



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

OTOLITOS COMO REGISTROS DE CAMBIOS
AMBIENTALES EN LAGUNA DE TÉRMINOS
CAMPECHE, MÉXICO.

PRESENTA

José Manuel Dorantes Hernández

LA PAZ, B.C.S., junio DE 2019



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 24 del mes de Junio del 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

"OTOLITOS COMO REGISTROS DE CAMBIOS AMBIENTALES
EN LA LAGUNA DE TÉRMINOS CAMPECHE, MÉXICO"

Presentada por el alumno:

DORANTES	HERNÁNDEZ	JOSÉ MANUEL
Apellido paterno	materno	nombre(s)

Con registro: B 1 7 0 7 1 0

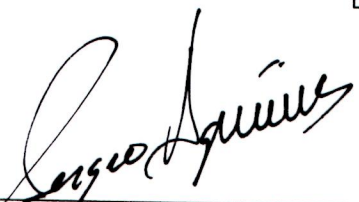
Aspirante de:

MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis



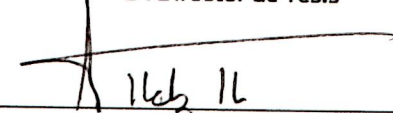
DR. SERGIO AGUIÑIGA GARCÍA
Director de Tesis



DR. YASSIR EDÉN TORRES ROJAS
2°. Director de Tesis



DR. ALBERTO SÁNCHEZ GONZÁLEZ

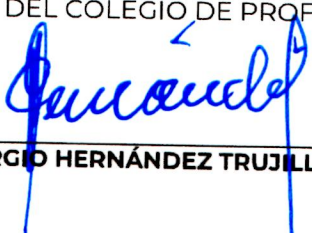


DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ HERRERA



DR. ULIANOV JAKES COTA

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO



I.P.N.
CICIMAR
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 25 del mes de Junio del año 2019

El (la) que suscribe BIÓL. JOSÉ MANUEL DORANTES HERNÁNDEZ Alumno (a) del Programa
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B170710 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. SERGIO AGUÍNIGA GARCÍA Y DR. YASSIR EDÉN TORRES ROJAS

y cede los derechos del trabajo titulado:

"OTOLITOS COMO REGISTROS DE CAMBIOS AMBIENTALES

EN LA LAGUNA DE TÉRMINOS CAMPECHE, MÉXICO"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: dorantessp@gmail.com - saguiniga@gmail.com - yetorres@uacam.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

BIÓL. JOSÉ MANUEL DORANTES HERNÁNDEZ

Nombre y firma del alumno

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para poder llevar a cabo éste paso en mi formación académica.

Al proyecto Semarnat Conacyt “Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en otolitos de peces marinos presentes en el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Campeche: indicadores del cambio climático” con número 000000000263401 a cargo del Dr. Yassir Eden Torres Rojas, por darme la oportunidad de realizar esta investigación.

Al programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) por el apoyo económico (BEIFI) y académico otorgado para complementar mi formación, también al Dr. Sergio Aguiñiga García por darme la oportunidad de incluirme e involucrarme en sus proyectos SIP.

Al proyecto SIP 20196704 “Efecto de los pesticidas en las biomasas microbianas sedimentarias y en el filtro alimentador bentónico *Anadara tuberculosa* en ecosistemas costeros impactados y prístinos del Pacífico Mexicano” a cargo del Dr. Sergio Aguiñiga García, por su apoyo tanto económico como académico.

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) por aceptarme en el programa de maestría y adquirir nuevos conocimientos.

Al Dr. Sergio Aguiñiga García por ser mi director y consejero tanto en los aspectos académicos, en mi desarrollo personal, social y en mi formación como investigador. Además de brindarme siempre en todo momento su apoyo incondicional y sobre todo su amistad.

Al Dr. Yassir Edén Torres Rojas por aceptarme en su equipo de trabajo desde 2015 y con el que he vivido experiencias únicas e irremplazables que me han sumado en aspectos académicos, en mi desarrollo personal, social, por ser una gran amigo y persona con una gran calidad humana digna de reconocimiento y admiración.

Al Dr. Alberto Sánchez González por ser uno de los capitanes en este barco y guiar el curso de la investigación con sus amplios conocimientos en el área de los isótopos estables inorgánicos. Además de tener la oportunidad de conocerlo y forjar una amistad.

Al Dr. Agustín Hernández Herrera por ayudarme a ingresar al programa de maestría, haberme ofrecido la oportunidad de integrarme a su equipo de trabajo, brindarme su amistad y conocimientos durante mi paso por CICIMAR.

Al Dr. Ulianov Jakes Cota por haber aceptado colaborar conmigo durante esta investigación y brindarme su amistad y apoyo incondicional siendo experto en estas estructuras llamadas otolitos.

Al técnico Ángel Ruvalcaba por compartirme sus conocimientos en el análisis de isotopos estables y ser un buen amigo y un gran ser humano.

Dedicatoria

A mis padres José y Pilar, mi hermano Gerry, mi abuela Irene y a mis amigos en Ciudad de México, Campeche, La Paz y Ensenada que siempre son mi motor todas las mañanas y todas las noches para seguir adelante y por recorrer parte del camino conmigo en mis aventuras.

Y a “Los caídos”, amigos y excompañeros que no pudieron concluir y seguir adelante con sus estudios debido a problemas sociales en México, que sin duda muchos de ellos pudieron haber llegado a ser parte de la solución de estos males en este país, si se les hubiera dado una oportunidad.

Glosario.

Aragonita: Forma cristalina del carbonato de calcio (CaCO_3), el mineral más abundante en el planeta y que constituye la mayor parte de las estructuras esqueléticas de muchos organismos marinos (corales, algas calcáreas, conchas de bivalvos, etc.) (Kim et al. 2007).

Carbonato de calcio: es un compuesto químico, de fórmula CaCO_3 y es el principal componente de conchas y esqueletos de muchos organismos (corales, algas calcáreas, conchas de bivalvos, etc.).

Deposición de los carbonatos: Transporte de partículas de carbono que son sedimentos producidos in situ, particularmente marino, y componentes del ciclo del carbono que actúan para controlar la concentración promedio de muchos productos químicos en el océano, además del pH y pCO_2 de la atmósfera (Archer, 2006).

Estuario: Ecosistema de interfaces inestables en los cuales el drenaje de agua dulce se mezcla con el mar abierto. (Levington 1982)

Fraccionamiento: Variaciones en la abundancia relativa de los isótopos causados por el transporte o por la reacción preferencial de estos a partir de procesos biológicos y geoquímicos (Fry, 2006).

Isótopos: Átomo de un mismo elemento que ocupan la misma posición en la tabla periódica (definida por el número de protones) pero con diferente número de neutrones y por tanto diferente masa atómica.

Laguna costera: Son depresiones en la zona costera que tienen una conexión permanente o efímera con el mar, pero del cual están protegidas por algún tipo de barrera.

Otolito: Son estructuras duras formadas durante la deposición de los carbonatos en el medio y son matrices inertes pertenecientes al sistema audio receptor de los

peces, su función es notar las aceleraciones, la dirección de la gravedad y el equilibrio, también sirven para la audición en los peces.

Sagitta: Otolitos ubicados en la cámara llamada sáculo de lado del neurocráneo del pez, generalmente de mayor tamaño (sagittae/plural)

Tasa de recambio: Periodo en el que las razones isotópicas de un tejido reflejan la señal o firma isotópica de una dieta o el ambiente en particular. Los tejidos con una tasa de recambio isotópica rápida reflejarán una dieta reciente mientras que VII aquellos tejidos con una tasa de recambio lenta reflejarán la dieta promedio representativa de un periodo mucho más extenso. Se relaciona directamente con la tasa metabólica (Carlisle et al. 2012)

$\delta^{18}\text{O}$: Diferencia expresada en partes por mil entre la razón de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de una muestra y la razón $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del estándar (NBS-19 para el oxígeno)

Índice

Laguna de Términos, Campeche, México.....	7
Distribución espacial <i>S. lanceolatus</i> y <i>E. gula</i> en la Laguna de Términos.....	10
Relación entre el valor teórico de $\delta^{18}\text{O}$ con la temperatura observada y su validación en otolitos.	11
Hipótesis	16
Objetivos.	16
Objetivo general.....	16
Objetivos particulares.....	16
Metodología.....	17
Área de estudio.....	17
Trabajo de campo.	18
Trabajo de laboratorio.....	19
Trabajo de gabinete.....	20
Resultados.....	23
<i>Stellifer lanceolatus</i>	27
<i>Eucinostomus gula</i>	29
Caudal de los ríos.....	32
Retro cálculo de la temperatura superficial del mar.	33
Equilibrio isotópico.	34
Discusión.	38
Conclusiones	45
Referencias bibliográficas.....	46

Relación de figuras.

Figura 1. Zona de estudio dividida en 4 zonas con diferentes características abióticas y la ubicación de los 17 sitios de muestreo.

Figura 2. Laguna de Términos ubicada en el estado de Campeche, en la zona costera mexicana del Golfo de México, y las subcuencas hidrográficas aledañas: Palizada, Chumpan, Candelaria y Mamantel, que descargan sus aguas en LT.

Figura 3. Gráfica de la temperatura observada desde 1980 al 2017, datos proporcionados por el Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografías del Golfo de México.

Figura 4. Gráfica de la Salinidad observada desde 1980 al 2017, datos proporcionados por el Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografías del Golfo de México.

Figura 5. Gráfica de los valores promedio de temperatura observada desde 1997 al 2017, de estudios realizados en Laguna de Términos.

Figura 6. Gráfica de los valores promedio de salinidad observada desde 1997 al 2017, de estudios realizados en Laguna de Términos.

Figura 7. Gráfica de valores $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de los otolitos de *S. lanceolatus*

Figura 8. Gráfica de valores $\delta^{18}\text{O}$ promedio por zonas de los otolitos de *S. lanceolatus*

Figura 9. Gráfica de valores $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de los otolitos de *E. gula*.

Figura 10. Gráfica de valores $\delta^{18}\text{O}$ promedio por zonas de los otolitos de *E. gula*.

Figura 11. Imagen especular de los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de *S. lanceolatus* y *E. gula*.

Figura 12. Caudal acumulado anual de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpan para los años 1995-2012 reportados por las bases de datos de CONAGUA.

Figura 13. Caudal acumulado anual de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpan para los años 1997, 2007 y 2014 reportados por las bases de datos de CONAGUA.

Figura 14. Valores promedios anuales de la temperatura observada en Laguna de Términos en los periodos de 1997, 2007 y 2017, y los valores de temperatura estimada se ajustan mejor con los valores de la ecuación 1 de equilibrio isotópico.

Figura 15. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *S. lanceolatus* vs valores teóricos calculados con las ecuaciones 1) y 2) de equilibrio isotópico.

Figura 16. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *E. gula* vs valores teóricos calculados con las ecuaciones 1) y 2) de equilibrio isotópico.

Figura 17. Valores $\delta^{18}\text{O}$ observados de *S. lanceolatus* de la zona 1 comparados con valores $\delta^{18}\text{O}$ estimados de la aragonita en zona 1.

Figura 18. Valores $\delta^{18}\text{O}$ observados de *E. gula* de la zona 2 comparados con valores $\delta^{18}\text{O}$ estimados de la aragonita en zona 2.

Relación de Tablas.

Tabla 1. Valores promedio anuales de temperatura en °C *in situ* a partir de 1980 al 2017.

Tabla 2. Valores promedio anuales de salinidad *in situ* a partir de 1980 al 2017.

Tabla 3. Valores promedio de temperatura por zona de los años 1998, 1999, 2011 y 2017 de la Laguna de Términos

Tabla 4. Valores promedio de salinidad por zona de los años 1998, 1999, 2011 y 2017 de Laguna de Términos

Tabla 5. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *S. lanceolatus*

Tabla 6. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ y su desviación estándar por zonas de los otolitos de *S. lanceolatus*.

Tabla 7. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *E. gula*

Tabla 8. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ y su desviación estándar por zonas de los otolitos de *E. gula*.

Tabla 9. Valores anuales promedio de la temperatura observada y la temperatura estimada con las ecuaciones de equilibrio isotópico de Laguna de Términos.

Tabla 10. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *S. lanceolatus* y *E. gula* vs valores teóricos estimados con las ecuaciones de equilibrio isotópico

Tabla 11. Valores observados de temperatura (°C) durante los años de 1998, 1999, 2011 y 2017 de las 4 zonas de Laguna de Términos.

Tabla 12. Valores observados de salinidad durante los años de 1998, 1999, 2011 y 2017 de las 4 zonas de Laguna de Términos

Tabla 13. Valores $\delta^{18}\text{O}$ observados y estimados de *S. lanceolatus* de la zona 1 y *E. gula* de la zona 2

Resumen

Estudios previos en la Laguna de Términos, Campeche (LT), han mostrado cambios en los productores primarios y en la ictiofauna dominante en los últimos 30 años. El objetivo del presente estudio es reconstruir el ambiente histórico marino de temperatura y salinidad de LT para los años 1997, 2007 y 2017 por medio del análisis del $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos de *Stellifer lanceolatus* (n=104) y *Eucinostomus gula* (n=96) representativo de la variabilidad espacial. No se encontraron diferencias entre los $\delta^{18}\text{O}$ de 46 bandas exteriores de los otolitos vs 62 otolitos completos para *S. lanceolatus* ($p = 0.1$) por lo que en este estudio se utilizaron los valores $\delta^{18}\text{O}$ del otolito completo en ambas especies. Los datos históricos de temperatura y salinidad entre 1980 y 2017 evidencian un incremento en los valores promedio de 27°C y 27 ups a 29°C y 31 ups. Este cambio coincide con la variación del promedio anual de $\delta^{18}\text{O}$ de *S. lanceolatus* que en 1997 se observan valores de -1.44‰ y en 2017 valores de -1.11‰ con una diferencia de -0.33‰ en 30 años. En contraste, la diferencia del $\delta^{18}\text{O}$ para *E. gula* en ese mismo periodo, es de -0.77‰ con -1.52 ‰ para 1997 y de -2.29‰ para 2017. Los valores más negativos registrados en los otolitos de *E. gula* indican ambientes con altas T°C y ups, mientras que los valores $\delta^{18}\text{O}$ más positivos en los otolitos de *S. lanceolatus* indican una preferencia de condiciones estuarinas. El equilibrio del $\delta^{18}\text{O}$ del otolito con la aragonita del agua de LT coincide para los años analizados en *S. lanceolatus*, pero no para *E. gula*. Las discrepancias del equilibrio pudieran ser explicadas a que *E. gula* es una especie que se encuentra más abundante en Boca Puerto Real que es una zona influenciada por la entrada de agua marina mientras que *S. lanceolatus* se encuentra preferentemente en condiciones más estuarinas por la influencia de caudales permanentes del río Palizada. Se propone a *E. gula* como monitor más sensible a los cambios de temperatura y salinidad en la escala decadal.

Palabras clave:

$\delta^{18}\text{O}$, otolitos, peces, Laguna de Términos, registros ambientales.

Abstract

Previous studies in Laguna de Términos, Campeche (LT), have had changes with primary producers and dominant ichthyofauna in the last 30 years. The aim with this present study is to reconstruct the environmental historical marine of temperature and salinity in LT for 1997, 2007 and 2017 with $\delta^{18}\text{O}$ analysis *Stellifer lanceolatus* otoliths (n = 104) and *Eucinostomus gula* (n = 96) representing all spatial variability. There not significal differences between $\delta^{18}\text{O}$ on 46 otolith bands vs 62 complete *S. lanceolatus* otoliths (p = 0.1). The temperature and salinity historical data from 1980 and 2017 show an increase in average values from 27 ° C with 27 ups to 29 ° C and 31 ups. This change coincides with the variation of annual averages in $\delta^{18}\text{O}$ *S. lanceolatus*, in 1997 values were -1.44 ‰ and 1.11 ‰ values in 2017, the difference is -0.33 ‰ in 30 years. furthermore the difference in $\delta^{18}\text{O}$ for *E. gula* in the same period is -0.77 ‰ with -1.52 ‰ for 1997 and -2.29 ‰ for 2017. *E. gula* otoliths show the most negative values, in other words is an indicate of high temperatures environments, and *S. lanceolatus* otoliths has more positive values that is to say an indicate of estuarine conditions preference. The isotopic equilibrium coincides in $\delta^{18}\text{O}$ aragonite values with the years analyzed in $\delta^{18}\text{O}$ of *S. lanceolatus* otolith in LT, but not for *E. gula*. The isotopic equilibrium discrepancies could be because *E. gula* is more abundant species in Boca Puerto Real which is an area influenced by the entrance of seawater while *S. lanceolatus* prefers more estuarine conditions due to influence of the permanent flows of Palizada River. In conclusion *E. gula* Works better as a sensitive monitor to changes in temperature and salinity in a decennial scale.

Keywords:

$\delta^{18}\text{O}$, otoliths, fishes, Laguna de Términos, environmental records

Introducción.

En las últimas décadas ha tomado especial relevancia la comprensión de los cambios climáticos, el forzamiento oceanográfico resultante y los cambios ambientales que afectan la función trófica de los ecosistemas costeros (Sánchez, 2011). La importancia de los estudios de ecosistemas costeros no sólo es para evaluar los efectos del impacto de las actividades antropogénicas contaminantes sino también por la presión pesquera y la alta explotación de recursos renovables. Asimismo, existe la incertidumbre de separar los efectos de origen natural del antropogénico sobre la resiliencia y dinámica de los ecosistemas costeros (Rowell *et al.*, 2008).

En la búsqueda de registros espacio temporales de estos cambios se han utilizado proxies como el análisis de $\delta^{18}\text{O}$ en estructuras carbonatadas. Existen estudios enfocados en registrar patrones de cambios ambientales utilizando estas estructuras formadas durante la depositación de los carbonatos, como aragonita, en los otolitos. Por ello es posible estimar la temperatura a la que ha ocurrido la depositación de los carbonatos en el agua de mar como en los otolitos (Patterson *et al.*, 1993).

Los otolitos de los peces son matrices inertes pertenecientes al sistema audio receptor de los peces, son empleados para estimar la edad y crecimiento, discriminación de stocks y patrones migratorios. Las bandas de crecimiento en los otolitos son considerados buenos trazadores de la variabilidad de los factores ambientales, como la temperatura y salinidad del agua de mar (Thorrold *et al.*, 1997). Algunos autores se centran en la reconstrucción de ambientes marinos con análisis de isótopos estables en $\delta^{18}\text{O}$, estimando las temperaturas a la que se depositó la aragonita en equilibrio con el medio marino y en el otolito, por medio de estas estructuras es posible determinar y segregar por capas de depositación en los anillos de crecimiento formados durante el desarrollo del pez (Campana, 1999).

Los estudios del $\delta^{18}\text{O}$ en otolitos, foraminíferos y cocolitofóridos son utilizados para explicar la influencia del forzamiento oceanográfico que genera cambios en la temperatura y salinidad en el ambiente marino. Estos estudios parten de supuestos termodinámicos sobre el CO_2 y su interacción con el agua de mar, ya que existe una relación isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) que representa una proporción de isótopos ligeros (^{16}O) y pesados (^{18}O) del oxígeno, que se encuentran en distintas abundancias en el ambiente dependiendo de la temperatura y salinidad. Por ejemplo, el fraccionamiento isotópico provocado por las tasas de evaporación y altas temperaturas en las aguas tropicales hacen que se encuentre una mayor concentración de isótopos pesados en el mar, debido a la fugacidad de los isótopos ligeros resultando en valores más negativos de $\delta^{18}\text{O}$ en el vapor de agua en la atmósfera. Los isótopos ligeros de oxígeno en las moléculas de agua, al ser termodinámicamente más fáciles de desplazarse, se destilan isotópicamente y son transportados y precipitados por las nubes, lluvias y glaciares. El resultado de esta destilación isotópica es que en el agua de altas latitudes se encuentran valores de $\delta^{18}\text{O}$ más positivos o cercanos a cero (Fontainer *et al.*, 2006).

La forma en la que la razón $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ se fija en los otolitos durante la depositación de los carbonatos en el océano a partir del ingreso de dióxido de carbono proveniente de la atmósfera se da por la Ley de las Presiones Parciales. La presión parcial del CO_2 atmosférico trata de igualar la concentración en el agua de mar. Al disolverse se forma ácido carbónico (que es una especie química inestable) y luego de pasar una serie de reacciones químicas equilibrando las concentraciones de las moléculas de H_2O , se formarán moléculas de carbonato de calcio el cual será precipitado por depositación hacia las estructuras de organismos marinos en forma de aragonita (Cerón, 2010). Sin embargo, existen sesgos en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ debido a un “efecto vital” en los organismos, puesto que los factores de crecimiento, metabolismo y adaptaciones fisiológicas pudieran estar interviniendo en la depositación de los carbonatos, por lo que surge la necesidad de realizar más estudios como estos para poder evaluar efectos y variaciones del $\delta^{18}\text{O}$ en especies de peces marinas y estuarinas (Høie *et al.*, 2004).

El cambio climático en la escala decadal, incide en las variaciones de la temperatura y la salinidad del agua de mar. Esto es especialmente importante en ecosistemas prístinos como las áreas naturales protegidas donde la actividad humana es muy restringida o nula (Kemp *et al.*, 2016). En este estudio, se eligieron dos especies dominantes en el área de protección de flora y fauna Laguna de Términos (LT) en Campeche. *Stellifer lanceolatus* o “corvinilla” y *Eucinostomus gula* o “mojarrita plateada” para observar los cambios ambientales mayormente influenciados por la temperatura y salinidad del agua de mar en la función del ecosistema.

Ambas especies representan una alta importancia económica debido a que *S. lanceolatus* se asocia a la fauna de acompañamiento de camarón siete barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*) y suele ser una especie monitor para la pesca del camarón. De igual manera *E. gula*, debido a su explotación, es clasificada como recurso de mediana escala a nivel de pesca artesanal. Es importante hacer notar que ambas especies están clasificadas como de alta tolerancia a los cambios de temperatura y salinidad dentro de LT. Adicionalmente se pueden encontrar en distintas zonas de la laguna por las preferencias del hábitat. Por ello, ambas especies pueden ser buenos biomonitores de cambios ambientales en LT (Ramos *et al.*, 2009, Castillo *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 1997; Pineda *et al.*, 2016).

Dentro de la LT se han reportado cambios en la estructura y función trófica debido a cambios en los productores primarios como pastos marinos cuya cobertura ha disminuido en un 50%, a partir de 1980 (Romo, 2013). Esto ha afectado las zonas que servían de hábitat con condiciones de refugio para las comunidades ícticas implicando una disminución de la biodiversidad (Ramos *et al.*, 2009). Asimismo, ha favorecido o perjudicado a ciertas especies ícticas. Actualmente existe una mayor presencia de especies de la familia Gerreidae o “mojarras” las cuales proliferan más en condiciones marinas por lo que se infiere un cambio en las aguas de la laguna de estuarinas a marinas (Villegier *et al.*, 2010).

La importancia de evaluar los efectos y el impacto de los cambios ambientales (naturales o antropogénicos) dentro de un ecosistema, son aspectos

centrales para un mejor entendimiento y buen manejo de los recursos naturales. En el caso específico de las comunidades marinas, el conocer la influencia de las variaciones ambientales sobre la ictiofauna, permitiría entender sus efectos en la producción pesquera (Crowder *et al.*, 2008).

Se ha señalado que un aumento en la temperatura por efecto del cambio climático afectaría las Áreas Naturales Protegidas (ANP), que en nuestro país suman 174, y de las cuales 64 se reportan con condiciones de sequías en los últimos años (Chan *et al.*, 2016). Dentro de esta categorización LT a partir del año 2010 registró una fuerte tendencia de sequías hasta el año 2016 con bajos índices de precipitación. Esto tiene implicaciones en las variaciones de caudales de los ríos, de posibles condiciones marinas dominantes en la LT, afectando la productividad primaria y secundaria, y la biodiversidad de la biota marina (Falkowski *et al.*, 1998; Behrenfeld *et al.*, 2006).

La importancia de evaluar estos efectos en los productores primarios es debido a que cumplen funciones ecológicas de refugio, alimento y reproducción de las comunidades marinas, que en el caso de LT, favorecen las fases larvarias y juveniles por ser un área de desove y crianza. Un aspecto importante es la variación de la cobertura de la vegetación sumergida que es vulnerable a los impactos antropogénicos y a los patrones de variación hidrológica por cambios en el ambiente o climáticos (Galeana, 2015).

Con base a lo anterior, este trabajo tiene como finalidad, obtener información isotópica que pudiera funcionar como monitor de cambios en temperatura y salinidad de los últimos 30 años de LT, a partir de las concentraciones de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de los otolitos de *S. lanceolatus* y *E. gula*, considerando que la variabilidad del $\delta^{18}\text{O}$ mantenga una relación con la temperatura y salinidad del agua de mar para 1997, 2007 y 2017. Esta información servirá para poder generar un conocimiento base de especies como monitores de cambios ambientales en LT.

Antecedentes.

Laguna de Términos, Campeche, México

La Laguna de Términos en el estado de Campeche, es la laguna costera más grande de México. El Área de Protección de Flora y Fauna comprende una superficie de 1,622 km² que corresponde al cuerpo de agua de la laguna (Villalobos-Zapata *et al.*, 2010) (Fig. 1). Laguna de Términos está influenciada por regímenes climáticos en la escala anual: época de secas de febrero a mayo, de lluvias de junio a finales de septiembre y de nortes (vientos fríos y secos) de octubre a marzo (Ayala *et al.*, 1998). De acuerdo con la clasificación propuesta por Yañez- Arancibia desde 1988, la laguna se divide en 4 zonas: en las zonas 1 y 3 se presentan manglares ribereños y son representativos de los sistemas fluvio-lagunares por la influencia de los ríos asociados a las subcuencas hidrográficas de LT. En contraste, la zona 2 se ve influenciada por el aporte de aguas marinas que entran al sistema por la boca Puerto Real que se caracteriza por presentar hábitat de pastos marinos con praderas de *Thalassia testudinum* en su mayoría. La zona 4 es la más profunda y es básicamente el canal de circulación dominado por corrientes que comunica el flujo desde la Boca de Puerto Real a la zona de drenaje de la laguna a través de Boca del Carmen (Yañez-Arancibia *et al.* 1988)..



Figura 1. Laguna de Términos, Campeche, dividida en 4 zonas con diferentes características abióticas y ubicación de las 17 estaciones de muestreo.

Dentro de la zona sur del Golfo de México, LT presenta una gran diversidad de servicios económicos y ecosistémicos, razón por la que ha sido objeto de estudios pesqueros, ambientales, de manejo, entre otros, principalmente por su alta abundancia de recursos naturales (García *et al.*, 2004). Laguna de Términos representa un pilar básico para la producción pesquera del estado de Campeche, mientras que, desde un enfoque ecológico, es considerada una zona de desove y crianza para diferentes poblaciones (Yañez *et al.*, 1991; Yañez *et al.*, 1993; Ramos *et al.*, 2006; Ayala *et al.*, 2012).

Sin embargo, el impacto antropogénico que ha tenido la laguna, principalmente por parte de las actividades agropecuarias aledañas a las subcuencas, se ha manifestado con altas concentraciones de contaminantes de hidrocarburos clorados como el DDT (dicloro-difenil-tricoloetano) y PCB (bifenilos policlorados), aunque no se encuentran en altas concentraciones de acuerdo a la NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente y la NOM-133-SEMARNAT-2015 para protección ambiental-Bifenilos Policlorados (BPCs), sí están presentes tanto en la biota como en los sedimentos, por lo que se deben seguir realizando estudios para el monitoreo de contaminantes persistentes en la laguna (Carvalho *et al.*, 2009).

A partir de 1980 y hasta 2010 se reportan cambios en las fuentes orgánicas de los sedimentos y una pérdida de casi el 50% de cobertura en las praderas de pastos marinos, principalmente dentro de la zona 2 y 3, este es un punto importante puesto que las praderas de pastos marinos son hábitats críticos de zonas de refugio, alimentación y reproducción en LT (Romo, 2013). Existe la posibilidad de que esta drástica disminución en los últimos años se deba a una relación con los valores bajos de salinidad y transparencia en esas zonas de la laguna, puesto que estas praderas de pastos marinos están constituidas principalmente de la especie *T.*

testudinum, la cual requiere condiciones de alta salinidad y transparencia (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1983; Raz *et al.*, 2000; Herrera *et al.*, 2011).

Los cambios antes mencionados pudieran estar influenciando un cambio en la biodiversidad íctica de LT, ya que se ha reportado una disminución de la biodiversidad de 1980 al 2010, con un aumento en la presencia de especies de condiciones marinas como las mojarra de la familia Gerreidae (mojarra), y una disminución de especies como bagres, corvinas, entre otros. Esto indica que evidentemente existe una mayor presencia de aguas con condiciones marinas en las zonas donde ha disminuido el pasto marino, modificando el hábitat y desplazando especies que son sustituidas por peces de condiciones más marinas en los espacios dejados por las especies desplazadas o perdedoras (Villegier, 2010).

Ante estos cambios, Villegier (2010) realizó comparaciones de la comunidad íctica entre el año de 1980 y 1988, encontró que algunas especies son favorecidas por la modificación del hábitat, incrementando su abundancia y a su vez causando una disminución en la diversidad de especies, esto debido a que hay especies más tolerantes a cambios bruscos en el ecosistema, un ejemplo de esto es *Sphoeroides testudineus*, que de 1980 a 1988 registró un incremento en su biomasa con una consecuente disminución de abundancia de *Ariopsis felis* asociada a la pérdida de cobertura de pasto marino en el mismo periodo de tiempo.

Una parte importante que controla la dinámica de la laguna y los cambios tanto en temperatura como en salinidad es el aporte de agua dulce por la descarga de 4 ríos de las subcuencas hidrográficas aledañas a LT. El río Palizada se localiza entre los 18°29'00"N, 91°44'W y 18°29'04"N 91°51'W, influencia de manera significativa a la denominada zona 1 dentro de la laguna. Es uno de los tributarios del río Usumacinta y tiene una descarga de $11.9 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, siendo el río con mayor descarga en LT (Ramos *et al.*, 2006). El río Candelaria, con una descarga de 35.09 m³/s, desemboca en la Laguna de Panlau, y los ríos Chumpan y Mamantel con una descarga de 1.67 m³/s, ubicados en la parte sur cercanos a la zona 3 de la laguna (Fig. 1), no tienen una descarga tan alta y constante como Palizada. Fichez *et al.* (2016) reportan que la variación de la salinidad en LT es producto de la

descarga de los ríos de las subcuencas hidrográficas. En 1980, el valor de salinidad en la zona 1 (influenciada por el río Palizada) fue de 21 ups y para el 2011 se registró un incremento a 24 ups. En contraste, en la zona 2 (más cercana a la boca de Puerto Real dentro de la laguna) con una clara influencia oceánica, se registraron hasta 31 ups.

Distribución espacial de *S. lanceolatus* y *E. gula* en la Laguna de Términos.

S. lanceolatus comúnmente llamada “corvinilla”, es una especie de la familia Sciaenidae clasificada como eurihalina de hábitos costero-marinos que llega a penetrar en estos sistemas fluvio-lagunares, aunque se considera una especie residente durante todo el año en LT (Ayala *et al.*, 2006). Su dieta consiste principalmente de organismos vertebrados de menor tamaño como copépodos y se alimenta también de detritos. Es una especie dominante en LT, siendo más abundante durante las épocas de secas (marzo). La talla de primera madurez sexual la alcanza a los 9.2 cm, algunos autores señalan que tiene desoves continuos a lo largo del año (Yañez *et al.*, 1988).

E. gula comúnmente llamada “mojarrita plateada” es una especie dominante de la familia Gerreidae que reside durante todo el año en LT, su dieta está compuesta por detritos, algas y ostrácodos. *E. gula* es una especie cuya distribución se concentra más en la zona 2 de LT (influenciada por la entrada de agua marina por Boca Puerto Real) principalmente durante la temporada de lluvias en los meses de julio y agosto. Dentro de esta zona se reportan valores de temperatura y salinidad que van de 27-28°C y 32-36 ups respectivamente (Ramos-Miranda *et al.*, 2006). *E. gula* es una especie dominante que se encuentra en altas densidades, sin embargo, ha ido en decremento en las últimas tres décadas. En 1980 se reportan densidades de 3673 individuos abarcando toda la laguna, mientras que para el año 2002 se reportaron densidades de 1395 individuos (Yañez *et al.*, 1988, Ramos *et al.*, 2006).

La importancia de elegir especies residentes todo el año es debido a que se pretende obtener la señal isotópica más fidedigna de LT. En un estudio realizado a

partir de una recopilación de rasgos funcionales y atributos biológicos de especies dominantes para determinar el comportamiento de permanencia de las especies en los años 1980, 1997 y 2011 en LT, se comprobó que *S. lanceolatus* y *E. gula* son especies que mantienen una presencia constante ante factores de cambios ambientales como la salinidad (Sirot *et al.*, 2015)

Relación entre el valor teórico de $\delta^{18}\text{O}$ con la temperatura observada y su validación en otolitos.

Diversos estudios han utilizado la composición química de los otolitos como trazadores naturales para determinar cambios en la función de las comunidades de peces, esto debido a que los otolitos fijan cambios de los elementos químicos debidos a variaciones de los factores fisicoquímicos del medio. Los otolitos son registros inertes donde quedan depositados permanentemente los cambios químicos reflejando así las condiciones en las que se desarrollan los peces (Campana, 1999).

Rowell *et al.* (2008) realizaron una validación de la relación entre la temperatura y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en el agua y en los otolitos del pez *Totoaba macdonaldi*, para determinar si el hábitat en el que se encontraba era utilizado como área de crianza. Los resultados del estudio mostraron valores de $\delta^{18}\text{O}$ de: -1.32‰ a -4.41‰ en el año 2005. Estos valores contrastan con valores de -0.38‰ a -1.22‰ para el año 1935. Esto es después de que ocurriera el represamiento del flujo del Río Colorado, por la construcción de las presas Hoover y Glenn Cannon en 1935 y 1955 respectivamente, lo que provocó una drástica disminución del gasto de agua de río al Alto Golfo de California. Este fenómeno se registró en forma de cambio en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos y del agua, concluyendo que la aportación del río era crucial para las condiciones propicias del hábitat de la totoaba durante su desarrollo y crecimiento.

Dicha validación es lograda empleando ecuaciones de equilibrio isotópico, por medio del valor $\delta^{18}\text{O}$ teórico de la aragonita en relación con la temperatura y la

salinidad en el medio. Esta relación está influenciada por la relación isotópica del oxígeno O^{18}/O^{16} del agua y se expresa como $\delta^{18}O_w$. En la ecuación de equilibrio isotópico se hace uso de los valores de salinidad que se miden en el medio (valores observados) y son sustituidos en la ecuación para obtener de manera directa el valor isotópico del agua de mar ($\delta^{18}O_w$). Este valor es comparado posteriormente con el valor isotópico de $\delta^{18}O_A$ de la aragonita fijada en los otolitos (S_a). Esto debido a que se ha demostrado que los valores de $\delta^{18}O$ son buenos proxies de la salinidad, relacionada con la temperatura histórica registrada por medio del fraccionamiento isotópico de las moléculas de oxígeno, experimentada durante la formación de los otolitos en la depositación del carbonato de calcio (Patterson *et al.*, 1993).

Los valores de $\delta^{18}O$ muestran una relación directa con la temperatura en ambientes marinos. Sin embargo, han sido pocos los estudios enfocados en la evaluación de las firmas isotópicas a través del gradiente de salinidad en estuarios o lagunas costeras. Kerr *et al.* (2007) realizaron una estimación de los valores de $\delta^{18}O$ en otolitos de la perca blanca (*Morone americana*) dentro del río Potomac en la Bahía de Chesapeake, Estados Unidos, durante los años 2001, 2005 y 2015. El estudio demostró una relación directa de la variabilidad del $\delta^{18}O$ y la variación de la salinidad del hábitat de individuos menores a un año. Lo anterior se demostró comparando un ambiente de agua dulce (FW), un ambiente oligohalino (OH) y un ambiente mesohalino (MH). Los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ fueron de: FW -7.07‰ a -7.83‰, OH de -6.89‰ a -7.58‰ y MH de -6.33‰ a -7.26‰. Estos valores se relacionan con el gradiente de salinidad; FW de 0.2‰ y una temperatura de 26°C, OH con salinidad de 2.2 ‰ y temperatura de 27°C y MH con 7.0 ‰ y temperatura de 29°C.

En el mismo contexto, Surge *et al.* (2005) analizaron los otolitos *Lapillus*, a diferencia de otros estudios en donde se utiliza el par de otolitos *Sagittae*, del bagre cabeza dura (*Ariopsis felis*), especie característica de ambientes estuarinos. Estos autores compararon los valores isotópicos promedio de $\delta^{18}O$ de otolitos de épocas actuales (del año 2001) con otolitos arqueológicos de los siglos 13 y 14. Esto con la finalidad de proporcionar información acerca de los cambios climáticos y ecológicos

en regiones costeras subtropicales y ambientes estuarinos, cercanos a la isla de Pine en Florida, E.U. Los otolitos de épocas modernas presentaron valores de $\delta^{18}\text{O}$ de -3.55‰ a 0.29‰ con temperaturas estimadas de 27 a 30°C, otolitos del periodo óptimo romano (RO) presentaron un rango de -1.80‰ a 0.84‰ con temperaturas estimadas de 17 a 20°C y otolitos de la pequeña edad de hielo (LIA) presentaron valores de -3.29‰ a 0.52‰ con temperaturas estimadas de hasta 40°C utilizando las ecuaciones propuestas por Patterson *et al.* (1993) y Thorrold *et al.* (1997). Concluyeron que las estimaciones de las temperaturas con las ecuaciones de equilibrio isotópicas propuestas por los autores ya mencionados, tienen una relación con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos, por lo que en las épocas más frías se registran valores más cercanos a 0 o positivos y en las temporadas de más humedad y condiciones de salinidad alta se registran valores más negativos.

En cuanto a la estimación de la relación en la depositación del carbonato de calcio en el medio y el fraccionamiento isotópico del $\delta^{18}\text{O}$ en la aragonita de los otolitos, algunos autores mencionan que no existe ningún factor de fraccionamiento cinético ni metabólico que intervenga durante la depositación del carbonato de calcio (Thorrold *et al.*, 1997). Sin embargo, las diferencias en el fraccionamiento isotópico pueden estar fundamentadas por la elección de ciertas ecuaciones de equilibrio isotópico. Asimismo, puede estar presente el efecto del proceso genético de cristalización en los otolitos, en el que la aragonita es remplazada por vaterita y calcita, aunque aún no está muy bien documentado este efecto en los otolitos (Strong *et al.*, 1986, Gauldie *et al.*, 1993, Brown *et al.*, 1999, Hoie *et al.*, 2004).

Al momento de seleccionar una ecuación de equilibrio isotópico para poder estimar temperaturas del pasado, se tienen que considerar algunos puntos importantes. Siempre es recomendable buscar la ecuación de equilibrio isotópico de estudios lo más cercanos a la región geográfica de la zona de estudio en cuestión, esto para poder obtener valores comparables con una desviación estándar baja. También es bueno considerar usar ecuaciones de estudios en los que hayan trabajado con especies similares, aunque no siempre se contará con ecuaciones tan específicas. Sin embargo, debido a la dificultad de encontrar información tan

detallada, es válido emplear ecuaciones en las que se demuestre que las especies alcancen el equilibrio isotópico con el medio marino para poder ser consideradas como buenos proxys para recrear información térmica y de salinidad (Thorrold *et al.*, 1997).

Algunos autores han utilizado ecuaciones basadas en organismos como foraminíferos y moluscos con estimaciones precisas de temperatura con una variación $< 1^{\circ}\text{C}$ en la temperatura observada con respecto a la temperatura estimada (Grossman *et al.*, 1986), a diferencia de algunas ecuaciones basadas en otolitos, las estimaciones de la temperatura son menos precisas con una variación de 4°C (Patterson *et al.*, 1993).

En cuanto a los efectos en fraccionamiento isotópico de la variación del $\delta^{18}\text{O}$ en los peces con respecto al crecimiento del otolito alcanzan más rápido el equilibrio isotópico de la aragonita con el medio, a diferencia de organismos de vida corta algunos autores mencionan que tienen periodos más cortos de depositación y no alcanzan el equilibrio isotópico. (McConnaughey *et al.*, 1989; Carpenter *et al.*, 1995; de Villiers *et al.*, 1995) siendo evidente que la temperatura es el mayor factor de variación para la depositación del carbonato en los otolitos, lo que hace variar el $\delta^{18}\text{O}$ (Thorrold *et al.*, 1997).

Justificación.

Laguna de Términos es un Área de Protección de Flora y Fauna, por lo que representa una fuente de servicios tanto económicos como ecosistémicos para la región del estado de Campeche. Por lo que es de gran importancia el monitoreo y la evaluación de registros “proxies” de los cambios climáticos en la escala decadal que pudieran explicar los cambios de biodiversidad íctica en LT.

Es importante elegir monitores ecológicos cuyas características sean: especies dominantes y residentes, que utilizan las distintas zonas de la Laguna de Términos como zonas de desove y crianza (zonas en donde los organismos se encuentran en fases larvares y juveniles). Los peces *Stellifer lanceolatus* (corvinilla)

y *Eucinostomus gula* (mojarrita plateada) son especies residentes adaptadas a oscilaciones de temperatura y salinidad, por lo que resultan elegibles como monitores de los cambios ambientales en tres diferentes periodos (1997, 2007 y 2017).

Es importante señalar que sólo con base en estudios sistemáticos, que se realizan durante diferentes años en periodo decadal, es posible generar colecciones de muestras biológicas (como otolitos) que no cambian con el tiempo. Estos periodos corresponden a una colección de otolitos preservados durante 30 años, como resultado de los estudios de monitoreo de LT realizados por instituto EPOMEX.

El análisis geoquímico de este tipo de muestras permite comparar distintas épocas, lo cual genera un mejor entendimiento del ecosistema en tiempo pasado, que sirve como base para planear investigaciones futuras.

Hipótesis

Bajo la premisa de que en LT han ocurrido algunos cambios en su estructura y función en los últimos 20 años, es posible estimar la variabilidad ambiental, en términos de temperatura y salinidad, con base a los valores $\delta^{18}\text{O}$ en registros de otolitos de especies dominantes y residentes todo el año (*S. lanceolatus* y *E. gula*). Al reconstruir el ambiente histórico marino de LT, se espera que la variabilidad de los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos de ambas especies sean buenos indicadores de cambios ambientales.

Objetivos.

Objetivo general.

- Reconstruir el ambiente histórico marino por medio de registros de temperatura y salinidad de la Laguna de Términos para los años 1997, 2007 y 2017, por medio del análisis del $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos de *S. lanceolatus* y *E. gula*.

Objetivos particulares.

- Analizar los valores *in situ* de temperatura y salinidad de LT de 1980 al 2016.
- Detectar diferencias en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre la parte superficial del otolito y el otolito completo.
- Obtener la relación del $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos de *S. lanceolatus* y *E. gula*, y los gastos promedio de la descarga de ríos del agua para los tres periodos (1997, 2007 y 2017).
- Comprobar el equilibrio isotópico ($\delta^{18}\text{O}$) de los otolitos para la obtención de la temperatura estimada.

Metodología.

Área de estudio.

Dentro de la Laguna de Términos (Fig. 2) desemboca una porción de la principal red hidrológica de la zona costera mexicana del Golfo de México, (ríos Mezcalapa, Usumacinta y Grijalva), los cuales han desarrollado un amplio complejo fluvio-lagunar, integrado por los sistemas: Pom-Atasta, Palizada-Del Este, Chumpán-Balchacah y Candelaria-Panlau (Villalobos-Zapata *et al.*, 2010). De acuerdo con Ayala *et al.*, (1998) las condiciones hidrológicas y morfológicas son resultado del clima característico de la zona que cuenta con tres épocas climáticas: secas (febrero-mayo), lluvias (junio-septiembre) y nortes (octubre –marzo).

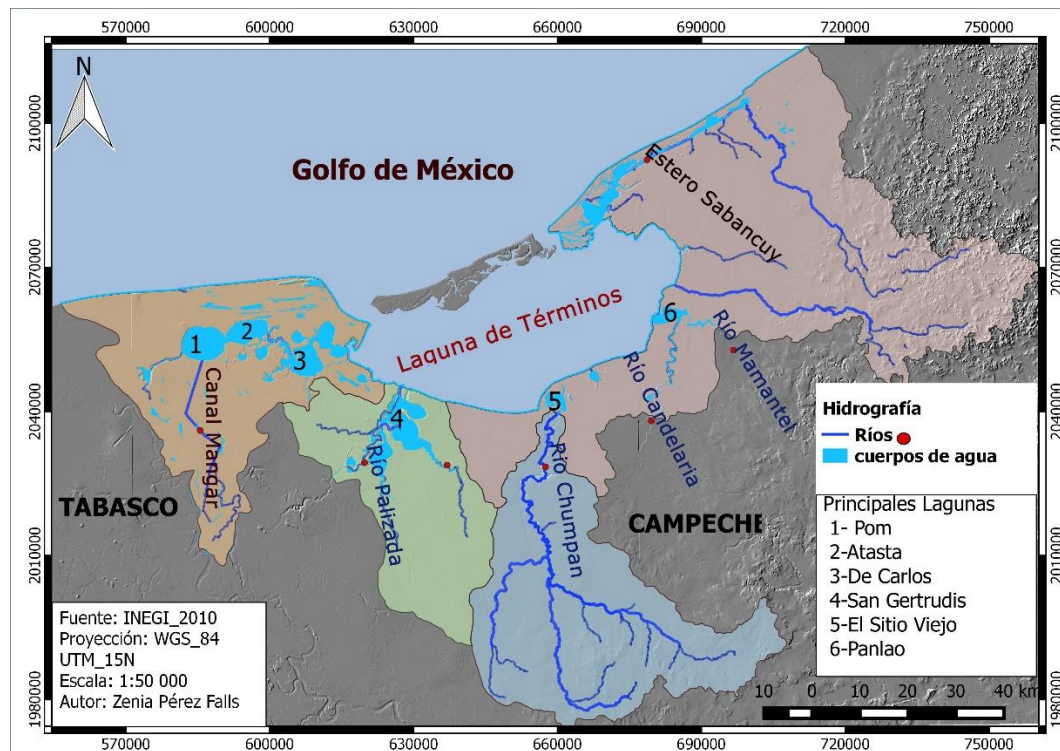


Figura 2. Laguna de Términos ubicada en el estado de Campeche, en la zona costera mexicana del Golfo de México, y las subcuencas hidrográficas aledañas: Palizada, Chumpan, Candelaria y Mamantel.

Trabajo de campo.

En relación con los años 1997 y 2007, se contó con la información en hojas de cálculo de Excel de valores de temperatura, salinidad y los otolitos debidamente extraídos y etiquetados por especie en el laboratorio de edad y crecimiento, del Instituto de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX) de la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM).

Se analizaron un total de 409 otolitos; *Stellifer lanceolatus* n=104, *Eucinostomus gula* n=96, *Bardiyella chrysoura* n=79, *Diapterus rhombeus* n=50, *Chaetodipterus faber* n=20, *Bardiyella rhonchus* n=60. Sin embargo, se contó sólo con la representación durante los años 1997, 2007 y 2017 de dos especies como son: *S. lanceolatus* y *E. gula*. Por lo que para el análisis se contó con una total de 200 pares de otolitos (*S. lanceolatus* n= 104 pares de otolitos y *E. gula* n= 96 pares de otolitos) y los valores de temperatura y salinidad medidos *in situ*.

Para la campaña de muestreo del 2016 por parte del proyecto Semarnat Conacyt “Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en otolitos de peces marinos presentes en el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Campeche: indicadores del cambio climático” con número 000000000263401, se realizaron muestreos mensuales (septiembre del 2016 a agosto del 2017). En cada muestreo, mediante el uso de un GPSmap 62s se ubicaron los 17 sitios de recolecta de las 4 zonas determinadas por Ramos *et al.*, (2006) durante 1997 y 2007. Para cada sitio se realizó una caracterización abiótica *in situ*, a partir de la siguiente metodología: con una sonda multiparamétrica marca Hydrolab H20 Surveyor 3 se obtuvieron datos de pH, oxígeno disuelto (mg/l), salinidad (UPS) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$); la profundidad con profundímetro EcoSonda digital de mano. (m), penetración de la luz con un disco de Sechii (m) y la transparencia (en % obtenida de la relación del valor de Sechii entre la profundidad X 100).

Una vez registrados los datos abióticos, se realizó la recolecta de ictiofauna con una red de arrastre de prueba camaronera “chango”, de 5 m de largo, 5 m de ancho, con una abertura de trabajo de 2.5 m, 1.7 cm de luz de malla y con puertas.

Cada arrastre duró 12 minutos a una velocidad de 2.5 nudos. Cabe resaltar que toda la metodología desarrollada para el 2016 fue en función de lo realizado por Ramos-Miranda *et al.*, (2006) para que los muestreos fueran comparables. Después de cada arrastre, los ejemplares capturados se guardaron en bolsas de plástico, etiquetados con las características del sitio de muestreo (día, hora, sitio de muestreo) y trasladados para su posterior análisis en el laboratorio de Ecología Trófica del Instituto EPOMEX-UACAM.

Trabajo de laboratorio.

Después de cada muestreo (datos de 2016 y 2017) cada organismo, se pesó (g), se midió la longitud total (cm) y se identificó a partir de las claves de Carpenter 2002, se extrajeron los otolitos *sagitta* del cráneo para posteriormente ser enjuagados con agua destilada y ser colectados en un ultrasonicador con el fin de eliminar residuos de tejido y sangre, por último, los otolitos fueron secados. A los otolitos de la especie *S. lanceolatus* se les realizó un corte con un micro-taladro de alta precisión (Merchantek Micromil) con una broca de 1.00 mm, en la parte más superficial del otolito, para comparar la última etapa de vida del pez contra el otolito completo. Cabe resaltar que en la especie *E. gula* debido al tamaño diminuto de los otolitos no se pudo hacer esta comparación puesto que se dificultaba cortar la parte superficial del otolito poniendo en riesgo la integridad de la muestra.

El polvo obtenido de cada barreno realizado se recolectó y pulverizó con un mortero de ágata para obtener un polvo homogéneo y con una micro balanza analítica (Metler Toledo con precisión de ± 0.0001 g) se pesaron 50 μ g de carbonato, para posteriormente depositarlos en viales sellados tipo Exentainer. Para el análisis de $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos, a cada vial Exentainer con muestra de carbonato se le inyectó con helio durante cinco minutos con el objetivo de desplazar todo el gas de origen atmosférico y evitar así valores erróneos en la medición isotópica (Sánchez, 2011). Transcurrido este tiempo, se adicionó ácido fosfórico a cada muestra para provocar la disolución de carbonatos y la liberación de oxígeno proveniente de la matriz de aragonita del otolito (Sánchez, 2011). Con el fin de favorecer la reacción

del ácido con el carbonato de calcio, las muestras permanecieron 24 horas a una temperatura aproximada de 72°C. Para el análisis isotópico se utilizó como estándar el NBS-19, aceptado por el National Bureau of Standards con un valor de $\delta^{18}\text{O}$ de -2.2‰ y $\delta^{13}\text{C}$ de 1.95‰ (vs PDB). La precisión analítica fue <0.4‰ en $\delta^{18}\text{O}$.

Para el análisis isotópico de las muestras de otolitos se empleó un espectrómetro de masas (Delta V Plus de Thermo Electron) de flujo continuo acoplado a un analizador elemental (Elemental Combustion System Costech Instruments) en el LESMA-CICIMAR. Los estándares utilizados en la calibración del espectrómetro para $\delta^{13}\text{C}$ (‰) fueron CO_2 (99.8%) con referencia al estándar internacional de V-PDB igual a -43.85‰. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ se calcularon a partir de las razones isotópicas medidas en la muestra y la de los estándares mediante la siguiente fórmula (DeNiro *et al.*, 1978): $\delta^{18}\text{O}$ (‰) = [(R muestra/R estándar)-1] x 1000. Donde: R muestra = Proporción entre el isótopo pesado y el ligero $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, R estándar = Valor de NBS-19, $\delta^{18}\text{O}$ (otolito).

Trabajo de gabinete.

Se analizó el comportamiento de los valores de temperatura y salinidad a partir de las bases de datos proporcionadas por el Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México “EPOMEX” de estudios realizados a partir del año 1980 hasta el año 2017, con la finalidad de detectar un posible aumento de estas variables en los últimos 30 años.

De acuerdo a las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, los datos de temperatura y salinidad tienen una distribución normal y homocedasticidad de varianzas, por lo que se les aplicó un ANDEVA con la finalidad de detectar diferencias entre años, en el caso de detectar diferencias significativas, se realizó una prueba a posteriori de Tukey para determinar entre que años las diferencias son significativas con el programa STATISTICA.

El ANDEVA realizado a los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de 46 bandas superficiales vs 62 otolitos completos no mostró diferencias significativas ($p = 0.10$), por lo que el otolito completo y la parte superficial del otolito estarían representando el mismo periodo

de tiempo de aproximadamente 1 o < 2 años, razón por la cual se utilizaron los otolitos completos de ambas especies en los análisis subsecuentes.

Se consideró el hecho de que los otolitos representaran un periodo de tiempo de no más de un año. Para *S. lanceolatus* se utilizaron otolitos <9 cm, debido a que alcanza la primera fase de madurez sexual a los 9 cm y de *E. gula* <11cm de acuerdo con lo reportado (Ayala, 2006; Ramos *et al.*, 2009)

Para el análisis de datos de las muestras de otolitos se agruparon por categorías como: años (1997, 2007 y 2017) y zonas (1, 2, 3 y 4). Se realizaron ANDEVAS para determinar si existían diferencias significativas en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de ambas especies entre años y entre zonas, esto debido a que los valores $\delta^{18}\text{O}$ mostraron tener una distribución normal de acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk y homocedasticidad de varianzas de acuerdo con la prueba de Levene. En caso de detectar diferencias significativas, se realizó una prueba a posteriori de Tukey para determinar entre que años y zonas las diferencias son significativas con el programa de STATISTICA.

Se utilizaron los datos de las bases de CONAGUA de los caudales acumulados anuales de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpan de los años 1995-2012, para graficar el comportamiento del aporte de los ríos a LT y ver su posible relación con los valores de $\delta^{18}\text{O}$.

Para identificar si los otolitos de *S. lanceolatus* y *E. gula* se forman en equilibrio isotópico con el medio, análogo al valor teórico de la aragonita en relación con la temperatura y la salinidad de una región dada. Se calculó el valor de $\delta^{18}\text{O}_w$ (relación isotópica del oxígeno en agua de mar) substituyendo los valores promedio anuales de salinidad (S) observada en LT, dentro de la ecuación $\delta^{18}\text{O}_w = 0.13 \cdot S + 2.70$ propuesta por Surge *et al.* (2005). Cabe señalar que la ecuación se utilizó para validar los registros de otolitos de una especie con condiciones estuarinas (*Ariopsis felis*) de diferentes periodos climáticos, en donde alcanzan el equilibrio isotópico de la aragonita en el medio.

Posteriormente utilizando las ecuaciones propuestas por Bemis *et al.* (1998): 1): $\delta^{18}\text{O}$ aragonita = $14.9 - 4.8 \cdot T^{\circ}\text{C} + \delta^{18}\text{O}_w$, y (2) $\delta^{18}\text{O}$ aragonita = $16.9 - 5.17 \cdot T^{\circ}\text{C} + \delta^{18}\text{O}_w$. Donde $\delta^{18}\text{O}$ aragonita es el valor isotópico teórico de la aragonita en el medio en relación con la temperatura y la salinidad que está influenciada por la composición isotópica del oxígeno del agua expresada como $\delta^{18}\text{O}_w$.

Finalmente, para este análisis se utilizaron sólo los datos de salinidad de la zona 1 y la zona 2 durante 1997, 2011 y 2017, para compararlos con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos en *S. lanceolatus* capturados dentro de la zona 1 y de *E. gula* de la zona 2, para observar si se encuentran en un equilibrio isotópico el valor de $\delta^{18}\text{O}$ aragonita en el medio y de $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos.

Resultados.

La temperatura superficial del mar promedio, desviación estándar, mínimo y máximo para 1980, 1997, 2007, 2011 y 2017 en la LT es mostrada en la Tabla 1. La TSM aumentó 2°C de 1986 a 2017, con el valor máximo en el 2017 (Fig. 3).

El ANDEVA realizado entre la temperatura promedio y los años mostro diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$. La prueba a posteriori de Tukey mostro que el año 1980 es significativamente diferente a los años 1997($p=0.013$), 2011($p=0.00$) y 2017($p=0.01$). De igual manera el año 2017 muestra diferencias significativas en los años 1980($p=0.00$), 1997($p=0.04$) y 2007($p=0.00$)

Tabla 1. Valores promedio, desviación estándar, mínimo y máximo de la temperatura superficial de mar para 1980, 1997, 2007, 2011 y 2017 en Laguna de Términos, Campeche.

Año	Promedio C°	±DE.	Mín	Máx
1980	27	3.18	20	32
1997	28	1.86	24	32
2007	27	1.23	21	32
2011	27	2.95	19	32
2017	29	2.53	23	39

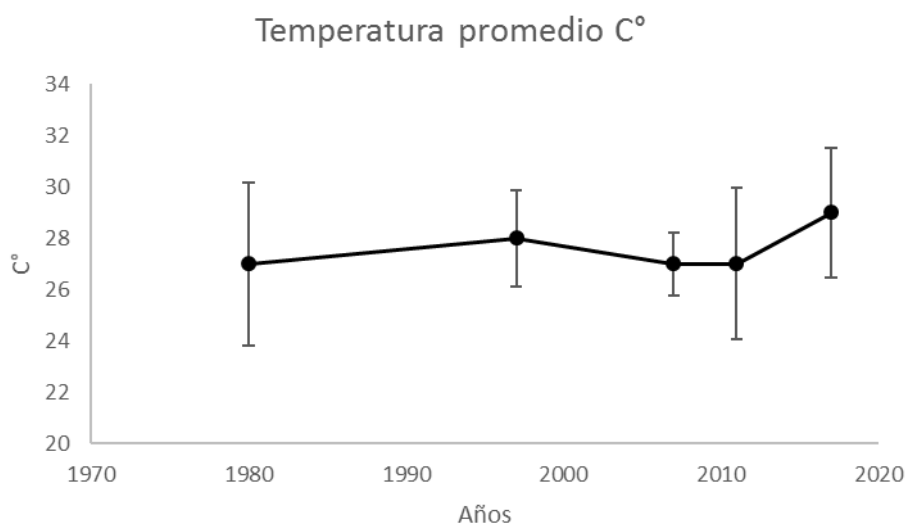


Figura 3. Gráfica de la temperatura y su desviación estándar observada desde 1980 al 2017 en Laguna de Términos, datos proporcionados por el Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografías del Golfo de México (las líneas representan $\pm$ DE).

Los valores de salinidad promedio, desviación estándar, mínimo y máximo para 1980, 1997, 2007, 2011 y 2017 en la LT son mostrados en la Tabla 2. La salinidad varió de 27 ups en 1980 a 31 ups en 2017, lo que registra un aumento de 4 ups de 1980 a 2017 (Fig.4).

El ANDEVA realizado para los datos anuales promedio de salinidad mostraron un valor de $p < 0.05$, por medio de la prueba a posteriori de Tukey se detecta que el año 1980 es significativamente diferente a los años 1997($p=0.01$), 2007($p=0.00$) y 2017($p=0.00$). Por otro lado, el año 2017 presenta diferencias significativas con los años 1980($p=0.00$), 1997($p=0.02$), 2007($p=0.00$) y 2011($p=0.01$)

Tabla 2. Valores promedio, desviación estándar, mínimo y máximo de la salinidad de 1980 al 2017 en Laguna de Términos, Campeche.

Año	Promedio ups	$\pm$DE	Mín	Máx
1980	27	8.56	10	38
1997	27	8.13	11	39
2007	26	7.26	0	42
2011	28	7.88	0	42
2017	31	6.08	12	43

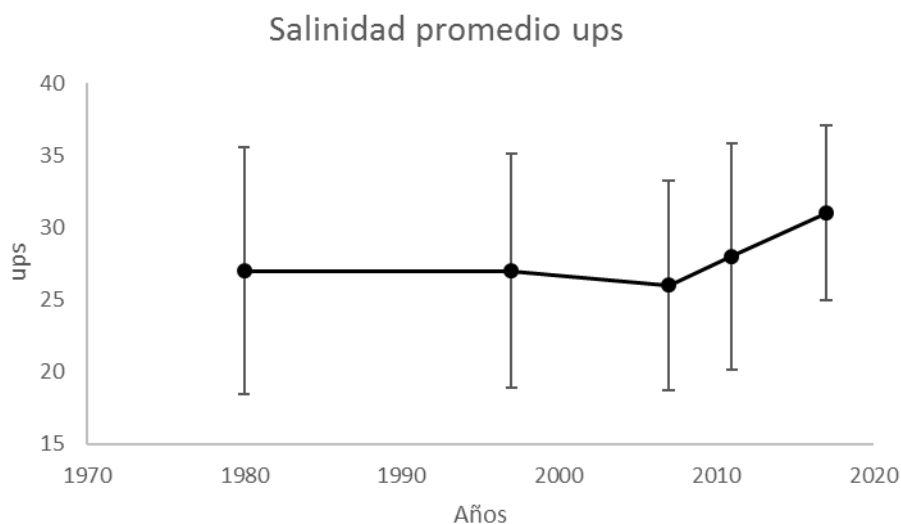


Figura 4. Gráfica de la salinidad observada desde 1980 al 2017 en Laguna de Términos, datos proporcionados por el Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografías del Golfo de México (las líneas representan $\pm$ DE).

Los valores promedio de temperatura superficial del mar por zonas en la LT para los años 1997, 1999, 2011 y 2017 (Tabla 3), muestran que en la zona 1 hay un incremento de hasta 2°C entre 1997 y 2017. Esto contrasta, con las zonas 2, 3 y 4 en donde sólo varía 1°C (Fig. 5).

Los valores de salinidad promedio por zonas (Tabla 4) para los años 1997, 1999, 2011 y 2017, registraron un aumento de 9 ups en la zona 1, en la zona 2 hay un aumento de 4 ups y particularmente en 2017 alcanzó valores de 36 ups, mientras que en zona 3 se registró un aumento de 2 ups y en zona 4, 6 ups (Fig. 6).

Tabla 3. Valores promedio de temperatura por zona de los años 1997, 1999, 2011 y 2017 de la Laguna de Términos, Campeche.

Temperatura	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1997	25.8	27.3	27.5	27.3
1999	28.0	27.7	28.3	28.0
2011	27.3	28.3	26.7	26.7
2017	28.5	28.1	29.4	29.4

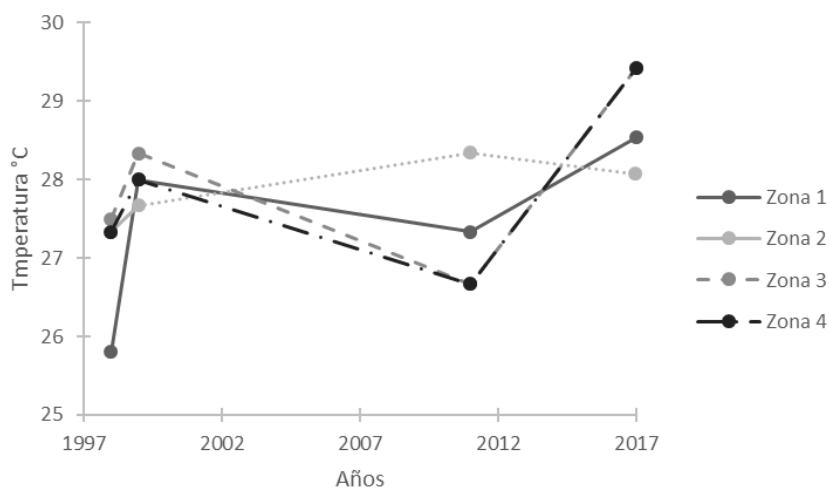


Figura 5. Gráfica de los valores promedio de temperatura observada desde 1997 al 2017, de estudios realizados en la Laguna de Términos, Campeche.

Tabla 4. Valores promedio de salinidad por zona de los años 1997, 1999, 2011 y 2017 de la Laguna de Términos, Campeche.

Salinidad	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1997	23.1	31.7	25.9	26.0
1999	20.3	31.7	25.3	28.0
2011	25.7	32.0	28.0	29.7
2017	31.5	36.5	28.5	32.4

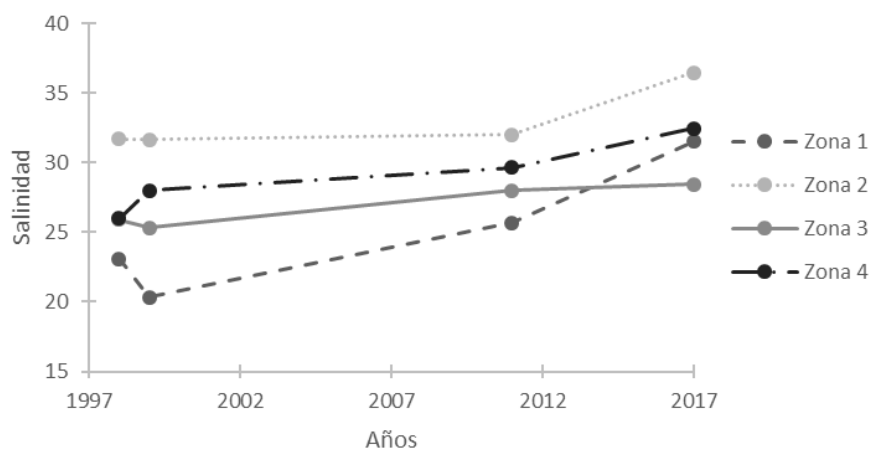


Figura 6. Gráfica de los valores promedio de salinidad observada desde 1997 al 2017, de estudios realizados en la Laguna de Términos, Campeche.

Centrándose en lo reportado en la literatura, que *S. lanceolatus* se distribuye en la zona 1, en la cual los valores de temperatura fluctuaron de 25.8 °C en 1997 a 28.5°C en 2017 y la salinidad incrementó de 23.1 ups a 31.5 ups.

La zona 2, en la que *E. gula* se distribuye principalmente, ha tenido un incremento en la temperatura de 27.3°C en 1997 a 28.1 °C en 2017 y con salinidades de 31.7 ups en 1997 a 36.5 ups en 2017, lo que denota que es una zona con valores de salinidad más altos que la zona 1.

Stellifer lanceolatus.

Los valores isotópicos promedio, desviación estándar, mínimo y máximo de $\delta^{18}\text{O}$ (Tabla 5) de los otolitos de *S. lanceolatus* tienen una diferencia de -0.33‰ entre 1997 y 2017, mostrando valores de -1.44 ‰ (± 0.91) en el año de 1997, -0.96‰ (± 0.52) en 2007 y -1.11‰ (± 0.44) en 2017 (Fig. 7)

Tabla 5. Valores isotópicos promedio, desviación estándar, mínimo y máximo para el $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *S. lanceolatus* en Laguna de Términos, Campeche.

Años	$\delta^{18}\text{O}$	$\pm\text{DE}$	Min.	Max
1997	-1.44	0.91	-0.01	-3.15
2007	-0.96	0.52	-0.04	-2.26
2017	-1.11	0.44	-0.74	-2.08

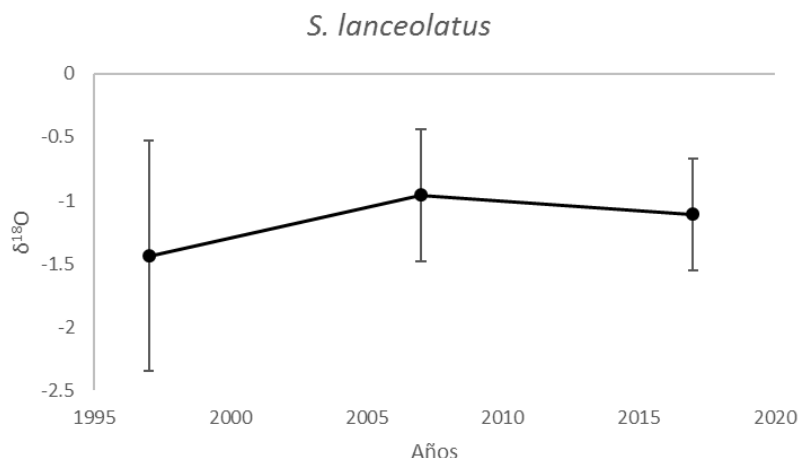


Figura 7. Gráfica de valores $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de los otolitos de *S. lanceolatus* en LT, Campeche.

Los resultados del ANDEVA mostraron diferencias significativas en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos entre años ($p < 0.05$). La prueba a posteriori de Tukey mostró que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de 1997 son diferentes estadísticamente comparado con los otolitos de los años 2007 ($p < 0.05$).

En la tabla 6 se muestran los valores de $\delta^{18}\text{O}$ por zonas de los otolitos de *S. lanceolatus*. En la zona 1, los valores son -1.03‰ en 1997, -1.01‰ en 2007 y -1.02‰ en 2017. Los valores isotópicos de 1997 a 2017 tiene una diferencia de 0.01‰ (Fig. 8).

Tabla 6. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ y su desviación estándar de los otolitos de *S. lanceolatus* separados por zonas en Laguna de Términos, Campeche.

Años	Zona 1	±DE	Zona 2	±DE	Zona 3	±DE	Zona 4	±DE
1997	-1.03	0.63	-1.44	0.86	-	-	-0.7	0.01
2007	-1.01	0.67	-0.94	0.63	-1.57	0.63	-0.76	0.33
2017	-1.02	0.83	-	-	-	-	-	-

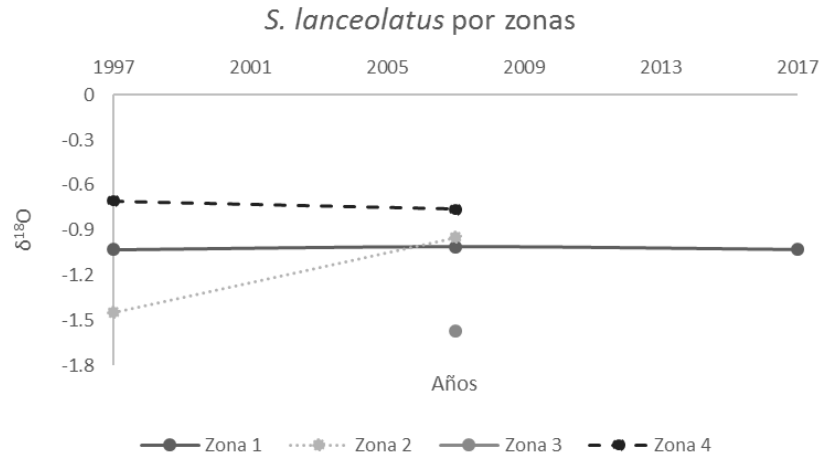


Figura 8. Gráfica de valores de $\delta^{18}\text{O}$ promedio por zonas y años de los otolitos de *S. lanceolatus* en Laguna de Términos, Campeche.

El ANDEVA reveló que existen diferencias significativas en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *S. lanceolatus* entre zonas ($p < 0.05$). La prueba de Tukey reveló que existen diferencias significativas entre la zona 1 y 2 ($p < 0.05$) y entre la zona 2 y 4 ($p < 0.05$).

Eucinostomus gula

Los valores isotópicos promedio, desviación estándar, mínimo y máximo de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *E. gula* (Tabla 7), tienen un fraccionamiento de -0.77‰ entre los años 1997 a 2017, con los valores más cercanos a 0 se registraron en 1997 y para 2017 se observaron valores más negativos. Los valores van de -1.52‰ (± 0.53) en el año de 1997, -1.97‰ (± 0.61) en 2007 y en 2017 se observan valores de -2.29‰ (± 0.63) (Fig. 9)

Tabla 7. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *E. gula* en Laguna de Términos, Campeche.

Año	$\delta^{18}\text{O}$	$\pm\text{DE}$	Mín.	Máx
1997	-1.52	0.53	-0.69	-2.29
2007	-1.97	0.72	-1.03	-3.75
2017	-2.29	0.61	-0.94	-3.39

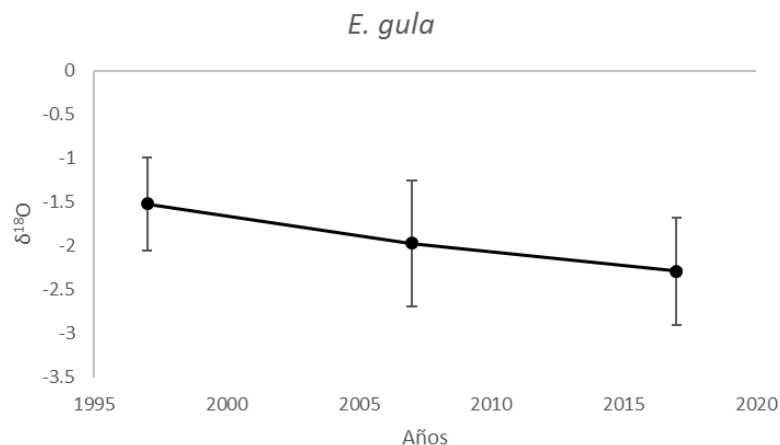


Figura 9. Gráfica de valores de $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de los otolitos de *E. gula* Laguna de Términos, Campeche.

Los resultados del ANDEVA no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre años en los los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *E. gula*.

Al observar los valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ de *E. gula* por zonas (Tabla 8), nuevamente son los otolitos de la zona 1 los que representan los 3 años. En 1997 presentan valores de -1.52‰ , en 2007 se fraccionan a -1.97‰ y en 2017 -1.66‰ . Sólo se tienen datos de 2007 y 2017 dentro de la zona 2, los cuales van de -1.81‰ en 2007 y en 2017 se hacen más negativos fraccionándose a -2.29‰ (Fig. 10).

Tabla 8. Valores isotópicos promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ y su desviación estándar por zonas de los otolitos de *E. gula* en Laguna de Términos, Campeche.

Años	Zona 1	±DE .	Zona 2	±DE .	Zona 3	±DE	Zona 4	±DE
1997	-1.52	0.53	-	-	-	-	-	-
2007	-1.97	0.37	-1.81	0.64	-	-	-	-
2017	-1.66	0.21	-2.29	0.73	-	-	-1.34	0.53

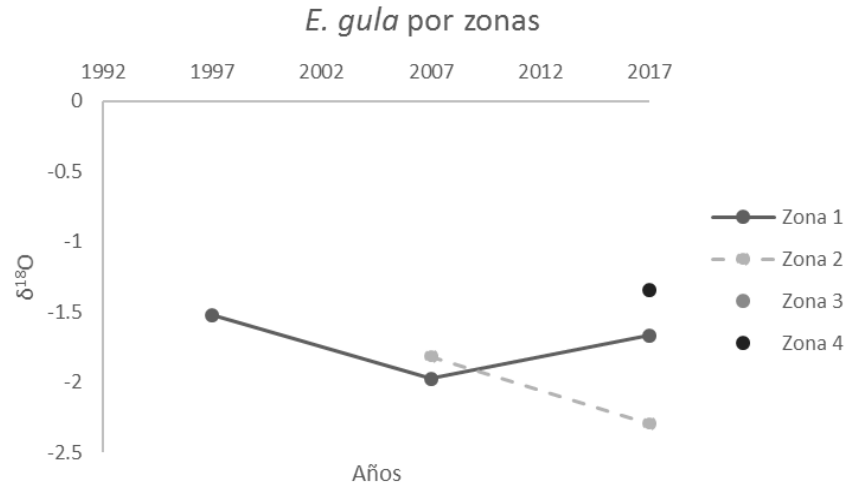


Figura 10. Gráfica de valores de $\delta^{18}\text{O}$ promedio por zonas y años de los otolitos de *E. gula* en Laguna de Términos, Campeche.

El ANDEVA de valores $\delta^{18}\text{O}$ promedio de los otolitos de *E. gula* por zonas, muestran diferencias significativas, entre la zona 1 y la zona 4 (prueba Tukey; $p < 0.05$).

En la Figura 11 se visualiza que ambas especies en el año de 1997 parten de una señal isotópica similar; *S. lanceolatus* teniendo una señal de -1.44‰ y *E. gula* con -1.52‰ , sin embargo, en los años 2007 y 2017 presentan tendencias contrarias, *S. lanceolatus* fraccionándose a valores más cercanos a 0 en 2017 de -1.11‰ y *E. gula* fraccionándose a valores más negativos -2.29‰ .

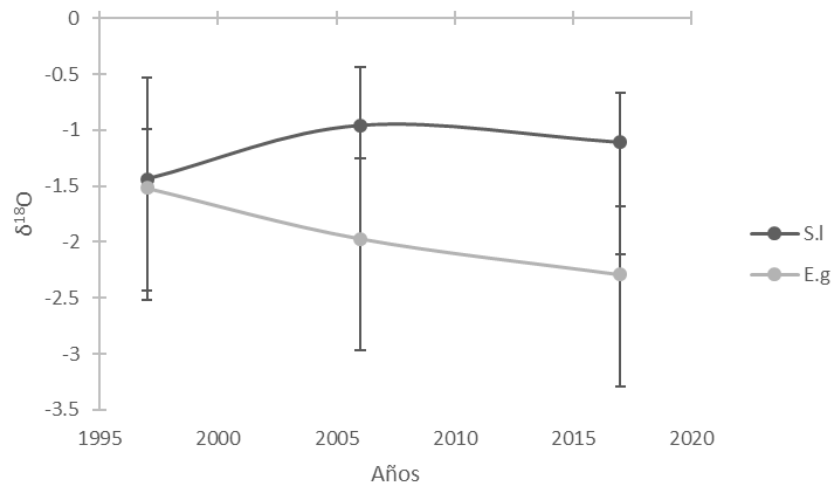


Figura 11. Grafica de los Valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de *S. lanceolatus* y *E. gula* en Laguna de Términos, Campeche (las líneas representan $\pm\text{DE}$).

Caudal de los ríos.

De los 4 ríos (Palizada, Candelaria, Chumpan y Mamantel) descargan sus aguas dentro de la Laguna de Términos, el río Palizada descargó el mayor caudal en el año 2013 con 291 $\text{m}^3/\text{s}/\text{año}$ y el menor caudal en el año 2009 con 154 $\text{m}^3/\text{s}/\text{año}$. El río Mamantel es el que menos caudal presenta con 5 $\text{m}^3/\text{s}/\text{año}$ durante todo el periodo analizado (1995-2014) (Fig. 12).

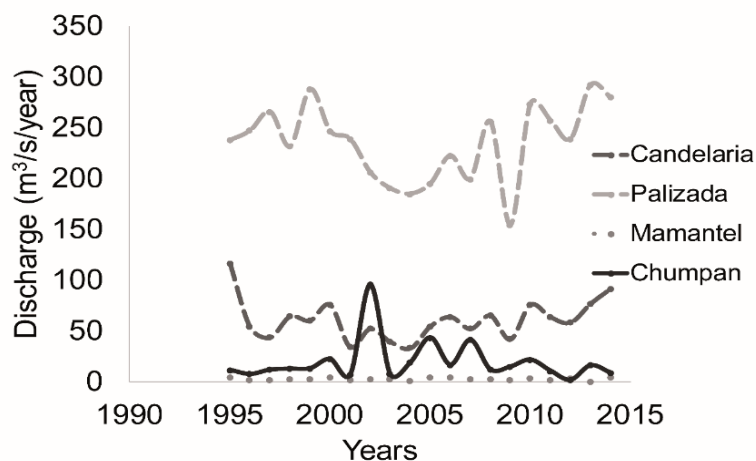


Figura 12. Caudal acumulado anual de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpan para los años 1995-2012 reportados por CONAGUA.

En los periodos de interés (1997, 2007 y 2017) (Fig. 13), se observa una tendencia similar al comportamiento de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del *E. gula* sobre todo en los organismos dentro de la zona 1, en donde el río Palizada en 2007 tiene un caudal de $199 \text{ m}^3/\text{s/año}$ y los organismos encontrados dentro de la zona 1 presentan los valores más negativos -1.97‰ (Fig. 10).

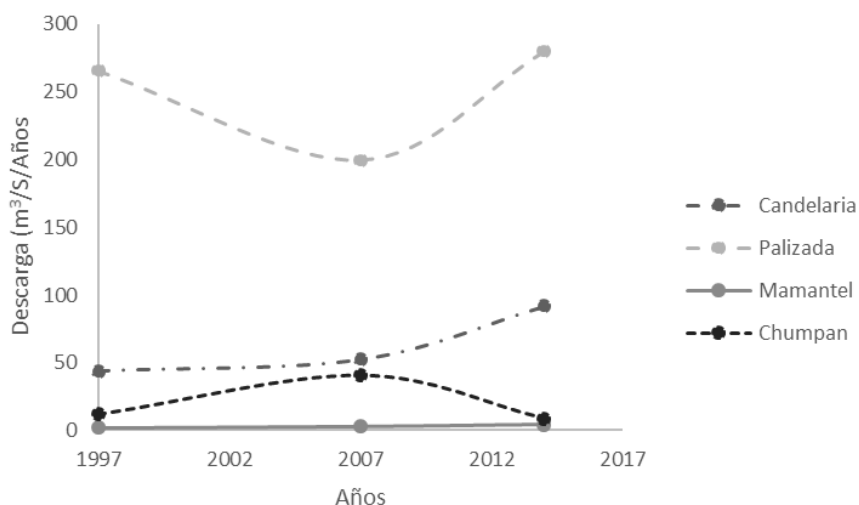


Figura 13. Caudal acumulado anual de los ríos Palizada, Candelaria, Mamantel y Chumpan para los años 1997, 2007 y 2014 reportados por la CONAGUA.

Retro cálculo de la temperatura superficial del mar.

Se obtuvieron los valores de la temperatura estimada (Tabla 9) despejando la temperatura de las 2 ecuaciones de equilibrio isotópico propuestas por Bemis *et al.* (1998) y se contrastaron con los valores de temperatura observada. La ecuación 1) se ajustó mejor a los datos de temperatura observada, los cuales tienen una variación de 1°C (Fig. 14).

Tabla 9. Valores anuales promedio de la temperatura observada y la temperatura estimada con las ecuaciones de equilibrio isotópico propuestas por Bemis *et al.* (1998) de la Laguna de Términos, Campeche

Año	TSM observada.	TSM Ec. 1	TSM Ec. 2
1997	28.0	27.5	25.1
2007	27.5	26.5	24.0
2017	29.1	30.3	27.8

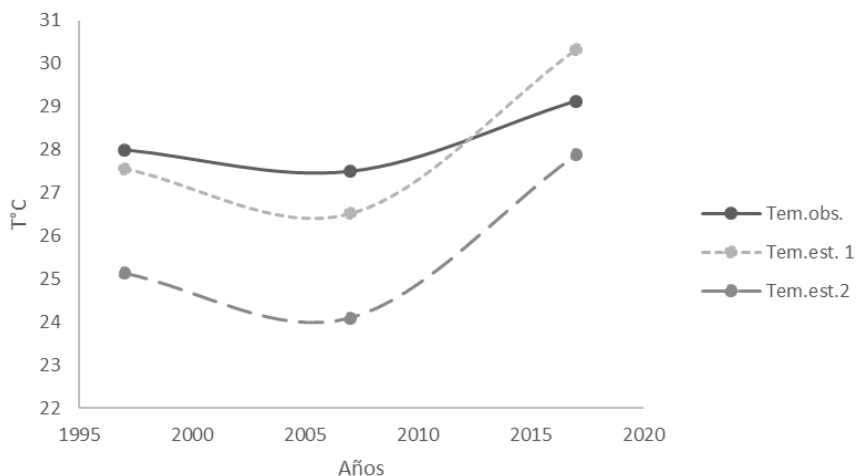


Figura 14. Valores promedios anuales de la temperatura superficial del mar observados y calculados en Laguna de Términos durante 1997, 2007 y 2017 con las ecuaciones de equilibrio propuestas por Bemis *et al.* (1998).

Equilibrio isotópico.

De acuerdo con las ecuaciones de Bemis *et al.* (1997), utilizadas para calcular el equilibrio isotópico de la aragonita en el medio a partir de los datos promedio anuales de temperatura y salinidad observados en la Laguna de Términos para los años 1997, 2007 y 2017 (Tabla 9), se observó que a partir de los datos de salinidad substituidos en la ecuación 2), al momento de graficar sobreponiendo los valores obtenidos de $\delta^{18}\text{O}$ de *S. lanceolatus* (Fig. 15) se visualiza una tendencia hacia un buen equilibrio isotópico, pero no así en *E. gula*, obteniendo valores de -1.84‰ en 1997, -1.10‰ en 2007 y -1.18‰ en 2017 (Tabla 10) (Fig. 15 y 16)

Tabla 10. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *S. lanceolatus* y *E. gula* vs valores estimados con las ecuaciones de equilibrio isotópico.

Año	$\delta^{18}\text{O}$ S.l.	$\delta^{18}\text{O}$ E.g.	Ec. 1	Ec. 2
1997	-1.44	-1.52	-2.24	-1.84
2007	-0.96	-1.97	-1.50	-1.10
2017	-1.11	-2.29	-1.61	-1.18

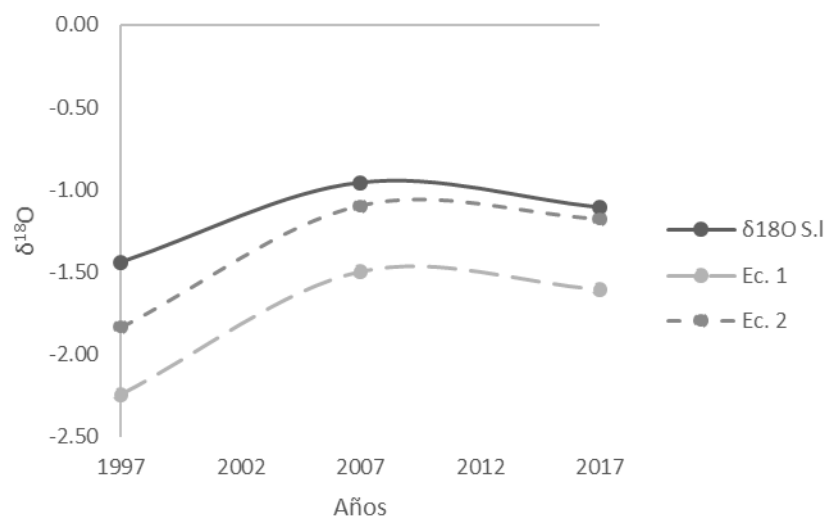


Figura 15. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *S. lanceolatus* vs valores estimados con las ecuaciones de equilibrio isotópico.

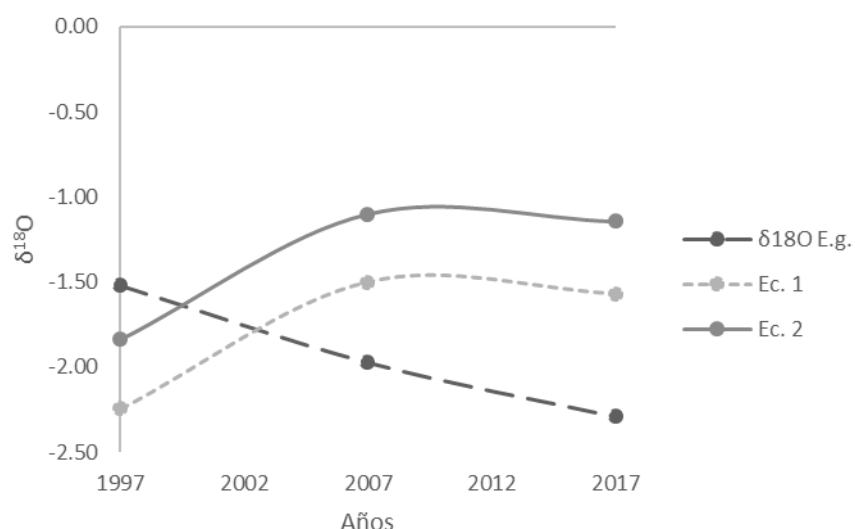


Figura 16. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *E. gula* vs valores estimados con las ecuaciones de equilibrio isotópico.

Al analizar los valores promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ para los años 1997, 2007 y 2017 en *S. lanceolatus* de otolitos capturados en la zona 1 y en *E. gula* de otolitos de la zona 2 (Tabla 13), no coincide en ningún punto con los valores teóricos calculados de estudios realizados en Laguna de Términos durante los años para los años 1997, 1999, 2011 y 2017 (Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Valores observados de temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) durante los años de 1997, 1999, 2011 y 2017 de las 4 zonas de la Laguna de Términos, Campeche.

Temperatura	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1997	26	27	28	27
1999	28	28	28	28
2011	27	28	27	27
2017	28	28	29	29

Tabla 12. Valores observados de salinidad superficial del mar durante los años de 1997, 1999, 2011 y 2017 de las 4 zonas de la Laguna de Términos, Campeche.

Salinidad	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1997	23	32	26	26
1999	20	32	25	28
2011	26	32	28	30
2017	32	36	28	32

Tabla 13. Valores $\delta^{18}\text{O}$ observados y estimados de *S. lanceolatus* de la zona 1 y *E. gula* de la zona 2

Años	$\delta^{18}\text{O}$ S.l.	Zona 1	$\delta^{18}\text{O}$ E. g.	Zona 2
1997	-1.03	-1.97	-1.52	-0.72
1999	-1.23	-	-1.97	-
2011	-	-1.95	-	-1.34
2017	-0.73	-1.44	-2.29	-1.64

Con las ecuaciones propuestas al trazar los valores teóricos obtenidos se tiene un buen ajuste a un equilibrio isotópico por lo que estas estructuras si pudieran haberse formado en la zona 1 para *S. lanceolatus* (Fig. 17) y en la zona 2 para *E. gula* (Fig. 18).

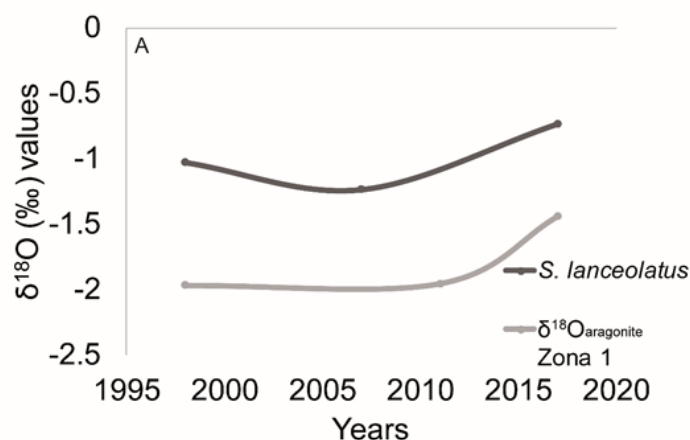


Figura 17. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *S. lanceolatus* de la zona 1 comparados con valores $\delta^{18}\text{O}$ estimados de la aragonita en la zona 1 en Laguna de Términos, Campeche.

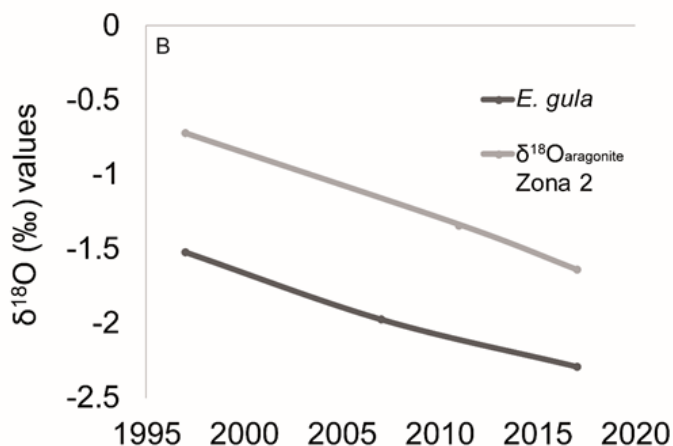


Figura 18. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados de *E. gula* de la zona 2 comparados con valores de $\delta^{18}\text{O}$ estimados de la aragonita en zona 2 en Laguna de Términos, Campeche.

Discusión.

El Golfo de México depende principalmente de dos actividades como son la extracción de hidrocarburos y la pesca. De acuerdo con diferentes autores (Romo, 2013; Ayala *et al.*, 2008; Ramos *et al.*, 2006), en los últimos 30 años, la Laguna de Términos ha presentado cambios en la cobertura de los autótrofos marinos y en la profundidad promedio de la laguna, teniendo como consecuencia cambios en la composición específica y el volumen de las capturas. Autores dedicados al estudio de la dinámica de LT coinciden con un cambio notable en los últimos años, señalando un aumento en la temperatura y salinidad. Ramos *et al.* (2006) reportan que en el periodo de 1980 a 1998, la temperatura superficial del mar mostró diferencias significativas. Señalan que los mayores valores de temperatura superficial del mar fueron en la temporada de lluvias, para países tropicales. Esto coincide con lo reportado, de que, existe un aumento de casi 2 °C en los valores anuales promedio de temperatura a partir de 1980 a 1999 y diferencias significativas en principalmente en los años recientes de 2017 y 2011 a los años del pasado de 1980 y 1997.

En cuanto a la salinidad, Sirot *et al.* (2015) señalaron un incremento notable y significativo entre 1980 y 2011, la salinidad cambio de 22 ups a 27 ups, con máximo de 38 ups. Ramos *et al.* (2006) reportan diferencias en la salinidad entre las distintas zonas en el interior de la laguna y años. Los mayores valores de salinidad se encontraron en zonas cercanas a las bocas de la laguna (zona 2) y en la zona 1 se caracterizó por condiciones estuarinas, donde se tuvieron los valores más bajos de salinidad. Debido al aporte constante de los sistemas fluvio-lagunar de Pom-Atasta y de la subcuenca hidrográfica del río Palizada, con una descargada constante y abundante durante todo el año.

A pesar de los cambios que han sido reportados en LT, en cuanto a los aumentos de temperatura y salinidad sobre todo en las diferencias significativas entre años, es posible que sean procesos cíclicos y regulatorios por parte de la laguna (Villalobos *et al.*, 2002). Desde 1950 se reportan oscilaciones en cuanto a la salinidad de la laguna con cambios de hipohalino a euhalino. Además, de las modificaciones tanto en estructura y función de la laguna por actividades antropogénicas durante los últimos años, algunos aspectos a resaltar han sido el incremento en las actividades agropecuarias adyacentes a LT (Kemp *et al.*, 2016).

Otro factor el que pudiera estar afectando la temperatura y salinidad de LT es la dinámica hidrológica de los patrones de corrientes y mareas por la intrusión de agua marina por la boca de Puerto Real, el efecto que tiene este movimiento de las aguas dentro de LT domina principalmente cerca de la zona 2, la zona más cercana a las bocas de LT (Contreras *et al.*, 2014). Otro factor sin duda que interactúa con el comportamiento, y depende principalmente de los aumentos y disminuciones de la salinidad, son las escorrentías que tienen las subcuencas hidrográficas que descargan sus aguas en la laguna, sobre todo este patrón se ve más marcado en la zona 1, la cual presenta los valores más bajos en salinidad, esto se debe principalmente al constante aporte del río Palizada.

A pesar del marcado aumento que ha tenido LT en sus valores de temperatura y salinidad en los últimos 30 años, algunos autores reportan ciclos de oscilación de estos parámetros en la laguna, el aporte constante de los ríos

adyacentes a LT es considerado como el principal factor responsable de la variación en cuanto a la salinidad, los resultados de esta investigación coinciden con Fichez *et al.* (2016) que sugieren como la principal causa de los cambios en la salinidad y temperatura superficial del mar los aportes de agua dulce en LT. Adicionalmente, las altas tasas de evaporación dentro de la laguna, por lo que no existe pruebas aún fehacientes de que exista un cambio climático en la laguna durante los últimos 30 años, sino que es un comportamiento cíclico y regulatorio, que depende de varios factores hidrológicos y antropogénicos en este cuerpo lagunar.

Una manera de buscar evidencias de un cambio ambiental, es por medio de otolitos, siendo estructuras calcáreas que forman parte del sistema audio receptor de los peces (Leta *et al.*, 1992), los cuales por el hecho de ser una matriz carbonatada se formara durante la depositación de los carbonatos en la laguna durante el crecimiento del pez; estos contienen concentraciones de isótopos de oxígeno que permiten inferir la temperatura a la que se depositó el carbonato de calcio en los diferentes anillos de crecimiento (Campana, 1999). Estos nos dicen que a valores bajos del isótopo de $\delta^{18}\text{O}$ es reflejo de temperaturas altas y viceversa.

La decisión de utilizar los otolitos completos durante este estudio fue debido a que no se encontraron diferencias significativas al comparar los valores $\delta^{18}\text{O}$ de la parte más superficial del otolito (el último período de vida del pez) y el otolito completo (promedio total de la vida del pez). Esta comparación solo fue posible realizarla en la especie *S. lanceolatus*. El tamaño del otolito de *E. gula* complicó el corte poniendo en riesgo la integridad del otolito completo

Aunque no se validó la periodicidad de formación de las marcas de los otolitos para estimar la edad de los organismos, bajo los fundamentos reportados por algunos autores para *S. lanceolatus*, consideramos que esta especie cumple la primera fase de madurez sexual alcanzando los 9.2 cm de longitud total, teniendo una tasa de mortalidad total (Z) de 1.68 años^{-1} y una mortalidad natural (M) de $1.10\text{-}0.90 \text{ años}^{-1}$ dentro de LT (Ayala, 2006; Ramos *et al.*, 2009). Por lo que asumimos que son registros de organismos en fases juveniles de aproximadamente entre 1 y 2 años, además de que LT es considerada como una zona de desove y crianza para

infinidad de especies que en su mayoría se encuentran en fases larvarias y juveniles (Yañez *et al.*, 1980).

Para la especie *E. gula* la primera fase de madurez sexual ocurre entre los 11 y 12 cm (Mexicano, 1999). Ayala (2006) menciona que *E. gula* presenta una mortalidad total de 2.03 y una mortalidad natural de 1.29 dentro de LT. Para *S. lanceolatus* se utilizaron otolitos < 9 cm y para *E. gula* < 11 cm, para reducir la variabilidad de los valores $\delta^{18}\text{O}$ de ambas especies.

Los valores promedio de $\delta^{18}\text{O}$ en *E. gula* en 1997, 2007 y 2017 coinciden con el incremento tanto en la temperatura como en la salinidad. A partir de 1997, los valores del $\delta^{18}\text{O}$ son más negativos, alcanzando valores de -2.29‰ en 2017. Los valores isotópicos promedio de $\delta^{18}\text{O}$ de *S. lanceolatus* por lo contrario, muestran tendencias contrarias a *E. gula*, manteniendo una estabilidad y con ligeros aumentos a valores de -1.11‰ más cercanos a 0 en 2007 y 2017. Rowell *et al.* (2008), mencionan que los peces que crecen en ambientes con temperaturas cálidas presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ más negativos debido a una mayor depositación de material carbonatado en los otolitos, aumentando la fracción de isotopos pesados de ^{18}O , que a comparación del ^{16}O este se fuga por efecto de la evaporación por altas temperaturas.

Los valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos durante este trabajo para ambas especies, tuvieron un intervalo entre -0.1‰ a -3.75‰, lo cual muestra las características de un ambiente costero lagunar, con valores cercanos a cero por condiciones estuarinas y también por condiciones con mayor presencia de agua de marina; es decir, valores más negativos, Rowell *et al.* (2008), reportaron valores similares en el Alto Golfo de California de -1.32‰ a -4.41‰ en el año 2005 después de las modificación y la disminución del aporte de agua dulce lo cual mantenía los valores isotópicos de -0.38‰ a -1.22‰ en 1935. Investigaciones realizadas en ambientes de agua río muestran valores mucho más negativos de -6.33‰ a -7.0‰ (Kerr *et al.*, 2007), esto debido a que el O^{16} es mayor en agua dulce lo que mantiene los valores más negativos como se observa en ambientes costero lagunares influenciados por agua dulce. Surge *et al.* (2005), reportan en un ambiente costero-

estuarino cercano a la isla de Pine en Florida E.U., muestran un intervalo de -0.29‰ a -3.55‰, por lo que también coinciden con los resultados observados durante esta investigación.

Se encontraron diferencias significativas en los valores de los otolitos de *S. lanceolatus* entre los años 1997 y 2007. Estas diferencias pueden deberse a que la posible degradación de las zonas de LT, lo cual modifica las condiciones ambientales y fisicoquímicas del hábitat de estas especies. por lo observado en los valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ más cercanos a cero de la especie *S. lanceolatus*, estos demuestran que son de un ambiente estuarino con un aporte constante de agua de río con señales isotópicas distintas. El análisis por zonas también muestra diferencias significativas entre las zonas 1 y 2, 2 y 4, esto coincide con lo reportado de que la zona 2 presenta condiciones más marinas debido a la cercanía de las bocas de la laguna, además de ser una zona que se reporta con hábitat degradados por efecto de huracanes y pérdida de cobertura de pastos (Herrera, 2010; Villeger, 2010).

A diferencia del *E. gula* no se observan diferencias significativas entre las 3 décadas, sin embargo, el análisis por zonas entre la zona 1 y 4 muestra diferencias. Considerando que *E. gula* es una especie con una amplia tolerancia a los cambios en salinidad (Sirot *et al.*, 2015), lo cual es el reflejo de que existan diferencias entre la zona 1 que es la zona más estuarina de la laguna y la zona 4 siendo la zona más profunda y el canal de circulación dominado por corrientes que comunica el flujo desde la Boca de Puerto Real a la zona de drenaje de la laguna a través de Boca del Carmen (Yañez-Arancibia *et al.* 1988).

Fichez *et al.* (2016) señalan que la variabilidad que tiene la laguna principalmente de salinidad es debido a la intrusión del gasto de agua de los 4 ríos que descargan en LT, del patrón de mareas, de corrientes, giros ciclónicos entre la mezcla de agua marina proveniente de las bocas de la laguna, con la presencia de agua de río de los gastos de las subcuencas hidrológicas. Por lo que es más probable que las diferencias en los valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ de *E. gula*, que son más

negativos, sea un efecto más de la salinidad dominada por la descarga de los 4 ríos a LT, que del efecto en el aumento en la temperatura observado.

Analizando los datos de CONAGUA se observa que el río Palizada tiene el mayor gasto del caudal de los 4 ríos y también siendo el más constante, lo que coincide con los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ de *S. lanceolatus* el cual como mencionan Ayala *et al.* (2006) es una especie con condiciones estuarinas que llega a penetrar a los sistemas fluvio-lagunares cercanos a LT, por lo que esta especie pudiera estar habitando más la zona 1 la cual es la más aledaña a esta zona y con un aporte constante de la descarga del río Palizada.

A partir del año 2010 según lo reportado por autores, se han presentado temporadas de sequía de moderadas a intensas, señalando también un incremento de la salinidad en LT en el mismo periodo de tiempo. Se menciona que estas temporadas de sequías se presentaban cada 6 años en la región de Campeche y desde 2010 se presentan cada 3 o 4 años, por lo que coincide con el aumento en temperatura y salinidad en los años del 2016-2017 registrada durante esta investigación. A su vez fenómenos como El NIÑO Oscilación del Sur (ENSO), también intervienen en este tipo de cambios ambientales, debido a que se manifiestan como una mayor intensidad en sequías y menor índice de huracanes. Por lo que no solo modifica los parámetros de salinidad y de temperatura en LT, sino también cambios en la distribución de las especies ícticas que habitan en la laguna (Chan-Kep *et al.*, 2018).

Con ayuda de las ecuaciones propuestas en su estudio Bemis *et al.*, (1998) y de Surge *et al.*, (2005) que se utilizaron para determinar el equilibrio isotópico con el valor teórico de la aragonita fijada en el medio y los valores promedio anuales de $\delta^{18}\text{O}$ promedio anuales de los otolitos, se observa que las especies no alcanzan el equilibrio isotópico relacionados con el valor estimado de las ecuaciones, sin embargo la especie *S. lanceolatus* muestra la misma tendencia de aumento de los valores promedio anuales observados de $\delta^{18}\text{O}$. Esto pudiera deberse a la desviación estándar que se tienen en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de 1 o 2 años, que pudiera

estar sesgado debido a que no se tiene con certeza la estimación de la edad del pez, si es un año o menos.

Al comprar el valor teórico de $\delta^{18}\text{O}$ aragonita calculado de los valores de salinidad de la zona 1 para *S. lanceolatus* y de la zona 2 para *E. gula*, con el valor de $\delta^{18}\text{O}$ de otolitos en las mismas zonas, se logra observar una tendencia que se acerca a un equilibrio isotópico en ambas especies. Lo que indica que se tiene un mejor ajuste de equilibrio isotópico de *S. lanceolatus* en la zona 1 por lo antes ya mencionado, que es una especie que prefiere condiciones más estuarinas que *E. gula* la cual tiene un rango más amplio de tolerancia de salinidad y prefiere zonas como la 2 que es una zona con mayor presencia de aguas marinas.

La importancia de poder construir una ecuación de equilibrio isotópico propia para cada especie o hacer una buena elección de ecuaciones similares a la zona geográfica o especie empleada ya reportadas, se ejemplifica en el estudio de Høie *et al.*, (2004), en el que analiza los otolitos del bacalao común (*Gadus morhua*) en el noreste de Bergen, Noruega, de organismos en un ambiente controlado con rangos de temperatura constantes de 6° a 20°C. Concluyendo que efectivamente el fraccionamiento de los valores isotópicos de oxígeno a diferentes temperaturas tienen una relación con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos en el bagre con respecto a los modelos comparados para estimar el fraccionamiento isotópico y la estimación de la temperatura en la depositación del carbonato de calcio en los otolitos. El mejor ajuste lo obtiene utilizando una ecuación basada en la depositación de la aragonita inorgánica con un enriquecimiento de 0.6‰ utilizada por Kim *et al.*, (1997).

Otra causa de que no se alcance el equilibrio isotópico puede ser a que la ecuación de equilibrio isotópico no interviene en nada con el factor de metabolismo vital de los peces, por lo que no tiene ninguna variable que considere la tasa de crecimiento, que, por supuesto en los peces no es de manera homogénea si no que depende de factores como la dieta, migraciones, entre otros factores (Høie *et al.*, 2004).

Recientemente se han encendido luces de alerta debido a si los cambios ambientales observados durante los últimos 30 años pudieran tener consecuencias

irreversibles afectando los ciclos biogeoquímicos de los océanos y alterando la productividad primaria, lo cual derivaría en una pérdida de la biodiversidad, teniendo en cuenta que la biodiversidad es parte fundamental para la resiliencia de los ecosistemas oceánicos. En Laguna de Términos al ser un ecosistema categorizado como un Área Natural Protegida (ANP), es de vital importancia monitorear los cambios ambientales ocurridos. Las condiciones salobres de LT dependen principalmente del aporte de la descarga de los ríos, la cual compensa el aporte de agua dulce con la entrada de agua de mar proveniente del Golfo de México, que es aún más abundante en temporadas de sequía. Estas sequías se han intensificado a partir del año 2014-2016, por lo que eleva los valores de salinidad de la laguna. Los valores isotópicos de las especies utilizadas durante el desarrollo de esta investigación logran detectar estos cambios tanto de las condiciones estuarinas localizadas en la zona de descarga del río Palizada (*S. lanceolatus*), como el aumento en la salinidad en zonas más cercanas a la entrada de las bocas de la laguna intensificado por una larga temporada de sequías (*E. gula*). Ambas especies cumplen al ser buenos monitores de cambios ambientales especialmente en un ecosistema de laguna costera como es el caso de LT, por lo que se debe continuar con las campañas de monitoreo y recolección de información, biológica y metadatos para tener un mejor entendimiento de los eventos estocásticos con repercusiones ecológicas y económicas.

Conclusiones

La variabilidad de la temperatura y salinidad que experimenta la Laguna de Términos en los últimos 30 años, aunque vaya en una tendencia de aumento, es más probable que sea por el efecto de los gastos del caudal de los ríos y de la dinámica de la laguna que de un cambio climático como anteriormente ya se ha reportado.

No existen diferencias significativas en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre la parte superficial y el otolito completo, por lo que se concluye que tanto la parte

superficial del otolito como el otolito completo pueden ser registros del mismo periodo de tiempos estimado de 1 año.

En los últimos 20 años, los valores promedio de $\delta^{18}\text{O}$ de *E. gula* se incrementaron de -1.52 ‰ en 1997 a -2.13 ‰ en 2016, lo cual concuerda con el incremento de 27° a 29°C (temperatura observada). Por lo que *E. gula* se considera un mejor registro ante el aumento de temperatura en Laguna de Términos.

S. lanceolatus presenta valores de $\delta^{18}\text{O}$ cercanos a 0 debido a que es una especie adaptada a condiciones estuarinas que prefiere las zonas con valores bajos de salinidad y temperatura.

El equilibrio isotópico analizado por zonas tiene un mejor ajuste espacial que temporal, debido a que representa en mejor forma las condiciones estuarinas, como en la zona 1 lo hace *S. lanceolatus* y la preferencia de zonas con alta salinidad de *E. gula* como en la zona 2.

Referencias bibliográficas.

- Archer, D., (2006), Biological fluxes in the ocean and atmospheric pCO_2 . en Elderfield H. (ed.), The Oceans and Marine Geochemistry: Elsevier, Treatise on Geochemistry, Volume 6, 275-291.
- Ayala L., Terán G., Ramos J., Flores D. (2012). Cambios interanuales en la abundancia de la comunidad de peces en la costa occidental de Campeche, México. *Cienc Mar*, 38(2), 395-410.
- Ayala L., Ramos J., Flores D., Vega I., Moreno C. (2008). Caracterización biológica y ecológica del bagre *Cathorops melanopus* de la costa oeste de Campeche, México. *Cienc Mar*, 34(4), 453-465
- Ayala L., (2006). Modelo de simulación de la comunidad de peces en el área natural protegida laguna de términos, Campeche, México. *Tesis de doctorado*. Universidad Autónoma, Metropolitana, México
- Ayala L., Avilés O., Rojas J. (1998). Estructura de la comunidad de peces en el sistema Candelaria-Panlau, Campeche, México. Departamento "El Hombre y

- su Ambiente". Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. *Revista Biología Tropical.*, 46(3):763-774.
- Behrenfeld M.J., Oalley R.T., Siegel D.A., McClain C.R., Sarmiento J.L., Feldman G.C., Milligan A.J., Falkowski P.G., Letelier, R.M., Boss, E.S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752–755.
- Bemis B.E., Spero H.J., Bijma J., Lea D.W., (1998). Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: experimental results and revised paleotemperature equations. *Paleoceanography* 13, 150–160. doi:10.1029/98PA00070
- Brown R., Severin K. P. (1999). Elemental distribution within polymorphic inconnu (*Stenodus leucichthys*) otoliths is affected by crystal structure. *Can J Fish Aquat*, 56: 1898e1903
- Campana S.E. (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Mar Ecol Prog Ser* 188:263-297.
- Carpenter S. J. and Lohmann K. C. (1995) $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of modern brachiopod shells. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59,3749- 3764.
- Carpenter K. (2002). The living marine resources of the Western Central Atlantic. Volume 3: Bony fishes part 2 (Opistognathidae to Molidae), sea turtles and marine mammals. FAO Species Identification Guide for Fishery Purposes and American Society of Ichthyologists and Herpetologists Special Publication No. 5. Rome, FAO. 2002. pp. 1375-2127.
- Carvalho F. P., Villeneuve J.-P., Cattini C., Tolosa I., Montenegro-Guillén S., Lacayo M. (2002). Ecological risk assessment of pesticide residues in coastal lagoons of Nicaragua. *J. Environ. Monit.* 4: 778– 787
- Castillo M, Montiel M., Sanvicente L., Zárate R. (2005). Spatial, seasonal and diel distribution patterns of two species of mojarras (Pisces: Gerreidae) in a Mexican tropical coastal lagoon. *J Appl Ichthyol* 21:498-503.
- Chan C., Agraz C., Muñiz R., Posada G., Osti J., Reyes J., Conde K., Vega B. (2018). "Ecophysiological Response of *Rhizophora mangle* to the variation in hydrochemistry during five years along the coast of Campeche, México." *Diversity* 10, no. 1: 9.
- Ceron J. (2010). Discriminación de subpoblaciones de la sardina del pacífico (*Sardinops sagax*) con base en la temperatura de crianza estimada a partir de valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los núcleos de otolitos. Tesis de Maestría CICESE. Ensenada, Baja California, México. 90 p.

- Comision Nacional del Agua (CONAGUA). <https://www.gob.mx/conagua>. Accessed January 31, 2019.
- Contreras E., Douillet p., Hidalgo J. (2014). Tidal dynamics of the Terminos Lagoon, Mexico: observations and 3D numerical modelling. *Ocean Dynamics*, 64:1349–1371.
- Crowder B, Hazen L, Avissar N, Bjorkland R, Latanich C, Ogburn B. (2008). The impacts of fisheries on marine ecosystems and the transition to ecosystem-based management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39: 259-78.
- Falkowski P.G., Barber R.T., Smetacek V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281: 200–206.
- Fichez R., Archundia C., Grenz P., Douillet P., Gutiérrez M. Origel M., Denis L., Contreras E., Zavala J. (2016). Global climate change and local watershed management as potential drivers of salinity variation in a tropical coastal lagoon (Laguna de Términos México). *Aquat Sci*. 17.
- Fontanier C., Mackensen A., Jorissen F.J., Anschutz P., Licari L., Griveaud C., (2006). Stable oxygen and carbon isotopes of live benthic foraminifera from the Bay of Biscay: microhabitat impact and seasonal variability. *Mar Micropaleontol*, 58, 159-183
- Galeana Cortazar A. (2015). Fuentes orgánicas de carbono y su relación con la ictiofauna dominante en Laguna de Términos, Campeche, México. 2015. *Tesis de maestría*. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas La Paz, B. C. S., México p. x, 83 h.
- Gauldie R. W. (1993). Polymorphic crystalline structure of fish otoliths. *J Morphol*, 218: 1e28
- García J., Arreguín F., Hernández, S., Lluch B. (2004). “Impacto ecológico de la Industria Petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión”, *Interciencia* 29(6): 311- 319.
- Grossman E., ku T. (1986). Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects. *Chemi Geol* 59, 59–74
- Herrera J., Arellano L., Morales S. (2011). Report of the Pilot Project Natural Habitat and Ecosystem Conservation of Coastal and Marine Zones of the Gulf of Mexico: Seagrass beds characterization for restoration pilot project: Phase I- 2011.

- Høie H., Otterlei E., Folkvord A. (2004). Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua*). *ICES J. of Mar Scie.*, 61: 243e251
- Kalish J.(1991). Oxygen and carbon stable isotope in the otoliths of wild and laboratory-reared Australian salmon (*Arripis trutta*). *Mar Biol* 110; 37-47pp
- Kemp G., Day J., Yáñez A. (2016). Can continental shelf river plumes in the Northern and Southern Gulf of Mexico Promote Ecological resilience in a time of climate change? *Water* 2016;8:83.
- Kerr LA, Secor DH, Kraus RT. (2007). Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and Sr/Ca composition of otoliths as proxies for environmental salinity experienced by an estuarine fish. *Mar Ecol Prog Ser* 349:245–253
- Kim S., O'Neil J. (1997). Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. *Geochim Cosmochim Acta*, 61: 3461e3475
- Leta H., Keim A. (1992). Otolith removal and preparation for microstructural examination. FAO Technical document for fisheries No. 39. Montevideo, Uruguay.
- McConnaughey T. (1989). ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 151-162.
- Mexicano G.(1999).Crecimiento y reproducción de la mojarra, *Eucinostomus gula* de Celestún, Yucatán, México. In: Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute, 45, pp. 524-536
- Patterson W., Smith G., Lohmann K. (1993). Continental paleothermometry and seasonality using the isotopic composition of aragonitic otoliths of freshwater fishes. *Geophysical Monograph*, 78: 191e202.
- Pineda A., Ramos J., Castillo M., Arreguín F. (2016). Cambios en la dieta de dos especies de mojarra (Gerreidae) en la Laguna de Términos, Campeche, México.*Revista de biología marina y oceanografía*,51(2), 385-394.
- Ramos M., J Bejarano H., Flores D, Ayala L. (2009). Crecimiento, mortalidad, madurez y reclutamiento de la corvinilla (*Stellifer lanceolatus*) en el sur del Golfo de México. *Cienc Mar*, 35(3), 245-257
- Ramos J., Flores D., Ayala L., Rendon J., Villalobos G., Sosa A. (2006). Atlas hidrológico e ictiológico de la Laguna de Términos. Universidad Autónoma de Campeche 173 p.

- Rendón J., Memije M. (2001). Persistent organochlorine pesticide as biomarker of exposure in White shrimp (*L. setiferus*) from Terminos lagoon, Campeche, Mexico. Abstract Book: Biomarkers of Environmental Contamination, Porto.
- Romo J. (2013). Productores primarios y su relación con la distribución de la ictiofauna en laguna de Términos y plataforma continental adyacente, Campeche, México. *Tesis de Maestría*. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S. México. 100 p.
- Rowell K, True C, Flessa KW, Dettman D. (2008). Fish without water: Validation and Application of $\delta^{18}\text{O}$ in *Totoaba macdonaldi* otoliths. *Cienc. Mar.* 34: 55-68.
- Sánchez A. (2011). Isótopos estables de Oxígeno y Carbono en Foraminíferos del margen continental de Magdalena, B.C.S., México. *Tesis de maestría*. México: CICIMAR-IPN. 73.
- Santos A., Araújo F. (1997). Hábitos alimentares de tres espécies de Gerreidae (Osteichthyes, Perciformes) na Bahía de Sepetiba, RJ. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 40: 359-368.
- Sirot C, Villéger S, Mouillot D, Darnaude AM, Ramos-Miranda J, Flores-Hernandez D. (2015). Combinations of biological attributes predict temporal dynamics of fish species in response to environmental changes. *Ecol Ind.* 2015;48:147–56.
- Surge D, Walker K. (2005). Oxygen isotope composition of modern and archaeoological otoliths from the estuarine hardhead catfish (*Ariopsis felis*) and their potential to record low-latitude climate change. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 228: 179–191
- Strong M., Neilson D., Hunt, J. J. (1986). Aberrant crystallization of pollock (*Pollachius virens*) otoliths. *Can J Fish Aquat Sci*, 43:1457-1463
- Thorrold S., Campana S., Jones C., Swart P. (1997). Factors determining $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ fractionation in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61: 2909-2919.
- Yáñez A., Lara A., J. W. Day, Jr., (1993). Interaction between mangrove and seagrass habitat mediated by estuarine nekton assemblages: coupling of primary and secondary production. *Hydrobiologia*, 264: 1-12
- Yáñez A., Sánchez A., Lara A., (1991). Interacciones ecológicas estuario-mar: estructura funcional de bocas estuarinas y su efecto en la productividad del

- ecosistema. In: II Simposio sobre Ecosistemas da Coasta Sul Brasileira: Estrutura, Funcao e Manejo. *Publ. ACIESP*, 71(4): 49-83.
- Yáñez A., Amezcua F., Day J. (1980). Fish community structure and function in Terminos Lagoon, a tropical estuary in the southern Gulf of Mexico. pp. 465-482 In V.S. Kennedy (ed.). *Estuarine perspectives*. Academic, Nueva York.
- Villalobos G., Mendoza J. (2010). La biodiversidad de Campeche: Estudio de estado. Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Gobierno del estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche. El colegio de la Frontera Sur. México. 730p.
- Villalobos G. J., Palacio G., Sosa A., Alvares A., Zetina R., Tafoya O., González M., Cu A., Borges G. (2002). Ecología del paisaje y diagnóstico ambiental del ANP "Laguna de Términos" Informe Final. P. SISIERRA 20000706030 Centro EPOMEX-UAC-37.
- Villéger S., Miranda J., Hernández D., Mouillot D. (2010). Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. *Ecological Applications*, 20: 1512–1522
- de Villiers S., Nelson B., Chivas A. (1995). Biological controls on coral Sr/Ca and O¹⁸ reconstructions of sea surface temperatures. *Science* 269, 1247- 1249.
- Volpedo A., Vaz A. (2015). Métodos de estudo com otólitos: princípios e aplicações. Buenos Aires: *CAFP-BA-PIESCI* , 2015. p. 301-332.