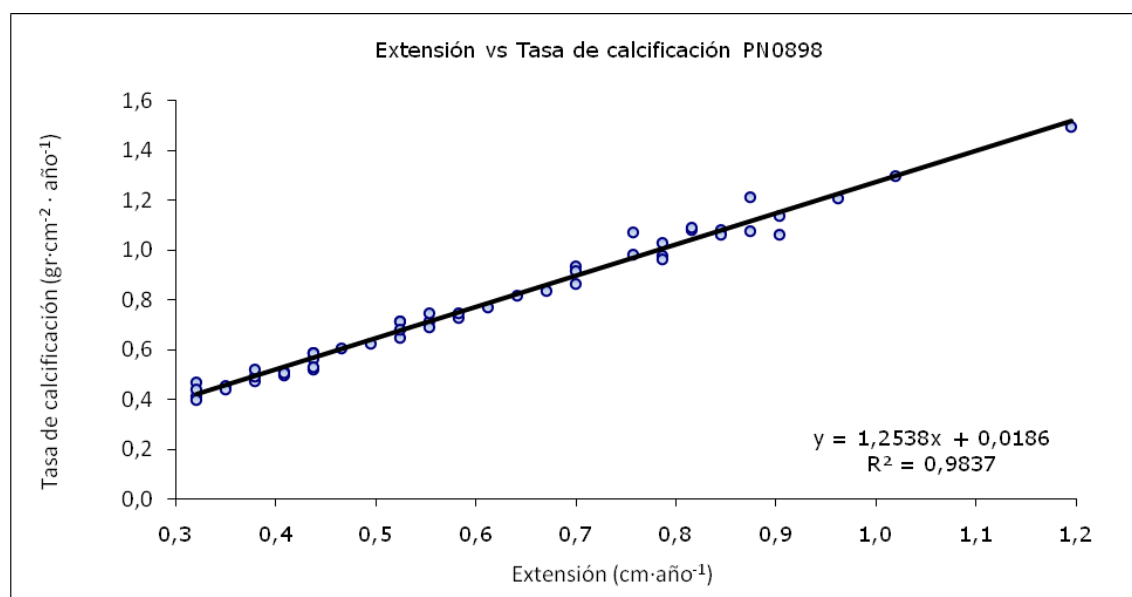


Figura 13. Tasa de calcificación vs extencion lineal, el valor de r^2 es de 0.984.

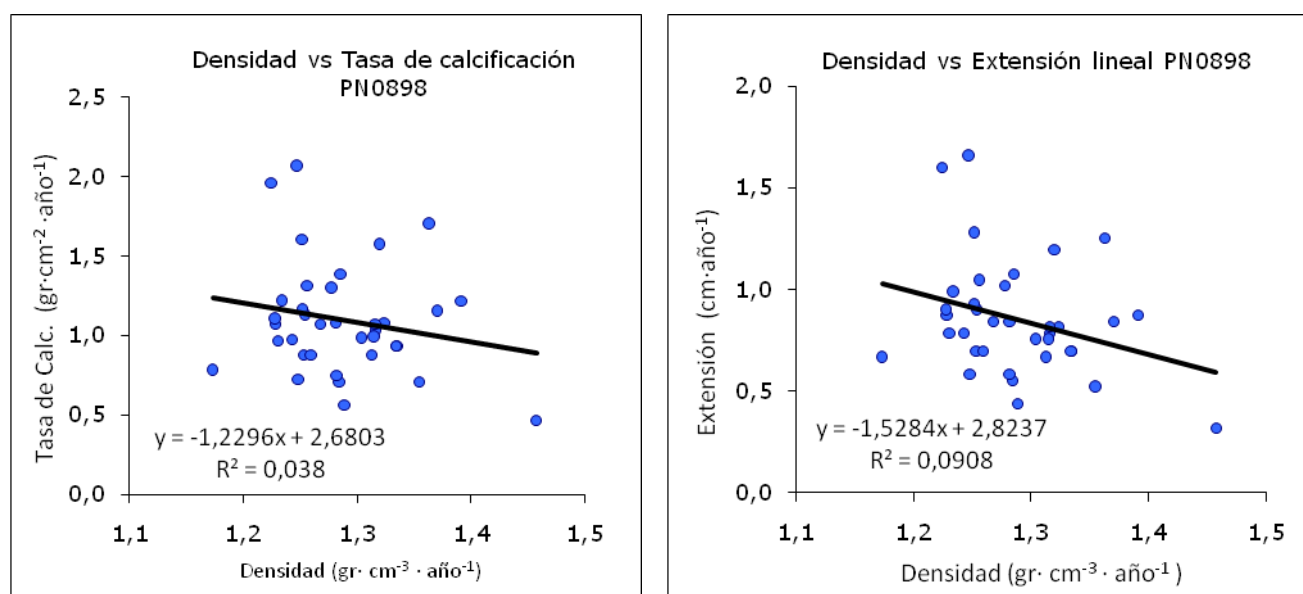


Figura 14 (derecha). Densidad anual vs la tasa de calcificación anual, el valor del coheficiente de determinación es menor a 0.04. Figura 15 (izquierda). Densidad vs extensión lineal, el valor de r^2 es menor a 0.1.

Para el ajuste cronológico de las señales se utilizaron dos series de temperatura satelital, obtenidas de la base de datos de COADS, con resolución temporal mensual y resolución espacial de $0.5 \times 0.5^\circ$ latitud-longitud. Las series de las señales geoquímicas y de temperatura satelital fueron analizadas y ajustadas en el programa Analyseries. Con los datos de salida de Analyseries se logró construir la ecuación de calibración con la que se transformaron los valores molares de Sr/Ca a valores de temperatura en $^\circ\text{C}$.

El análisis estadístico de la regresión lineal entre la señal de Sr/Ca y la temperatura, se realizó con un nivel de confianza del 95% (Tabla V, anexos), en el caso de PM3 tuvo un valor de r^2 de 0.753 (Fig. 16), el cual es deseable de acuerdo a la literatura (Fig. 17). La ecuación de la regresión lineal para PN0898 (Fig. 18) es muy similar a la de PM3, en ambos casos la relación es estadísticamente significativa y presentaron valores de r^2 mayores a 0.7. Debido a problemas de carácter técnico, la temperatura reconstruida a través de la señal Sr/Ca para PN0898 (Fig. 19), solo cubre 41 de los 51 ciclos anuales calculados.

El rango de la variación estacional de la temperatura para ambas localidades no supera los 4°C , siendo este valor la máxima variación en un año y corresponde al periodo de verano-invierno 1997 en Punta Nizuc. De acuerdo a las series de temperatura reconstruidas, típicamente la variación estacional entre la temperatura mínima y máxima en Punta Nizuc es de $\sim 3^\circ\text{C}$ y de $\sim 2.7^\circ\text{C}$ en Puerto Morelos. Por otra parte, la temperatura media anual en los veintisiete años de registro de PM3 no rebasó los 28.5°C , manteniéndose en un rango aproximado de 27.3 a 28.3°C y un

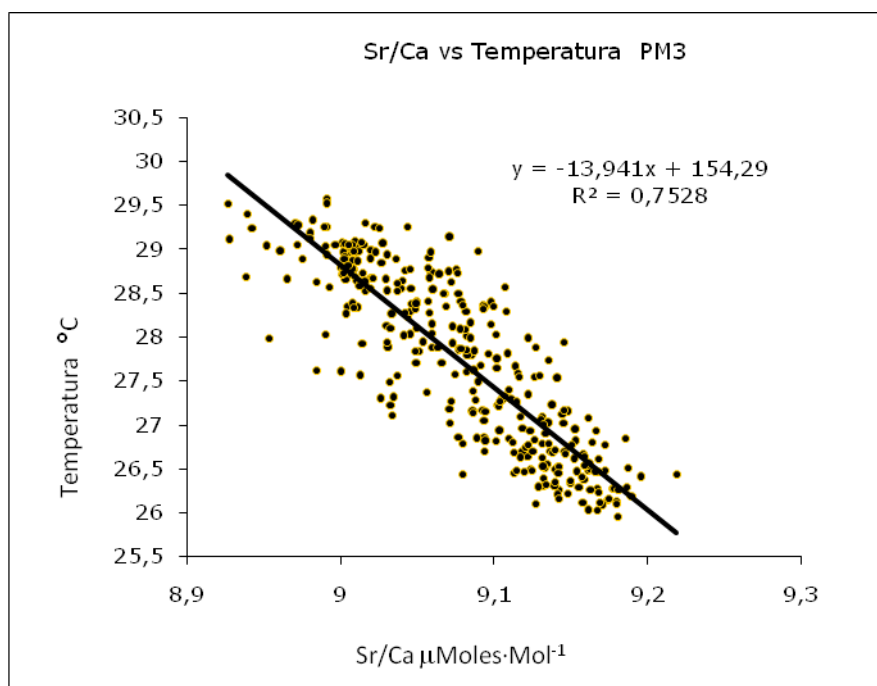


Figura 16. Calibración de la señal geoquímica del Sr/Ca para el registro PM3, utilizando datos de TOS de instrumental COADS.

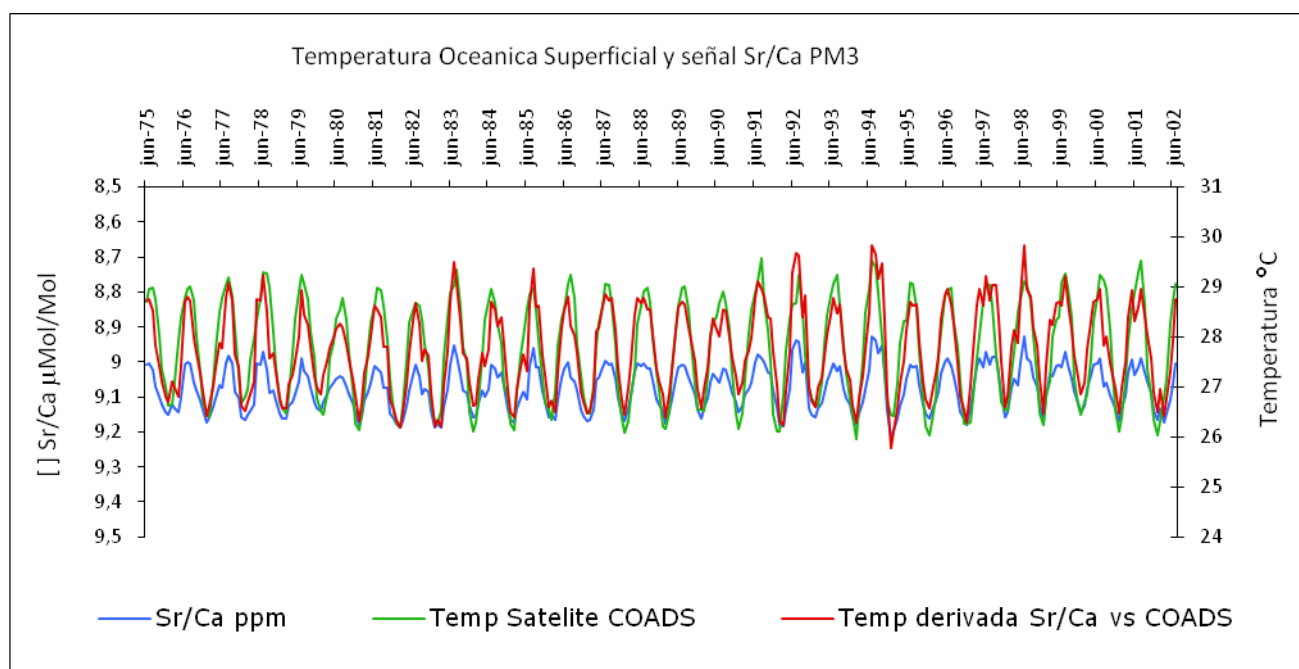


Figura 17. La temperatura del registro satelital (línea continua verde) y la derivada de la señal Sr/Ca (línea azul), presentan diferencia de hasta 1°C en algunos años.

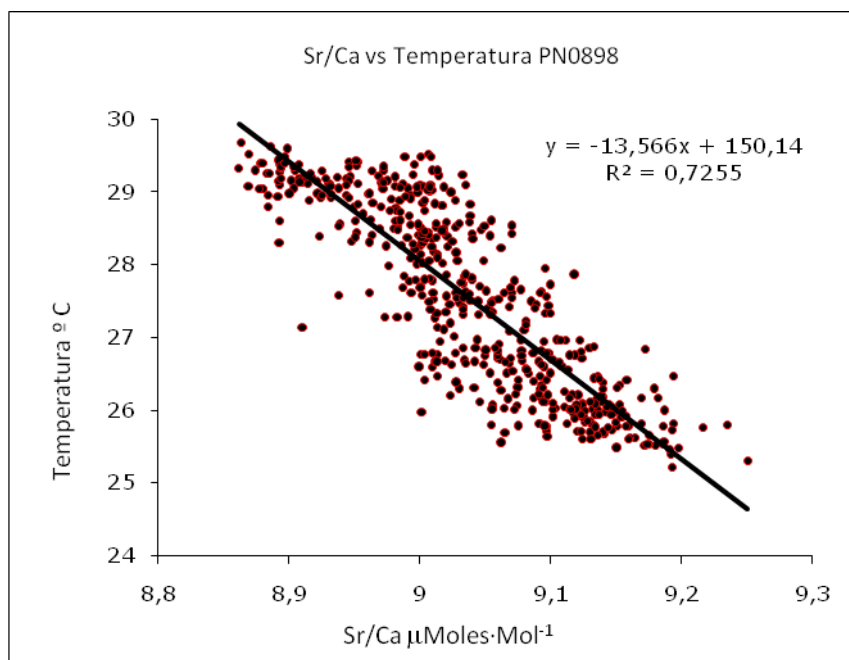


Figura 18. Calibración de la señal geoquímica del Sr/Ca para el registro PN0898, utilizando datos de TOS instrumental COADS.

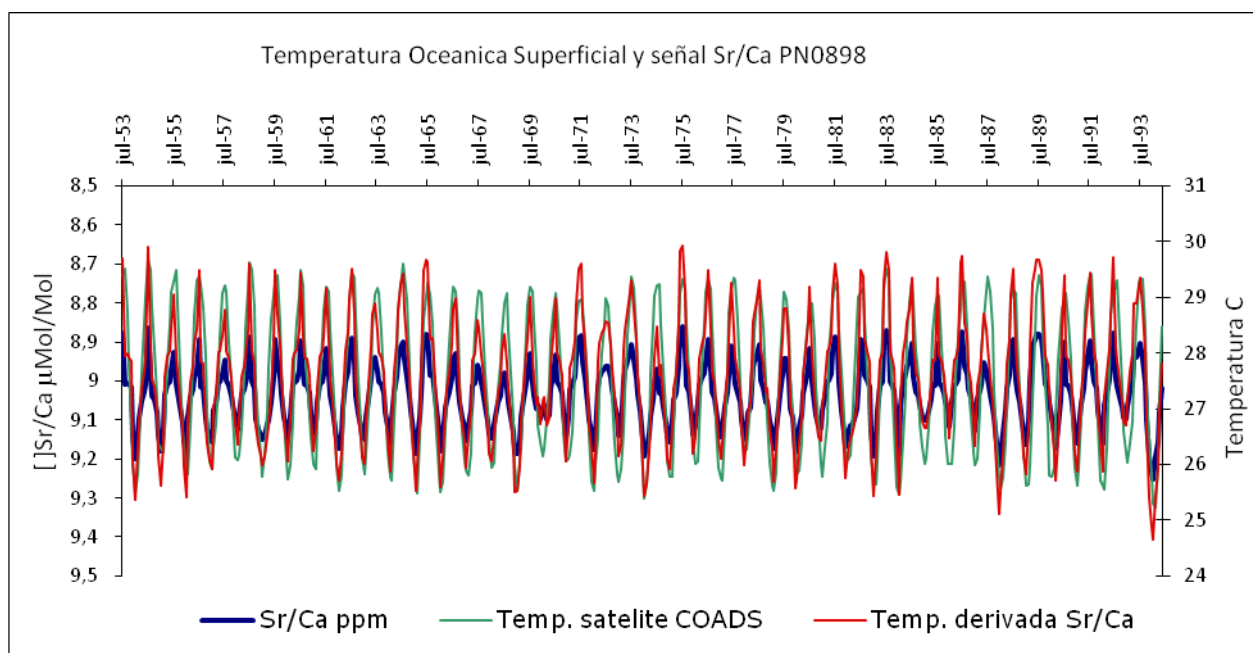


Figura 19. 41 de los 51 ciclos del registro fueron medidos en el ICP (línea azul), con los cuales se calculó la temperatura a través de la señal geoquímica de Sr/Ca (línea roja).

promedio de 27.7°C. En contraste, la temperatura media anual calculada de los 41 años de registro de PN0898, se mantuvo en un rango más amplio, con límites ligeramente menores a PM3, 26.6 a 28.1°C y un promedio de 27.5°C.

e) TOS vs Tasas de crecimiento

Con la TOS reconstruida y el promedio anual de temperatura calculado, fue posible comparar los escenarios de crecimiento coralino en el contexto de los cambios de temperatura. En otras palabras, se realizaron análisis de correlación entre los promedios anuales de temperatura y las tasas de crecimiento, (Tablas II y IV, anexos). No se encontró relación entre temperatura y crecimiento de los corales. En todos los casos el valor de r^2 fue menor a 0.1 (Figs. 20, 21, 22, 23, 24 y 25).

En el caso de PM3, la densidad presentó la relación más elevada con la TOS, obteniendo una ecuación de pendiente negativa pero apenas una r^2 de 0.08, (Fig. 22). En tanto que los dos parámetros restantes (Fig. 20 y 21), presentaron una pendiente ligeramente positiva con un valor de $r^2 < 0.05$.

Por otra parte, las características de la contrastación entre los parámetros de crecimiento y TOS en PN0898 (Fig. 23, 24 y 25), se repiten pero obteniendo valores de r^2 aún mas bajos que los obtenidos para PM3 (< 0.05). Estos valores bajos de r^2 representan una dificultad para interpretar los resultados, y esto se debe parcialmente a que la variabilidad de la TOS media anual, no es suficientemente amplia como para observar mejor los efectos sobre el crecimiento coralino.

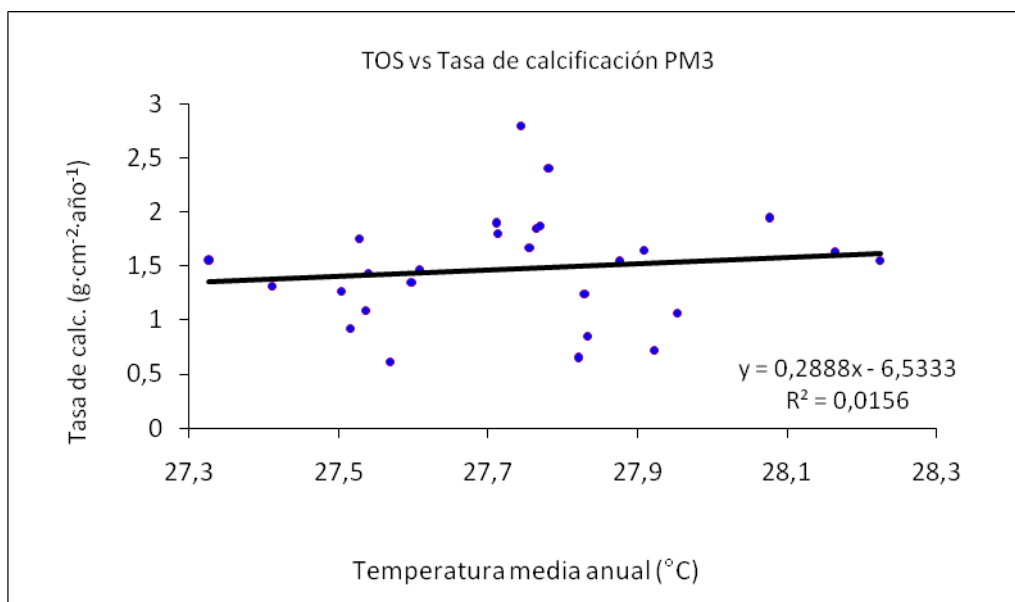


Figura 20. TOS vs Tasa de calcificación anual del núcleo PM3. La tasa de crecimiento presenta pendiente positiva, y el valor de $r^2 < 0.2$.

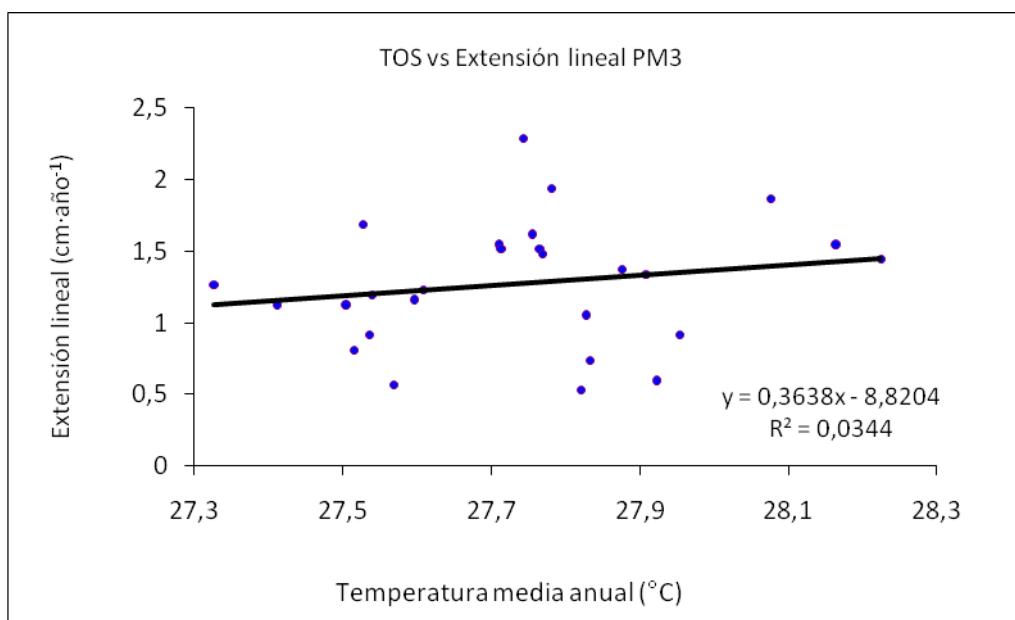


Figura 21. TOS vs Extensión lineal anual del núcleo PM3. Al igual que la tasa de calcificación vs extensión presenta pendiente positiva, y el valor de r^2 0.03.

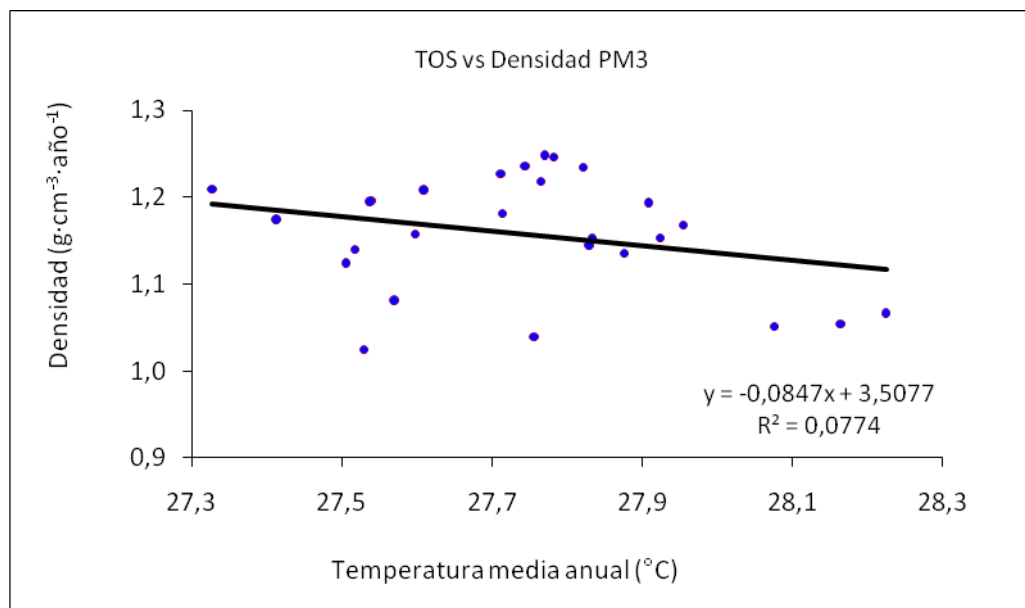


Figura 22. TOS vs Densidad media anual del núcleo PM3. En este caso la pendiente es negativa, el valor de $r^2 < 0.1$.

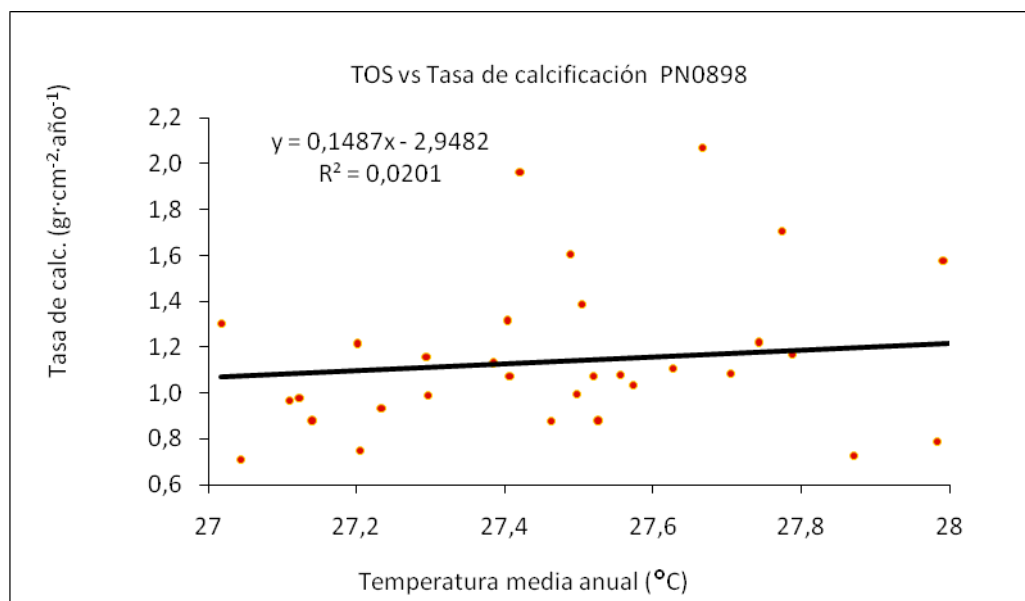


Figura 23. TOS vs Tasa de calcificación anual del núcleo PN0898. Al igual que su par de PM3, la pendiente es de signo positivo, el valor de r^2 es de 0.2.

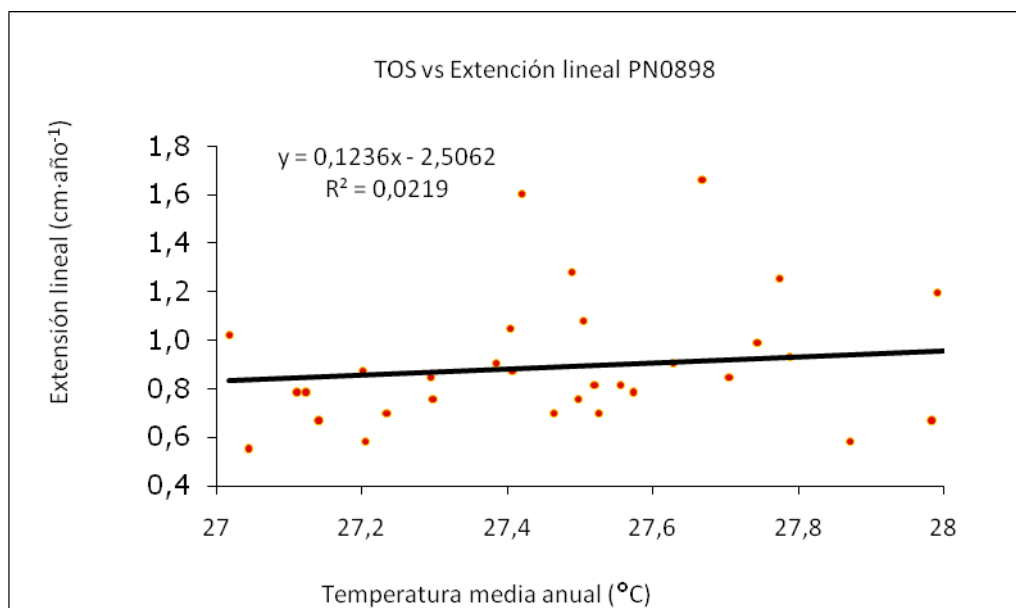


Figura 24. TOS vs Extensión lineal anual del núcleo PN0898. Mantiene las mismas características en cuanto al signo de la pendiente y coeficiente de determinación.

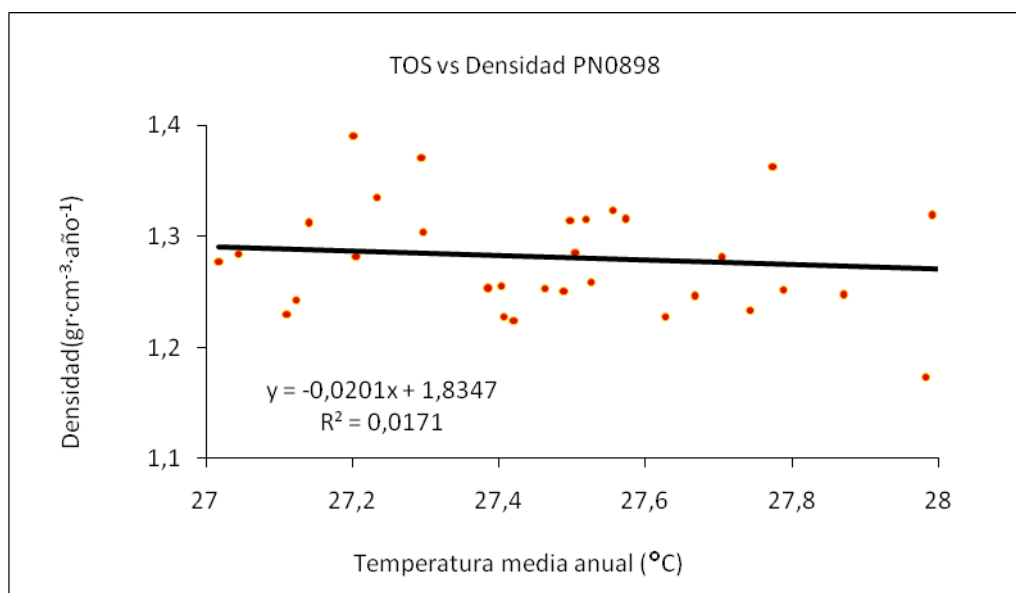


Figura 25. TOS vs Densidad media anual del núcleo PN0898. Pendiente negativa $r^2 < 0.2$.

Para poder observar mejor los efectos de la temperatura sobre el crecimiento coralino se determinó filtrar todos aquellos datos cuyo valor fuese una desviación estándar ($\pm 1\sigma$) por arriba o por debajo del promedio de la TOS anual para ambos registros. Este ejercicio se realizó considerando que los datos filtrados mostrarían una mayor evidencia de cambios en los parámetros de crecimiento, asociados a la TOS. Por lo tanto se construyeron dos series de datos para cada registro coralino, una serie comprende aquellos datos cuyo valor es $>1\sigma$ y la otra serie comprende aquellos datos cuyo valor es $<1\sigma$.

Se contrastaron los datos de valor $>1\sigma$ de TOS contra los datos correspondientes de tasa de calcificación, extensión lineal anual y densidad media anual (Tabla VI, anexos). No se encontró correlación estadísticamente significativa con los nuevos análisis, sin embargo, los resultados de este ejercicio proporcionaron una mejor perspectiva de la relación entre parámetros de crecimiento y temperatura para el registro PM3 (Fig. 26, 27 y 28). En los tres parámetros de crecimiento se encontraron pendientes positivas y valores de r^2 mayores a 0.5; r^2 de 0.64 para la tasa de calcificación contra TOS, r^2 de 0.51 para extensión lineal contra TOS y finalmente r^2 de 0.69 para densidad contra TOS. Con respecto a los datos de valor $<1\sigma$, no se observaron cambios significativos.

El registro PN0898, coincide en el signo de las pendientes con el registro PM3 para el caso de los valores de TOS $>1\sigma$, sin embargo los valores de r^2 son menores a 0.06 en todos los casos (Fig. 29, 30 y 31), no se encontraron cambios significativos en el análisis estadístico de correlación para este núcleo (Tabla VI, anexos).

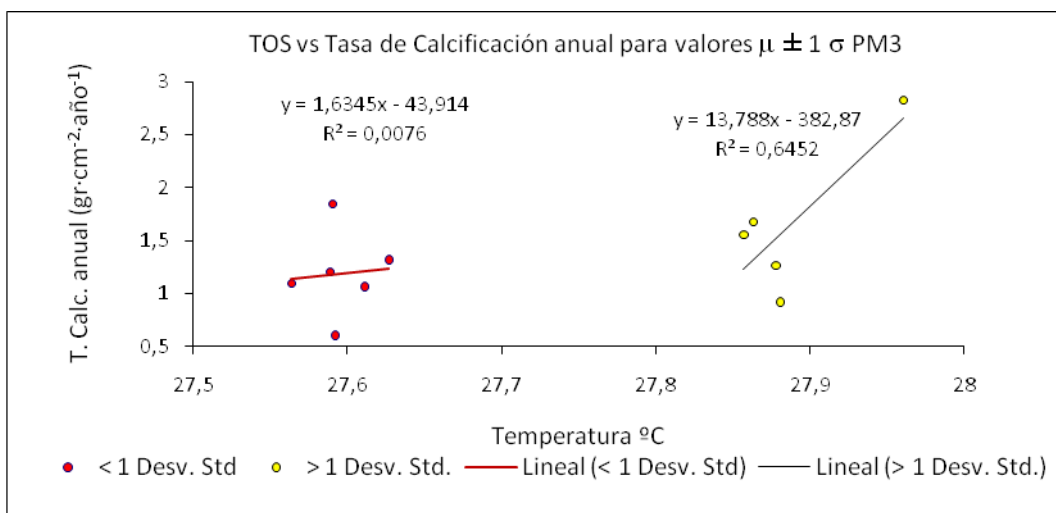


Figura 26. Los valores de la tasa de calcificación mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PM3, presentan una pendiente positiva y r^2 mayor a 0.6.

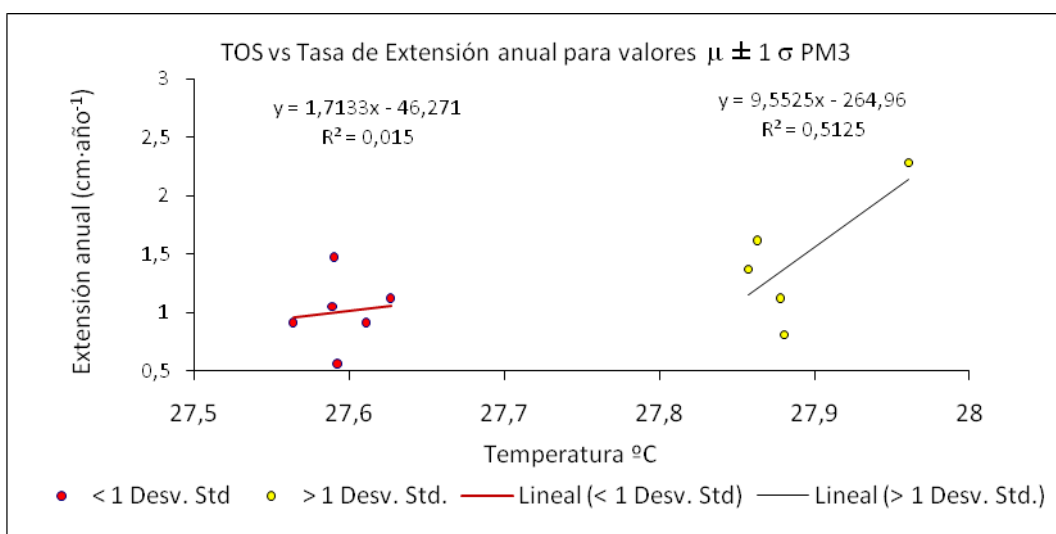


Figura 27. Los valores de extensión lineal anual mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PM3, presentan una pendiente positiva y r^2 mayor a 0.5.

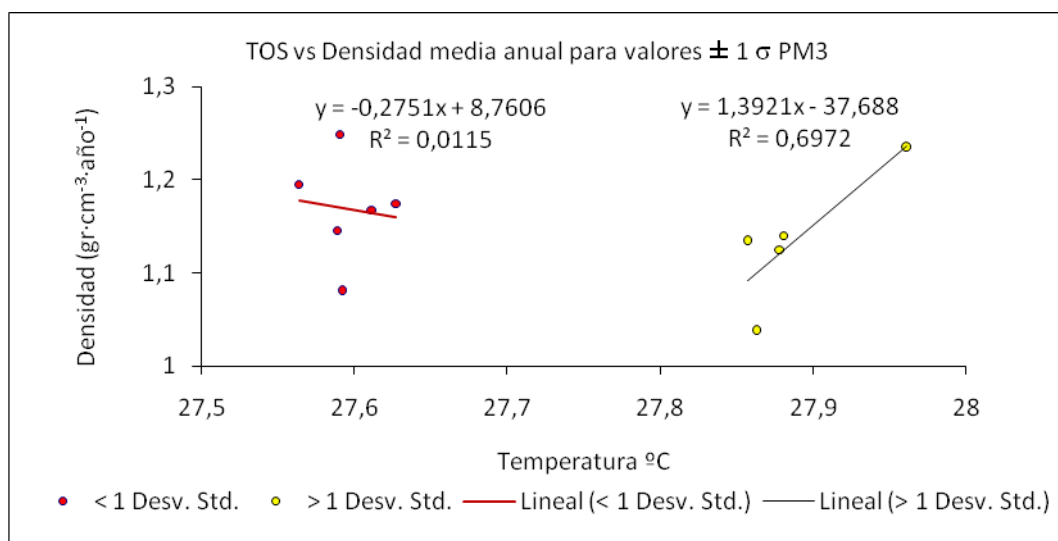


Figura 28. Los valores de densidad media anual mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PM3, también presentan una pendiente positiva y el valor mas alto de r^2 0.7.

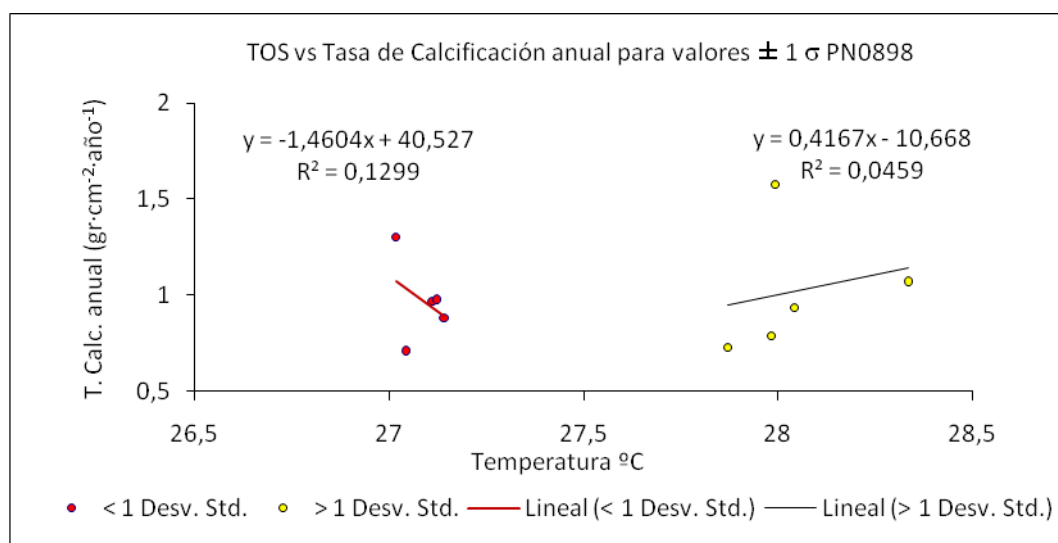


Figura 29. Los valores de la tasa de calcificación mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PN0898, presentan una pendiente positiva y $r^2 < 0.05$ mientras que los valores menores a la media menos una desviación estándar, presentan pendiente negativa y el valor de r^2 es ligeramente mayor a 0.1.

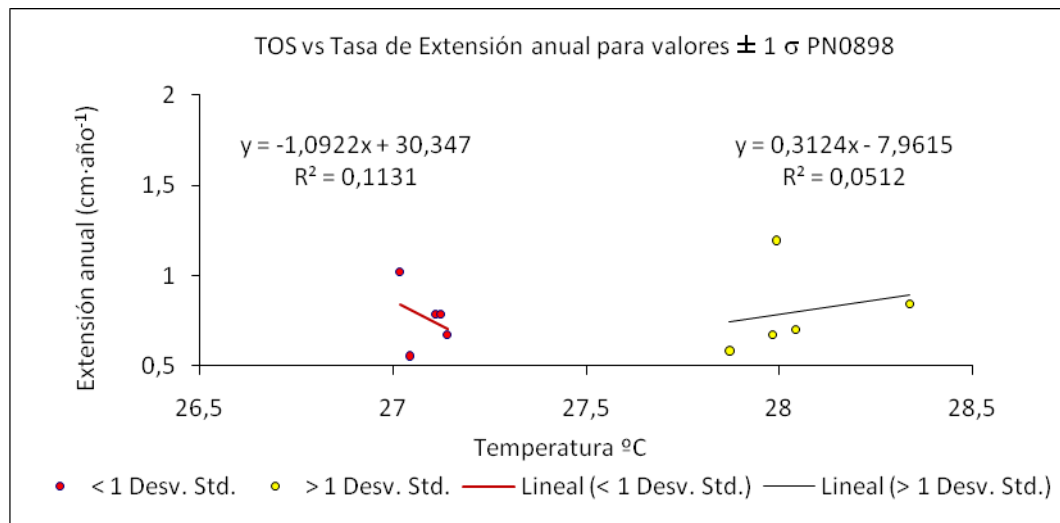


Figura 30. Los valores de la tasa de extensión lineal anual mayores a la media mas una desviación estándar del núcleo PN0898, presentan características similares de pendiente y valor de r^2 que ocurren con la tasa de clasificación.

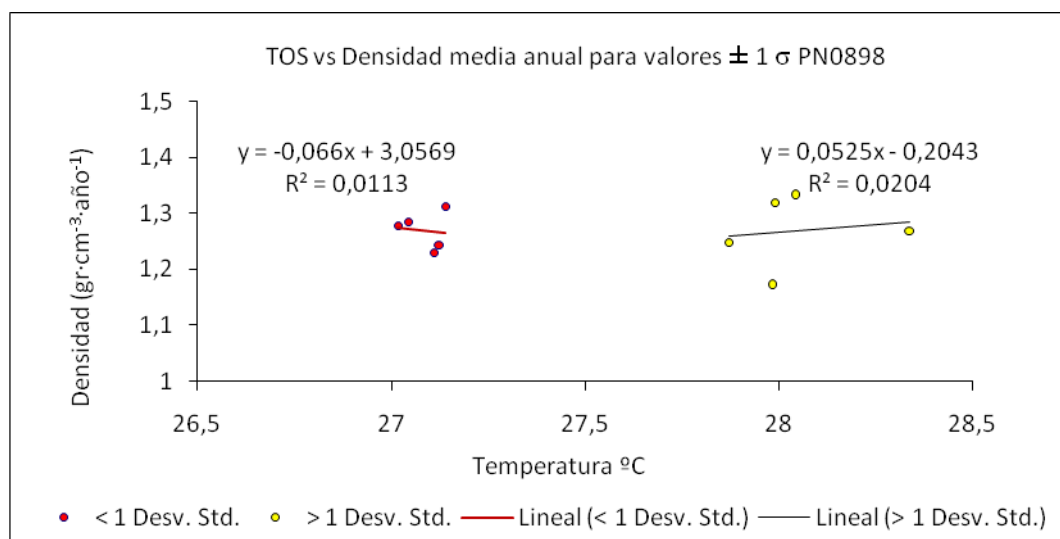


Figura 31. Los valores de densidad media anual mayores a la media mas una desviación estándar, del núcleo PN0898, también presentan pendiente positiva r^2 0.2

Para entender mejor la diferencia de la variabilidad de los ciclos anuales de TOS entre ambos registros, se graficaron las series de TOS media anual (Fig. 32). En esta se observa que la temperatura para Puerto Morelos presenta pendiente positiva, sin encontrar diferencias en la TOS media anual mayores a 1°C a lo largo del registro. Por otro lado la temperatura del registro Punta Nizuc, mostró una pendiente positiva, sin embargo, las variaciones son mucho más amplias, e incluso diferencias de la TOS media anual entre un año y otro llegan a ser mayores de 1°C .

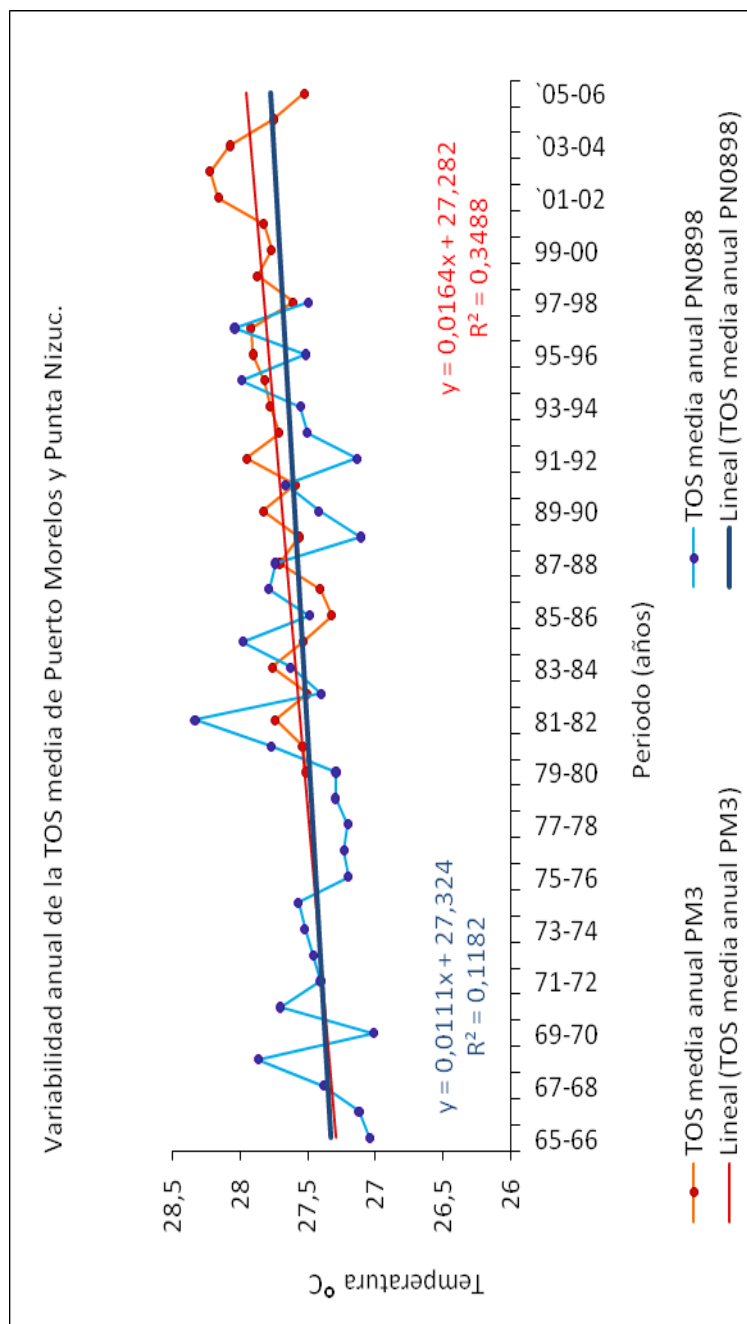


Figura 32. Comparación entre la variabilidad de la TOS media anual obtenida de los registros PM3 (línea roja) y PN0898 (línea azul), el valor de la pendiente es mayor para PM3, pero los cambios mas amplios entre un año y otro se presentan en PN0898.

VIII.- Discusiones

a) Relación entre variables de crecimiento

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis densitométrico, no existe relación clara entre la densidad media anual y tasa de calcificación anual (Fig. 8 y 14), como tampoco entre la densidad media anual y la tasa de extensión anual (Fig. 9 y 15). Sin embargo existe una fuerte relación lineal entre extensión lineal y tasa de calcificación (Fig. 7 y 13).

Carricart-Ganivet y Merino (2001) encontraron este mismo comportamiento en corales del género *Montastrea spp.* en seis localidades en el Golfo de México. De acuerdo a Carricart-Ganivet (comunicación personal), este comportamiento lo define la ‘Modulación estrecha del crecimiento esquelético’, que es la respuesta de los corales a las condiciones ambientales que le indican al organismo la estrategia de crecimiento en la que debe usar los recursos de calcificación; si los emplea en crecimiento lineal, la densidad será reducida, y viceversa. Generalmente, estructuras más densas generan bajas tasas de extensión lineal. Teniendo esto en cuenta, los corales analizados parecen estar utilizando sus recursos de calcificación para el crecimiento lineal, sin embargo las tres tasas de crecimiento encontradas para cada núcleo (ver tabla I y III en anexos) presentan valores más bajos que los reportados en la literatura (Carricart-Ganivet y Merino. 2001; Carricart-Ganivet. 2004).

Por otra parte, las correlaciones entre las variables de crecimiento encontradas en este trabajo (Fig. 7 y 13) son coincidentes con los resultados obtenidos por Carricart-Ganivet y Merino (2001) para corales del Golfo de México, y esto sugiere que los recursos de calcificación están siendo empleados para el crecimiento lineal. Por el

contrario, Carricart-Ganivet (2004), encuentra que en condiciones optimas los corales del género *Montastrea* del Caribe, emplean sus recursos de calcificación en la formación de estructuras más densas. Sin embargo, la falta de relaciones estadísticamente significativas entre la tasa de extensión y tasa de calcificación con la densidad, no permite concluir que la densidad disminuye a medida que las otras dos variables aumentan. Esto es, aunque los valores de densidad promedio calculados para los registros PM3 ($\sim 1.15 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{año}^{-1}$, ver tabla I en anexos) y PN0898 ($\sim 1.29 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{año}^{-1}$, ver tabla III en anexos), son relativamente bajos comparados con los publicados por Carricart-Ganivet (2004) para corales del mismo genero, colectados en el Caribe Mexicano.

En el mismo contexto, la tasa promedio de extensión lineal para el registro PM3 es particularmente alta ($\sim 1.47 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$, ver tabla I en anexos) en comparación con el promedio reportado para ejemplares del Caribe ($\sim 0.9 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$, en Carricart-Ganivet, 2004). Así mismo, la tasa promedio de calcificación anual calculada para este trabajo ($\sim 1.21 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, ver tabla I en anexos), es menor al promedio reportado para ejemplares de la misma localidad ($\sim 1.46 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, en Carricart-Ganivet, 2004), lo cual sugiere la existencia de un efecto negativo en el crecimiento ligado a posibles cambios ambientales.

Respecto al registro PN0898, los promedios de los tres parámetros de crecimiento son ligeramente menores a lo reportado para el Caribe, particularmente el valor promedio de extensión lineal anual cuyo valor es de $\sim 0.6 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$, estas condiciones representan una mayor dificultad para discernir sobre un posible efecto en los recursos de calcificación, analizando únicamente los parámetros de crecimiento del coral.

b) Reconstrucción de la TOS

La señal Sr/Ca y Mg/Ca obtenida de los registros coralininos, ha sido reconocida por varios autores como uno de los paleotermómetros de mayor fidelidad en la reconstrucción de la TOS (Beck et al, 1992; de Villiers et al. 1994; Gagan et al. 2000; Marshall y McCulloch 2002; Mitsuguchi et al. 2003). Aunque algunos autores han destacado que existe una fuerte influencia de factores biológicos que regulan la incorporación de Sr y/o Mg a la estructura de aragonita del organismo y que podrían complicar la relación entre Sr/Ca –TOS, Mg/Ca – TOS (de Villiers et al. 1994; Cohen et al. 2001; Mitsuguchi et al 2003). Trabajos anteriores han encontrado que existe una disminución significativa de la fidelidad en la relación Sr/Ca – TOS, Mg/Ca – TOS, asociada a tasas extensión lineal bajas (de Villiers et al. 1994; Mitsuguchi et al. 2003), antecedente que es importante tomando en cuenta que los valores de extensión lineal encontrados para este trabajo son bajos ($\sim 0.6 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$ a $\sim 1.0 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$).

Debido a las condiciones de estabilidad del Caribe Mexicano, la TOS en esta región presenta un pequeño rango de variación entre el máximo del verano y el mínimo del invierno y esto sugiere que, en la reconstrucción de la TOS, los ciclos estacionales sean menos claros comparados a lugares donde variación de temperatura es mayor. Desde esta perspectiva, se esperaría que el registro PN0898 (Fig. 19), tuviese una señal más fiel con respecto a PM3 (Fig. 18), debido a que en PN0898 las variaciones de la temperatura entre verano e invierno fueron mayores a las registradas en PM3. Contrario a lo esperado, el registro PM3, presentó ciclos mejor definidos que PN0898 (Fig. 16, 17, 18 y 19). Visto desde otro punto, el registro PN0898 presentó tasas de extensión lineal incluso menores a $0.5 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$, por lo que en este caso el parámetro

de crecimiento parece estar influyendo en la fidelidad de la señal Sr/Ca para éste registro.

De cualquier manera, la señal Sr/Ca recuperada tanto de PM3 como de PN0898, se ajusta satisfactoriamente al registro instrumental de TOS ($r^2 > 0.7$ en ambos casos), con lo cual la reconstrucción de la TOS para los sitios de crecimiento se debe considerar válida, Esto indica que la suma de los factores biológicos que controlan la incorporación del Sr en el esqueleto coralino, no son significativos en la relación Sr/Ca – TOS, así como tampoco son significativos los cambios de Sr/Ca en el agua de mar (Smith et al. 1979; Gagan et al. 2000).

Por otra parte, la señal de Mg/Ca, presenta señales erráticas que dificultaron la reconstrucción de los ciclos anuales, más aún, el coeficiente de determinación (r^2) entre el Mg/Ca y la TOS presentó valores de menores a 0.3. Este resultado se suma a otros trabajos en los que se han propuesto varias razones por las cuales bajo ciertas circunstancias el Mg puede no funcionar adecuadamente como un paleotermómetro (Mitsuguchi et al. 1996; Meibon et al. 2004).

c) TOS vs Tasas de crecimiento.

Las características más destacables de los ciclos anuales de la TOS reconstruida a partir de las señales geoquímicas que comparten ambos registros, son; a) el corto rango de variación estacional, (en algunos años es incluso menor a 2°C) por lo que la temperatura promedio anual en ambos registros es ~27.5°C, con una desviación estándar de ~0.3°C (ver Tabla VII en anexos), b) la temperatura media anual encontrada es considerada dentro del rango óptimo de crecimiento (Hoeg-Guldberg

1999; Carricart-Ganivet 2004; Marshall y Clode 2004). Estas características indican que el medio marino de la zona de estudio considerablemente estable, paradójicamente estas condiciones no favorecen la interpretación de los datos, debido a que limitan la observación de los efectos de la TOS sobre las tasas de crecimiento, por otro lado, Carricart-Ganivet (2004) encuentra que el género *Montastrea spp.*, está adaptado para crecer bajo condiciones de TOS máxima y que bajo condiciones de TOS mínima, relación entre las variables de crecimiento y la variación de la temperatura tiende a perderse.

La TOS anual media reconstruida con los registros PM3 y PN0898, se encuentra ligeramente más cercana a la TOS máxima que menciona Carricart-Ganivet (2004). De hecho, para los valores mayores de TOS de ambos registros, los tres parámetros de crecimiento presentan tendencia a aumentar sus valores con el aumento de la TOS, particularmente en el coral PM3.

De acuerdo con Lough y Barnes (2000) y Marshall y Clode (2004), el factor ambiental que controla los cambios en la tasa de calcificación en los corales es la temperatura. Por otra parte Gladfelter (1984), sostiene que dentro de cierto rango de temperatura, las tasas de extensión lineal no son afectadas por esta variable. De cualquier manera, en el presente trabajo, la extensión lineal y la tasa de calcificación de los corales analizados, mantienen una estrecha relación proporcional, por lo que el efecto que tiene la temperatura en la tasa de calcificación, afecta de la misma forma la tasa de extensión lineal.

Es fundamental tener en cuenta que existe un rango de temperatura en la cual la tasa de calcificación alcanza sus valores óptimos y que esto varía con la especie, fuera de este rango óptimo, es donde ocurren los cambios de estrategia en el crecimiento coralino (Marshall y Clode. 2004).

En el análisis de correlación entre tasas de crecimiento y TOS media anual donde se filtran los valores de temperatura $>1\sigma$, aplicado a los registros PM3 y PN0898, destaca una condición importante mencionada previamente, la media anual en la densidad, la tasa de calcificación anual y por consecuencia la tasa de extensión anual tienden a incrementarse cuando la TOS media anual también se incrementa.

Este comportamiento contradice la teoría general, que indica que la densidad de las bandas esqueléticas responde de manera inversa al incremento de la temperatura. Bajo este principio, cuando la temperatura incrementa hacia el punto de máxima calcificación, la densidad se reduce, y los recursos de calcificación se emplean en el crecimiento lineal. Por el contrario, cuando la temperatura rebasa el óptimo de máxima calcificación y los valores de extensión lineal disminuyen, la densidad debería tender a incrementarse a la par que los recursos de calcificación comienzan a disminuir.

Este concepto descrito por Carricart-Ganivet y Merino (2001) como ‘Modulación estrecha del crecimiento esquelético’, considera un cambio en la estrategia de crecimiento coralino, análogo al que ocurre entre el invierno y el verano, pero este ligado a la disminución de las tasas de calcificación por efecto del aumento continuo de la TOS. En otras palabras, el coral emplea los recursos de calcificación para formar una estructura más densa y en consecuencia el crecimiento lineal sería mínimo, de lo

contrario, el coral emplearía los recursos de calcificación en crecer linealmente y en consecuencia la estructura formada sería frágil o poco densa, o bien una tercera opción sugiere que tanto la tasa de extensión lineal como la densidad disminuyan paralelamente buscando un equilibrio proporcional entre el crecimiento del organismo y la fuerza de su estructura. Los tres escenarios propuestos indican un efecto negativo, tal vez implícito desde el instante en el que la tasa de clasificación anual comienza a disminuir. Por el contrario, los resultados de este estudio indican que al incrementar la temperatura los tres parámetros de crecimiento tienden a incrementar. Por ejemplo en el registro PM3, el incremento de la TOS media anual es más evidente en comparación a PN0898 (Fig. 31). Por otra parte los resultados de comparar la TOS media anual contra parámetros de crecimiento, sugieren que en estas localidades se estén alcanzando las temperaturas de óptimo crecimiento, y más aún, estén rebasando esta temperatura, obligando a pasar dos veces por el punto óptimo. Cabe destacar que tanto el registro PM3 como PN0898 son núcleos extraídos en aguas costeras, las cuales son menos estables en su composición fisicoquímica en comparación con las aguas oceánicas.

Por otra parte, PN0898 es un núcleo que además de haber sido extraído de la zona costera, también tiene como característica la cercanía a la zona urbana de Cancún por lo que se esperaría que estuviera influenciado por las actividades de carácter antropogénico. El crecimiento bajo estas condiciones puede estar afectado por la variación de parámetros físicos como la luz, la calidad del agua, la salinidad, etc., factores que sin lugar a dudas afectan de manera importante el crecimiento del coral y la señal de estas alteraciones podría encontrarse mezclada con la señal de la variación de la TOS. Sin embargo, el registro PN0898 presenta las mismas características que

PM3, aunque con menor claridad. De cualquier manera, este análisis resulta insuficiente para predecir la estrategia que elige el organismo en la situación expuesta.

Si bien la comparación entre parámetros de crecimiento y la TOS muestran resultados ligeramente distintos a los antecedentes sobre los efectos de la temperatura sobre el crecimiento coralino, estos resultados son interpretados de acuerdo a las condiciones ambientales que imperan en el Caribe mexicano hoy en día. En este punto resulta muy importante considerar que actualmente en el Caribe, la temperatura de máxima calcificación es rebasada durante el verano, pero posteriormente, durante el periodo de otoño-invierno cuando la TOS disminuye, alcanzando nuevamente el punto óptimo de calcificación. La consecuencia esperada de acuerdo con Carricart-Ganivet (comunicación personal) es la formación de ‘bandas fantasma’ de alta y baja densidad y este efecto está bien manifestado en la laja PN0898 (Fig.3). Debido a esto, se dificultó de manera importante la construcción del modelo de edad, pero más importante aún, comparando los años en los que ocurren temperaturas mayores a 1σ de la media con las secciones correspondientes en las radiografías, es posible observar las mencionadas ‘bandas dobles’ o ‘bandas fantasma’ (Fig. 33 y 34). Por lo tanto, este efecto debe ser considerado como evidencia de la transición de un cambio de estrategia en el crecimiento y por lo tanto, un efecto negativo para el crecimiento y desarrollo de la estructura esquelética coralina.

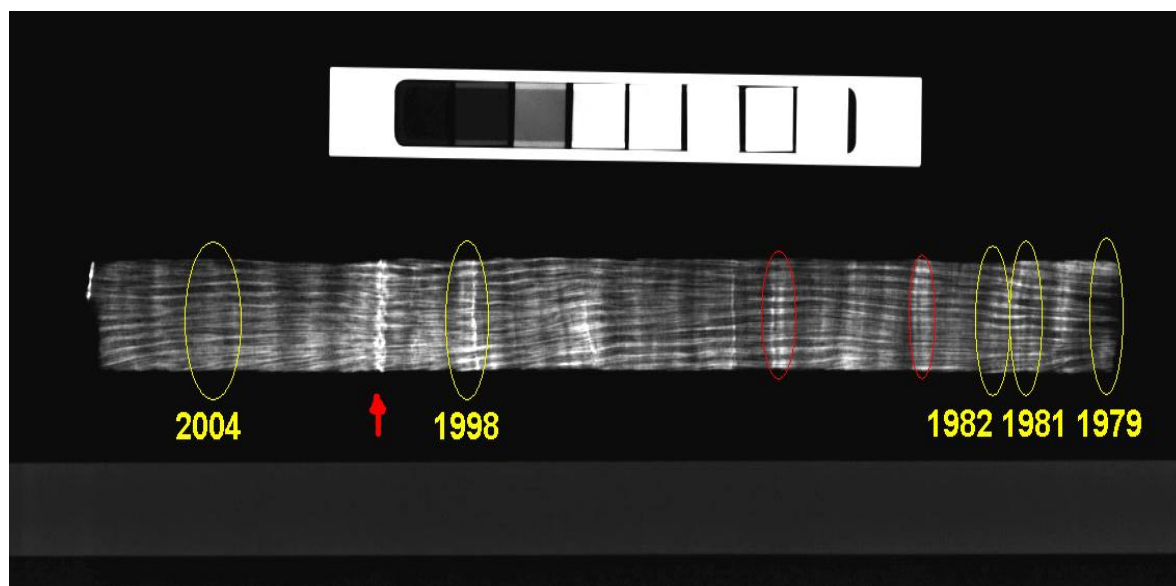


Figura 33. Bandas dobles de un ciclo anual identificadas en la laja PM3, las marcas amarillas señalan donde aparecen en correspondencia con los datos de TOS mayores a la media mas una desviación estándar.

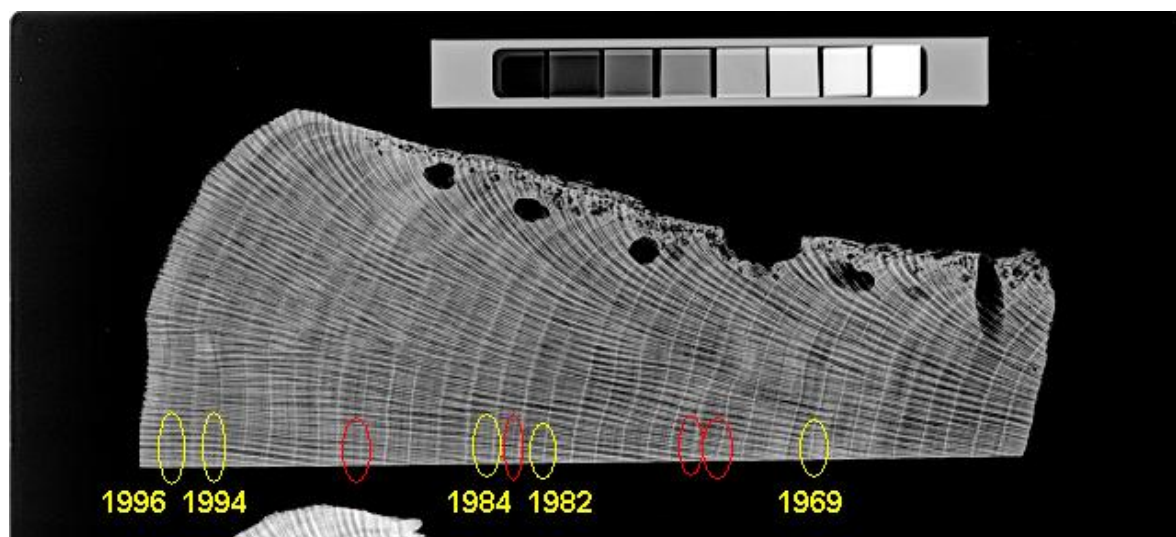


Figura 34. Bandas dobles de un ciclo anual identificadas en la laja PN0898, las marcas amarillas señalan donde aparecen en correspondencia con los datos de TOS mayores a la media mas una desviación estándar.

Por último resulta imprescindible mencionar que aún cuando los corales escleroticnios desarrollen estrategias para contrarrestar el déficit de recursos de calcificación, producto de altas temperaturas, el efecto neto en el crecimiento tiende a ser negativo; Aún más, el incremento sostenido de la TOS, aunado a el incremento de CO₂, acerca de manera inminente a estos organismos a su límite de tolerancia térmica y ambiental, con esto, eventos de blanqueamiento estarán ocurriendo con mayor frecuencia. Finalmente, las expectativas de adaptación de los corales a estas nuevas condiciones no son favorables (Hoeg-Gulderg 1999; Kleypas et al. 2005).

IX.- Conclusiones

La fuerte correlación entre la tasa de calcificación anual y la tasa de extensión lineal, encontrados para los registros PM3 y PN0898, sugieren que los recursos de calcificación del género *Montastrea ssp.* en el Caribe Mexicano, se empleadan para incrementar la tasa de extensión lineal. Bajo esta perspectiva, las variaciones en la tasa de calcificación anual afectan directamente en variaciones en la tasa de extensión lineal.

No existe una relación clara entre la densidad y las otras dos variables de crecimiento. A pesar de esto, cuando las tasas de calcificación anual y extensión lineal disminuyen, la densidad incrementa, aparentemente como un cambio de estrategia en el crecimiento del coral.

Los valores promedio de las tasas de crecimiento para ambos registros, con excepción de la tasa de calcificación en PM3, son relativamente bajos en contraste con los promedios reportados en otros trabajos.

Las señales geoquímicas contenidas en los corales presentaron algunas dificultades para describir los ciclos anuales, debido a dos efectos principalmente; 1) al corto rango de temperatura en el que se definen los ciclos anuales de la TOS del Caribe Mexicano, 2) a las bajas tasas de extensión lineal sobre todo en PN0898.

Los resultados de este estudio indican que la señal de Sr/Ca sigue varía claramente con la temperatura, en ambos registros, mientras que la razón Mg/Ca muestra una alta variabilidad no relacionada con la temperatura.

La TOS reconstruida para las localidades del área de estudio, describe adecuadamente la variación anual y los promedios anuales de temperatura, con lo cual se reafirma la confiabilidad del Sr/Ca como paleotermómetro, incluso en condiciones de alta estabilidad como el Caribe Mexicano.

La TOS reconstruida para la localidad de Punta Nizuc, mostró mayor variabilidad anual, así como también, las máximas y las mínimas temperaturas registradas, mientras que la TOS reconstruida para la localidad de Puerto Morelos mostró menor variabilidad, pero una clara tendencia a incrementarse con el tiempo.

Las respuestas de las variables de crecimiento al incremento de la temperatura descritas en este trabajo, sugieren una alternancia en la estrategia de crecimiento, posiblemente vinculada a la respuesta individual de la tasa de calcificación al incremento de la temperatura.

Se encontraron evidencias suficientes en este estudio para afirmar que, la tasa de calcificación anual aumenta, con el aumento del promedio anual de la TOS. Como consecuencia de esto, la tasa de extensión lineal sigue el mismo comportamiento.

La tendencia observada en las tasas de crecimiento causado por el aumento del promedio anual de la TOS, indica un incremento de los tres parámetros, lo cual contradice los antecedentes. Sin embargo, este comportamiento puede ser evidencia de la transición entre el punto óptimo y el punto de máxima tolerancia. La temperatura de máxima calcificación observada en este estudio se encuentra entre los 27.7 y 27.8° C.

De acuerdo a los resultados de este estudio, la perspectiva de éxito de los corales del Caribe Mexicano es complicada en el incremento sostenido de la TOS debida al Cambio Global.

X.- Referencias

- Camarena Luhrs T. (2003) "Ficha informativa de los humedales de Ramsar"
www.wetlands.org/RSIS/_COP9Directory/Directory/ris/4MX038.html.
- Carabias-Lillo J., Provencio E., De la Maza J. (1998) "Programa de manejo Parque Nacional Marino Costa Occidental Isla Mujeres, Punta Cancun y Punta Nizuc". INE-Semarnap, México 1998. 160 pp.
- Carriquiry J.D., Cupul-Magaña A. L., Rodriguez-Zaragoza F., Medina Rosas P. (2001)
 "Coral bleaching and mortality in the Mexican Pacific during the 1997-98 El Niño and Prediction from a remote sensing approach" *Bul.Mar.Sci* 69(1): 237-249.
- Carricart-Ganivet J.P. y M.Merino (2001) "Growth responses of the reef-building coral *Montastrea annularis* along the gradient of continental influence in the southern Gulf of Mexico". *Bull.Mar.Sci* 68, 133-146.
- Carricart-Ganivet J.P. (2004) "Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastrea annularis*" *Jour. Exp Mar. Biol. And Eco.* Version preeliminar 12 pp..
- Carricart-Ganivet J.P. y D.J. Barnes (2004) "Optical densiometry of digitalized images: a method for measurement of coral skeletal density from X-radiographs". 10th International Coral reef Symposium, Okinawa, Japan. Abstracts: 35.

- Carricart-Ganivet J.P. y D.J. Barnes (2007) "Densitometry from digitized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density". Jour. Exp Mar. Biol. And Eco. Versión preeliminar 6 pp..
- Cohen A., Graham D., Hart S., (2001) "Kinetic control of skeletal Sr/Ca in a symbiotic coral: Implications for the paleotemperature proxy" Paleoc. 16(1): 20-26
- Coronado C., Candela J., R. Iglesias-Prieto., J. Sheinbaum., M. López., F.J. Ocampo-Torres. (2007) "On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon" Coral Reefs 26: 149-163.
- De Villiers S., Nelson B., Chivas A., (1995) "Biological Controls on Coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ Reconstructions of Sea Surface Temperatures" Science 269: 1247-1249.
- Druffel Ellen R. (1997) "Geochemistry of corals: Proxies of past ocean chemistry, ocean circulation, and climate" Proc.Natl.Acad.Sci. 94:8354-8361.
- Dumbar R.B y Cole J.E (1993) "Coral Records of Ocean-Atmosphere Variability" NOAA special report No. 10. 38 p.p.
- Gagan M.K et al. (2000) "New views of tropical paleoclimates from corals" Quaternary Science reviews. 19:45-64.

Gladfelter E.H. (1984) "Skeletal development in *Acropora cervicornis*: A comparison of monthly rates of linear extension, density and calcium carbonate accretion measured over a year" *Coral Reefs* 3:51-57.

Guinotte J.M., Buddemeier R.W., y Kleypas J.A. (2003) "Future coral reefs habitat marginality: temporal and spatial effects of climate changing in the Pacific basin" *Coral Reefs* 22: 551-558.

Helme K.P., Kholer K.E., y Dodge R. (2002) "Relative Optical Densitometry and The Coral X-radiograph Densitometry System: CoralXDS" National Coral Reef Institute and Nova Southeastern University Oceanographic Center. 10 p.p.

Hoeg-Guldberg O. (1999), "Climate changr, coral bleaching and the future of the world's coral reef" *Mar. Freshwater Res.* 50: 839-866.

Instituto Nacional de Ecología; Base de datos (2006)
www.ine.gob.mx/download/conacyt_res/8r.pdf

Kleypas J.A., R.W. Buddemeier, D. Archer, J.P. Gattuso, C. Langdon y B.N. Opdyke (1999) "Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284: 118.120.

Kleypas J.A., R.W. Buddemeier, C.M. Eakin., J.P. Guttuso, J. Guinotte C. O. Hoeg-Guldberg, R. Iglesias-Prieto, P.L. Jokiel, C. Langdon W. Skirving, A. E.

- Strong (2005) "Coment on "Coral reef calcification and climate change: The effect of ocean warming"" Geophy. Res. Letters 32: 1-3.
- Marshall A.T. y Clode P. (2004) "Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate and azooxanthellate scleractinian reef coral" Coral Reefs 23: 218-224.
- Marshall J. F. y McCulloch M.T. (2002) "An assesement of the Sr/Ca ratio in shallow water hermatypic corals as a proxy for sea surface temperature" Gechim. et Cosmochim. Acta 66:3263-3280.
- McNeil B.I., R.J. Matear y D.J. Barnes (2004) "Coral reefs calcification and climate change: The effect of ocean warming. Geoph Res. Lett. VOL. 31, L22309, doi:1029/2004GL021541.
- Mitsuguchi T., Ushida T., Matsumoto E., P.J. Isdale, T. Kawana (2001) "variations in Mg/Ca, Na/Ca, and Sr/Ca ratios of coral skeletons with chemical treatments: Implication for carbonate geochemistry" Geochim et Cosmochim. Acta 65(17): 2865-2874.
- Mitsuguchi T., Matsumoto T., Ushida (2003) "Mg/Ca and Sr/Ca ratios of Porites coral skeleton: Evaluation of the effect of skeletal growth rate" Coral Reefs 22: 381-388.
- Rupert E. Barnes R. (1996) "Zoologia de Invertebrados" 6ª ed. Mc-Graw-Hill interam. p 145-147.

ANEXOS

Tabla I. Tasas del crecimiento coralino calculada para los años de desarrollo de PM3.

Densidad(gcm-3y-1)	Extencion lineal. (cm)	Tasa de calcifcación(gcm-2y-1)	Año
1,140	0,809	0,922	79-80
1,196	1,196	1,430	80-81
1,236	2,286	2,825	81-82
1,124	1,126	1,265	82-83
1,218	1,513	1,842	83-84
1,195	0,915	1,093	84-85
1,209	1,266	1,531	85-86
1,175	1,126	1,322	86-87
1,227	1,548	1,898	87-88
1,081	0,563	0,609	88-89
1,154	0,739	0,852	89-90
1,158	1,161	1,344	90-91
1,167	0,915	1,068	91-92
1,182	1,513	1,787	92-93
1,246	1,935	2,410	93-94
1,234	0,528	0,651	94-95
1,194	1,337	1,595	95-96
1,153	0,598	0,690	96-97
1,208	1,231	1,488	97-98
1,135	1,372	1,557	98-99
1,248	1,477	1,844	99-00
1,145	1,055	1,208	00-01
1,054	1,548	1,631	01-02
1,067	1,442	1,539	02-03
1,051	1,864	1,960	03-04
1,039	1,618	1,681	04-05
1,024	1,688	1,730	05-06
**	**0,000	**0,000	Jul-06
1,158 0.067	1,273 0.431	1,473 0.513	Media □

Tabla II. Resumen de las pruebas estadísticas de correlación entre los parametros de crecimiento y la TOS anual, para el registro PM3.

Pruebas estadísticas de correlación PM3				
D.año(gcm-3y-1)	Ext. (cm)	Tcal(gcm-2y-1)	TOS anual. °C	
1.158	1.273	1.473	27.742	promedio
0.067	0.431	0.513	0.111	desv. Std
valor r correlacion de Pearson				
	-0.019	0.179		D.año(gcm-3y-1)
		0.978		Ext. (cm)
				Tcal(gcm-2y-1)
	0.129	0.019		0.179
Valor critico de F vs p =0.01				
	0.922	0.37		D.año(gcm-3y-1)
		1.09E-18		Ext. (cm)
				Tcal(gcm-2y-1)
	0.522	0.922		0.37
Significancia de la correlación				
	No	No		D.año(gcm-3y-1)
		Si		Ext. (cm)
				Tcal(gcm-2y-1)
	No	No		No

Tabla III. Tasas de crecimiento esqueletal calculadas para los años de desarrollo de PN0898.

Densidad (g/cm ³ y)	Extensión lineal anual (cm)	Tasa de calcificación (g/cm ² y)	año
1,463	0,321	0,469	47-48
1,358	0,525	0,712	48-49
1,289	0,437	0,564	49-50
1,289	0,554	0,714	50-51
1,240	0,787	0,976	51-52
1,256	0,495	0,622	52-53
1,251	0,408	0,510	53-54
1,246	0,583	0,726	54-55
1,273	1,020	1,299	55-56
1,278	0,845	1,081	56-57
1,233	0,874	1,078	57-58
1,247	0,379	0,473	58-59
1,286	0,321	0,412	59-60
1,236	0,699	0,865	60-61
1,311	0,787	1,031	61-62
1,389	0,874	1,215	62-63
1,338	0,699	0,936	63-64
1,284	0,583	0,748	64-65
1,298	0,379	0,492	65-66
1,370	0,379	0,519	66-67
1,372	0,321	0,440	67-68
1,363	0,525	0,715	68-69
1,304	0,350	0,456	69-70
1,259	0,903	1,138	70-71
1,255	0,845	1,061	71-72
1,257	0,612	0,769	72-73
1,189	0,437	0,520	73-74
1,173	0,903	1,060	74-75
1,247	0,670	0,836	75-76
1,251	0,321	0,401	76-77
1,254	0,962	1,206	77-78
1,239	0,525	0,650	78-79
1,223	0,408	0,499	79-80
1,243	0,554	0,688	80-81
1,215	0,437	0,531	81-82
1,224	0,787	0,963	82-83
1,241	0,408	0,507	83-84
1,251	1,195	1,495	84-85
1,265	0,350	0,442	85-86
1,343	0,437	0,587	86-87
1,344	0,437	0,587	87-88
1,279	0,641	0,820	88-89
1,299	0,466	0,606	89-90
1,294	0,525	0,679	90-91
1,349	0,554	0,747	91-92
1,322	0,816	1,079	92-93
1,296	0,758	0,982	93-94
1,344	0,437	0,588	94-95
1,336	0,816	1,090	95-96
1,312	0,699	0,918	96-97
1,416	0,758	1,073	97-98
1,288	0,604	0,776	Media
0,058	0,215	0,272	□

Tabla IV. Resumen de las pruebas estadísticas de correlación entre los parámetros de crecimiento y la TOS anual, para el registro PN0898.

Pruebas estadísticas de correlación PN0898				
D.año(gcm-3y-1)	Ext.(cm)	Tcal(gcm-2y-1)	TOS anual. °C	
1.288	0.856	1.097	27.513	promedio
0.056	0.284	0.353	0.314	desv. Std
valor r correlacion de Pearson				
	0.111	0.019		D.año(gcm-3y-1)
		0.991		Ext. (cm)
				Tcal(gcm-2y-1)
0.131	0.148	0.142		TOS anual. °C
Valor critico de F vs p =0.01				
	0.539	0.916		D.año(gcm-3y-1)
		1.180E-28		Ext. (cm)
				Tcal(gcm-2y-1)
0.468	0.412	0.431		TOS anual. °C
Significancia de la correlación				
	No	No		D.año(gcm-3y-1)
		Si		Ext. (cm)
				Tcal(gcm-2y-1)
No	No	No		TOS anual. °C

Tabla V. Resumen de las pruebas estadísticas de correlación entre la señal geoquímica de Sr/Ca y la TOS instrumental para los registros PM3 y PN098.

Pruebas estadísticas de correlación señal geoquímica Sr/Ca vs TOS		
PM3 Tos vs Sr/Ca	PN0898 Tos vs Sr/Ca	
0.868	0.852	r
0.000	0.000	Fc, p=0.05
Si	Si	Significativo

Tabla VI Resumen de las pruebas estadísticas de correlación entre los datos filtrados de TOS anual y de crecimiento coralino de los registros PM3 y PN0898.

Pruebas estadísticas de correlación PM3			Pruebas estadísticas de correlación PN0898			TOS
Den.(gcm-3y-1)	Ext(cm)	Tcal(gcm-2y-1)	Den.(gcm-3y-1)	Ext(cm)	Tcal(gcm-2y-1)	>1σ
0.835	0.716	0.803	0.143	0.226	0.214	r
0.078	0.174	0.102	0.819	0.714	0.729	Fc,p=0.01
No	No	No	No	No	No	Signific.
						<1σ
0.107	0.122	0.087	0.106	0.336	0.360	r
0.840	0.817	0.869	0.865	0.580	0.551	Fc,p=0.01
No	No	No	No	No	No	Signific.

Tabla VI. Temperatura Oceánica Superficial media anual calculada para los núcleos PM3 y PN0898.

Año	T°C PM3	T°C PN0898
65-66		27.044
66-67		27.123
67-68		27.385
68-69		27.870
69-70		27.017
70-71		27.704
71-72		27.406
72-73		27.463
73-74		27.526
74-75		27.573
75-76		27.201
76-77		27.234
77-78		27.205
78-79		27.297
79-80	27.516	27.294
80-81	27.540	27.773
81-82	27.743	28.336
82-83	27.504	27.404
83-84	27.765	27.627
84-85	27.536	27.983
85-86	27.326	27.488
86-87	27.412	27.788
87-88	27.711	27.743
88-89	27.569	27.110
89-90	27.833	27.420
90-91	27.597	27.667
91-92	27.954	27.140
92-93	27.713	27.504
93-94	27.781	27.556
94-95	27.821	27.991
95-96	27.908	27.519
96-97	27.923	28.043
97-98	27.608	27.497
98-99	27.876	
99-00	27.770	
`00-01	27.829	
`01-02	28.164	
`02-03	28.225	
`03-04	28.076	
`04-05	27.755	
`05-06	27.528	
T°C media	27.740	27.513
s	0.220	0.314