



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**VALORES DE  $\delta^{15}\text{N}$  EN LA MATRIZ ORGÁNICA DEL CORAL HERMATÍPICO *Orbicella faveolata* COMO INDICADORES DEL IMPACTO DEL DESARROLLO TURÍSTICO EN EL PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN CIENCIAS

PRESENTA:

SERGUEI DAMIÁN RICO ESENARO

DIRECTOR: DR. ROBERTO IGLESIAS PRIETO

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

COMITÉ TUTOR: DR. JUAN PABLO CARRICART GANIVET  
DR. MARTÍN MERINO IBARRA  
DR. PAUL BLANCHON  
DR. JOAN ALBERT SÁNCHEZ CABEZA

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO DE 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pública y Gratuita de México.

Al Dr. Roberto Iglesias Prieto.

A los integrantes del Comité tutor por su acertada asesoría y aportes en la ejecución de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante los estudios de posgrado (CVU: 448526) y a la Fundación Cannon.

A la Dra. Martha Signoret Poillon<sup>†</sup> quien gracias a sus consejos durante mi formación como biólogo me impulsó a dedicarme al quehacer científico, un reconocimiento especial a su trayectoria docente.

A los investigadores: Dra. Andrea Grottoli, Dra. Susana Enríquez, Dra. Judith Sánchez y Dra. Patricia Thomé y al M en C. Yohei Matsui y M. en C. Rosa Rodríguez por sus comentarios y apoyo.

A la Estación Oceanográfica de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, en especial al M en C. Edgar Escalante Mancera y al Capitán Amaury Mendoza.

A mi familia, quienes desinteresadamente han apoyado económica y afectivamente la conclusión de mis proyectos académicos, especialmente a Carolina Esenaro González, Javier Rico Moreno, Sebastián Rico Esenaro, Celia González Rodríguez<sup>†</sup> e Ilich Brito Castañeda.

A mis compañeros del posgrado, con los que el trabajo diario nos recuerda que la ciencia es un producto del trabajo colectivo, pero especialmente a quienes apoyaron con ideas, trabajo y opiniones valiosas: Agustín Cruz, Sergio Güendulain, Elisa López, Tatiana Galindo, Luis González, Darren Brown, Román Vázquez, Tim Scheufen, Luis Parmenio Suescun, José Estrada, Axayácatl Prieto, Sacnité Chávez, Antonia Colom, Rodrigo Ángeles, Esmeralda Pérez, Tomás López, Nancy Escaldón y Kelly Gómez.

A mis amigos y colegas quienes moralmente apoyaron en todo momento y mostraron interés en el proyecto: Luis Lombardo, Cecilia Mozqueda, Lucía Santos, Eduardo Pérez, Gabriela Gutiérrez, Miguel A. Pérez, Gabriela Ang, Sarahí Anaya y Miriam Schutter.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁG.</b>
<b>RESUMEN</b>	4
<b>ABSTRACT</b>	4
<b>INTRODUCCIÓN</b>	5
<i>Objetivo general</i>	7
<i>Objetivos particulares</i>	7
<b>ANTECEDENTES</b>	
<b>1. Los corales hermatípicos como indicadores ambientales</b>	8
1.1 <i>El ciclo del nitrógeno en los corales hermatípicos</i>	8
1.2 <i>Esclerocronología</i>	9
1.3 <i>Matriz orgánica</i>	10
1.4 <i>Fundamento y aplicaciones del <math>\delta^{15}\text{N}</math> en arrecifes de coral</i>	11
<b>2. Puerto Morelos y el desarrollo turístico</b>	
2.1 <i>Características ambientales y dinámica hídrica</i>	14
2.2 <i>Desarrollo turístico y asentamientos urbanos en Puerto Morelos</i>	16
2.3 <i>Indicadores de impacto antropogénico en arrecifes de la Riviera maya</i>	19
<b>MÉTODO</b>	
<i>Estimación del tamaño de muestra</i>	19
<i>Extracción de núcleos y fechado por esclerocronología</i>	21
<i>Extracción de matriz orgánica</i>	21
<i>Análisis isotópico</i>	21
<i>Registro histórico de precipitación</i>	22
<i>Turismo, crecimiento poblacional y servicios</i>	22
<i>Manejo estadístico</i>	22
<b>RESULTADOS</b>	
<i>Colecta y fechado</i>	23
<i>Matriz orgánica</i>	24
<i>Valores de <math>\delta^{15}\text{N}</math> en la matriz orgánica</i>	24
<i>Indicadores sociodemográficos</i>	26
<b>DISCUSIÓN</b>	
<i>Matriz orgánica</i>	27
<i><math>\delta^{15}\text{N}</math></i>	28
<i>El impacto del desarrollo turístico en Puerto Morelos</i>	29
<b>CONCLUSIONES</b>	33
<b>LITERATURA CITADA</b>	34
<b>ANEXO I</b>	40

## RESUMEN

Los arrecifes coralinos de la Riviera Maya que se encuentran cercanos a desarrollos turísticos son influenciados por filtraciones de agua residual provenientes de los acuíferos del sistema cárstico. Se determinaron valores anuales de  $\delta^{15}\text{N}$  en la matriz orgánica en muestras de esqueleto del coral *Orbicella faveolata* de 1970 a 2012 para obtener un registro histórico del impacto antropogénico en la laguna arrecifal de Puerto Morelos. Se obtuvo una cantidad promedio de de 0.03% ( $\pm 0.01$  DE) de matriz orgánica por gramo de  $\text{CaCO}_3$  y un porcentaje promedio de 0.002% ( $\pm 0.001$  DE,  $n=106$ ) de  $\text{N}\cdot\text{g}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ . Asimismo, se determinó un incremento estadísticamente significativo ( $p<0.001$ ) en el  $\delta^{15}\text{N}$  derivado de contaminación por descargas de agua residual al acuífero. Este aumento está positivamente correlacionado con el crecimiento demográfico derivado del impulso a la industria turística. Se pone de manifiesto la necesidad de considerar este impacto en la elaboración de planes de desarrollo que garanticen el saneamiento del agua residual reduciendo al mínimo la aportación de nitrógeno al sistema hídrico así como la necesidad de una normatividad local que responda a las necesidades del sistema.

## ABSTRACT

Reef corals in the Riviera Maya located close to touristic developments are under influence of filtered sewage through aquifers in the karstic system to the reef lagoon. Annual values of  $\delta^{15}\text{N}$  were determined in the organic matrix of skeletal fragments of the coral *Orbicella faveolata* from 1970 to 2012. An historical register of the antropogenic impact was determined in the Puerto Morelos reef lagoon. Average content of organic matrix per gram of  $\text{CaCO}_3$  was 0.03% ( $\pm 0.01$  SD) and 0.002% ( $\pm 0.001$  SD,  $n=106$ ) of  $\text{N}\cdot\text{g}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ . Also, a statistically significant increase ( $p<0.001$ ) in the  $\delta^{15}\text{N}$  was determined from filtrations of sewage to the aquifer. This increase is positively correlated with population growth derived from the development of the touristic industry. It highlights the need to consider this impact on the elaboration of development projects capable to ensure wastewater treatment to reduce nitrogen inputs to the hydrological system and a local regulation that responds to the characteristics of the water system.

## INTRODUCCIÓN

Los corales hermatípicos son considerados como los principales constructores de arrecifes coralinos ya que poseen una gran capacidad de precipitar carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en su esqueleto. Estos corales guardan estrechas relaciones simbióticas con dinoflagelados que hospeda dentro del tejido de sus pólipos. La fotosíntesis realizada por los dinoflagelados utiliza el nitrógeno inorgánico disuelto (NID) del medio produciendo fotosintetatos que son translocados a los pólipos para satisfacer sus necesidades metabólicas. Lo anterior hace que estos corales dependan de una producción fotosintética que les provea la energía necesaria para invertir en su crecimiento mediante la calcificación. En este contexto los corales hermatípicos son sensibles a las variaciones o excesos de nitrógeno en su medio.

El proceso de calcificación, así como su metabolismo en general, es afectado por las variaciones ambientales y las repercusiones de estas se pueden observar reflejadas en las densidades medias y los patrones de crecimiento (Knutson, 1972; Carricart, 2000). Dentro del esqueleto de  $\text{CaCO}_3$  se conserva una matriz orgánica compuesta de proteínas y lípidos que es estable en escalas de siglo (Constantz y Weiner 1988; Allemand *et al.*, 2003; Ingalls *et al.*, 2003; Muscatine *et al.*, 2005; Marion *et al.*, 2005; Puvarel *et al.*, 2005). Esta característica hace que los corales contengan indicadores paleoceanográficos y geoquímicos útiles como el crecimiento esquelético y los isótopos estables (Bernal y Cariquiry 2001).

El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) se encuentra en la región de la Riviera Maya entre las ciudades de Cancún y Playa del Carmen, localidades que representan los principales desarrollos turísticos en estado de Quintana Roo. Puerto Morelos al igual que Cancún pertenece al municipio de Benito Juárez. El subsuelo de la Riviera maya se compone por un sistema cárstico con extensos acuíferos subterráneos que mantienen comunicación con el mar. En Puerto Morelos no se cuenta con un sistema de drenaje sanitario ni pluvial (Vázquez-Lule y Adame, 2009), en general se construyen fosas sépticas que no cumplen con la normatividad adecuada (INE, 2000; Daltabuit *et al.*, 2006).

Los arrecifes de la región pertenecen al Sistema Arrecifal Mesoamericano y sus playas poseen un gran atractivo que ha sido aprovechado por la industria turística. El turismo de

alto impacto se ha propuesto como opción de desarrollo industrial a los países del tercer mundo y ha sido promovido por agencias internacionales como una alternativa de desarrollo que provee beneficios económicos tanto a nivel local como nacional. Sin embargo, el desarrollo turístico en la Riviera Maya, así como los desarrollos urbanos que conlleva, carecen de infraestructura y servicios adecuados que garanticen su sustentabilidad. Cancún y Playa del Carmen mantienen actualmente tasas de crecimiento poblacional que se encuentran entre las más altas a nivel nacional y han experimentado una rápida explosión demográfica desde los años setenta. Tan sólo entre 1998 y el 2000 la infraestructura hotelera en la Riviera Maya pasó de 150 a 241 hoteles (Daltabuit *et al.*, 2006) y entre 1998 y 2005 se triplicó el número de cuartos de hotel (Rodríguez-Martínez, 2008).

Para obtener un diagnóstico adecuado de los arrecifes coralinos resulta necesario el empleo de métodos objetivos capaces de evaluar el estrés provocado por descargas de aguas residuales, particularmente en las zonas costeras con altos índices de crecimiento económico y poblacional. Para entender la magnitud y la naturaleza de los cambios que ocurren en los arrecifes de coral es sumamente importante observar tendencias a gran escala espacial y temporal sobre la condición de los mismos (Carrquiry, 2010) así como de los ecosistemas que los rodean. La composición elemental e isotópica en esqueletos de coral es considerada como un indicador de alta prioridad para su uso en programas de monitoreo a corto y largo plazo (Cooper *et al.*, 2009) ya que permite determinar condiciones de estrés a diversas escalas temporales y espaciales (Risk *et al.*, 2009). Las posibilidades de entender tanto las fuerzas que afectan a los arrecifes coralinos como su respuesta a los cambios ambientales provee oportunidades para dirigir de manera adecuada el manejo de estos recursos (Downs *et al.*, 2005).

Los corales hermatípicos del Caribe Mexicano han sido testigos de un rápido crecimiento demográfico durante los últimos cuarenta años. Este estudio aporta datos que permiten construir un registro histórico de la acumulación de  $^{15}\text{N}$  como indicador del impacto del crecimiento poblacional en la zona desde 1972 a 2012. Este registro puede contribuir a una mejor toma de decisiones en el desarrollo de la región. Con base en lo anterior, esta investigación propone responder a las siguientes interrogantes: ¿Es posible determinar un

incremento en la contaminación del arrecife mediante los registros históricos de  $\delta^{15}\text{N}$  contenidos en la matriz orgánica del esqueleto coralino? De existir estas evidencias, ¿Es posible utilizar este registro como un indicador del impacto del desarrollo turístico en las colonias arrecifales de Puerto Morelos?

*Objetivo General.*

Obtener un registro temporal del impacto antropogénico por el desarrollo turístico en corales hermatípicos del PNAPM.

*Objetivos particulares*

- Obtener un registro desde 1970 de los niveles de  $\delta^{15}\text{N}$  alojados en la matriz orgánica del coral hermatípico *Orbicella faveolata*.
- Obtener un registro histórico sobre el incremento en la ocupación hotelera, tasas de crecimiento poblacional, descarga de agua residual y precipitación en la región.



## ANTECEDENTES

### 1. Los corales hermatípicos como indicadores ambientales

#### 1.1 El ciclo del nitrógeno en los corales hermatípicos

Los corales hermatípicos comparten relaciones simbióticas no sólo con dinoflagelados del género *Symbiodinium* sino que además contienen dentro y fuera del tejido de sus pólipos poblaciones de bacterias diazótrofes, archaeas y hongos (Kimes *et al.*, 2010; Lema *et al.*, 2012). En el caso de *M. cavernosa* se han identificado cianobacterias endosimbióticas del orden de las *Chroococales* (Lesser *et al.*, 2004). Esta comunidad de organismos interactúa en relaciones complejas que dan como resultado una eficiente maquinaria de reciclaje de nutrimentos. Los corales hermatípicos presentan dos tipos de alimentación, una por vía autótrofa, en la que nutrimentos sintetizados por las algas son translocados al pólipo, y otra heterótrofa, mediante la deglución de material particulado. En corales que viven en zonas someras la aportación por autotrofia es predominante. Por lo anterior, al depender de la producción fotosintética estos organismos son sensibles a las variaciones de nitrógeno de su ambiente.

Las fuentes de nitrógeno para los arrecifes de coral incluyen el nitrógeno inorgánico disuelto del agua (NID), que es asimilado por los dinoflagelados simbiotes, el consumo de nitrógeno orgánico particulado (NOP), incluyendo el proporcionado por el zooplancton, el nitrógeno orgánico disuelto (NOD) y la fijación de nitrógeno por cianobacterias simbióticas (Rahav, 1987; Heikoop *et al.*, 2000; Lesser *et al.*, 2004, 2007).

Experimentos con *Montastraea cavernosa* realizados por Lesser *et al.*, (2007) indican que las tasas de fijación de nitrógeno se elevan en las primeras horas de la mañana y en las últimas horas de la tarde, justo cuando la producción primaria decae y los niveles de oxígeno en los tejidos del coral disminuyen. Esto representa una estrategia de adaptación ya que la enzima nitrogenasa, encargada de la fijación del nitrógeno, se inhibe en presencia de oxígeno. Lo cual explica que los corales que se encuentran a mayor profundidad muestren tasas de fijación más altas ya que reciben menos cantidad de luz que los corales cercanos a la superficie.

El 90% del nitrógeno asimilado por los dinoflagelados simbiotes es generado por reciclaje de nitrógeno orgánico dentro del coral y el 10% restante es nitrógeno asimilado desde fuentes externas para apoyar el crecimiento (Rahav *et al.*, 1989). Shashar *et al.* (1994) muestran que en el esqueleto coralino se encuentran bacterias fijadoras de nitrógeno que se benefician de carbono orgánico excretado por el tejido del coral, esas interacciones entre los organismos fijadores de nitrógeno y el coral son de gran importancia para el presupuesto de nitrógeno de los corales.

La absorción de nitrógeno por las algas simbiotes causa mayor actividad en el metabolismo del coral y por lo tanto el pólipo puede alojar parte de este como nitrógeno orgánico fijo en su esqueletos (Yamasaki *et al.*, 2011). Recientemente Kopp *et al.* (2013) establecen procesos dinámicos de nitrógeno en tejidos de *Pocillopora damicornis* a nivel subcelular y en ambientes enriquecidos con  $^{15}\text{N}$  donde la asimilación de amonio, nitrato, y ácido aspártico dan lugar a la formación de cristales de ácido úrico incorporando el nitrógeno y almacenándolo temporalmente. Estos son removidos posteriormente por translocación de compuestos nitrogenados al pólipo y almacenados en compartimentos celulares específicos en los cuatro epitelios del pólipo, incluyendo cámaras de moco, cuerpos de Golgi y vesículas de células calicoblásticas.

### 1.2 Esclerocronología

Los corales hermatípicos se encuentran entre los organismos más eficientes en cuanto a calcificación y pueden alojar en su esqueleto indicadores que permiten calcular la edad del organismo y obtener información sobre cambios climáticos y ambientales del pasado (Carilli *et al.*, 2010). A pesar de existir diversa información en cuanto a su rol ecológico, basado en el control de ciclos de carbono y calcio, la geología referente a la formación de arrecifes, su paleoclimatología y los mecanismos de formación de su esqueleto siguen siendo poco conocidos (Puverel *et al.*, 2005).

A escalas anuales el crecimiento esquelético puede ser descrito por dos variables: extensión y tasa de calcificación (Carricart-Ganivet *et al.*, 2000). Estas variables son herramientas útiles para obtener información acerca de la temperatura del océano, flujos rivereños, precipitación, surgencias, salinidad e influencias antropogénicas (Allemand *et al.*, 2003).

La tasa de calcificación anual es el producto de la tasa de extensión y la densidad promedio del esqueleto depositado en esa extensión:

$$\text{g CaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1} = \text{cm} \cdot \text{año}^{-1} \text{ g CaCO}_3 \cdot \text{cm}^{-3}$$

Las medidas anuales de densidad proporcionan una vía de análisis retrospectivo para analizar tanto crecimiento del coral como las condiciones ambientales en las que se presenta dicho crecimiento. Estudios de densitometría en *O. faveolata* y *O. annularis* indican que durante su crecimiento se presenta una banda anual de alta densidad formada durante el verano, entre los meses de julio y agosto, temporada en la que se presentan las temperaturas máximas en el Caribe mexicano (Carricart-Ganivet *et al.*, 2000; Cruz-Piñón, 2003). Un aspecto relevante para efectos de fechado, es que para años específicos estas bandas pueden no presentarse. Por ejemplo, (Carricart-Ganivet, 2011) reporta que la banda de alta densidad entre los años 1997 y 1998 puede ser imperceptible debido un evento de blanqueamiento severo por temperaturas extremas presentado en el Caribe entre esos años. La extensión esquelética promedio reportada para *O. faveolata* es de  $0.8 \text{ cm} \cdot \text{año}^{-1}$  (Cruz-Piñón *et al.*, 2003, Gischler y Oschmann, 2005), mientras que la densidad esquelética para *O. annularis* es de  $1.74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (Garricart-Ganivet, 2011).

### 1.3 Matriz orgánica

En la estructura esquelética de estos organismos se pueden diferenciar dos fases comprendidas por una capa de aragonita asociada a una matriz orgánica (MO). Esta se comprende de proteínas sintetizadas por las células del epitelio calicoblástico y son secretadas dentro del espacio subepitelial donde se inicia y controla el proceso de calcificación (Clode y Marshal, 2003; Muscatine *et al.*, 2005). La MO está compuesta principalmente por glicoproteínas sulfatadas y proteínas ricas en aminoácidos como aspartato y glutamato que en presencia de calcio adoptan una estructura  $\beta$ -plegada protegiéndose de la oxidación inclusive al someterlas a tratamientos con hipoclorito de sodio (Contanz y Weiner, 1988). Allemand *et al.* (2003) y Puverel *et al.*, (2005) afirman que las proteínas contenidas en la MO intervienen en la dirección de los procesos de calcificación. Estas proteínas son relativamente estables y pueden permanecer intactas a escalas de cientos de años. El contenido de la MO preservada en el esqueleto del coral incluye, además de proteínas sintetizadas durante el proceso de biomineralización, aportes

de materia por algas endolíticas, bacterias y la incorporación de material particulado presente en la columna de agua (Allemand *et al.*, 1998; Marion *et al.*, 2005). El contenido de MO generalmente se encuentra en proporción  $<0.1\%$  del total del peso del esqueleto (Constanz y Weiner, 1988). El tratamiento de muestras de esqueleto con HCl permite aislar la MO (Cohen y McConnaughey, 2003; Muscatine *et al.*, 2005) y analizar de manera independiente los valores de N alojados en el esqueleto coralino (Kolasinsky *et al.*, 2008). Comparados con parámetros fisicoquímicos del ambiente, la extensión y la densidad esquelética son capaces de brindar información sobre la respuesta de estos organismos a variaciones climáticas, p.e. la temperatura oceánica. Además existen otros parámetros de que pueden brindar obtener información de relevancia como los isótopos estables.

#### *1.4 Fundamento y aplicaciones del $\delta^{15}\text{N}$ en arrecifes de coral*

Los isótopos son átomos con el mismo número de protones y electrones pero distinto número de neutrones. Los isótopos que no se desintegran son denominados isótopos estables. Un isótopo ligero tiende a ser estable cuando el número de protones y el número de electrones es similar. El nitrógeno tiene dos isótopos estables:  $^{14}\text{N}$  y  $^{15}\text{N}$ . Los átomos pesados vibran más lento que los ligeros, por lo que la energía cinética de una molécula con isótopos pesados es menor. Además, las moléculas con isótopos pesados forman enlaces más fuertes y estables. Las diferencias de velocidad de enlace entre los isótopos y los isómeros que forman provocan fraccionamientos (diferencias isotópicas) entre los componentes de origen y los productos derivados de transformaciones químicas. El fraccionamiento cinético se asocia normalmente con procesos como la evaporación, la difusión, las reacciones de disociación y los efectos enzimáticos (Sulzman, 2007). Por ejemplo, los procesos biológicos asimilan preferencialmente isótopos ligeros y tanto las distintas vías metabólicas como las enzimas que intervienen en ellas producen moléculas con diferentes proporciones isotópicas.

La determinación de las proporciones isotópicas se realiza mediante la técnica de espectrometría de masas de isótopos estables. Las sustancias son ionizadas y los iones positivos son acelerados por una diferencia de potencial hacia un campo magnético perpendicular al campo eléctrico donde los isótopos ligeros y pesados se separan y se reciben en un colector (Mook, 2002). Esto genera corrientes eléctricas o pulsos que se

pueden medir con precisión. Los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  se calculan en relación a la cantidad contenida en el nitrógeno atmosférico en partes por mil (‰) mediante la expresión:

$$\delta^{15}\text{N} = [(\mathbf{R}_{\text{muestra}} - \mathbf{R}_{\text{referencia}}) - 1] \times 10^3$$

Donde R es la relación  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ , y la referencia estándar es el nitrógeno atmosférico (Heaton, 1986; Peterson y Fry, 1987; Sulzman, 2007; Risk *et al.*, 2009). Valores positivos de  $\delta^{15}\text{N}$  indican que la muestra contiene una mayor cantidad de isótopos pesados en relación al estándar, valores negativos indican una predominancia de isótopos ligeros, y valores de cero indican igual proporción isotópica entre la muestra y la referencia.

Muscatine *et al.* (2005) muestran que existe una mayor asimilación promedio de  $^{15}\text{N}$  en corales no simbióticos ( $+12.25 \pm 1.81\%$ ) que en corales simbióticos ( $+4.09 \pm 1.51\%$ ) debido a que los corales no simbióticos mantienen una alimentación por heterotrofia, mientras que en los corales simbióticos, a pesar de también alimentarse por vías heterótrofas, predomina un régimen de autótrofo. Lo anterior se ve reflejado en los corales que viven en zonas someras donde predomina la actividad fotosintética, a diferencia de los corales de mayores profundidades donde la actividad heterótrofa es más intensa (Muscatine y Kaplan, 1994; Uchida *et al.*, 2008).

Los nutrimentos de aguas residuales provenientes de fosas sépticas y plantas de tratamiento son fuentes enriquecidas con  $^{15}\text{N}$  debido a las transformaciones que ocurren típicamente en el ciclo del nitrógeno como la volatilización de amoníaco, la desnitrificación de nitratos y la nitrificación de amonio, proveyendo NID (Heikoop *et al.*, 2000; Risk *et al.*, 2009, Sherwood *et al.*, 2010). El nitrógeno recién fijado contiene un  $\delta^{15}\text{N}$  de -3 a 0‰ mientras que el NID proveniente de aguas residuales contiene valores entre +6 y + 22‰ (Heaton 1986; Sherwood *et al.* 2010; Cooper *et al.*, 2009; Baker *et al.*, 2010; González de Zayas *et al.* 2011). El  $\delta^{15}\text{N}$  en corales puede depender de: 1) el flujo de NID, de origen terrestre, oceánico o atmosférico, 2) la fijación de nitrógeno debido al agotamiento de los nutrimentos en el sistema, y 3) los cambios proporcionales de nutrición autótrofa y heterótrofa en el metabolismo coralino (Yamasaki *et al.*, 2011). Diversos estudios (Heikoop *et al.*, 2000; Marion *et al.*, 2005; Baker *et al.*, 2010; Sherwood *et al.*, 2010; Yamasaki *et al.*, 2011; Baker *et al.*, 2013) muestran la influencia de distintas fuentes de nitrógeno tales como descargas de fertilizantes, aporte de agua residual y surgencias que pueden aumentar

o disminuir los niveles de  $\delta^{15}\text{N}$ . En la Tabla 1 se muestran valores utilizados por distintos autores para determinar la influencia de distintas fuentes de nitrógeno en diversos organismos arrecifales.

**Tabla 1.** Valores de  $\delta^{15}\text{N}$  como indicadores de distintas fuentes de N en organismos de arrecifes coralinos. El  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  corresponde a la diferencia con la referencia utilizada en cada caso.

Fuente	Organismo	Promedio $\delta^{15}\text{N}$ ‰	Tendencia	$\Delta\delta^{15}\text{N}$ ‰	$\delta^{15}\text{N}$ ‰		Región	Referencia
					Mín.	Máx.		
	Coral hermatípico	-	↑	2 ±1.2	+4.2	+9.3	Indopacífico	Heikoop <i>et al.</i> (2000)
	Coral hermatípico	+8.4 ±2.2	↑	2.3 ±0.4	+4.2	+14.0	Sanur, Bali, Indonesia	Marion <i>et al.</i> (2005)
	Gorgonia	-	↑	0.8	+2.7	+4.7	Florida Reef Tract, Florida, E.U.	Ward-Paige <i>et al.</i> (2005)
Agua residual	Pasto marino	+9.1	↑	7.4	-	-	Cancún, Quintana Roo, México	Carrouters <i>et al.</i> (2005)
	Gorgonia	+7.5 ±0.3	↑	5.5	+2	+10	Florida, E.U.A.	Sherwood <i>et al.</i> (2010)*
	Gorgonia	+3.3	↑	1.2	+2.2	+4.3	Akumal, Quintana Roo, México	Baker <i>et al.</i> (2013)
	Coral hermatípico	+4.2 ±0.6	↑	0.6	+2.8	+5.8	Puerto Morelos, Quintana Roo, México	Este estudio
Lluvia	Pasto marino	+0.55	-	-	-1.83	+3.02	Cayo Coco, Cuba	De Zayas <i>et al.</i> (2010)
	Macroalgas	+2.67	-	-	+1.02	+4.17		
Fertilizantes	Coral hermatípico	+7.3	↓	6	+15.1	+3.5	Lovina, Bali, Indonesia	Marion <i>et al.</i> (2005)
Fertilizantes	Gorgonia	+3.8	↓	~1.8	+1.3	+7.0	Antillas, Atlántico norte y Yucatán, Mar Caribe	Baker <i>et al.</i> (2010)
Surgencia	Coral hermatípico	3.7	↑	~5	+0.8	+8.3	Okinotori, Japón	Yamasaki <i>et al.</i> (2011)

Sin embargo, Swart *et al.* (2005) realizaron mediciones de  $\delta^{15}\text{N}$  en tejidos de *O. faveolata* a lo largo del arrecife de Florida incluyendo sitios cercanos y lejanos a la costa en las que no se encontró diferencia significativa que indicara influencia por actividad antropogénica, por lo que cuestionan la utilización de los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  como indicadores de agua residual y proponen una revisión sobre los sitios en los que es adecuado utilizar el  $\delta^{15}\text{N}$  como indicador de contaminación. Uchida *et al.* (2008) mencionan que la variación de  $^{15}\text{N}$  en corales hermatípicos que viven alejados de zonas de impacto antropogénico se puede

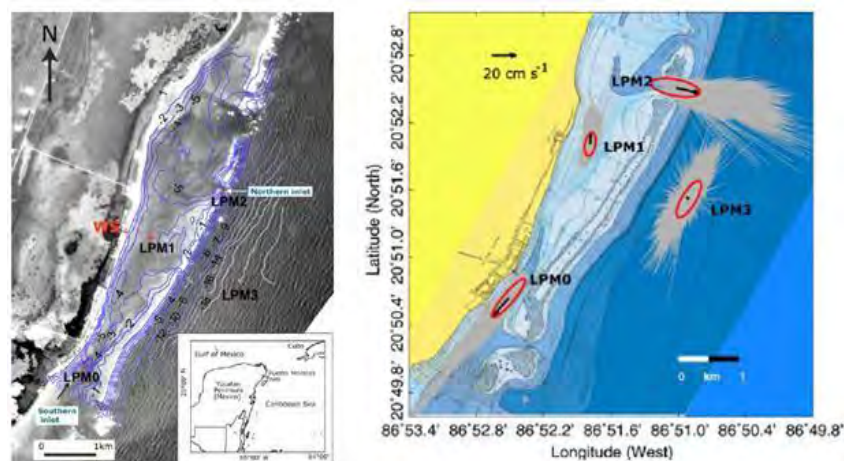
deber a cambios estacionales en la proporción de dos componentes utilizados por los dinoflagelados simbiotes: por un lado del  $^{15}\text{N}$ -empobrecido derivado de la fijación de  $\text{N}_2$  y por el otro, del  $^{15}\text{N}$ -enriquecido característico de océanos oligotróficos.

## 2. Puerto Morelos y el desarrollo turístico

### 2.1 Características ambientales y dinámica hídrica

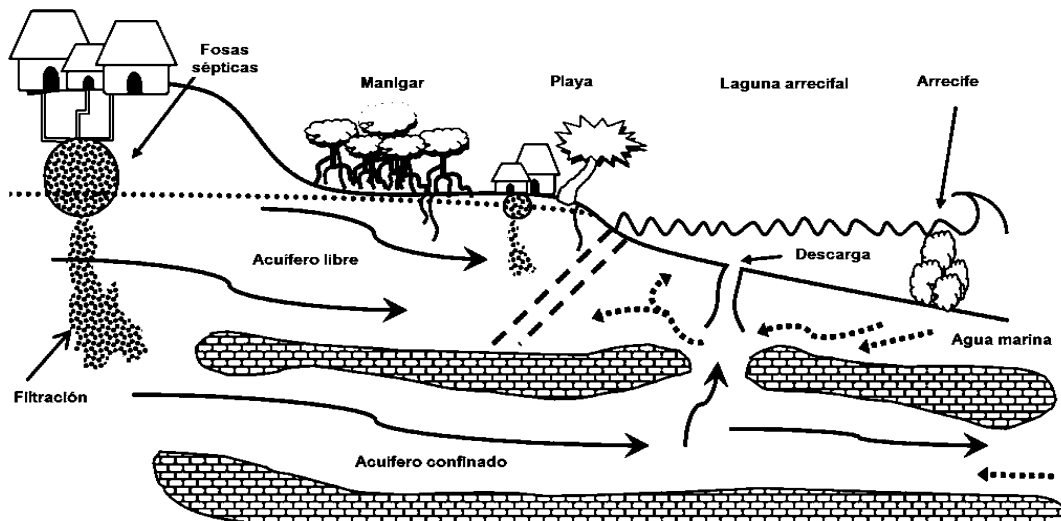
Puerto Morelos se localiza en la costa nororiental de la península de Yucatán, pertenece al municipio de Benito Juárez del estado de Quintana Roo, a los  $20^\circ 51' \text{N}$  y los  $86^\circ 52' \text{O}$ . A lo largo de la costa se extiende un arrecife que forma una laguna arrecifal. La zona se caracteriza por presentar arena calcárea la cual es sedimentada por la dominancia de pastos marinos (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010).

La laguna arrecifal cuenta con una profundidad promedio 3-4 m y una máxima de 8 m y mantiene dos conexiones hacia mar abierto: La Bocana al norte, que cuenta con una longitud de 300m ancho y una profundidad de 6 m, y el Canal de navegación en el sur, con 400 m ancho y 8 m de profundidad. Por su morfología, la principal entrada de agua se da por encima de la cresta arrecifal provocando la salida de masas de agua más profundas a través de estas dos conexiones, en presencia de viento la corriente sigue la misma dirección en las capas superficiales, pero conforme aumenta la profundidad la corriente muestra un patrón distinto tal y como se muestra en la Figura 1 (Coronado *et al.*, 2007).



**Figura 1.** A. Localización geográfica y batimetría de la Laguna Arrecifal. En los sitios LPM0 y LPM2 se realizaron mediciones de corriente en las conexiones de la laguna con el mar abierto. B. Vectores de flujo de corriente dentro y fuera de la laguna arrecifal (Coronado *et al.*, 2007).

Paralela a la costa predomina una amplia zona de manglares (37.54 km<sup>2</sup>) que se encuentra a un nivel de 3-5 msnm y que se extiende hasta 3 km en dirección perpendicular a la costa. Está delimitada por una elevación del terreno de 6-10 msnm donde se encuentra la carretera federal Benito Juárez – Chetumal. El suelo en esta zona se compone de Rendzina (60.64 %), Solonchack (26.95 %) y Litosol (12.41 %) (Vázquez-Lule y Adame, 2009). En la zona más alta y justo del otro lado de la carretera predomina una zona de selva mediana subperennifolia. El subsuelo forma parte de un sistema cárstico por lo que no existe un sistema superficial de agua dulce sino flujos subterráneos y sistemas de cenotes debido a la infiltración de agua pluvial a través de la roca caliza. Los asentamientos humanos que existen en la zona se encuentran entre el manglar y la playa y en la zona de selva (Figura 2).



**Figura 2.** Diagrama esquemático del acuífero y la zona costera de Puerto Morelos e interpretación de la interacción con las actividades humanas (Hernández-Terronez *et al.*, 2010).

El régimen de precipitación en la región se compone de una estación seca que se presenta de marzo a mayo, una estación de lluvias de junio a octubre, y una estación de nortes de noviembre a febrero. Cabe mencionar que Puerto Morelos y en general la Riviera Maya están en una zona expuesta a impactos por huracanes que se presentan durante la temporada de lluvias por lo que el arrecife actúa como una barrera natural que protege a la zona costera del impacto por oleaje intenso.



## 2.2 Desarrollo turístico y asentamientos urbanos en Puerto Morelos

El uso humano de la tierra altera la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas así como la forma en la que interactúan con la atmósfera, con los sistemas acuáticos, y con la tierra circundante. Las costas que contienen arrecifes de coral generan un gran interés económico ya que sus playas son muy atractivas para el desarrollo de complejos turísticos. En Puerto Morelos y toda la Riviera Maya los arrecifes de coral son uno de los principales atractivos ya que el paisaje que brindan es preferido por un gran número de turistas tanto nacionales como internacionales propiciando una importante derrama económica. El crecimiento de sus comunidades y el capital económico del estado de Quintana Roo se han desarrollado principalmente a un fuerte impulso de la industria turística que se inició desde 1970 (Daltabuit *et al.*, 2006).

El fundo legal de Puerto Morelos se realizó en el año de 1973, asignando un área de 3 337 Ha de selva y humedales y con un total de 50 habitantes. Sin embargo, no fue sino hasta 1974 cuando el territorio de Quintana Roo se constituyó como Estado y se comenzó a planificar la apertura de sitios destinados al turismo.

Durante la década de los años setenta la economía nacional se encontraba en transición, pasando de un modelo de sustitución de importaciones a un modelo neoliberal que privilegiara el desarrollo industrial y el turismo. A mediados de los años setenta se crea el Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR) cuya principal tarea fue incentivar la inversión privada y planificar el crecimiento turístico en la región, integrando años después el concepto de sustentabilidad como eje rector en sus planes de desarrollo. De esta manera se planificó, en teoría, un desarrollo económico y social de carácter regional, cuyo principal objetivo era aprovechar turísticamente y de manera sustentable un territorio prácticamente virgen con cualidades ambientales y de paisajes singulares, además cuenta con zonas arqueológicas de gran interés (Rubio *et al.*, 2010).

Con la apertura de Cancún como un sitio para el turismo y la promoción de este sector Puerto Morelos inició una fase de crecimiento poblacional y económico caracterizado por la inmigración de población proveniente de distintas partes del mundo y de otros estados. El desarrollo de esta localidad estuvo guiado por el Estado a través de FONATUR, que impulsó la participación de la población local, empresarios, investigadores, estudiantes,

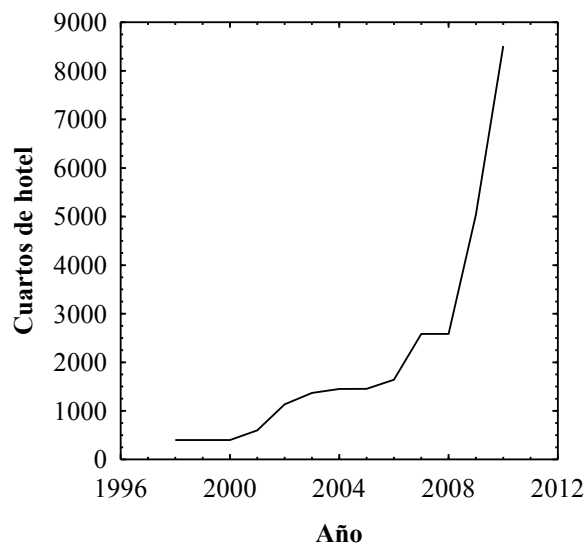
pescadores, instituciones públicas y migrantes en la toma de decisiones sobre el aprovechamiento de los recursos naturales. A partir de una serie de confrontaciones que buscaron imponer ciertas formas de aprovechamiento del espacio se generaron las condiciones para la apropiación privada de los recursos naturales con potencial para la acumulación de capital a través del turismo (Cruz-Coria *et al.*, 2013).

Durante los años ochenta, la principal actividad económica en la zona fue la pesca secundada por un desarrollo turístico incipiente. A finales de la década de 1980, esta población fue seriamente impactada por el huracán Gilberto (categoría V) lo que propició que parte de esta población se desplazara hacia las zonas selváticas localizadas a dos kilómetros de la costa.

El 2 de febrero de 1998 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el decreto en el que se declara la región denominada Arrecife de Puerto Morelos como área natural protegida con el carácter de Parque Nacional con una superficie total de 9,066 Ha.

Para el año 2000 la comunidad de Puerto Morelos contaba ya con 3 438 habitantes, esto provocó que se colonizaran más terrenos en la zona de selva (Daltabuit *et al.*, 2006) por lo que en los siguientes diez años se construyeron nuevas zonas habitacionales al norte y poniente de la colonia Zetina Gasca como los fraccionamientos de Villas Morelos I, Villas Morelos II, Residencial Bucaneros y La zona urbana, ya que las estimaciones de crecimiento poblacional para 2007 proponían un total de más de 10 000 habitantes. Actualmente se encuentran desarrollados y en fase de expansión los fraccionamientos Villas la playa, Villas del Carmen y Residencial Regatta. Asimismo, se espera la apertura de un centro comercial en la zona de la colonia Zetina Gasca.

La franja costera ha sido objeto de una acelerada transformación inducida por numerosos proyectos turísticos que ahí se desarrollan, y que en su mayoría, son considerados como complejos turísticos de alto impacto. Por ejemplo, el incremento en los cuartos de hotel pasó de 1640 en 2006 a 5072 en 2012 (Figura 3). Por otro lado, los índices de inmigración-colonización en el área, son considerablemente superiores a los registrados en el resto del país (INE, 2000).



**Figura 3.** Incremento en cuartos de Hotel en Puerto Morelos. Fuente: SEDETUR (2013).

Para México las tres primeras entradas de divisas al PIB son, en orden de importancia, la venta de hidrocarburos, las remesas enviadas por los trabajadores migrantes y los ingresos por la industria turística. Según el acuerdo publicado por la Secretaría de Turismo en el Diario Oficial de la Federación en enero de 2011 se ponen de manifiesto las intenciones de la política económica que se pretende impulsar en el siguiente párrafo: “[...] el turismo en México es una de las principales actividades económicas que reporta ingresos importantes, y en los siguientes años habrá de consolidarse como la fuente principal de ingresos que el país requiere mediante el acceso a servicios turísticos de calidad y al alcance de todos los sectores de la economía” (DOF, 26/01/2011). De la misma manera, se puede apreciar en el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 y en sus respectivos Informes de Ejecución, que se contempla un impulso importante a la industria turística pero no se menciona en ningún apartado sobre la protección y sustentabilidad de los recursos naturales frente a este modelo de desarrollo (Daltabuit *et al.*, 2006).

Lo anterior debiera reflejarse en un incremento en la calidad de vida de las comunidades que se ven beneficiadas por esta industria; sin embargo, como dato curioso, el estado de Quintana Roo, líder mundial en turismo de altura, presenta uno de los índices más altos en suicidios (Amador, 2008) y mantiene serias carencias en cuanto a servicios públicos (drenaje, plantas de tratamiento de agua, centros de salud, escuelas, etc.). Durante las últimas tres décadas de desarrollo se ha evidenciado que el crecimiento de este sector ha

tenido serias implicaciones en detrimento de la calidad ambiental así como de la calidad de vida de sus habitantes, y ha implicado procesos de desplazamientos humanos y aculturamiento (Daltabuit *et al.*, 2006).

### *2.3 Indicadores de impacto antropogénico en los arrecifes de la Riviera maya.*

En un estudio elaborado por Carriquiry (2010), que incluye mediciones de  $\delta^{15}\text{N}$  en macroalgas, se determinó estado de alerta en algunas zonas del PNAPM de acuerdo al Índice de Desarrollo Arrecifal propuesto por el mismo autor. Esta alerta se encuentra relacionada con probables cambios en el estado trófico del sistema resultando en una dominancia de macro algas indicadoras de contaminación antropogénica en sistemas oligotróficos. En el mismo estudio se mencionan otras zonas que no muestran tal impacto; sin embargo las mediciones isotópicas realizadas en las macroalgas corresponden al estado trófico del momento de muestreo y no de una medición a largo plazo, por lo que resulta necesario contar con un registro histórico que brinde información sobre los niveles de nutrimentos que son vertidos hacia la laguna arrecifal.

Recientemente se ha publicado un estudio en la bahía de Akumal que relaciona los índices de ocupación turística con los niveles de  $\delta^{15}\text{N}$  en gorgónidos encontrando correlaciones positivas entre el número de turistas y las variaciones de  $\delta^{15}\text{N}$  comparados con las variaciones en octocorales de la misma especie en zonas protegidas del turismo en Banco Chinchorro (Baker *et al.*, 2013).

## **MÉTODO**

### *Estimación del tamaño de muestra*

Para la obtener resultados confiables en el análisis de espectrometría es necesario que la muestra contenga al menos  $30\mu\text{g}$  de N, por lo que fue necesario contar con una primera aproximación en la cuantificación de proteínas de la MO. Por lo anterior, se realizaron dos experimentos con muestras de *O. faveolata*. En una primera fase se realizó la extracción y cuantificación por espectrofotometría de las proteínas contenidas en la matriz orgánica de tres muestras con distinto peso: 3.4, 5.6 y 9.1 g (Tabla 2).

**Tabla 2.** Cuantificación de proteínas y porcentaje de MO para muestras de *O. faveolata*

Muestra	Polvo (g)	Proteínas (mg/ml)	Proteína total por muestra (mg)	MO (%)
A	9.12	0.040	1.21	0.013
B	5.68	0.016	0.32	0.006
C	3.4	0.022	0.44	0.013

Con la finalidad de poder estimar la cantidad necesaria de material esquelético a descalcificar se realizó una segunda fase de cuantificación de proteínas con seis muestras. Se procesaron dos muestras de 10, 5 y 2.5 g de esqueleto pulverizado. En las seis muestras se obtuvo un promedio de 0.005 %  $\pm$  0.002 % de MO con respecto al total del peso de la muestra. Para obtener una aproximación al contenido de nitrógeno por muestra se plantearon dos escenarios en los que pudieran contener (entre un 16 y 2% de N) y así poder estimar el tamaño adecuado de la muestra (Tabla 3).

**Tabla 3.** Cuantificación de proteínas, porcentaje de MO, contenido de N y cantidad necesaria de esqueleto a descalcificar en dos escenarios 16 y 2 % de contenido de N en muestras de *O. faveolata*.

Muestra	Polvo (g)	Proteínas (mg•ml <sup>-1</sup> )	Proteína total (mg)	MO (%)	N (µg)		CaCO <sub>3</sub> necesario para obtener 30 µg de N (g)	
					16%	2%	16%	2%
A	10	0.025	0.309	0.003	49.4	6.2	6.1	48.6
B	10	0.025	0.314	0.003	50.2	6.3	6.0	47.8
C	5	0.008	0.251	0.005	40.2	5.0	3.7	29.9
D	5	0.010	0.120	0.002	19.2	2.4	7.8	62.4
E	2.5	0.014	0.179	0.007	28.6	3.6	2.6	21.0
F	2.5	0.016	0.195	0.008	31.2	3.9	2.4	19.2

Tomando en cuenta las tasas de calcificación propuestas por Carricart (2007) y para un escenario con un contenido mínimo de 2% de N en las proteínas de la matriz orgánica se estimó un tamaño de muestra de 38.5 g. Para poder determinar el tamaño de la muestra se descalcificaron y liofilizaron tres muestras de 36, 33 y 34 g de esqueleto y se analizaron en un analizador elemental C, H, N y S varioMICRO V2.0.11 (Tabla 4).

**Tabla 4.** Peso de las muestras, contenido de MO, proporción y contenido total de N.

Muestra	Peso (g)	Muestra liofilizada (mg)	Peso MO (%)	N (%)	N Total ( $\mu\text{g}$ )	N en relación al peso (%)
A	36	180	0.50	0.50	900	0.003
B	33	123	0.37	1.15	1415	0.004
C	34	397	1.24	0.26	1032	0.004

En promedio se obtuvo un total de **0.003% ( $\pm 0.001\%$ )** de N por muestra. Tomando en cuenta el diámetro del núcleo (3 cm), una tasa anual de extensión de 0.8 cm y una densidad esquelética de  $1.74 \text{ g cm}^{-3}$  para *O. annularis* (Carricart-Ganivet *et al.*, 2000) se estimó un peso de **3.0 g** de esqueleto pulverizado por muestra que equivaldrían a un valor aproximado de **97  $\mu\text{g}$**  de N.

#### *Extracción de núcleos y fechado por esclerocronología*

Se extrajeron tres núcleos de esqueleto coralino con un taladro neumático y una broca de 40 cm de largo y 3 cm de diámetro en diferentes colonias de *O. faveolata* a una profundidad de 5 m. Los núcleos se analizaron de acuerdo a la metodología propuesta por Carricart-Ganivet y Barnes (2007) obteniendo una placa de RX para determinar las bandas de alta y baja densidad, así como la extensión esquelética por año. El positivo de las placas de RX se analizó con ayuda del software ImageJ.

#### *Extracción de matriz orgánica*

Una vez establecidos los segmentos anuales en los núcleos, se pulverizaron 3.0 g de esqueleto por año con ayuda de un taladro. Se extrajo la MO de acuerdo a la metodología propuesta por Muscatine *et al.* (2005) que implica la adición por goteo de HCl hasta que el polvo se disuelva y cese el burbujeo. La solución resultante, ligeramente turbia, fue neutralizada con NaOH 0.1 M y dializada durante 24 horas a con a agua destilada. Del material dializado se tomó una alícuota de 0.3 mL por cada muestra y se diluyeron en 0.7 mL de solución de NaCl para cuantificar proteínas por el método de diferencia de absorbancias propuesto por Whitaker y Granum (1980) utilizando un espectrofotómetro

Ocean Optics USB4000 200 - 850 nm. Los restantes de cada muestra fueron congelados a  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  y liofilizadas en un liofilizador Labconco Freeze Dry System / Freezone 4.5.

#### *Análisis isotópico*

Los análisis sobre la química del esqueleto calcáreo requieren la colecta de pequeñas muestras de coral y su análisis por espectrometría de masas. Para obtener los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  las muestras obtenidas se enviaron al Stable Isotope Biogeochemistry Laboratory de la Universidad de Ohio, para su análisis por espectrometría de masas utilizando un analizador elemental Costech acoplado a un espectrómetro de masas SIRMS Finningan Delta IV Plus de flujo continuo.

#### *Registro histórico de precipitación*

Para reconstruir un registro de los niveles de precipitación acumulada se utilizaron las bases de datos de la Secretaría de Marina para el período comprendido entre 1970-1993 y la base de datos de la estación meteorológica de Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos de la UNAM que abarca los datos de precipitación de 1993-2010. Se consultó también el registro histórico de huracanes que han impactado en la región desde 1970 a la fecha proporcionado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012).

#### *Turismo, crecimiento poblacional y servicios*

Se realizaron consultas a dependencias de gobierno (INEGI, CONAGUA, SEMARNAT y Secretaría de Turismo del Estado de Quintana Roo) para obtener estadísticas históricas de censos poblacionales, ocupación hotelera, suministro de agua potable y plantas de tratamiento de agua residual. Para estimar el crecimiento poblacional por año se realizó una interpolación lineal con los datos obtenidos en cada censo poblacional.

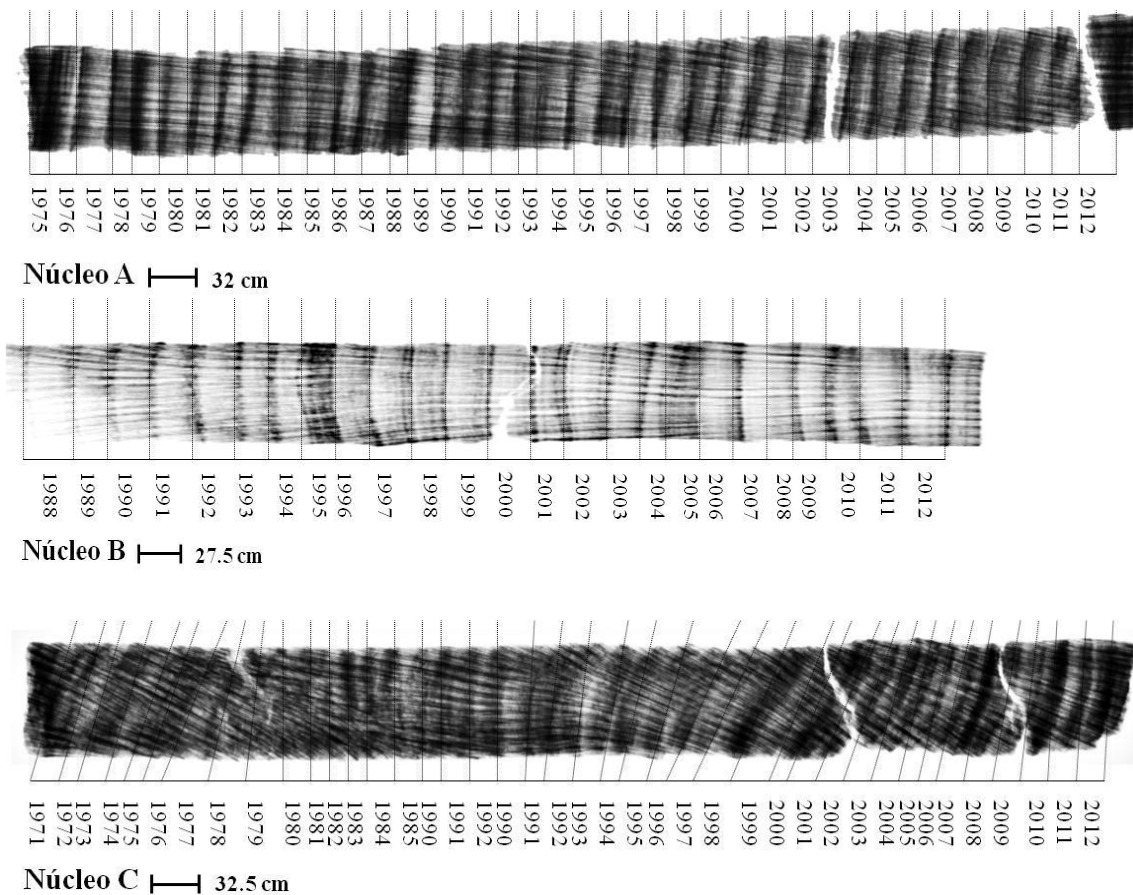
#### *Manejo estadístico*

Se realizaron correlaciones de Pearson con el programa estadístico R x64 3.0.2 entre los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  y los de precipitación así como con la estimación de habitantes por año. La tendencia del  $\delta^{15}\text{N}$  en el tiempo se determinó mediante regresión lineal.

## RESULTADOS

### Colecta y fechado

Se seleccionaron tres colonias de *O. faveolata* en la zona de “La Bocana” a una profundidad de 5 m y por cada colonia se extrajo un núcleo de 30 cm de largo por 3 cm de diámetro. Los núcleos fueron secados a 60°C por 24 h y posteriormente fueron radiografiados a 73 kV y 20 mA con 1 s de exposición. Las imágenes digitalizadas se analizaron con el software Image-J para determinar las bandas anuales de alta densidad y obtener la extensión esquelética por año. Los núcleos analizados fueron fechados y denominados A (1975-2012), B (1988-2012) y C (1971-2012) (Figura 4).



**Figura 4.** Positivo de las placas de RX, y fechado anual por bandas de alta densidad.



### Matriz orgánica

Del total de muestras de esqueleto pulverizado determinó un promedio de 0.99 mg de proteína contenida en la MO, lo que equivale a un promedio de 0.33 mg proteína  $\cdot$  g<sup>-1</sup> <sup>1</sup>CaCO<sub>3</sub> ( $\pm$ 0.1 DE, n=100). Lo anterior permitió estimar un porcentaje de 0.03% ( $\pm$  0.01 DE) de MO con respecto al peso total de la muestra (Tabla 4).

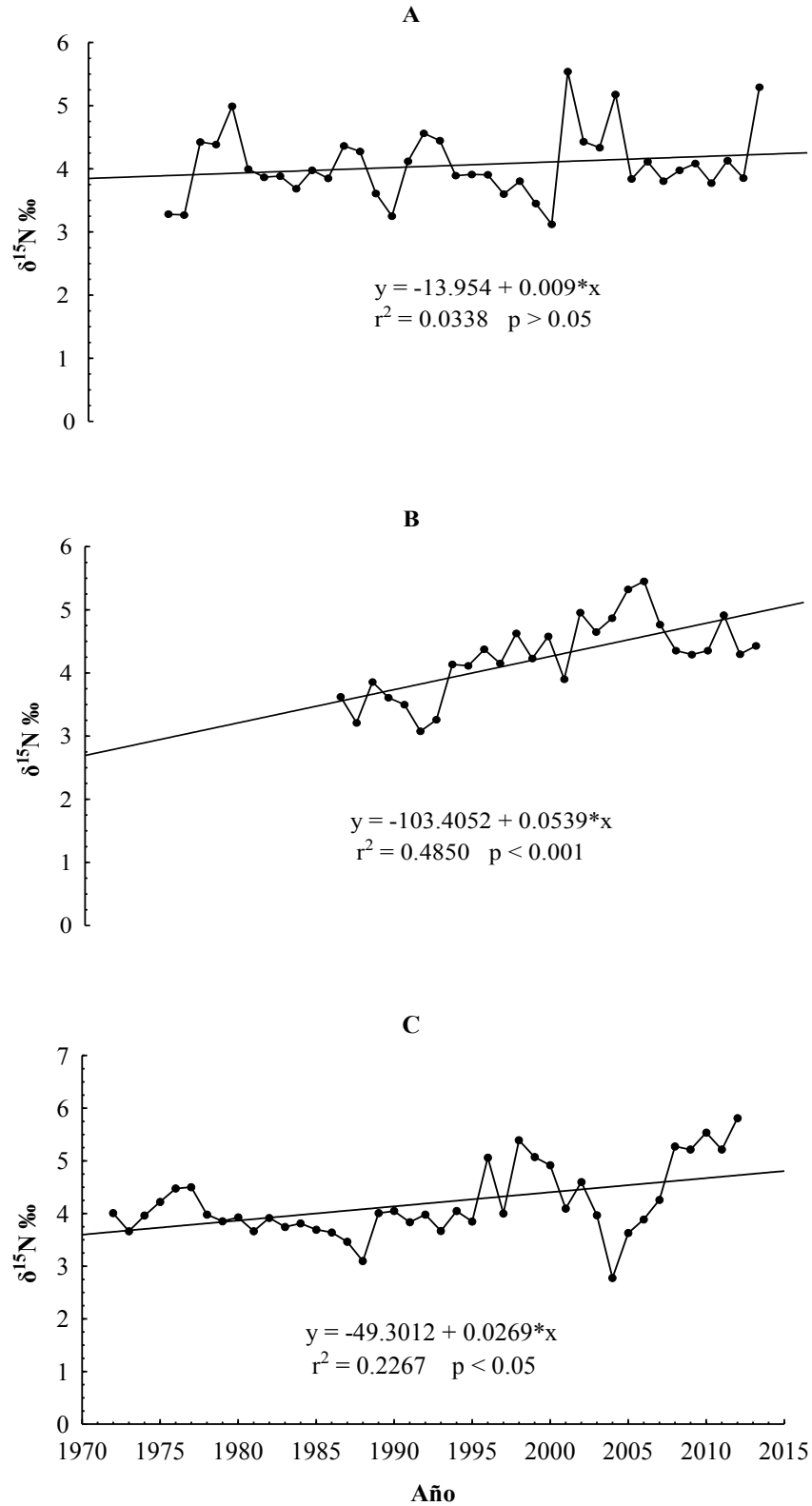
**Tabla 4.** Estimación promedio de proteína, porcentaje de MO y cantidad de proteína por gramo de esqueleto.

Núcleo	Proteína total (mg)	% MO	mg proteína $\cdot$ g <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>
A	0.87	0.03	0.29
B	0.94	0.03	0.31
C	1.14	0.04	0.38
<b>Promedio</b>	0.99	0.03	0.33
<b><math>\pm</math> DE</b>	0.30	0.01	0.10

### Valores de $\delta^{15}\text{N}$ en la matriz orgánica

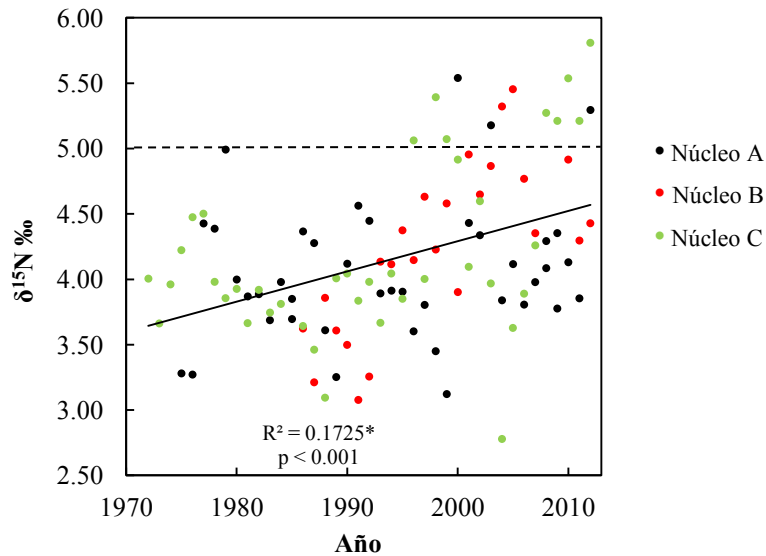
Se determinó un contenido de nitrógeno promedio de 0.83% en las muestras del núcleo A, 1.25% en el núcleo B y 1.01% en el núcleo C. Los valores promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  en la MO de cada núcleo fueron de 4.6‰, 4.26‰ y 4.19‰ respectivamente (Anexo I). La Figura 5 presenta los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  por núcleo para cada año. Los núcleos B y C presentan tendencias de incrementos en el  $\delta^{15}\text{N}$  estadísticamente significativos ( $p < 0.05$ ), mientras que en el núcleo A la tendencia al incremento no fue significativa ( $p > 0.05$ ). Sin embargo, todos los núcleos presentaron sus valores más altos en los últimos años muestreados. Los valores máximos en el  $\delta^{15}\text{N}$  se presentaron en el año 2000 (+5.54‰) para el núcleo A, en el año 2005 (+5.45‰) para el núcleo B, y el valor más alto se presentó en el año 2012 (+5.81‰) en el núcleo C. El valor mínimo de  $\delta^{15}\text{N}$  en la MO fue +2.78‰ y el máximo de +5.81‰, ambos en el núcleo C. No se encontró correlación entre los valores de precipitación acumulada anual con los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  ( $t = -0.6734$ ,  $gl = 98$ ,  $p = 0.5023$ ).

VALORES DE  $\delta^{15}\text{N}$  EN LA MATRIZ ORGÁNICA DE *Orbicella faveolata* COMO INDICADORES DEL IMPACTO DEL DESARROLLO TURÍSTICO EN EL PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS



**Figura 5.** Valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en núcleos de *O. faveolata*. Las letras A, B y C corresponden al rótulo de cada núcleo extraído.

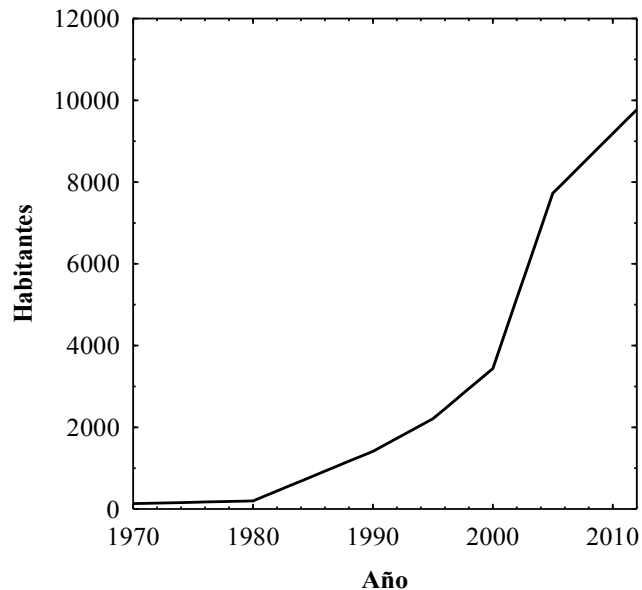
Las muestras analizadas mostraron un incremento estadísticamente significativo ( $p < 0.01$ ) en los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  entre los años 1972 y 2012 (Figura 6).



**Figura 6.** Evolución temporal de  $\delta^{15}\text{N}$  en la MO de *Orbicella faveolata*. La línea punteada indica los valores superiores a 5‰.

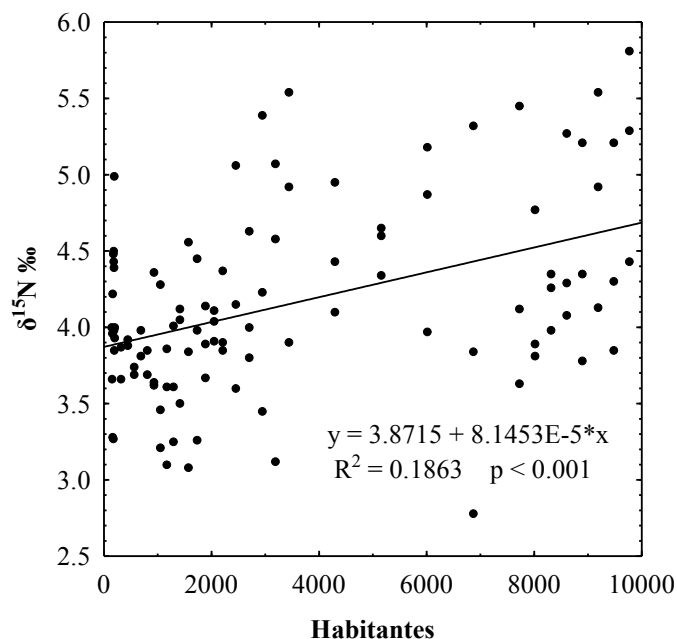
#### Indicadores sociodemográficos

Se realizó una interpolación con los datos de censos y conteos poblacionales para obtener un estimado del número de habitantes por año en Puerto Morelos (Figura 7).



**Figura 7.** Estimación del número de habitantes en Puerto Morelos. Fuentes: Secretaría de Industria y comercio (1973) e INEGI (1986, 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010). No incluye estimaciones de cantidad de turistas.

De acuerdo a la correlación de Pearson entre el número de habitantes y los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  (Figura 8) se determinó una correlación positiva ( $R^2= 0.1863$   $t = 4.88$ ,  $gl = 104$ ,  $p < 0.001$ )

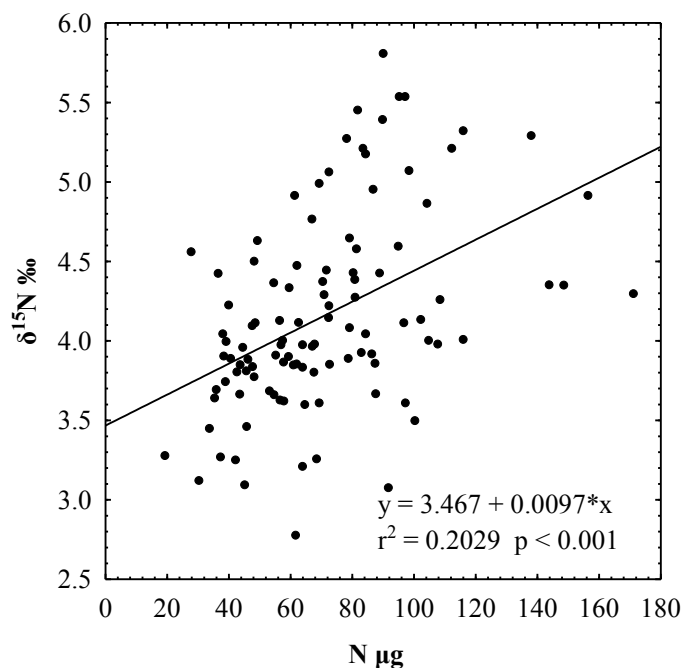


**Figura 8.** Correlación entre el número de habitantes y los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  encontrados en núcleos de *O. faveolata* en el sitio de La Bocana.

## DISCUSIÓN

### *Matriz orgánica*

Se obtuvo un promedio de 0.03% ( $\pm 0.01$  DE) de MO con respecto al peso de cada muestra. Este resultado concuerda con lo reportado por Constanz y Weiner (1988) quienes refieren valores  $< 0.1\%$  con respecto al peso de la muestra. El porcentaje promedio de nitrógeno por gramo de  $\text{CaCO}_3$  contenido en la MO estimado en este estudio fue de 0.002% ( $\pm 0.001$  DE,  $n=106$ ). Esta estimación es relevante para estudios relacionados con el metabolismo de la especie en lo que a construcción de bioherma se refiere, ya que para calcificar un gramo de  $\text{CaCO}_3$  *O. faveolata* sólo se requiere en promedio 70  $\mu\text{g}$  de N ( $\pm 30$  DE). La cantidad de N alojado en la MO se encontró positivamente correlacionado los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  (Figura 9) lo que indica no sólo que cada vez haya más  $^{15}\text{N}$  característico de la influencia de agua residual sino que existe un ligero incremento en la producción de MO relacionado con la presencia de isótopos pesados.



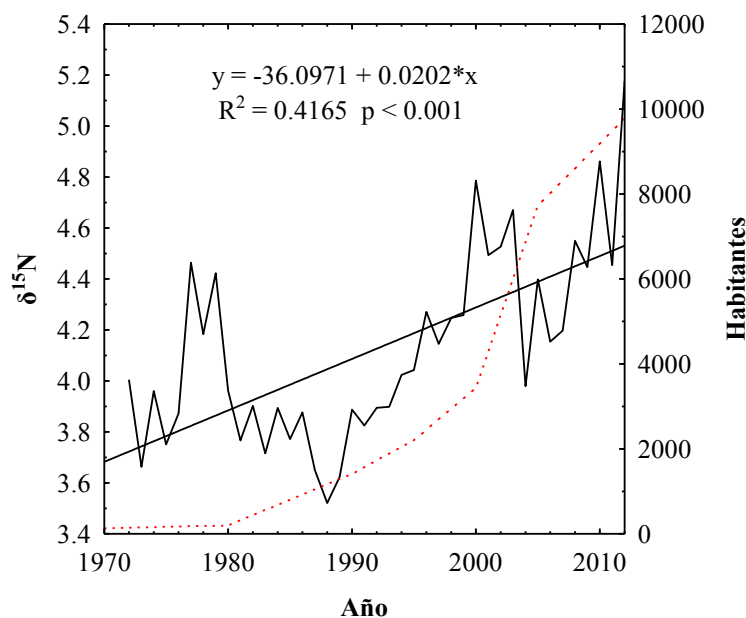
**Figura 9.** Aumento del  $\delta^{15}\text{N}$  en relación con el contenido de N en la MO de *O. faveolata*.

$\delta^{15}\text{N}$

Las diferencias obtenidas entre cada núcleo se atribuyeron a la fisiología particular de cada colonia ya que las tres fueron seleccionadas en el mismo sitio. Por lo anterior, resulta importante considerar esta variabilidad para la interpretación de registros isotópicos en investigaciones posteriores. A pesar de esta diferencia es posible observar una clara tendencia hacia un incremento en la incorporación de isótopos pesados en la MO, sobre todo en los últimos 20 años (Figura 6).

El valor promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  en la MO de *O. faveolata* estimado (+4.16 ‰) se encuentra dentro de las estimaciones reportadas por Muscatine *et al.* (2005) para valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en la MO de diecisiete especies de corales hermatípicos ( $4.09 \pm 1.51$ ). Entre 1972 y 1992 el promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  estimado fue de 3.9‰ ( $\pm 0.4$  DE) contrastando con un promedio de 4.4‰ ( $\pm 0.6$  DE) correspondiente a los años entre 1992 y 2010. Los valores más altos obtenidos en los tres núcleos ( $>5\%$ ) se presentaron entre 1996 y 2012, que corresponden al 10% del total de datos (Figura 6). Cabe señalar que de 1990 a 2010 la cantidad de habitantes en Puerto Morelos aumentó de 1412 a 9188 habitantes, más del 600%. Lo

anterior se ve reflejado en un aumento estadísticamente significativo en el  $\delta^{15}\text{N}$  durante esos años (Figura 10).



**Figura 10.** Correlación entre el promedio anual de los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  y los datos de crecimiento poblacional en Puerto Morelos de 1970 a 2010. La línea punteada corresponde al número de habitantes.

Se registró un aumento promedio de en los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  de 1972 a 2012 de 0.6‰ ( $R^2=0.1725$ ,  $p<0.001$ ,  $n= 106$ ). A pesar de que el  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  de 0.6‰ determinado en este estudio no es tan alto en comparación con lo reportado por otros autores (Tabla 1) sigue siendo un incremento estadísticamente significativo ( $p<0.05$ ) como para alertar la necesidad de implementar medidas que den una nueva orientación a las estrategias de desarrollo. Risk (2002) sugiere que un  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  de 1‰ es suficiente evidencia de procesos de eutrofización para requerir la intervención de políticas ambientales. Al respecto, Ladd y Collado-Vides (2013) recomiendan establecer estándares del nivel de nutrientes e incluir evaluaciones de los mismos en los protocolos anuales de seguimiento dentro del PNAPM.

#### *El impacto del desarrollo turístico en Puerto Morelos*

El Estado de Quintana Roo ocupa el 4° lugar a nivel nacional en cuanto a cuartos de hotel y el primero y segundo lugar en número de hoteles de cinco y cuatro estrellas respectivamente (INEGI, 2011). La explosión demográfica del Estado se explica por la aplicación de políticas orientadas al desarrollo de centros turísticos de alto impacto. Esto

implica que además del crecimiento poblacional derivado de la apertura de centros turísticos el ecosistema soporta la presión de una población flotante adicional a causa de la ocupación hotelera. En Puerto Morelos en 2012 se registró una ocupación promedio anual de 72.5 % que equivale a un aproximado de 5516 turistas (Tabla 5), un 40% más habitantes con respecto al total de la población residente. En este año se determinó un  $\delta^{15}\text{N}$  promedio de 5.2‰, el más alto desde 1972 (Figura 9).

**Tabla 5.** Estimación de la población flotante anual derivada de la ocupación hotelera en Puerto Morelos. Para este cálculo se estimó una ocupación de 1.5 ocupantes por habitación.

Año	No. Cuartos	Ocupación promedio	Población flotante
2008	2585	61.6	2389
2009	5036	53.8	4064
2010	5072	73.2	5569
2011	5072	74.3	5653
2012	5072	72.5	5516

De acuerdo al último Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, actualmente se tienen registradas dos plantas de tratamiento para la comunidad de Puerto Morelos. Estas funcionan a base de lodos activados con una capacidad de  $7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  cada una y mantienen un caudal tratado de  $2.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , estas plantas descargan directamente en el acuífero (CONAGUA, 2009).

En el PNAPM se tienen registrados al menos trece ojos de agua que se encuentran a unos 500 m mar adentro, estos van de 10 m de largo hasta pequeñas fracturas en depresiones circulares (filtraciones) de sólo unos pocos centímetros de diámetro (Crook *et al.*, 2011). Sin embargo, el flujo de las aguas subterráneas a través de estos es intermitente y predominantemente controlado por el nivel del mar. Durante las mareas muertas los ojos de agua permanecen abiertos casi por completo, mientras que durante las mareas vivas se cierran y abren de acuerdo al régimen de marea semidiurna. Una vez que el nivel del mar se eleva por encima del umbral y los ojos se cierran, el agua del centro de estos se equilibra rápidamente con el agua de la laguna (Iglesias-Prieto *et al.*, 2014). La ausencia de una correlación de valores obtenidos de  $\delta^{15}\text{N}$  con los niveles de precipitación permite inferir

que las filtraciones por percolación tanto del acuífero y el manglar representan un aporte relevante de  $^{15}\text{N}$  en la laguna arrecifal.

De acuerdo con cifras oficiales, Quintana Roo cuenta con una cobertura de drenaje y alcantarillado por habitante del 90.1 - 99.2 %, un suministro de agua de 200.1 – 300 L/hab/día y un caudal tratado de 100.1 a 150 L/hab/día (SEMARNAT, 2012). Sin embargo, estas cifras no resultan tan alentadoras si se analiza desde una perspectiva local. En Puerto Morelos en 2010 se contaba con una población de 9188 habitantes; se suministró un total de 2 297 000 L·día<sup>-1</sup> pero, de acuerdo a la capacidad de las plantas de tratamiento de agua residual, sólo se trataron 1 209 600 L·día<sup>-1</sup> equivalentes al 52.7% del caudal suministrado. Es decir, durante el año 2010 el acuífero recibió alrededor de 1 087 400 L·día<sup>-1</sup> de agua residual sin tratamiento alguno. Tanto en esta localidad como en la mayoría de la entidad, el tratamiento que se le da al agua residual es de tipo primario, con plantas a base de lodos activados que finalmente descargan en el acuífero.

En un estudio realizado por Hernández-Terrones *et al.* (2011) se estiman flujos de nitrógeno vertidos a la laguna de hasta 2.4 ton N km<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, derivados de la descarga de agua residual filtrada en el sistema cárstico o por descargas directas. Los altos niveles de nitrógeno encontrados, así como evidencias de bacterias coliformes, indican que el agua que sale al arrecife por las fracturas tiene un contenido mucho mayor de nutrimentos que el del agua marina y frecuentemente por encima de límite máximo de la Norma Oficial Mexicana 001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En estas mismas descargas, se ha detectado la presencia de coliformes fecales, lo cual indica un aporte directo de la mala disposición de las aguas residuales domésticas.

Lo anterior y las evidencias de los incrementos en los niveles de nitrógeno registrados por los corales, demuestran que las plantas de tratamiento, aunque cumplan los requerimientos de la Norma Oficial Mexicana, resultan insuficientes para la demanda de una comunidad con los índices de crecimiento que presenta Puerto Morelos. Tal y como lo afirma Rubio *et al.* (2010), cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas no significa que no se contamine o que no se generen impactos ambientales adversos significativos en el ambiente y sobre la capacidad de carga de los ecosistemas. Asimismo, el cumplimiento de éstas no garantiza el



equilibrio ecológico, ya que al ser generalistas no contemplan ni la capacidad de carga de ni la integridad funcional de los ecosistemas. Esto presenta problemas de escala, ya que están diseñadas con una visión de proyecto y no de región que contemple el cuerpo receptor.

Dada la alta vulnerabilidad del acuífero es importante la promoción de una norma diseñada específicamente para una región hidrológica, como lo es la Península de Yucatán, y en la cual que se alojan los recursos hídricos (CAPA, 2013).

Las áreas marinas protegidas como el PNAPM se han propuesto como uno de los principales instrumentos para la conservación de estos ecosistemas, sin embargo, su utilidad depende de un diseño adecuado que incluya a todos los componentes esenciales del ecosistema. Ello implica, en la mayoría de los casos, la necesidad de proteger también los hábitats adyacentes o los que se encuentran funcionalmente conectados (Michener y Kaufman, 2007).

El desarrollo turístico en Puerto Morelos y en la región de la costa quintanarroense está lejos de considerarse sustentable. Al ocuparse en evaluar los proyectos hoteleros, se perdió de vista el impacto ambiental indirecto ocasionado por la migración de personas derivada de la necesidad de servicios y personal de los propios hoteles. Es decir, no se evaluó que para cada cuarto de hotel es necesario un número considerable de personas que trabajan directa e indirectamente, dónde viven, dónde hacen y dónde disponen sus residuos. En otras palabras, el mayor impacto ambiental es generado por las personas que laboran directa o indirectamente en la actividad turística asentadas fuera de los hoteles (Rubio *et al.*, 2010).

De acuerdo con los planes de desarrollo turístico de la región se tiene estimado que para los próximos veinte años Puerto Morelos alcance un desarrollo de 70 000 habitantes y que se constituya como la primer alternativa de desconcentración del crecimiento de Cancún (Daltabuit *et al.*, 2006). Puerto Morelos está creciendo a ritmos acelerados que permiten dilucidar que un tiempo relativamente corto se convertirá en una ciudad con un peso importante en el estado por lo que resulta prioritario un cambio radical en el modelo de desarrollo que contemple las necesidades sociales y los impactos ambientales que la industria turística ha generado a partir de su establecimiento en la región.

## CONCLUSIONES

Se presentan evidencias de un aumento estadísticamente significativo en los registros de  $\delta^{15}\text{N}$  principalmente por valores obtenidos a partir de 1996. Este aumento coincide con un acelerado crecimiento en la cantidad de habitantes de Puerto Morelos.

Las proteínas contenidas en la matriz orgánica demostraron ser un buen registro de las entradas de nitrógeno en la laguna arrecifal. Los registros de isótopos estables de nitrógeno en *O. faveolata* permiten medir el impacto por crecimiento poblacional a escala temporal en la laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Los resultados obtenidos confirman la necesidad de considerarlos en la elaboración de planes de desarrollo que permitan diseñar programas de saneamiento de agua residual que reduzcan al mínimo la aportación de nitrógeno al sistema hídrico así como revisiones a la normatividad relativa a la descarga de las plantas de tratamiento de agua residual hacia el acuífero y la inyección de aguas sin tratamiento hacia la zona marítima. Lo anterior resulta prioritario para hacer frente a la influencia negativa de los impactos antropogénicos por descarga de aguas residuales en el ecosistema.

Se propone el uso de esta técnica en distintos sitios y en diversos organismos arrecifales a lo largo de la Riviera Maya para la elaboración de un diagnóstico regional y la realización de modelos de impacto antropogénico debido al desarrollo turístico a nivel regional.

## VI. LITERATURA CITADA

- ALLEMAND D., E. Tambutte, J.P. Girard, J. Jaubert, (1998) Organic matrix synthesis in the scleractinian coral *Stylophora pistillata*: Role in biomineralization and potential target of the organotin tributyltin. *Journal of Experimental Biology* 201 (13), 2001–2009.
- ALLEMAND D., C. Ferrier-Pagès, P. Furla, F.Houlbrèque, S. Puvrel, S. Reynaud, É. Tambutté, S. Tambutté, D. Zoccola (2003) Biomineralization in reef-building corals: from molecular mechanisms to environmental control. *C.R. Acad. Sc. Paris Palévol.* 3 : 453-467 p.
- AMADOR S. K. (2008) El suicidio en un destino turístico: Cozumel *Teoría y praxis* 5:377-387 p.
- BAKER D.M., R. E. Rodríguez-Martínez y M. L. Fogel (2013) Tourism's nitrogen footprint on a Mesoamerican coral reef *Coral Reefs* DOI 10.1007/s00338-013-1040-2
- BAKER D.M., L. Kirby y K. Kiho (2010) Caribbean octocorals record changing carbon and nitrogen sources from 1862 to 2005 *Global Change Biology* 16:2701-2710 p
- BERNAL G.R. y J.D. Carriquiry (2001) The paleoenvironmental isotopic record of a coral from Pulmo Reef, Gulf of California, México *Ciencias Marinas*, 27:155-174 p.
- CAPA (2013) La gestión de los recursos hídricos en Quintana Roo. *Gobierno del Estado de Quintana Roo/Comisión de Agua Potable y Alcantarillado* 3p. <http://www.capa.gob.mx/capa/index.php/agua-qroo> (Última consulta: Febrero de 2014).
- CARILLI J.E., R.D. Norris, B. Black, S. Heila, M. Walsh y M. McFieldz (2010) Century-scale records of coral growth rates indicate that local stressors reduce coral thermal tolerance threshold *Global Change Biology* 16, 1247–1257 p.
- CARRICART-GANIVET J.P.; A.U. Beltrán-Torres; M. Merino y M.A. Ruiz-Zárate (2000) Extension density and calcification rate of the reef building coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander) in de mexican Caribbean. *Bulletin of Marine Science* 66(1): 215–224
- CARRICART-GANIVET J.P. y D.J. Barnes (2007) Densitometry from digitalized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 344:67–72
- CARRICART-GANIVET J.P. (2011) Coral skeletal extension rate: An environmental signal or a subject to inaccuracies? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 405:73–79.
- CARRIQUIRY J.D. (2010) *Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Primera Etapa.* Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM012. México, D.F.
- CARROUTHERS T. J. B., B.I. van Tussenbroek y W.C. Dennison (2005) Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64:191–199 p.
- CLODE P.L. y A.T. Marshall (2003) Calcium associated with a fibrillar organic matrix in the scleractinian coral *Galaxea fascicularis* *Protoplasma* 220: 153–161

- COHEN A.L. y T.A. McConnaughey *Geochemical perspectives on coral mineralization*, en Dove N.P.; J. J. DeYoreo; and S. Wener (2003) *Biom mineralization reviews in mineralogy and geochemistry* 54 151 – 188 p.
- CONAGUA. 2009. *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 300 p.
- CONAGUA (2012) *Base de datos de ciclones tropicales que afectaron a México durante el período de 1970 a 2011*, Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn.ena.gob.mx/ciclones/historia/ciclones1970-2011.pdf> (Última consulta Diciembre 2013)
- CONSTANTZ B. y S. Weiner (1988) Acidic Macromolecules Associated with the mineral phase of scleractinian coral skeletons *The journal of experimental zoology* 248:253-258 p.
- COOPER T. F., J. P. Gilmour y K.E. Fabricius (2009) Bioindicators of changes in water quality on coral reefs: review and recommendations for monitoring programmes *Coral Reefs* 28:589–606
- CORONADO C., J. Candela R. Iglesias-Prieto, J. Sheinbaum, M. López y F. J. Ocampo-Torres (2007) On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon *Coral Reefs* 26:149–163 p.
- CORTÉS, J. y M.J. Risk (1985). A reef under siltation stress: Cahuita, Costa Rica. *Bulletin Marine Science* 36, 339–356
- CROOK E.D., D. Potts, M. Rebolledo-Vieyra, L. Hernandez y A. Paytan (2011) Calcifying coral abundance near low-pH springs: implications for future ocean acidification *Coral Reefs* 31:239–245
- CRUZ-CORIA E., L. Zisumbo-Villareal, S.N. Monterroso y M.A.L. Quintanilla M.A.L. (2013), La confrontación social por el espacio costero: la configuración de paisajes turísticos en Puerto Morelos, *Región y Sociedad*, 15(56):127-160 p.
- CRUZ-PIÑÓN G. J.P., Carricart-Ganivet y J. Espinoza-Ávalos (2003) Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: biological and environmental controls *Marine Biology* 143: 491–500 p.
- DOF (26/01/2011) Acuerdo por el que se declara 2011, Año del Turismo en México *Diario Oficial de la Federación* 1p.
- DALTABUIT G.M., L.M. Vázquez, H. Cisneros G.A. Ruiz. (2006) El turismo costero en la ecorregión del Sistema Arrecifal Mesoamericano. UNAM, México. 358 p.
- DOWNS C.A., M.W. Woodley, R.H. Richmond, L.L. Lanning y R. Owen (2005) Shifting the paradigm of coral reef “health” assessment *Marine Pollution Bulletin* 51
- GONZÁLEZ-DE ZAYAS R., M. Merino-Ibarra; F. Matos-Pupo y M. F. Soto-Jiménez (2012) Atmospheric deposition of nitrogen to a Caribbean coastal zone (Cayo Coco, Cuba): Temporal trends and relative importance as a nitrogen source *Water Air Soil Pollut* 223(3):1125-1136.
- GISCHLER E. y W. Oschmann (2005) Historical Climate Variation in Belize (Central America) as Recorded in Scleractinian Coral Skeletons *PALAIOS*, 2005, V. 20, p. 159-174 p.

- HEATON T.H.E. (1986) Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 59:87-102
- HEIKOOP J.M., M.J. Risk, A.V. Lazier, E.N. Edinger, J. Jompa, G.V. Limmon, J.J. Dunn, D.R. Browne y H.P. Schwarcz (2000) Nitrogen-15 signals of anthropogenic nutrient loading in reef corals. *Mar Pollut Bull* 40:628–636 p.
- HERNÁNDEZ-TERRONES L, M. Rebolledo-Vieyra, M. Merino-Ibarra, M.A. Soto, A. Le Cossec, E. Monroy-Ríos (2011) Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems *Water, Air, & Soil Pollution*. 218(1–4): 517–528 p.
- IGLESIAS-PRIETO R., C.T. Galindo-Martínez, S. Enríquez, y J.P. Carricart-Ganivet (2014) Attributing reductions in coral calcification to the saturation state of aragonite, comments on the effects of persistent natural acidification *Proc Natl Acad Sci* www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318521111
- INE (2000) *Programa de manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, México*. Instituto Nacional de Ecología. 224 p.
- INEGI (1986) *X Censo General de Población y Vivienda 1980* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística 90 p.
- INEGI (1986) *XI Censo General de Población y Vivienda 1990* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística 90 p.
- INEGI (1995) *I Conteo General de Población y Vivienda 1995* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística..
- INEGI (2000) *XII Censo General de Población y Vivienda 2000* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (2005) *II Conteo General de Población y Vivienda 2005* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (2010) *XIII Censo General de Población y Vivienda 2010* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (2011) *Perspectiva estadística, Quintana Roo* México Instituto Nacional de Geografía y Estadística 86 p.
- INGALLS A.E., C. Lee y E.R.M. Druffel (2003) Preservation of organic matter in mound-forming coral skeletons *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(15):2827–2841 p.
- KOLASINSKI J., K. Rogers y P. Frouin (2008) Effects of acidification on carbon and nitrogen stable isotopes of benthic macrofauna from a tropical coral reef *Rapid Commun Mass Spectrom* 22:2955–2960 p.
- KOPP C., M. Pernice, I. Domart-Coulon, C. Djediat, J. E. Spangenberg, D. T. L. Alexander, M. Hignette, T. Meziane, y A. Meibom (2013) Highly dynamic cellular-level response of symbiotic Coral to a sudden increase in environmental nitrogen *mBio*.4 (3):1-9 p.
- KNUTSON D.W., R.W. Buddemeier y S.V. Smith (1972) Coral Chronometers: seasonal growth bands in reef corals *Science* 177(4045):270-272 p.

- KIMES N.E., J.D. Van Nostrand, E. Weil, J. Zhou y P.J. Morris (2010) Microbial functional structure of *Montastraea faveolata*, an important Caribbean reef-building coral, differs between healthy and yellow-band diseased colonies *Environmental Microbiology* 12(2):541–556 p.
- LADD M.C. y L. Collado-Vides (2013) Practical applications of monitoring results to improve managing for coral reef resilience: a case study in the Mexican Caribbean *Biodivers Conserv* 22:1591–1608 p.
- LEMA K.A., B.L. Willis y D.G. Bourne (2012) Corals from characteristic associations with symbiotic nitrogen-fixing bacteria *Appl. Environ. Microbiol.* 78(9):3136- 3144 p.
- LESSER, M. P., C. H. Mazel, M. Y. Gorbunov, and P. G. Falkowski (2004) Discovery of symbiotic nitrogen-fixing cyanobacteria in corals, *Science*, 305, 997–1000 doi:10.1126/science.1099128.
- LESSER, M.P., L.I. Falcón, A. Rodríguez-Román, S. Enríquez, O. Hoegh-Guldberg, y R. Iglesias-Prieto (2007), Nitrogen fixation by symbiotic cyanobacteria provides a source of nitrogen for the scleractinian coral *Montastraea cavernosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 346:143–152 p. doi:10.3354/meps07008.
- MARION G.U., R.B. Dunbar, D.A. Mucciarone, J.N. Kremer, J.S. Lansing, A. Arthawiguna (2005) Coral skeletal  $\delta^{15}\text{N}$  reveals isotopic traces of an agricultural revolution *Marine Pollution Bulletin* 50:931–944 p.
- MICHENER R.H y L. Kaufman (2007) Stable isotope ratios as tracers in marine food webs: an update. In: Michener y R.H., Lajtha, K. (2007) *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, Blackwell Publishing 566 p.
- MOOK W.G. (2002) *Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications* IHP-V Technical Documents in Hidrology No. 39 UNESCO-IAEA 164 p.
- MUSCATINE L. e I.R. Kaplan (1994) Resource partitioning by reef corals as determined from stable isotope composition. 2.  $\delta^{15}\text{N}$  of zooxanthellae and animal tissue versus depth. *Pac. Sci.* 48:304–312 p.
- MUSCATINE L., C. Goiran, L. Land, J. Jaubert, J.P. Cuif y D. Allenmand (2005) Stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) of organic matrix from coral skeleton. *PNAS* 5:1525-1530 p.
- NOM-001-SEMARNAT-1996 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales *SEMARNAT-Secretaría de Pesca* 33 p.
- PETERSON B.J. y Fry B., (1987) Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18:293–320 p.
- PUVEREL S., E. Tambutté, L. Pereira-Mouriés, D. Zoccola, D. Allemand y S. Tambutté (2005) Soluble organic matrix of two Scleractinian corals: Partial and comparative analysis *Comparative Biochemistry and Physiology*, Part B 141 (2005) 480– 487 p.
- RAHAV O., Z. Dubinsky, Y. Achituv y P.G. Falkowski (1989) *Ammonium Metabolism in the Zooxanthellate Coral, Stylophora pistillata* Proceedings of the Royal Society of London Series B, *Biological Sciences*, 236(1284):325-337 p.

- RISK M.J. (2002) Reef management in the 21st century: effective monitoring and legislative guidelines for land-based sources. In: Brook S., Spencer T., Teleki K., Taylor M. (eds) International Society of reef Studies, ISRS European meeting, Cambridge, Abstracts volume 82 p.
- RISK M.J., B. E. Lapointe, O.A. Sherwood y B.J. Bedford (2009) The use of  $\delta^{15}\text{N}$  in assessing sewage stress on coral reefs. *Marine Pollution Bulletin* 58(6):793-802 p.
- RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ R.E. (2008) Community involvement in marine protected areas: The case of Puerto Morelos reef, México *Journal of Environmental Management* 88 1151–1160 p.
- RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ R.E., F. Ruíz-Rentería, B. van Tussenbroek, G. Barba-Santos, E. Escalante-Mancera, G. Jordán-Garza y E. Jordán-Dahlgren (2010) Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site *Rev. Biol. Trop.* 58(3):23-43 p.
- RUBIO E. M. Murad y J.V. Rovira (2010) Crisis ambiental en la costa de Quintana Roo como consecuencia de una visión limitada de lo que representa el desarrollo sustentable *Nueva Época* 63 161-185 p.
- SEDETUR (2013) Indicadores turísticos. Gobierno de Estado de Quintana Roo, Secretaría de Turismo. <http://sedetur.qroo.gob.mx/index.php/estadisticas/indicadores-turisticos> Última consulta: Febrero de 2014.
- SHASAR N., Y. Cohen, Y. Loya y N. Sar (1994) Nitrogen fixation (acetylene reduction) in stony corals: evidence for coral-bacteria interactions. *Mar Ecol Prog Ser* 111:259–264 p.
- SHERWOOD O. B. Lapointe, M. J. Risk , A. Jamieson (2010) Nitrogen isotopic records of terrestrial pollution encoded in floridian and bahamian gorgonian corals *Environ. Sci. Technol.* 30,
- SULZMAN E.W. (2007) Stable isotope chemistry and measurement: a primer. In: Michener, R.H., Lajtha, K. (2007), *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, Blackwell Publishing 566 p.
- SWART P.K., A. Saied y K. Lamb(2005) Temporal and spatial variation in the  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  of coral tissue and zooxanthellae in *Montastraea faveolata* collected from the Florida reef tract *Limnol. Oceanogr.*, 50(4):1049–1058 p.
- SECRETARÍA DE LA INDUSTRIA Y COMERCIO (1971) *IX Censo general de población 1970. Territorio de Quintana Roo* México Dirección General de Estadística.77 p.
- SMARNAT (2012) *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental.* Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/06\\_agua/cap6\\_4.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/06_agua/cap6_4.html). Consultado el 31 de enero de 2014.
- UCHIDA A., M. Nishizawa, K. Shirai, H. Iijima, H. Kayanne, N. Takahata1 y Y. Sano (2008) High sensitivity measurements of nitrogen isotopic ratios in coral skeletons from Palau, western Pacific: Temporal resolution and seasonal variation of nitrogen sources *Geochemical Journal* 42:255-262 p.
- VÁZQUEZ-LULE, A. D. y M. F. Adame (2009) Caracterización del sitio de manglar Puerto Morelos – Punta Maroma, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Sitios

de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.

WARD-PAIGE C.A., M.J. Risk y O.A. Sherwood (2005) Reconstruction of nitrogen sources on coral reefs:  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  in gorgonians from Florida Reef Tract *Mar Ecol Prog Ser* 296:155-163 p.

WHITAKER J.R. y P.E. Granum (1980) An absolute method for protein determination based on difference in absorbance at 235 and 280 nm *Analytical Biochemistry* 109:156- 159 p.

YAMASAKI A., T. Watanabe, N.O. Ogawa, N. Ohkouchi, K. Shirai, M. Toratani, y M. Uematsu (2011) Seasonal variations in the nitrogen isotope composition of Okinotori coral in the tropical western Pacific: A new proxy for marine nitrate dynamics, *J. Geophys. Res.*, 116, G04005, doi:10.1029/2011JG001697.

## ANEXO I

Peso por muestra liofilizada, contenido de nitrógeno y valores de  $\delta^{15}\text{N}$  obtenidos en tres núcleos de *O. faveolata*

Año	A			B			C		
	Peso [mg]	N [%]	$\delta^{15}\text{N}$ [‰]	Peso [mg]	N [%]	$\delta^{15}\text{N}$ [‰]	Peso [mg]	N [%]	$\delta^{15}\text{N}$ [‰]
1972	-	-	-	-	-	-	6.82	1.5	4.00
1973	-	-	-	-	-	-	5.46	1.0	3.66
1974	-	-	-	-	-	-	14.35	0.3	3.96
1975	3.60	0.5	3.28	-	-	-	5.35	1.4	4.22
1976	5.20	0.7	3.27	-	-	-	6.12	1.0	4.48
1977	4.46	0.8	4.43	-	-	-	8.01	0.6	4.50
1978	9.24	0.9	4.39	-	-	-	8.62	1.3	3.98
1979	10.26	0.7	4.99	-	-	-	14.44	0.4	3.85
1980	7.67	0.5	4.00	-	-	-	9.55	0.9	3.93
1981	8.71	0.7	3.87	-	-	-	5.04	0.9	3.66
1982	9.04	0.5	3.88	-	-	-	7.06	1.2	3.92
1983	5.19	1.0	3.69	-	-	-	4.96	0.8	3.74
1984	5.94	1.0	3.98	-	-	-	17.73	0.3	3.81
1985	6.31	1.0	3.85	-	-	-	15.73	0.2	3.69
1986	7.23	0.8	4.36	9.07	0.6	3.62	5.48	0.6	3.64
1987	4.31	1.9	4.28	11.81	0.5	3.21	7.25	0.6	3.46
1988	3.83	2.5	3.61	9.73	0.9	3.86	7.74	0.6	3.10
1989	5.99	0.7	3.25	7.33	0.9	3.61	9.41	1.2	4.01
1990	7.00	0.9	4.12	10.28	1.0	3.50	8.25	1.0	4.05
1991	9.02	0.3	4.56	6.81	1.3	3.08	11.70	0.5	3.84
1992	8.94	0.8	4.45	7.21	0.9	3.26	6.77	1.0	3.98
1993	9.03	0.4	3.89	7.58	1.3	4.14	4.85	1.8	3.67
1994	6.58	0.8	3.91	6.04	1.6	4.11	5.22	0.7	4.04
1995	6.80	0.6	3.90	5.95	1.2	4.37	6.88	0.6	3.85
1996	13.13	0.5	3.60	5.96	1.2	4.15	5.82	1.2	5.06



VALORES DE  $\delta^{15}\text{N}$  EN LA MATRIZ ORGÁNICA DE *Orbicella faveolata* COMO INDICADORES DEL IMPACTO DEL DESARROLLO TURÍSTICO EN EL PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS

1997	13.34	0.5	3.80	6.01	0.8	4.63	7.69	0.7	4.00
1998	6.08	0.6	3.45	8.09	0.5	4.23	6.11	1.5	5.39
1999	5.76	0.5	3.12	9.63	0.8	4.58	7.72	1.3	5.07
2000	9.40	1.0	5.54	5.74	1.0	3.90	6.95	0.9	4.92
2001	11.18	0.7	4.43	4.13	2.1	4.95	4.33	1.1	4.10
2002	5.16	1.2	4.34	5.05	1.6	4.65	5.87	1.6	4.60
2003	8.77	1.0	5.18	5.77	1.8	4.87	5.41	1.2	3.97
2004	9.64	0.5	3.84	5.62	2.1	5.32	9.08	0.7	2.78
2005	19.69	0.2	4.12	11.10	0.7	5.45	5.29	1.1	3.63
2006	16.53	0.3	3.81	13.91	0.5	4.77	10.66	0.7	3.89
2007	14.19	0.5	3.98	10.24	1.4	4.35	5.15	2.1	4.26
2008	9.64	0.8	4.08	4.25	1.7	4.29	6.02	1.3	5.27
2009	7.10	0.7	3.78	10.51	1.4	4.35	8.48	1.3	5.21
2010	3.78	1.5	4.13	16.15	1.0	4.92	6.34	1.5	5.54
2011	6.46	1.1	3.85	8.00	2.1	4.30	8.54	1.0	5.21
2012	6.31	2.2	5.29	3.57	2.5	4.43	6.13	1.5	5.81
<b>Promedio</b>	<b>8.17</b>	<b>0.83</b>	<b>4.06</b>	<b>7.98</b>	<b>1.25</b>	<b>4.26</b>	<b>7.76</b>	<b>1.01</b>	<b>4.19</b>
<b>± DE</b>	<b>3.55</b>	<b>0.49</b>	<b>0.55</b>	<b>3.04</b>	<b>0.54</b>	<b>0.61</b>	<b>3.11</b>	<b>0.42</b>	<b>0.68</b>