



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA  
Unidad Académica Sisal**

**ECOMORFOLOGÍA DE LOS OTOLITOS  
*SAGITTAE* DE *Pterois volitans* EN EL ÁREA  
NATURAL PROTEGIDA “ARRECIFES DE  
PUERTO MORELOS”**

**T E S I S**

que para optar por el grado académico de

**Maestro en Ciencias**

P r e s e n t a

**JACOB RUBIO MOLINA**

Director de tesis

Xavier Chiappa Carrara UNIDAD ACADÉMICA SISAL, FACULTAD DE CIENCIAS,  
UNAM

Comité Tutor

Abraham Kobelkowsky Díaz POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA  
María Eugenia Vega Cendejas POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA  
Cecilia E. Enríquez Ortiz UNIDAD ACADÉMICA SISAL, FACULTAD DE CIENCIAS,  
UNAM

Efraín De Luna García POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA

Sisal, Yucatán. (Enero) 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## AGRADECIMIENTOS

A Ricardo Rubio Ramírez, Claudia Molina Reyes por engendrarme y guiarme de la manera necesaria en cada momento de esta vida que poseo, gracias por todo, las palabras de aliento, los regaños, los sapes y los premios, por procurarme siempre lo mejor que está a su alcance y a veces lo que no también, por preocuparse por mí, pero principalmente por dejarme ser yo mismo, por tratar de comprender mis locuras y ahora, por permitirme llegar a estudiar la carrera más bella que existe, la cual definitivamente es un paso más en la dirección adecuada para poder llegar a ser un ser humano feliz y pleno, por todo lo anterior y todo lo que ustedes saben que han sacrificado por mí, GRACIAS.

A ese trio de locos que tengo por hermanos, saben que los cuanto los quiero, aquí está el ejemplo de lo que tienen que hacer, para que vean que no solo les doy malos ejemplos, espero con ansia ver las suyas.

En especial a una mujer, con la cual he compartido casi cada minuto de los últimos 3 años, que me ha acompañado en las felicidades y amarguras de esta vida, gracias por ser ese apoyo incondicional en todo momento, por recordarme que soy un humano, y que compartir la vida no solo es más genial si no que es la única manera de sentirla plenamente, tu mejor que nadie sabes lo fundamental que fuiste para la realización de esta tesis, pues incluso en el laboratorio siempre nos hemos complementado, gracias por soportar mis locuras e inyectar en mi esa energía para seguir adelante, en fin, por todo Gracias Verónica Rivera

Al Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara y a la M. en C. Maribel Badillo de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal. Yucatán, México. Quiénes no solo me brindaron todo el apoyo que son capaces de ofrecerme, si no que me lo ofrecieron la manera más desinteresada y eficiente posible, lo cual solo me lleva a pensar que cuando sea grande quiero ser como ustedes.

Y por ultimo gracias a la UNAM por todo lo que ha invertido en mi y por darme la oportunidad de enriquecer mi vida con lo más valioso que hay, el conocimiento, además por todo el apoyo económico emanado de los Proyectos PAPIIT (IN207609, IN213012) y FOMIX Yucatán-Conacyt. (103229).

## Índice de Contenido

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN.....                           | 3  |
| INTRODUCCIÓN.....                      | 4  |
| ANTECEDENTES .....                     | 9  |
| ÁREA DE ESTUDIO .....                  | 13 |
| HIPÓTESIS .....                        | 14 |
| OBJETIVO GENERAL.....                  | 15 |
| OBJETIVOS PARTICULARES.....            | 15 |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....             | 16 |
| RESULTADOS.....                        | 21 |
| Descripción de la <i>sagitta</i> ..... | 22 |
| Morfometría tradicional.....           | 24 |
| Morfometría Geométrica.....            | 27 |
| Análisis ecológico.....                | 34 |
| DISCUSIÓN.....                         | 36 |
| Descripción de la <i>sagitta</i> ..... | 36 |
| Morfometría tradicional.....           | 36 |
| Morfometría Geométrica.....            | 38 |
| Coloración.....                        | 38 |
| Clases de talla.....                   | 40 |
| Análisis ecológico.....                | 43 |
| CONCLUSIONES.....                      | 45 |
| LITERATURA CITADA .....                | 47 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Localización de la zona de estudio y ubicación de los sitios de muestreo.....   | 13 |
| Figura 2. Medidas morfométricas obtenidas del pez león.....   | 17 |
| Figura 3. Esquema de una sagitta de <i>Pterois volitans</i> en el que se indican los nombres de las zonas del otolito y se muestran las dimensiones lineales obtenidas..... | 18 |
| Figura 4. Captura de pantalla del programa MakeFan6 en la que se muestra el “peine digital” sobrepuesto a un otolito.....   | 19 |
| Figura 5. Captura de pantalla del programa TPSDig2. ....  | 20 |
| Figura 6. Captura de pantalla del programa CoordGen6f.....  | 20 |
| Figura 7. Captura de pantalla del programa Semiland6.....   | 20 |
| Figura 8. Fotografías de microscopia electrónica de un otolito de <i>Pterois volitans</i> “representativo” de organismos de cada una de las clases de talla. ....           | 23 |
| Figura 9. Regresión potencial longitud patrón- longitud de los otolitos izquierdos, con ecuación y coeficiente de determinación. ....                                       | 25 |
| Figura 10. Regresión potencial longitud patrón- longitud de los otolitos derechos, con ecuación y coeficiente de determinación. ....  | 25 |
| Figura 11. Regresión potencial diámetro ocular-longitud del otolito derecho, con ecuación y coeficiente de determinación. ....  | 26 |
| Figura 12. Regresión potencial diámetro ocular-longitud del otolito izquierdo, con ecuación y coeficiente de determinación. ....  | 26 |
| Figura 13. Coloraciones externas aparentes de los peces a) clara, b) intermedia, c) obscura. ....   | 27 |
| Figura 14. Semimarcas alineadas con el método de Procrustes, lado derecho e izquierdo.....  | 27 |
| Figura 15. Agrupación por coloración externa del pez de otolitos izquierdos y derechos, alineados con el análisis de Procrustes y deslizados con el programa Semiland6..... | 28 |
| Figura 16. Agrupación por clases de talla de otolitos izquierdos y derechos, alineados con el análisis de Procrustes y deslizados con el programa Semiland6 .....           | 28 |
| Figura 17. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de las medidas de los otolitos derechos agrupados por la coloración externa de los ejemplares. ....                     | 29 |
| Figura 18. Gráfica de las variables canónicas (CV) 1 y 3 de las medidas de los otolitos derechos agrupados por la coloración externa de los ejemplares. ....                | 30 |
| Figura 19. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de las medidas de los otolitos izquierdos agrupados por la coloración externa de los ejemplares. ....                   | 30 |
| Figura 20. Gráfica de las variables canónicas 1 y 3 de las medidas de los otolitos izquierdos agrupados por la coloración externa de los ejemplares. ....                   | 31 |
| Figura 21. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de los otolitos derechos agrupados por las clases de tallas de los peces.....   | 32 |
| Figura 22. Gráfica de las variables canónicas 1 y 3 de los otolitos derechos agrupados por las clases de tallas de los peces.....   | 33 |
| Figura 23. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de los otolitos izquierdos agrupados por las clases de tallas de los peces. ....  | 33 |
| Figura 24. Gráfica de las variables canónicas 1 y 3 de los otolitos izquierdos agrupados por las clases de tallas de los peces. ....  | 34 |
| Figura 25. Gráfica de los valores de índice R en otolitos derechos e izquierdos. ....   | 35 |
| Figura 26. Gráfica de los valores de índice E en otolitos derechos e izquierdos. ....   | 35 |

## **RESUMEN**

El pez león, *Pterois volitans*, es la primera especie de peces marinos no nativos en establecerse a lo largo de la costa atlántica de los EUA y el Caribe (Hamner *et al.*, 2007; Morris, 2009). Los estudios morfológicos buscan describir de la manera más detallada cada aspecto concerniente a la forma de algún carácter en específico. La morfometría geométrica en el estudio de la forma de los otolitos ha demostrado que proporciona una correcta discriminación de stocks, en el presente trabajo se busca evaluar la relación entre el tamaño del pez y la forma de los otolitos *sagittae* izquierdos y derechos del pez león, y compararlos con los índices ecológicos E y R. Un total de 110 pares de otolitos de peces en el rango de  $81 \text{ mm} \leq \text{SL} \leq 337 \text{ mm}$  fueron fotografiados y analizados mediante la colocación de 50 semimarcas en el contorno de la sagitta de individuos divididos en ocho clases de tamaño y en tres patrones de colores externos (claro, medio, oscuro). Los cambios en la morfología de los otolitos son particularmente evidentes en el surco acústico, que se define mejor en las últimas etapas ontogenéticas, cuando la cauda se vuelve más profunda y las cristas comienzan a aparecer en su sección terminal. A medida que el tamaño aumenta, la cisura se hace progresivamente visible pero no aparece en todos los organismos. La parte posterior del otolito es la región más variable, su forma va desde puntiaguda a redondeada, e incluso truncado, presentando ondulaciones irregulares a lo largo del borde. El CVA muestra que la forma de los otolitos derechos es significativa entre todas las clases de tamaño de los peces, mientras que en los otolitos izquierdos sólo tres clases de tamaño mostraron diferencias.

## **INTRODUCCIÓN**

El oído interno de los peces actinopterigios contiene tres estructuras calcáreas otolíticas que forman parte de los órganos de la audición encargados de la transducción del sonido y participan en el mantenimiento del equilibrio estático y dinámico (Platt y Popper, 1981). Éstas se encuentran suspendidas en la endolinfa del sistema auditivo interno, ubicado en el neurocráneo, y reciben diferentes nombres dependiendo del saco membranoso en el que se encuentran: las que se localizan dentro del utrículo se denominan *lapilli*, las de la lagena se llaman *asterisci* y las del sáculo, que usualmente son las más grandes, se conocen como *sagitta* (Mascareñas, 2003). Estos últimos han sido utilizados principalmente en trabajos relacionados con la determinación de la edad y en la separación de stocks con base en características morfológicas (Volpedo, 2000).

Los otolitos se componen de dos fases intercaladas que forman anillos de crecimiento. Una de ellas es inorgánica y está constituida por cristales de carbonato de calcio, los cuales se acomodan sobre la fase formada por una matriz orgánica, consistente en una compleja red de macromoléculas (Wright *et al.*, 2002). La aragonita con forma cristalina romboidal es el isómero de carbonato de calcio que, en condiciones normales, se encuentra presente en los otolitos (Gauldie y Nelson, 1988). Sin embargo, existen otras formas isoméricas, como la calcita y la vaterita que ocurren cuando los peces se encuentran bajo estrés y pueden reemplazar total o parcialmente a la aragonita (Gauldie, 1993).

Los otolitos comenzaron a usarse como una herramienta auxiliar en las labores taxonómicas debido a que los cambios en los aspectos funcionales del sistema auditivo de cada taxón ante las diferentes presiones selectivas se ven reflejados en el cambio de la morfología de los otolitos (Popper, 1976; Gauldie, 1988). Para lograr un mejor entendimiento sobre la amplia variabilidad en las formas de los otolitos que se han encontrado en el taxón que compila a los peces se deben tener en cuenta dos puntos nodales. El primero es la existencia de unas 28,000 especies de peces que han sido descritas (Nelson, 2006), siendo un número mayor al resto de todos los vertebrados juntos. El segundo es la alta probabilidad de que existan más variaciones anatómicas auditivas entre las

especies de peces que en cualquier otro grupo de vertebrados (Popper y Fay, 2010).

Los otolitos presentan anillos concéntricos producto de la deposición diaria y continua del material que los forma a lo largo de toda la ontogenia. El hecho que los materiales orgánicos e inorgánicos se depositen diferencialmente supone un análogo a la caja negra de los aviones, susceptible de ser leída en cualquier momento. Determinar la manera en cómo afecta el medio ambiente la forma de los otolitos, es de suma importancia para diversos estudios, como las reconstrucciones paleogeográficas y el establecimiento de stocks pesqueros. La morfología tan característica de cada otolito permite discernir entre las diferentes especies, aún entre aquellas muy cercanas (Volpedo y Echeverría, 1997).

Para asociar los aspectos morfológicos de las estructuras de cada especie con la función que desempeñan en el ambiente, se usan diversos métodos matemáticos, dependiendo de los datos con los que se cuente o el enfoque que se desee dar a la investigación. Por ejemplo, la morfología del aparato bucal con la dieta (Clifton y Motta, 1998), la longitud del tracto digestivo y la dieta (Virgina, 1991), la forma del cuerpo y localización de las aletas con el desempeño en el hábitat (Bellwood y Wainwright, 2001). Idealmente, el estudio de las relaciones entre las características ecológicas de las especies y la morfología de cada sistema requiere, para empezar, del conocimiento de todos los roles biológicos que los sistemas morfológicos cumplen en el ambiente de las especies estudiadas. Es decir, se debe observar y conocer el rendimiento morfofuncional de cada pieza de un sistema biológico, y si interactúa con el ambiente, para posteriormente comparar las especies que se encuentran en diferentes condiciones ecológicas, lo cual es esencial cuando se busca evaluar las potenciales ventajas del complejo carácter morfológico/ambiente (Bohorquez 2008)

Actualmente es ampliamente reconocido que la información genética es un factor fundamental que guía los patrones de crecimiento y determina la forma de los otolitos. Sin embargo, la gran diversidad que tienen estas estructuras también está asociada a ciertas condiciones ambientales (Vignon y Morat 2010). Así,

varios autores han sugerido que la forma de los otolitos está determinada genéticamente, es específica para cada especie y refleja las relaciones filogenéticas (Lombarte y Castellón 1991, Lombarte y Lleonart 1993, Reichenbacher *et al.* 2009). Sin embargo, los otolitos presentan variaciones entre individuos de la misma especie influenciadas principalmente por el sexo, la edad, o stock (Castonguay *et al.* 1991, Monteiro *et al.* 2005), así como por las condiciones locales del medio ambiente o de factores como profundidad, temperatura del agua y el tipo de sustrato (Lombarte y Lleonart 1993, Gagliano y McCormick 2004, Hüsey 2008).

Aun sabiendo que las diferencias en la forma de los otolitos entre poblaciones de la misma especie pueden ser causadas por influencias genéticas y/o ambientales, no está claro cuánto y cómo afecta cada grupo de variables a la forma de los otolitos (Begg y Brown 2000, Simoneau *et al.* 2000) debido a que, en general, los análisis no distinguen entre los efectos de cada una (Campana y Casselman 1993, Cardinale *et al.* 2004).

En términos generales, las especies de peces arrecifales con otolitos relativamente grandes pertenecen a grupos especializados en la producción de sonido asociado con comunicación acústica, mientras que aquellos con otolitos pequeños muestran patrones de color brillantes o con colores contrastados, relacionado con la comunicación visual (Cruz y Lombarte 2004). La coloración externa de los peces asociados a los arrecifes de coral, es una de las características fenotípicas más conspicuas. Los peces usan los patrones de color para diversas funciones como crípsis (Cott 1940), la mímica (Randall & Randall 1960) o para identificarse entre ellos mismos (Lorenz, 1966), sin embargo el papel desempeñado por los patrones de color en peces arrecifales puede jugar un rol importante en los procesos de especiación marina (Puebla *et al.*, 2007).

Por otra parte, un organismo no es únicamente un complejo morfológico sino un sistema complejo que interactúa para mejorar la aptitud del individuo en un gradiente de condiciones ecológicas (Parmentier 2002), lo cual complica su estudio y exige el mayor número de comparaciones, que permita comprender, de

una mejor manera, los procesos que se llevan a cabo entre los organismos que habitan en distintos ambientes.

La familia Scorpaenidae está formada por 56 géneros que incluyen 418 especies (Nelson 2006) que, en su mayoría, habitan en los arrecifes de los océanos Índico y Pacífico. Un caso de estudio que resulta particularmente interesante corresponde a los organismos del género *Pterois*, que está compuesto por nueve especies. Para separar a dos de ellas, *P. volitans* y *P. miles*, se ha considerado un conjunto de caracteres merísticos, como el número de los radios de las aletas dorsal y anal aunque la determinación basada únicamente en caracteres fenotípicos ha resultado complicada debido a que se traslapan los valores de varios caracteres merísticos y de los parámetros morfométricos de ambas especies. De igual manera, no existe un patrón de coloración definido puesto el número de las franjas claras y oscuras varía en individuos de la misma especie; asimismo, cambia el número, tamaño y distribución de puntos blancos en el cuerpo del pez, y lo hace también el tono de las franjas oscuras que va del rojo pálido al marrón. Se ha observado que los organismos recolectados a mayores profundidades normalmente tienen una tonalidad más clara y carecen de franjas oscuras en la región lateral de la cabeza. Además, sus aletas pectorales y pélvicas son más transparentes, con puntos de pigmento oscuro más concentrado (Schultz, 1986).

Los llamados peces león (*Pterois volitans* y *P. miles*) son los primeros peces marinos no nativos que se han establecido a lo largo de la costa atlántica de los Estados Unidos de América (EUA) y el Caribe (Hamner *et al.* 2007; Morris *et al.* 2009). Existen publicaciones que señalan la presencia de poblaciones de pez león a lo largo de la costa Este de los EUA desde cabo Hatteras, Carolina del Norte y Florida. Hay reportes en las Bermudas, las Bahamas y en otros sitios del Caribe, incluyendo las islas Turcas, Haití, Cuba, República Dominicana, Puerto Rico, St. Croix, Belice y México (Schofield *et al.* 2009).

El origen de los primeros peces león en el Atlántico americano, así como la razón de su presencia en el medio natural no son claros y aún son motivo de discusión. Sin embargo, tomando en cuenta la gran distancia geográfica que

separa las aguas del océano Indo-Pacífico de la costa este de Estados Unidos, que es el lugar aceptado como el epicentro de la dispersión del pez león (Whitfield *et al.*, 2002), existen al menos dos métodos de introducción plausibles: el transporte de organismos juveniles en los tanques de lastre de los barcos y la introducción individual por parte de aficionados a la acuariofilia. Courtenay (1995) reportó que en 1992 un acuario en la bahía Vizcaína en Florida liberó accidentalmente organismos de *P. volitans* en el océano.

Los primeros esfuerzos para evaluar la densidad de peces león fueron en Carolina del Norte a través de censos visuales por buceo y con vehículos a control remoto (ROV, por sus siglas en inglés) que sugieren que las abundancias poblacionales de peces león han aumentado rápidamente, repercutiendo en la estructura de las redes tróficas de los arrecifes (Whitfield *et al.* 2002; Hare y Whitfield 2003).

En México, el primer reporte del avistamiento del pez león se dio en el mar Caribe, frente a las costas del estado de Quintana Roo, en el año 2010 (Aguilar-Perera 2010). Desde entonces se han reportado avistamientos de estos organismos a lo largo del Atlántico y gran Caribe, recientemente (Fortunato y Avigliano, 2014) reportan que su dispersión alcanza ya las costas del sur de Venezuela. Se han publicado artículos en los que se caracterizan los lugares donde se encuentran, se señalan aspectos de la ecología trófica o de la reproducción. En muchos de estos trabajos no se ha podido distinguir entre ambas especies, definiendo así el «complejo *P. volitans / miles*».

No existen reportes en los que se hayan descrito los patrones morfológicos los otolitos *sagitta* de las especies de este «complejo», por lo que se planteó este trabajo para analizar la morfología de estas estructuras en *Pterois volitans* y asociarlas con algunos aspectos ambientales, provenientes del Área Natural Protegida Arrecifes de Puerto Morelos.

## **ANTECEDENTES**

Gauldie y Crampton (2002) examinaron la variación en la forma de los otolitos de *H. atlanticus* de 4 diferentes regiones de los océanos Atlántico y Pacífico y lo compararon con la variación en la forma de los otolitos de *H. mediterraneus* y *P. trailli*, que ocupan diferentes hábitats, para ello, usaron la forma de los otolitos de *T. murphyi* y *P. aureatus* como referencia relativa de la variabilidad morfológica e investigaron las implicaciones de la variación de la forma para la determinación de stocks.

Duarte-Neto *et al.* (2008) estudiaron la forma de los otolitos sagitales del dorado (*Coryphaena hippurus*) para poner a prueba su hipótesis de que existen dos poblaciones de la costa noreste de Brasil. Obtuvieron 82 otolitos *sagittae* de los cuales determinaron área, perímetro, ortogonalidad, la circularidad, la excentricidad, la dimensión fractal (FD), y coeficientes de Fourier (FC) para evaluar el grado de similitud en los otolitos entre regiones. Encontraron un patrón de tres morfotipos a través de análisis por clusters y de componentes principales basados en los 30 primeros armónicos. Al parecer, este patrón no se ve influenciado por factores clinales. Usaron un análisis de discriminantes canónicas para todos los descriptores de forma. A pesar de la gran variabilidad entre las formas de otolitos, las muestras procedentes de las dos regiones se separaron. Los métodos clasificaron correctamente el 57,1 y el 69,6% de los otolitos de las regiones Maranhao y Rio Grande do Norte, respectivamente. Ubicaron al FD como el descriptor más potente para discriminar las dos poblaciones. Finalmente atribuyen la alta variabilidad en la forma de los otolitos, a las diferentes tasas de crecimiento de la especie y afirman que existen dos poblaciones a lo largo de la costa brasileña.

Vignon y Morat (2010) usaron técnicas de morfometría geométrica en otolitos de *Lutjanus kasmira* para encontrar que mientras el contorno de los otolitos en general puede ser reformado mediante el contraste de las condiciones ambientales, las variaciones genéticas intra-específica sólo afectan a la forma de los otolitos a nivel local, sobre todo en las regiones del rostro y el antirostro.

Además mediante el uso de wavelets confirmaron que la mayor diferenciación entre las poblaciones se produce en las partes posterior y antero-dorsal del otolito.

Lombarte *et al.* (2009) observaron los patrones ecomorfológicos y la inercia filogenética de la familia Nototheniidae, por medio del uso de técnicas basadas en imágenes digitales para el análisis morfológico de las *sagittae* de los organismos de esta familia. Los resultados de los análisis multivariados mostraron la existencia de una relación débil entre la forma del otolito y la filogenia; sin embargo, existe una clara correspondencia entre el tamaño relativo y la forma del otolito con el nicho ecológico de cada pez; con lo cual concluyen que es útil y recomendable analizar el tamaño y forma del otolito en trabajos ecomorfológicos.

Volpedo y Echeverría (2003) estudiaron la morfología y morfometría de las *sagittae* de varias especies de peces asociadas con diferentes substratos de la plataforma continental de Argentina encontrando que no había diferencias significativas en cuanto a la relación ancho/ largo del otolito (índice E); sin embargo, los valores del índice R (largo del rostro/largo del otolito) fueron significativos considerando el grupo de peces nadadores y el de los que frecuentan fondos duros. Los mismos autores compararon sus resultados con los citados por la literatura y concluyeron que el índice R puede ser utilizado para caracterizar las *sagittae* de los peces marinos que habitan diferentes sustratos.

Schulz-Mirbach *et al.* (2010) encontraron que los otolitos *sagittae* y *asteriscus* de los peces de un sistema de cuevas diferían de las de los peces de superficie en los rasgos de la cara orientada hacia el epitelio sensorial. Además, los otolitos del utrículo y lagena fueron significativamente más pesados en los peces de cueva. Midió la sensibilidad auditiva entre 100 y 1500 Hz, mediante la utilización de la técnica de grabación de potencial auditivo evocado y encontraron habilidades auditivas similares en los peces de cueva y los peces de superficie, con mayor sensibilidad entre 200 y 300 Hz. Los datos indican que la vida en cavernas alteró la morfología de los otolitos de *Poecilia mexicana*, probablemente debido a las diferencias metabólicas, sin embargo, no afectó a la sensibilidad auditiva general o el comportamiento acústico.

Deng *et al.* (2011) analizaron la estructura del oído interno de *Antimora rostrata* y su asociación con la vejiga natatoria, y lo compararon el oído interno de varias especies de aguas poco profundas que también tienen acoplamiento similar. El oído interno *A. rostrata* tiene una *sagitta* y epitelio sensorial grandes, en comparación con muchos otros peces. Encontraron que algunas partes del laberinto membranoso son gruesas y rígidas, mientras que otras partes son más delgadas, pero unidas firmemente a la cápsula ótica. El laberinto membranoso parcialmente rígido, junto con su íntima conexión con la vejiga natatoria, puede ayudar al oído interno a seguir las oscilaciones de sonido de la vejiga natatoria con una mejor precisión que los que ocurrirían en un oído interno menos rígido. Además, observaron que el epitelio sensorial sacular tiene una estructura elaborada y una ampliación de la anterior, que puede ser correlacionado con un aumento de la sensibilidad auditiva. Algunas de las características en el oído interno de *A. rostrata* son representativas de la especialización funcional de la vida en aguas profundas y apoyan la hipótesis de los organismos de aguas profundas tienen una mayor sensibilidad del oído interno.

Oxman *et al.* (2007) investigaron las consecuencias funcionales de la estructura cristalina otolitos en la audición en el salmón juvenil (*Oncorhynchus tshawytscha*) utilizando la técnica de respuesta auditiva del tronco encefálico. Se produjo una pérdida significativa de la sensibilidad (2.5 hasta 6.5 dB) en el rango de audición principal (100-300 Hz) en salmones que tenían al menos una *sagitta* vaterítica. Los umbrales auditivos no fueron significativamente diferentes en los peces con una *sagitta* de los que tenían dos *sagittae* vateríticas; además las *sagittae* cristalizadas fueron significativamente más grandes y menos densas que sus homólogas de aragonita. La forma del epitelio sacular y los patrones de orientación de los paquetes de células ciliadas no difirieron entre sáculos con diferentes tipos de cristales. Sin embargo, se encontró una propensión del epitelio sacular de las *sagittae* vateríticas a tener menos paquetes de células ciliadas sensoriales. Por lo que concluyeron que la pérdida significativa de la audición se puede asociar con la aparición de *sagittae* vateríticas y sugieren que la pérdida auditiva es causada por la menor densidad de los otolitos vateríticos.

Puebla *et al.* (2007) establecen que la especiación con flujo de genes es difícil, sin embargo, teóricamente uno de los escenarios más favorables sucede cuando un solo rasgo es utilizado bajo selección natural disruptiva y a la vez utilizado para dar señales de apareamiento selectivo. En este sentido, demuestran el potencial para un solo rasgo, como lo es el patrón de coloración, para conducir el comienzo de la especiación en el género *Hypoplectrus* (Serranidae), peces de arrecife conocidos por sus polimorfismos de colores llamativos y proporcionan información que acredita que se agrupan con formas de color simpátricas que son genéticamente distintas. Además, identifican las condiciones ecológicas favorables para la selección disruptiva en el patrón de color mediante la presentación de pruebas de comportamiento de mimetismo agresivo, en el cual, los organismos del género *Hypoplectrus* con comportamiento depredador imitan los patrones de color de las especies de peces de arrecife no depredadoras para aumentar su éxito al acercarse y atacar presas. Concluyen que el apareamiento selectivo basado en color, en combinación con la selección disruptiva en el patrón de color, está impulsando la especiación en *Hypoplectrus* spp.

## ÁREA DE ESTUDIO

Puerto Morelos es una población costera ubicada en el estado de Quintana Roo, en las riberas del mar Caribe. Frente a sus costas, a una distancia que varía entre 350 m y 1,600 metros se encuentra una barrera arrecifal que forma parte de la Gran Barrera Mesoamericana de Arrecifes del Atlántico Occidental, que es la segunda estructura arrecifal más extensa del mundo.

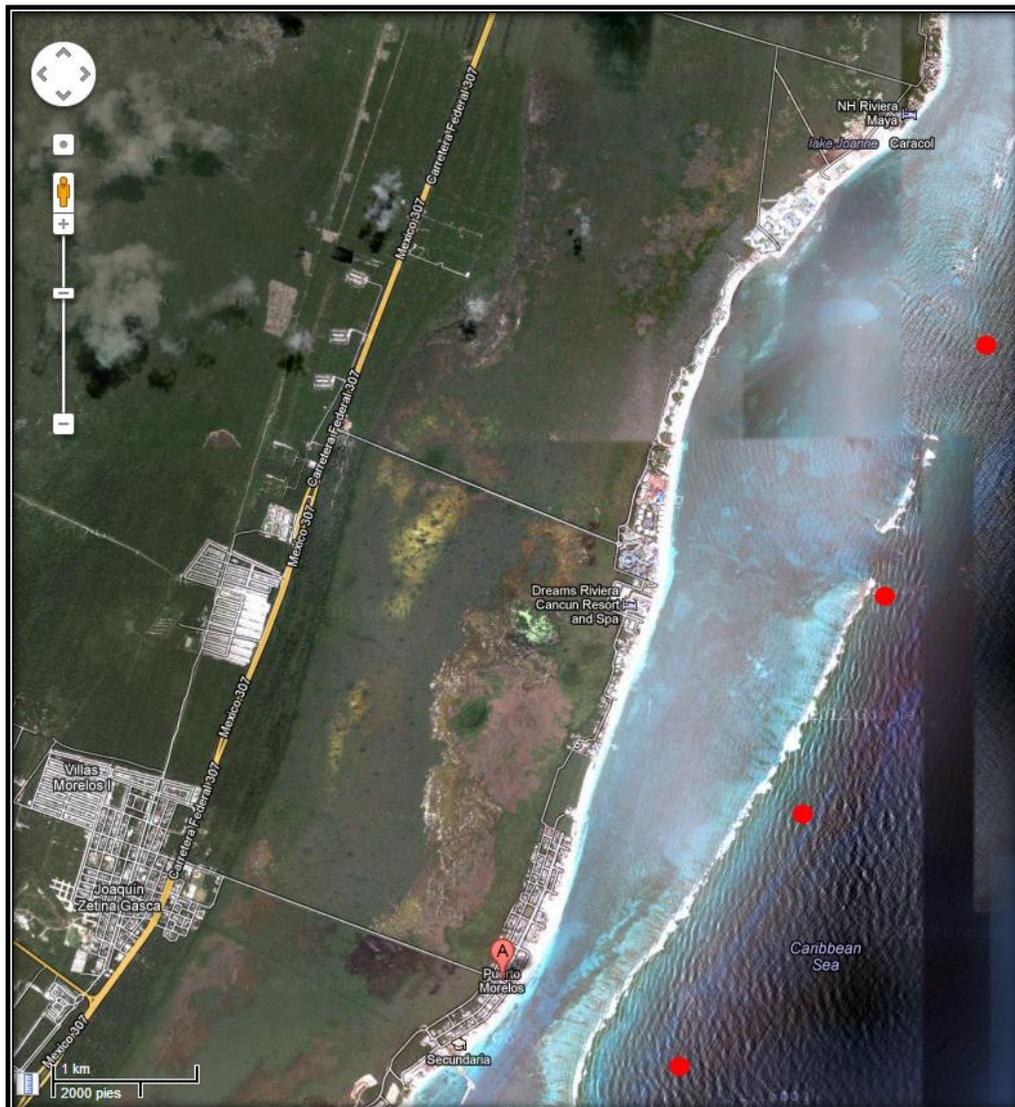


Figura 1. Localización de la zona de estudio y ubicación de los sitios de muestreo.

Entre la línea de costa y el arrecife se forma una laguna arrecifal debido a que la extensión marina de la península de Yucatán presenta un escaso relieve y la plataforma continental, si bien estrecha, presenta una pendiente suave. Por esta razón la laguna tiene aguas de poca profundidad que oscila entre los 2 y 8 m y en su fondo existen pastos marinos donde habita una gran diversidad de fauna marina. El 2 de febrero de 1998 por decreto presidencial se declaró el área natural protegida denominada Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, la cual cuenta con un superficie de 9,066 ha (Figura 1).

## **HIPÓTESIS**

Los otolitos sagittae al ser estructuras especie-especificas pueden utilizarse como herramientas para diferenciar distintas poblaciones de *Pterois volitans* en el Área Natural Protegida «Arrecifes de Puerto Morelos».

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar la ecomorfología de los otolitos *sagittae* de *Pterois volitans* del Área Natural Protegida Arrecifes de Puerto Morelos.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Determinar los patrones morfológicos geométricos y euclidianos de los otolitos *sagitta* de *Pterois volitans* de la ANP Arrecifes de Puerto Morelos.
- Describir los morfotipos del otolito *sagitta* de *Pterois volitans*.
- Obtener de los índices E y R para asignar posible zona ecológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El material biológico proviene de cuatro puntos de muestreo ubicados a lo largo del arrecife en frente de las costas de Puerto Morelos, Quintana Roo. Los muestreos se realizaron en la región de barlovento (Fig. 1) pues la inspección *in situ* de estos ambientes permitió encontrar ahí las mayores densidades poblacionales de peces león. Los peces fueron obtenidos uno por uno con arpón durante inmersiones con equipo SCUBA que tuvieron una duración de 40 a 50 minutos, en profundidades que fluctuaron entre 0 y 30 m. Todos los organismos fueron capturados por los pescadores de la Cooperativa de Pescadores de Puerto Morelos en dos muestreos que tuvieron lugar entre el 4/12/2012 al 6/12/2012 y del 30/10/2013 al 03/11/2013.

La identidad taxonómica de los organismos se verificó mediante el uso de claves especializadas como las de Hoesse y Moore (1977) y Mc Echrann *et al.* (2005). De cada individuo se obtuvieron los datos merísticos y morfométricos (Figura 2) con los que se construyó una base de datos digital de las siguientes variables: longitud patrón ( $L_p$ , cm  $\pm$  0.1), altura máxima ( $A_m$  cm  $\pm$  0.1), y peso ( $P$ , g  $\pm$  0.001). Se procedió a disecar las cabezas que se congelaron para ser trasladadas al Laboratorio de Ecología de Zonas Costeras de la UMDI-Sisal, UNAM.

Se extrajeron y limpiaron (eliminando los tejidos blandos y los restos de materiales no cementados) los otolitos *sagittae* para almacenarlos individualmente en contenedores de plástico secos.

La morfometría tradicional y la morfometría geométrica son dos tipos de análisis que abordan el estudio de la forma y tamaño desde perspectivas diferentes, en el presente trabajo se usaron ambas ya que se consideran complementarias.

Para el análisis tradicional de la morfometría se obtuvo una fotografía de cada par de *sagittae* de cada organismo por medio de una cámara digital Nikon DS-Ri1 acoplada a un microscopio óptico Nikon LMZ1500. De cada imagen se obtuvo el área del otolito ( $ArO$ , mm<sup>2</sup>  $\pm$  0.01), largo del otolito ( $LO$ , mm  $\pm$  0.01), el

ancho del otolito (AO, mm  $\pm$  0.01) y la longitud del rostro (LR, mm  $\pm$  0.01) por medio de una subrutina elaborada en el entorno de programación Matlab de MathWorks, R2013b (Figura 3).

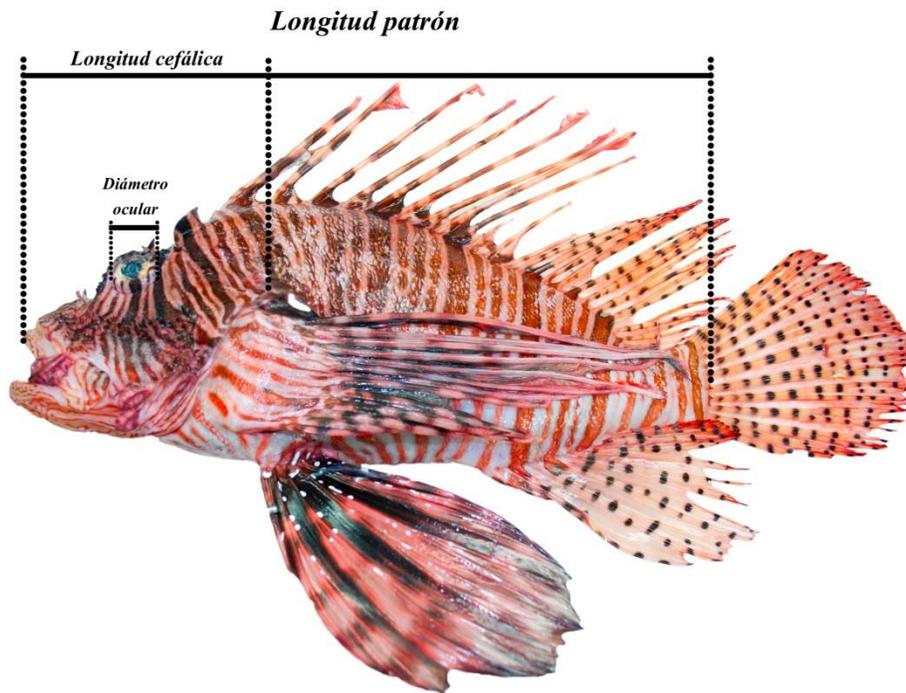


Figura 2. Medidas morfométricas obtenidas del pez león.

Posterior a la obtención de las medidas, se obtuvieron los parámetros de las relaciones potenciales de las siguientes variables por medio de análisis de regresión: largo del otolito (LO) vs. longitud estándar (Lp), para evaluar el tipo de crecimiento del otolito respecto del tamaño del pez, y diámetro ocular (DO) vs. largo del otolito (LO).

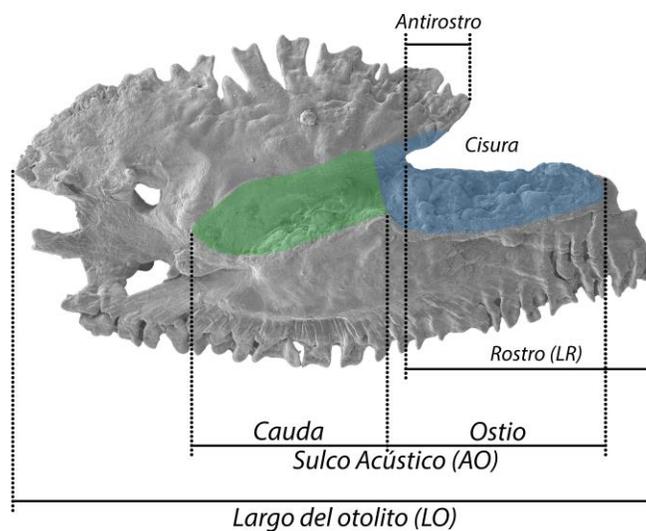
Se obtuvieron los índices E y R para uno de los organismos:

$$E = AO / LO \times 100$$

$$R = LR / LO \times 100$$

Donde AO es el ancho del otolito, LR es la longitud rostral y LO es largo del otolito. El índice E sirve para visualizar la tendencia en la forma de la *sagitta* pues permite obtener la proporción del cambio entre el largo y el ancho mientras que R lo hace

en relación con la magnitud del rostro y la longitud de la *sagitta*, expresados de forma porcentual, para posteriormente designar el nicho ecológico de cada organismo (Volpedo y Echeverría 2003). La comparación de los valores de los índices E y R obtenidos utilizando las mediciones provenientes de los otolitos izquierdos y derechos se realizó mediante una prueba de t-Student (Zar, 1999) y se utilizó la nomenclatura para el nombre de los peces según su zona ecológica encontrada en (Helfman *et al.*, 2009)



**Figura 3. Esquema de una sagitta de *Pterois volitans* en el que se indican los nombres de las zonas del otolito y se muestran las dimensiones lineales obtenidas.**

Se describieron todos los morfotipos que se encontraron en las *sagittae* de los organismos de la especie *Pterois volitans* de acuerdo con la nomenclatura propuesta por Tuset *et al.* (2008). Para estandarizar y sustentar de manera apropiada las comparaciones descriptivas de la forma de los otolitos (fig. 8). Para ello se obtuvieron 20 imágenes mediante un microscopio electrónico de barrido FE-SEM (JEOL, modelo JSM-7500F) de un organismo perteneciente a cada clase de talla. El número de clases se obtuvo mediante la regla de Sturges (1926) estimado como el número entero más cercano a  $\sqrt{c}$  en la expresión:

$$c = \frac{R}{1 + 3.322 \cdot \log N}$$

Donde  $N$  es el tamaño de la muestra y  $R$  es el intervalo de los valores de longitud estandar.

Para el análisis de la morfometría geométrica, se suelen considerar los datos que provienen de dos tipos de “puntos”. Los primeros, que se denominan *marcas*, poseen una cualidad absolutamente indispensable para que el análisis de la forma sea correcto: dado que son puntos homólogos, deben estar presentes en la totalidad de las muestras analizadas. El segundo tipo se conoce como puntos de contorno, o *semimarcas*, debido a que su colocación ocurre en sitios en los que se aprecia inequívocamente el cambio de forma del borde de la estructura analizada pero no requieren ser puntos homólogos. Por esta razón y considerando que el borde externo de los otolitos de *P. volitans* no presenta homología en la forma, en este trabajo se utilizaron 50 *semimarcas* que se digitalizaron a partir de imágenes de las *sagittae* izquierdas y derechas de cada uno de los organismos recolectados fotografiadas en un estereoscopio Nikon LMZ1500.

El procedimiento consistió en trazar círculo formado de 50 radios sobrepuesto a cada fotografía, con la ayuda del programa MakeFan6. En la intersección de cada una de las líneas del peine digital con el borde del otolito se colocó un punto o *semimarca* (Figura 4).

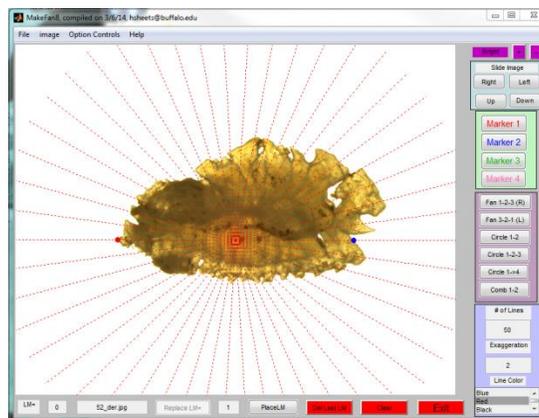


Figura 4. Captura de pantalla del programa MakeFan6 en la que se muestra el “círculo de radios” sobrepuesto a un otolito.

Para analizar la configuración geométrica de cada una de las *semimarcas*, se obtuvo su posición X,Y en un plano bidimensional usando el programa tpsDig2 (Rohlf, 2008) (Fig. 5).

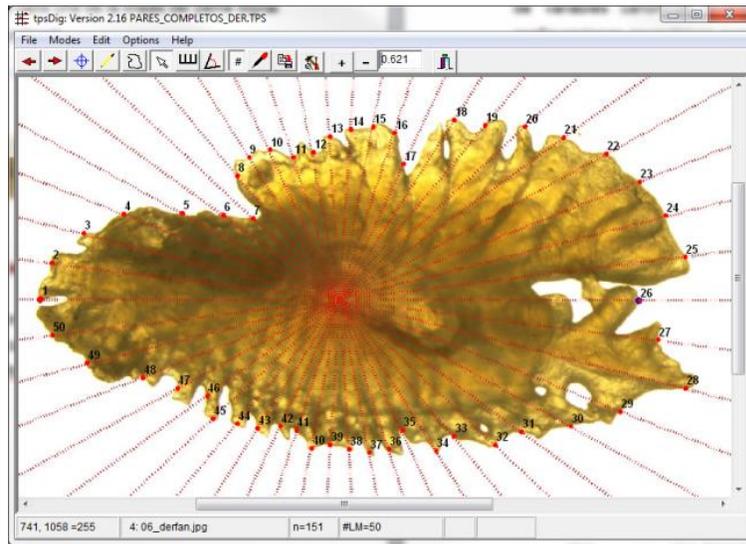


Figura 5. Captura de pantalla del programa TPSDig2.

La matriz de coordenadas, que representa el conjunto de configuraciones geométricas de los otolitos, se procesó con el paquete de análisis de forma IMP (Sheets, 2013). Primero se aplicó un análisis generalizado de Procrustes, con la ayuda del programa computacional CoordGen6f (Fig. 6). Después, se “deslizaron” las *semimarcas* con el programa Semiland6 (Fig. 7). Este procedimiento permite realinear los puntos digitalizados usando como base un archivo de texto (ver APÉNDICE 1) en el cual se describe el número y extensión de las 5 curvas que contiene el objeto de análisis.

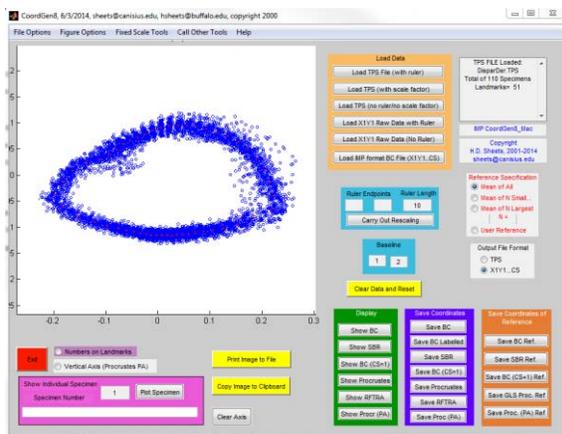


Figura 6. Captura de pantalla del programa CoordGen6f.

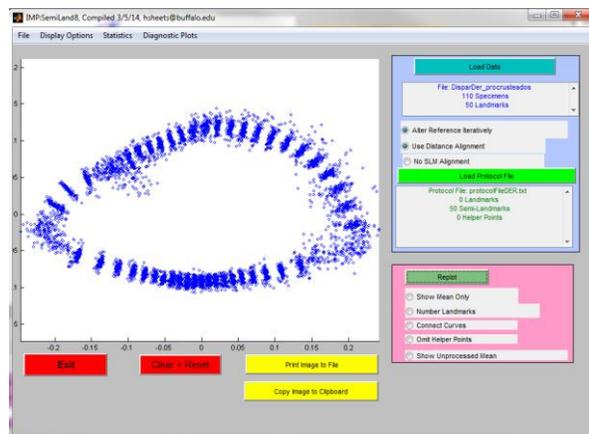


Figura 7. Captura de pantalla del programa Semiland6.

Posteriormente se ejecutó el programa CVAGen6o para realizar un análisis de variables canónicas o CVA para evaluar (1) el efecto del tamaño del pez, definido por el número de clases obtenidas por la regla de Sturges, y (2) el patrón de coloración de los ejemplares. Las agrupaciones de las configuraciones geométricas, expresadas en coordenadas, fueron evaluadas tomando en cuenta el valor calculado de Lamda, considerando que  $\lambda = 0$  indica que la discriminación entre los grupos es absoluta (Bookstein, 1997).

## RESULTADOS

Se colectaron 110 peces león, provenientes de los cuatro sitios de muestreo. Debido a las características del muestreo y el manejo que los pescadores hacen de los organismos capturados, los individuos sólo se pudieron determinar inequívocamente hasta el nivel de género. Para asegurar que los resultados de los análisis de la forma de los otolitos permitieran comparar los izquierdos y los derechos, se utilizaron siempre los pares completos. Así, tomando como variable independiente las clases de talla, se analizaron 220 otolitos, mientras que considerando el patrón de coloración de los peces, se analizaron 202 otolitos.

Debido a que existen similitudes en muchos aspectos de la topografía, a continuación se describen las características generales de los otolitos *sagittae* y, más adelante, se describirán las diferencias entre las clases de tamaño definidas por la regla de Sturges. En la Tabla 1 se muestran los valores mínimos y máximos de la longitud estandar (LP, mm) que limitan cada uno de los intervalos de las 8 clases de talla (ver fig. 8).

Tabla 1. Valores mínimos y máximos de la longitud estandar (LP, mm) de cada clase de talla de *P. volitans*.

| Talla | Mínimo | Máximo | n  |
|-------|--------|--------|----|
| 1     | 81     | 112    | 3  |
| 2     | 113    | 144    | 3  |
| 3     | 145    | 176    | 3  |
| 4     | 177    | 208    | 13 |
| 5     | 209    | 240    | 25 |
| 6     | 241    | 272    | 36 |
| 7     | 273    | 304    | 28 |
| 8     | 305    | 336    | 13 |

### Descripción de la *sagitta*

Los otolitos *sagittae* de *P. volitans* son de forma oblonga; tanto el borde anterior como el posterior son puntiagudos y sinuados; tanto el borde dorsal como el ventral son crinados. El sulco acústico es de tipo heterosulcoide, con modo de abertura de tipo ostial y en posición supramedial; la longitud del ostio es igual a la de la cauda, es de forma alargada, el rostro tiene forma de punta y el antirrostró también es puntiagudo, aproximadamente de la mitad del tamaño del rostro; la cisura es apenas visible; la cauda es tubular, recta poco profunda.

Los cambios en la topografía de las *sagittae* a lo largo del desarrollo, considerando en este caso las 8 clases de talla, se pueden observar principalmente en el sulco acústico, el cual se define mejor conforme avanza la etapa ontogenética. En particular, la cauda se hace más profunda y a partir de la clase 6 (que comprende individuos en el intervalo  $241 \leq LP, \text{ mm} \leq 272$ ) se comienzan a observar cristas en la región terminal de la misma. La cisura se puede observar cada vez más conspicua con forme la talla aumenta (figura 8), sin embargo no aparece de manera constante en el resto de los organismos de sus respectivas tallas; la región posterior es la más heterogénea entre los organismos de las 8 clases de talla pues en algunos casos termina en punta y en otros es truncada o redondeada. El borde presenta alta variación en todas las zonas del otolito, con formas aberrantes como agujeros y ondulaciones irregulares.

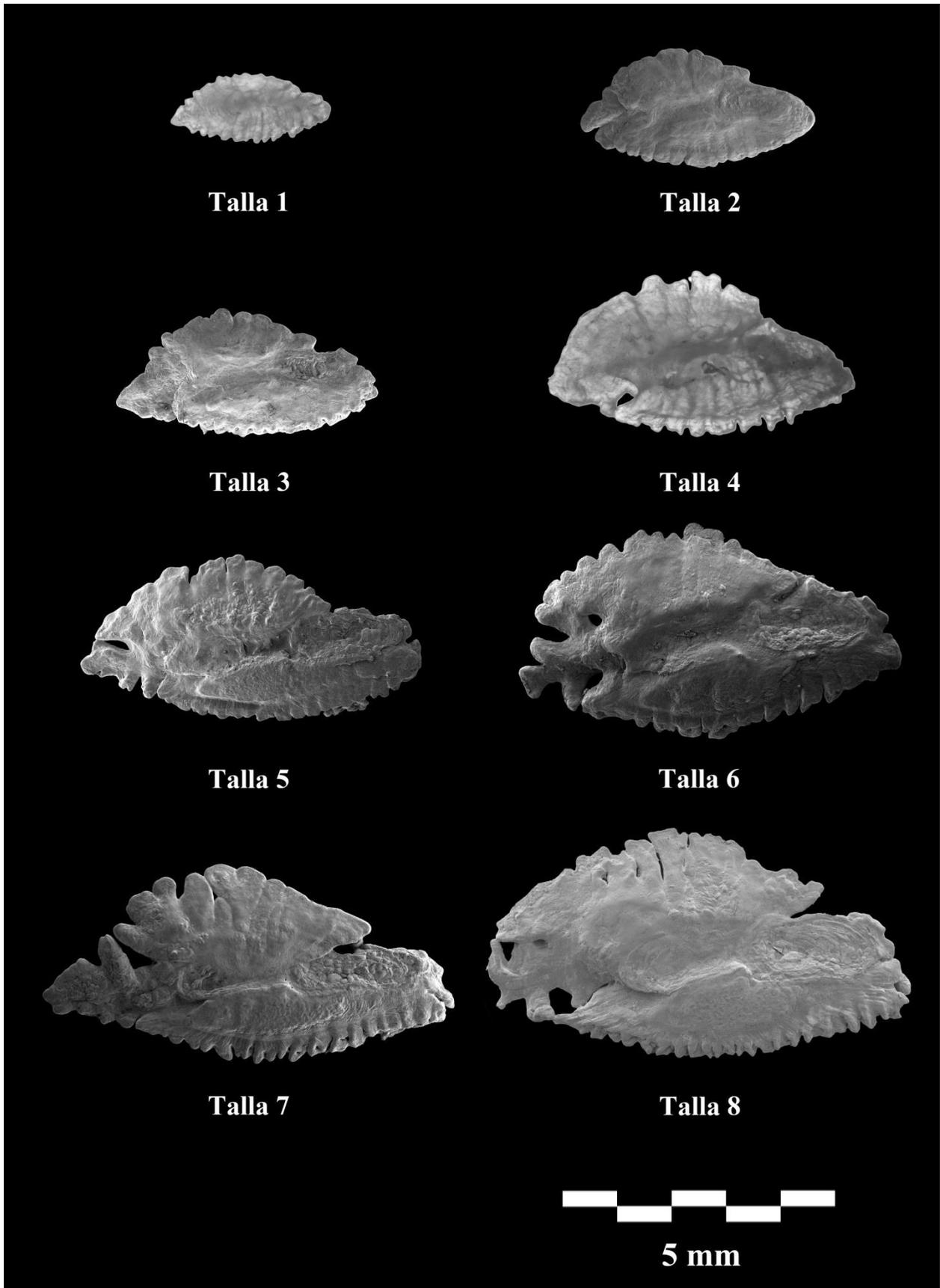


Figura 8. Fotografías de microscopía electrónica de un otolito de *Pterois volitans* “representativo” de organismos de cada una de las clases de talla.

## ***Morfometría tradicional***

Se fotografiaron 220 otolitos con la técnica de microscopía óptica de campo claro y 25 se fotografiaron por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido. Las medidas euclidianas de los peces se resumen en la tabla 2 y las de los otolitos en la tabla 3.

**Tabla 2. Intervalos de medidas euclidianas de los peces.**

| <b>Izquierdo</b>            | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>Promedio</b> |
|-----------------------------|------------|------------|-----------------|
| <b>Longitud patrón (mm)</b> | 81         | 337        | 248.45          |
| <b>Amplitud máxima (mm)</b> | 23         | 150        | 97.85           |
| <b>Diámetro ocular (mm)</b> | 5          | 21         | 15.83           |

**Tabla 3. Intervalos de medidas euclidianas de los otolitos.**

| <b>Izquierdo</b>                     | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>Promedio</b> | <b>Derecho</b>                  | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>Promedio</b> |
|--------------------------------------|------------|------------|-----------------|---------------------------------|------------|------------|-----------------|
| <b>Longitud otolito (mm)</b>         | 3.08       | 7.93       | 6.17            | Longitud otolito (mm)           | 2.93       | 7.89       | 6.20            |
| <b>Ancho otolito (mm)</b>            | 1.34       | 4.20       | 3.13            | Ancho otolito (mm)              | 1.35       | 4.14       | 3.13            |
| <b>Área otolito (mm<sup>2</sup>)</b> | 2.88       | 20.94      | 13.16           | Área otolito (mm <sup>2</sup> ) | 2.75       | 21.18      | 13.19           |
| <b>Longitud del rostro (mm)</b>      | 0.55       | 2.87       | 1.84            | Longitud del rostro (mm)        | 0.43       | 3.12       | 1.79            |

El análisis de la forma de los bordes de 220 otolitos se realizó colocando 50 semimarcas en cada imagen. Se evaluó por separado el efecto de dos variables ajenas a la forma para poder establecer su injerencia sobre la misma, la coloración aparente del pez y la talla.

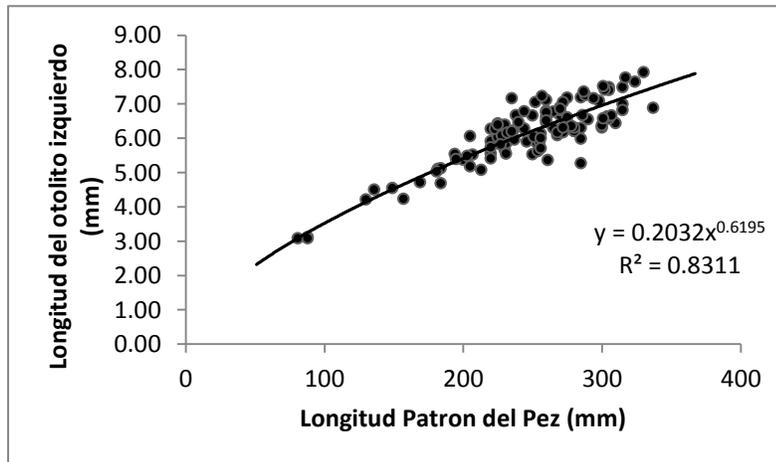


Figura 9. Regresión potencial longitud patrón- longitud de los otolitos izquierdos, con ecuación y coeficiente de determinación.

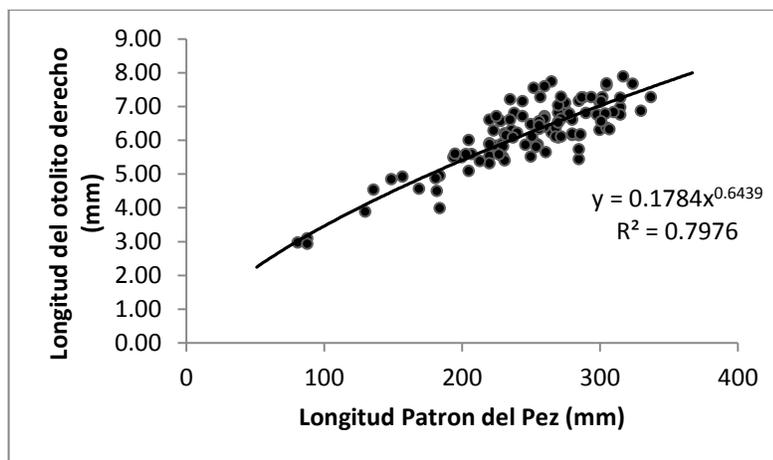


Figura 10. Regresión potencial longitud patrón- longitud de los otolitos derechos, con ecuación y coeficiente de determinación.

Con el fin de evaluar la manera en la que crecen los otolitos, considerando la dimensión del largo total de esta estructura, en función del tamaño del pez (LP, mm), se ajustaron modelos potenciales, resueltos por la técnica de mínimos cuadrados. Los resultados se presentan en las figuras 9 y 10 considerando la longitud del otolito derecho y la longitud del otolito izquierdo, respectivamente. En cada una se puede observar la ecuación que describe la curva teórica además de su coeficiente de determinación que, en el caso de los otolitos derechos fue de  $R^2 = 0.80$  y de  $R^2 = 0.83$  para los otolitos izquierdos, por lo que se considera un ajuste satisfactorio para el modelo potencial usado. El exponente fue de 0.6439 para la relación de los otolitos derechos y de 0.6195 para la relación de los otolitos izquierdos.

Para observar la relación del diámetro ocular con los otolitos derecho e izquierdo por separado, se graficaron los datos y se obtuvo la regresión potencial que describe el comportamiento de los datos. En la figura 11 se muestra la gráfica y la ecuación que describe la línea de tendencia de los otolitos derechos contra el diámetro ocular, el coeficiente de correlación es de 0.7708. En la figura 12 se grafican las longitudes de los otolitos izquierdos contra el diámetro ocular, en este caso el valor de  $R^2$  es de 0.7954 por lo que en ambos caso se considera un ajuste adecuado.

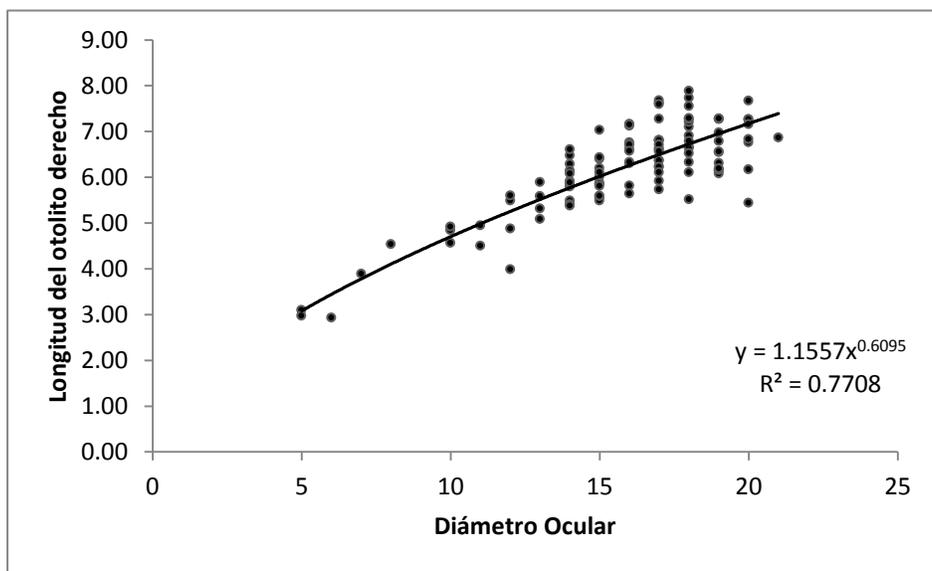


Figura 11. Regresión potencial diámetro ocular-longitud del otolito derecho, con ecuación y coeficiente de determinación.

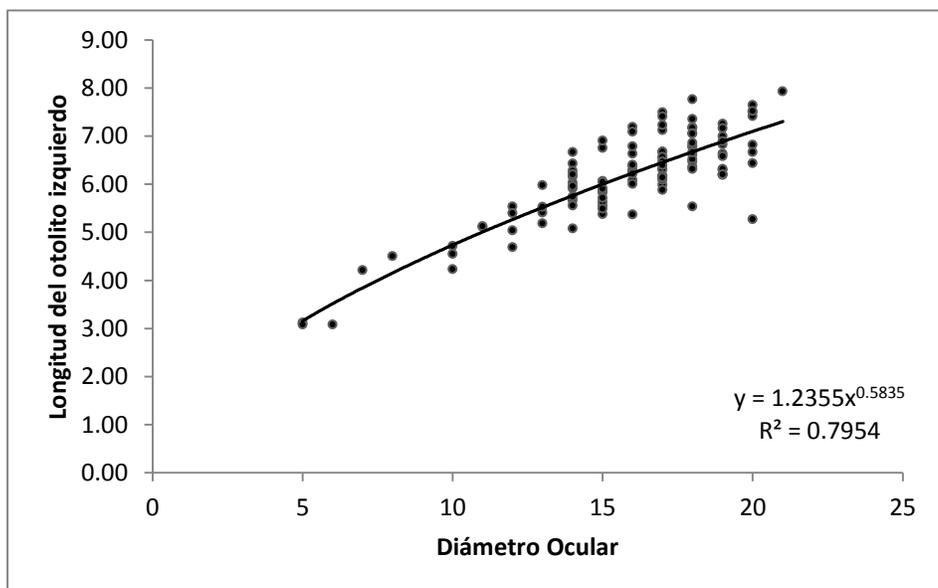


Figura 12. Regresión potencial diámetro ocular-longitud del otolito izquierdo, con ecuación y coeficiente de determinación.

En la figura 13 se muestran las tres coloraciones externas encontradas en los peces muestreados. En el momento de ser fotografiados había transcurrido el mismo tiempo de haber sido extraídos del mar, para evitar la degradación diferencial del color.

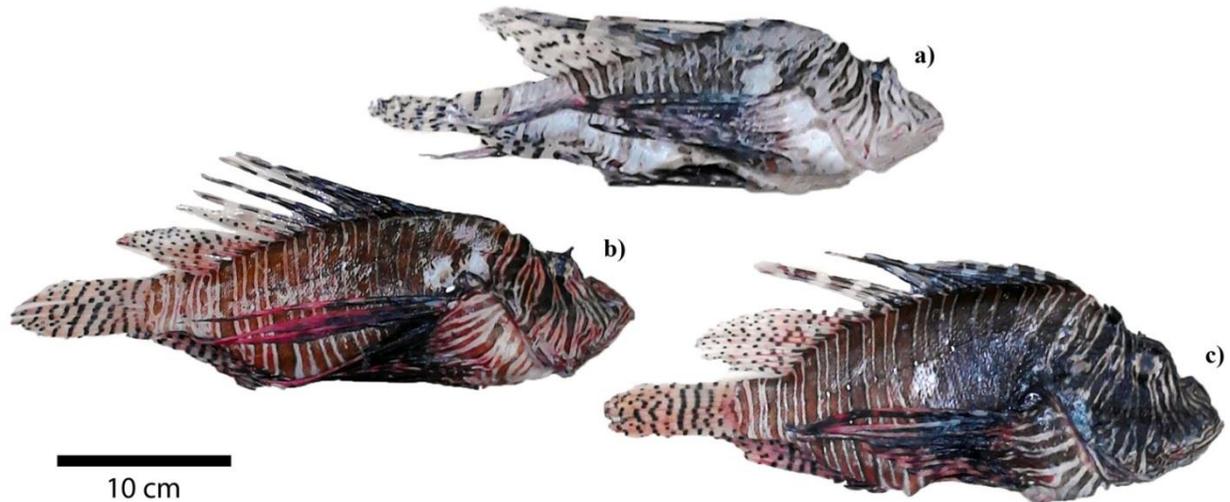


Figura 13. Coloraciones externas aparentes de *Pterois volitans* del Área Natural Protegida Arrecifes de Puerto Morelos: a) clara, b) intermedia, c) oscura.

### **Morfometría Geométrica**

En la figura 14 se aprecian las nubes de puntos negros correspondientes a las 11,000 semimarcas que fueron obtenidas considerando tanto los otolitos derechos e izquierdos, después de ser alineados mediante la técnica de ajuste de Procrustes. Los números en rojo, corresponden a los puntos azules que representan la configuración espacial promedio de los otolitos de *Pterois volitans*, también llamados centroides, de cada uno de las 50 semimarcas digitalizadas sobre el borde.

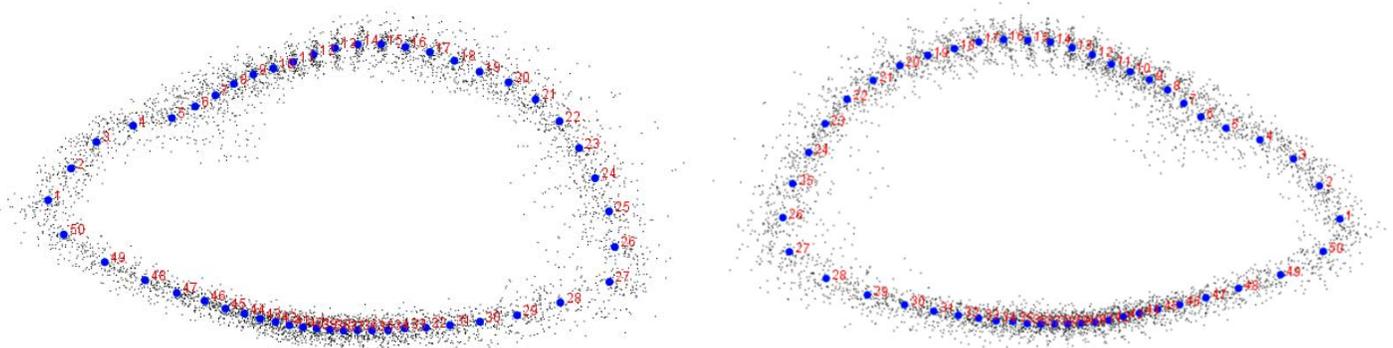
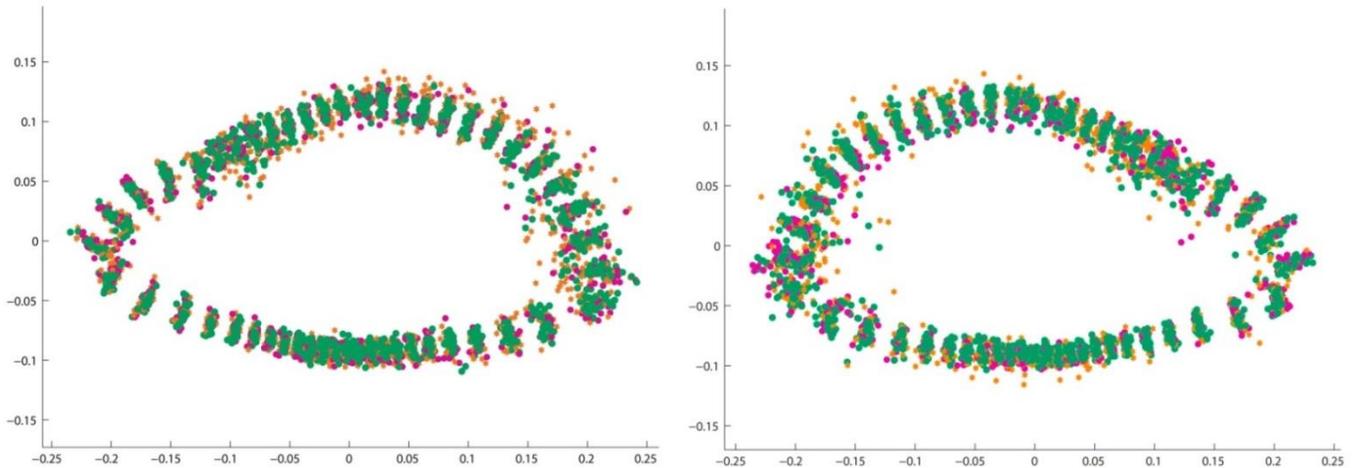
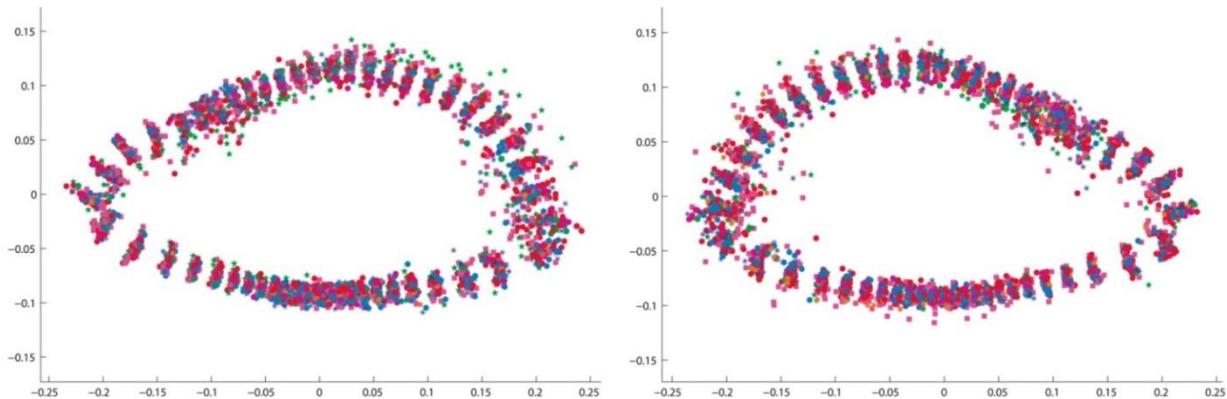


Figura 14. Semimarcas alineadas con el método de Procrustes, lado derecho e izquierdo.

Por otra parte, en las imágenes 15 y 16 se ilustran las configuraciones de las semimarcas alineadas mediante la técnica de deslizamiento ejecutada en el programa Semiland6.



**Figura 15. Agrupación por coloración externa del pez de otolitos izquierdos y derechos, alineados con el análisis de Procrustes y deslizados con el programa Semiland6.**

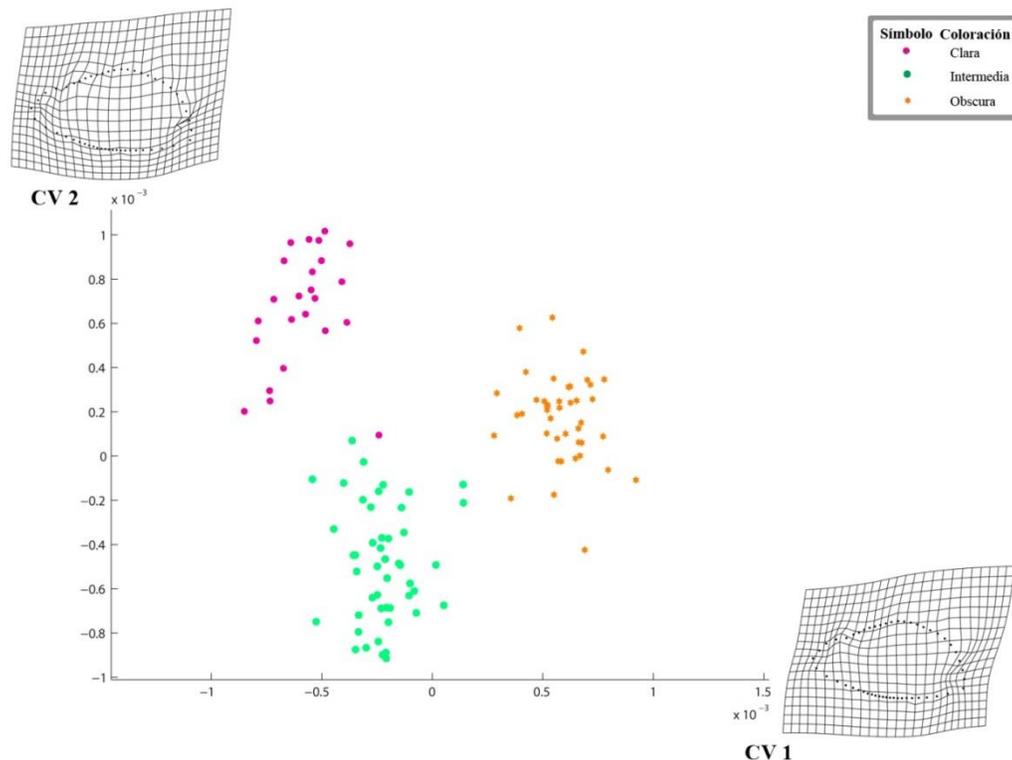


**Figura 16. Agrupación por clases de talla de otolitos izquierdos y derechos, alineados con el análisis de Procrustes y deslizados con el programa Semiland6**

Las figuras 17, 18, 19 y 20 muestran las gráficas de las variables canónicas (CV) de los análisis canónicos de variables ejecutados en los conjuntos de datos de otolitos derechos e izquierdos agrupados por color del ejemplar (ver fig. 9). Las figuras 17 y 18 muestran los datos correspondientes a los otolitos derechos; en la figura 17 se observa la agrupación cuando se grafican la CV1 contra la CV2. Las dos mallas de deformación indican que el cambio se centra en la región posteroventral y anterodorsal, lo cual genera tres agrupaciones de puntos bien

delimitadas y separadas entre sí. Los valores que corresponden a los otolitos extraídos de peces claros son más afines a la CVA1, mientras que los intermedios son más parecidos a la CV2. En la fig. 18 se observa la distribución cuando se grafica la CV1 contra la CV3, la malla de deformación del eje de la CV3 indica que los cambios en forma sólo se centran en la región posterior del otolito, aunque tienen una dirección opuesta a las CV anteriores. El primer eje es donde se presenta la mayoría del cambio en la forma dado que  $\Lambda = 0.0176$  ( $df = 192$  y  $p = 0.002$ ).

En las figuras 19 y 20 se muestran las gráficas de los grupos de otolitos izquierdos. Al igual que en el caso de los otolitos derechos. El valor de  $\Lambda = 0.0275$  ( $df = 192$  y  $p = 0.002$ ) es mayor que para el lado derecho. En la fig. 19 los grupos correspondientes a los peces categorizados como oscuros e intermedios muestran una mayor afinidad por la CV2 que la agrupación de otolitos de peces con coloración clara.



**Figura 17. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de las medidas de los otolitos derechos agrupados por la coloración externa de los ejemplares.**

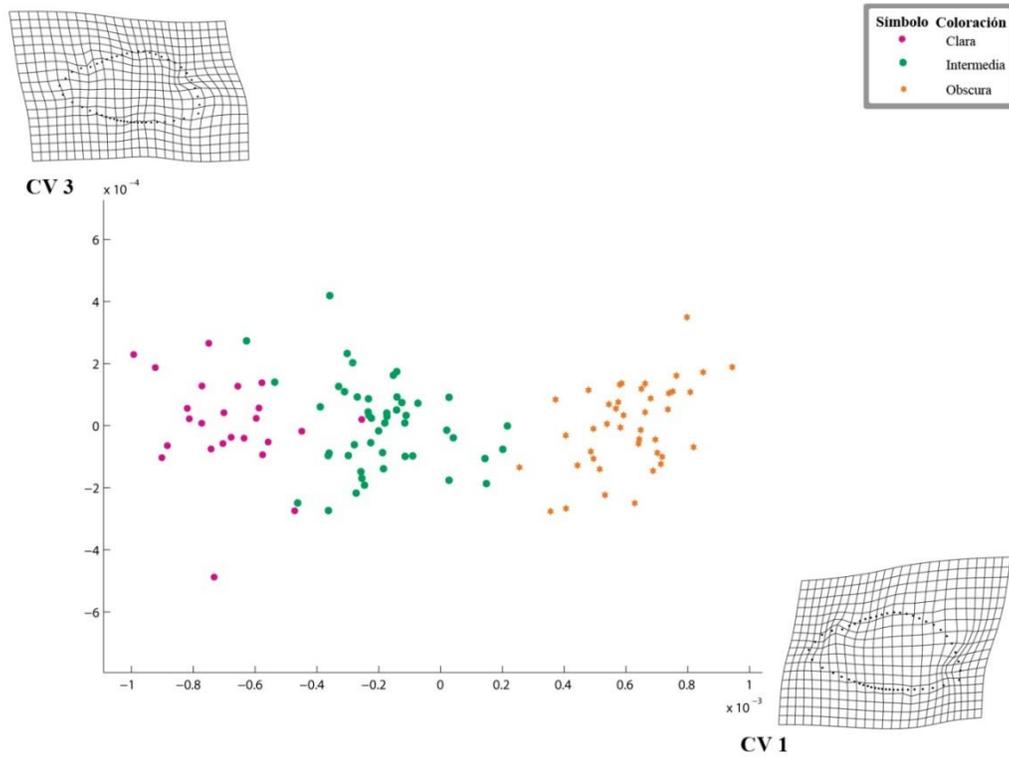


Figura 18. Gráfica de las variables canónicas (CV) 1 y 3 de las medidas de los otolitos derechos agrupados por la coloración externa de los ejemplares.

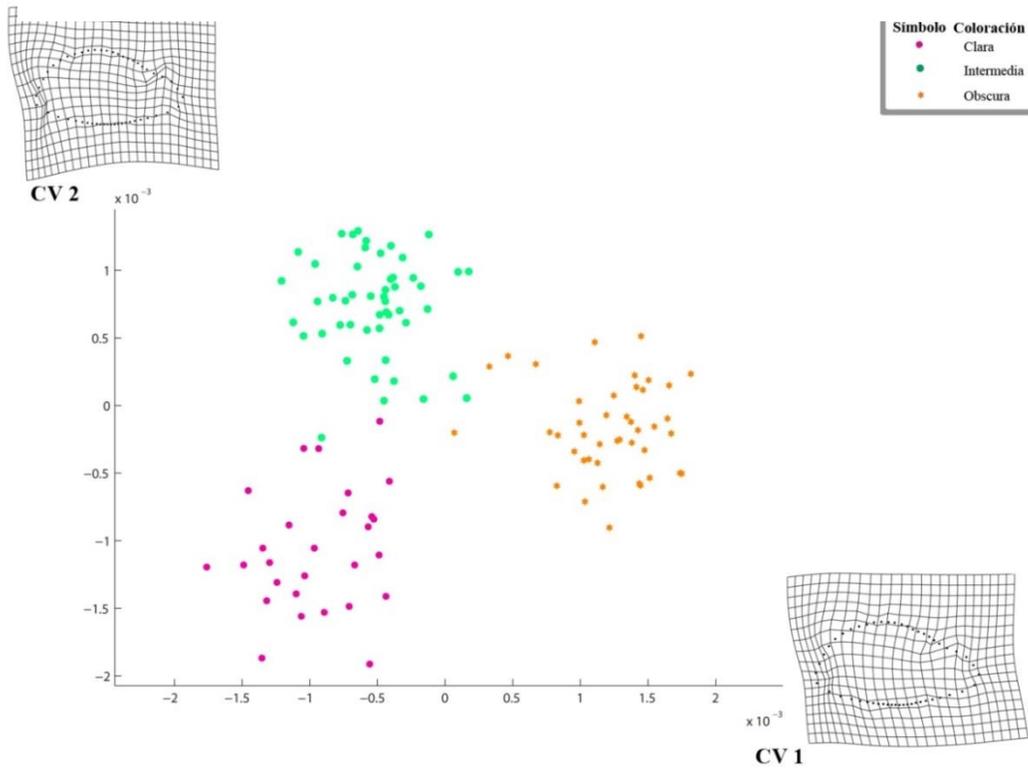
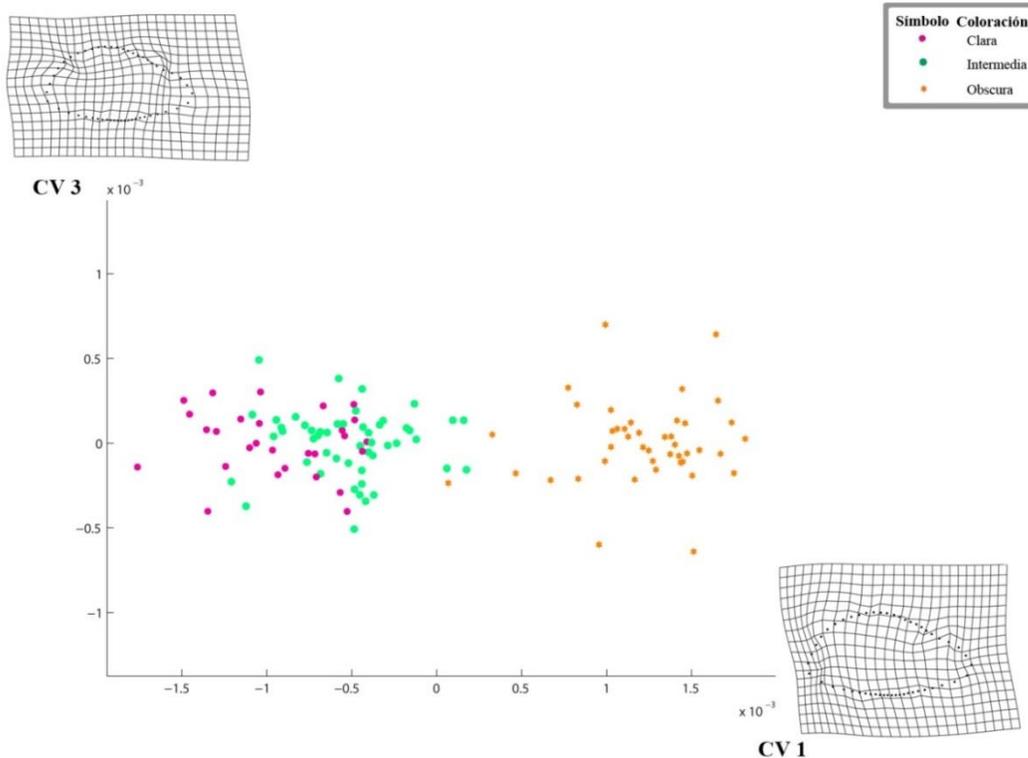


Figura 19. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de las medidas de los otolitos izquierdos agrupados por la coloración externa de los ejemplares.



**Figura 20. Gráfica de las variables canónicas 1 y 3 de las medidas de los otolitos izquierdos agrupados por la coloración externa de los ejemplares.**

En las figuras 21, 22, 23 y 24 se muestran las gráficas de los resultados del CVA aplicado a los conjuntos de otolitos derechos e izquierdos agrupados por clases de talla. En las figuras 21 y 22 se observan los valores correspondientes a la CV1 y a la CV2 y los de la CV1 y CV3 de los otolitos derechos, respectivamente. Para ambos casos se obtuvo que, para el Eje 1,  $\Lambda < 0.0001$  ( $df = 672$ ,  $p = 1.72 \times 10^{-15}$ ). En el Eje 2,  $\Lambda < 0.0001$  ( $df = 570$ ,  $p = 1.37 \times 10^{-5}$ ) y, en el Eje 3  $\Lambda = 0.0001$  ( $df = 470$ ,  $p = 0.008$ ). Los valores de  $\Lambda$  cercanos a cero indican que las 8 clases de talla se discriminan adecuadamente entre sí, a lo largo de los tres ejes. En la figura 21 se observa que todas las clases de talla se agrupan cerca del eje de la CV2, con excepción de las tallas 1, 3 y 8 las cuales se mantienen cerca del eje de la CV1. En este caso, la malla de deformación tiene un cambio de forma que notorio en parte de posterior del otolito, en especial en la región ventral. Los datos correspondientes a la CV2 indican que existe un cambio evidente tanto en la zona anterior y en la sección ventral de la posterior. En la figura 22 las clases de talla se observan más desagregadas, sin embargo se mantiene la misma tendencia descrita: las tallas 1 y 3 se mantienen próximas al

eje de la CV1. Las mallas de deformación indican que, si bien el cambio se centra en la parte posterior, el vector de deformación es diferente pues en la CV1 el vector tiende en dirección paralela al eje horizontal mientras que el vector de la CV3 es perpendicular al eje.

En las figuras 23 y 24 se muestran las gráficas de los CVA obtenidos del análisis de los otolitos izquierdos. Se obtuvieron 3 ejes con las siguientes características: Eje 1 Lambda < 0.0001 (df = 672, p = 4.72 x 10<sup>-16</sup>), Eje 2 Lambda = 0.0001 (df = 570 p=5.93 x 10<sup>-7</sup>) y Eje 3 Lambda= 0.0001 (df = 470, p = 0.003). Los resultados analíticos son parecidos a los obtenidos con los otolitos derechos; sin embargo, la distribución de los grupos es diferente. En la figura 23, las tallas 1, 2 y 3 se separan de las demás y se ubican en la periferia del conglomerado que forman las nubes de puntos de las otras tallas. Cabe señalar que la deformación representada en el CV2 es conspicua en el área posterior del otolito con un vector de deformación con dirección al centro del otolito, mientras que el vector de la misma área del otolito de la malla del CV1 es en sentido contrario. La figura 24 ilustra las CV1 y CV3 que son más parecidas en cuanto a dirección de vectores de deformación con la diferencia de que la magnitud del cambio de forma es menor en la región anterior del otolito, lo cual mantiene alejados a las tallas 1 y 2, sin embargo acerca a la talla 3 a las demás y aleja la talla 8.

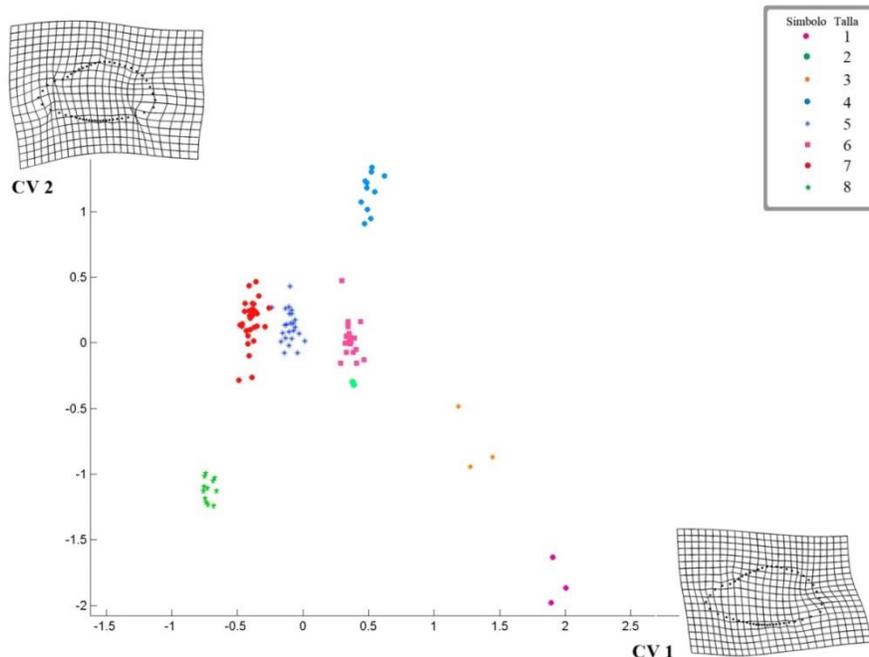


Figura 21. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de los otolitos derechos agrupados por las clases de tallas de los peces.

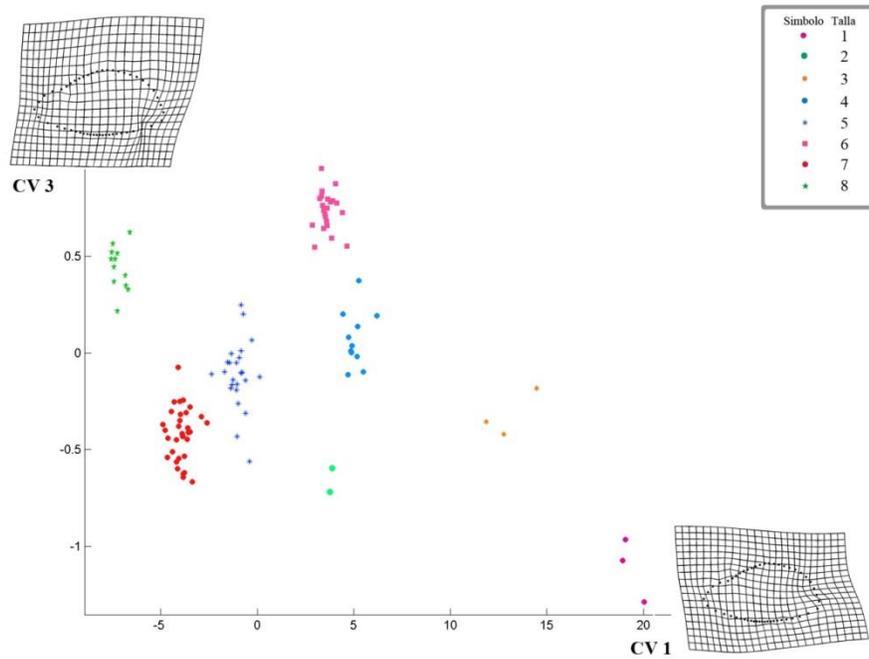


Figura 22. Gráfica de las variables canónicas 1 y 3 de los otolitos derechos agrupados por las clases de tallas de los peces.

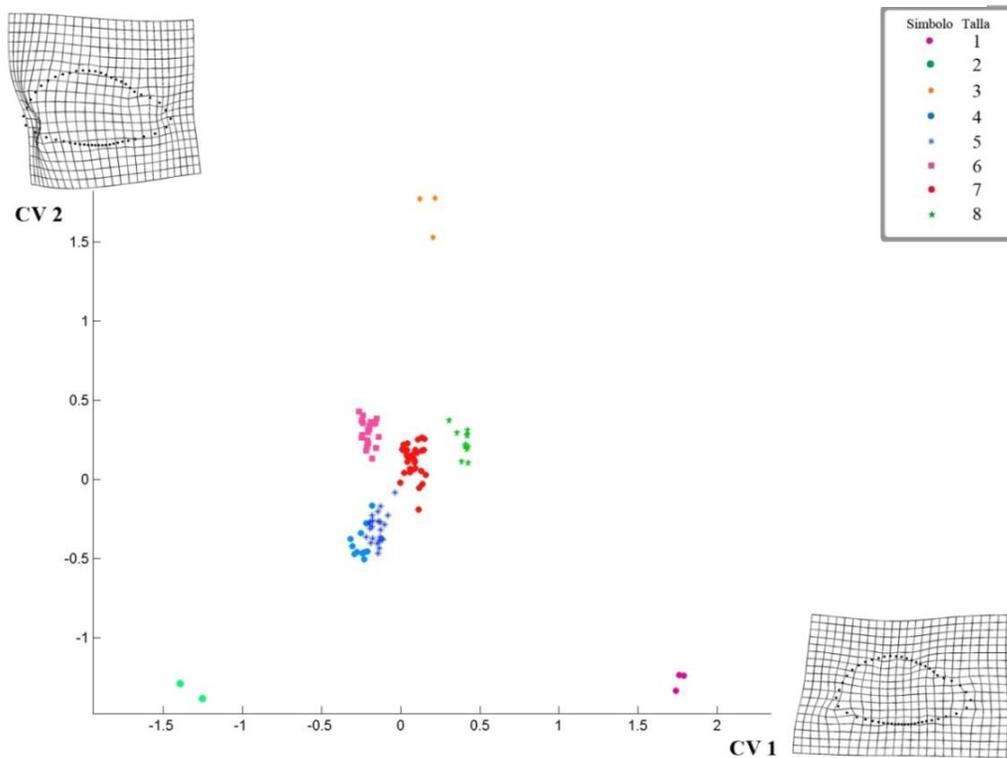


Figura 23. Gráfica de las variables canónicas 1 y 2 de los otolitos izquierdos agrupados por las clases de tallas de los peces.

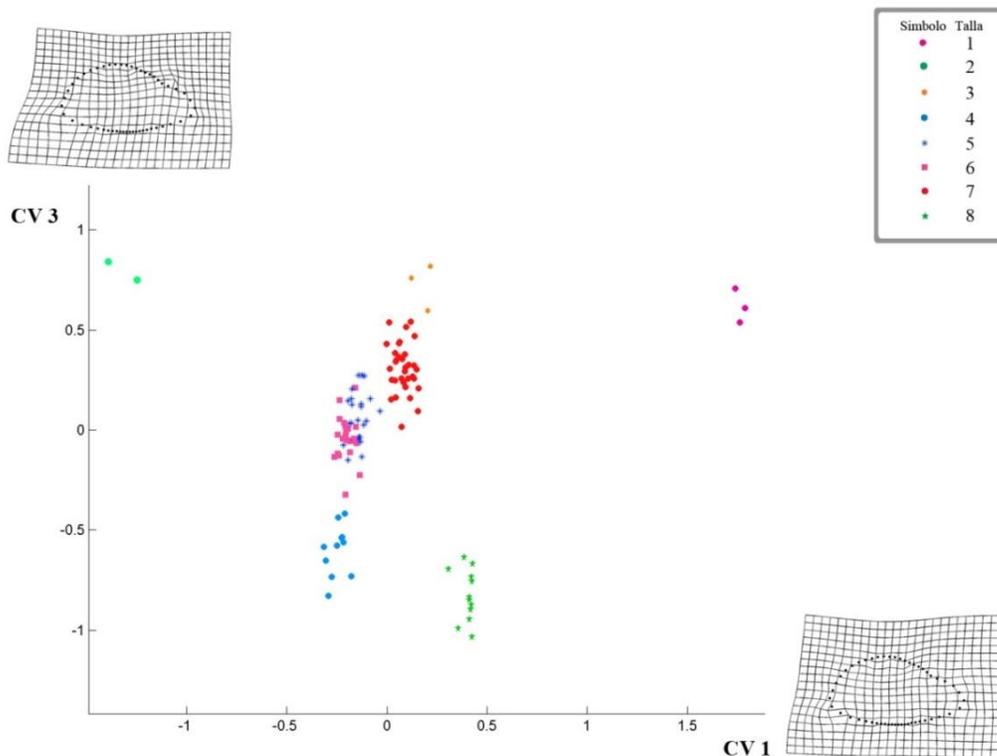


Figura 24. Gráfica de las variables canónicas 1 y 3 de los otolitos izquierdos agrupados por las clases de tallas de los peces.

### ***Análisis ecológico***

En la tabla 4 se puede apreciar los valores obtenidos para los índices E y R de los otolitos derechos e izquierdos. Si bien los valores máximos y mínimos de los índices no son idénticos, las diferencias entre valores promedio de ambos índices no son estadísticamente significativos (E:  $t = 1.54$ ,  $p > 0.05$ ; R:  $t = 0.21$ ,  $p > 0.05$ ). Este aspecto contrasta con las tendencias de los valores de los índices que se muestran en las figuras 25 y 26 en las que se nota que no existe un comportamiento especular, como se esperaría si los otolitos derechos e izquierdos del mismo organismo fueran idénticos.

Tabla 2. Valores (promedio, máximo y mínimo) de los índices E y R de otolitos derechos e izquierdos.

|          | Índice R<br>Derecho | Índice R<br>Izquierdo | Índice E<br>Derecho | Índice E<br>Izquierdo |
|----------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Mínimo   | 15                  | 18                    | 40                  | 43                    |
| Máximo   | 41                  | 45                    | 64                  | 68                    |
| Promedio | 29                  | 30                    | 50                  | 51                    |

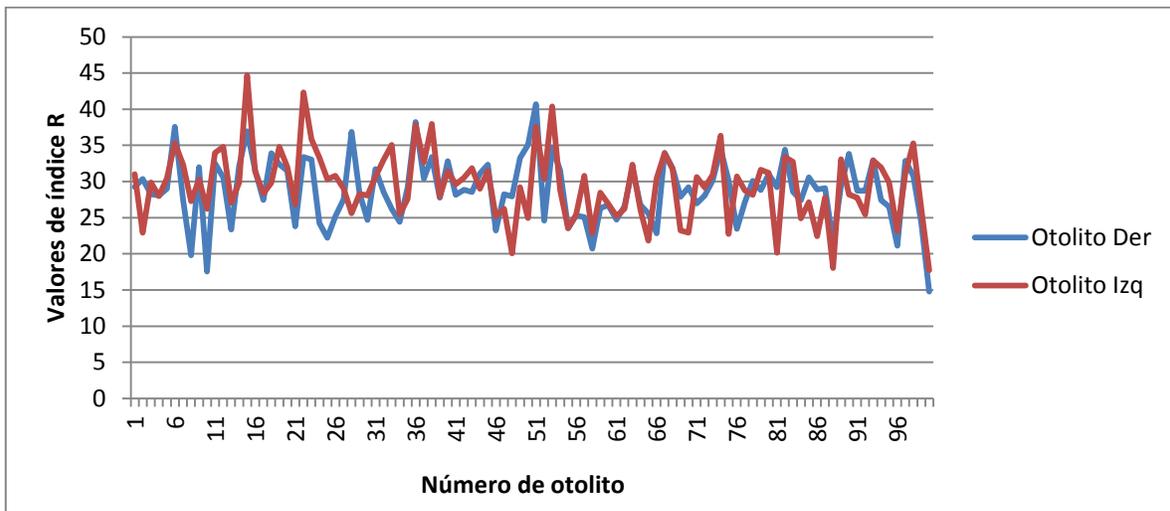


Figura 25. Gráfica de la secuencia (considerando un arreglo arbitrario) de los valores del índice R en los otolitos derechos e izquierdos.

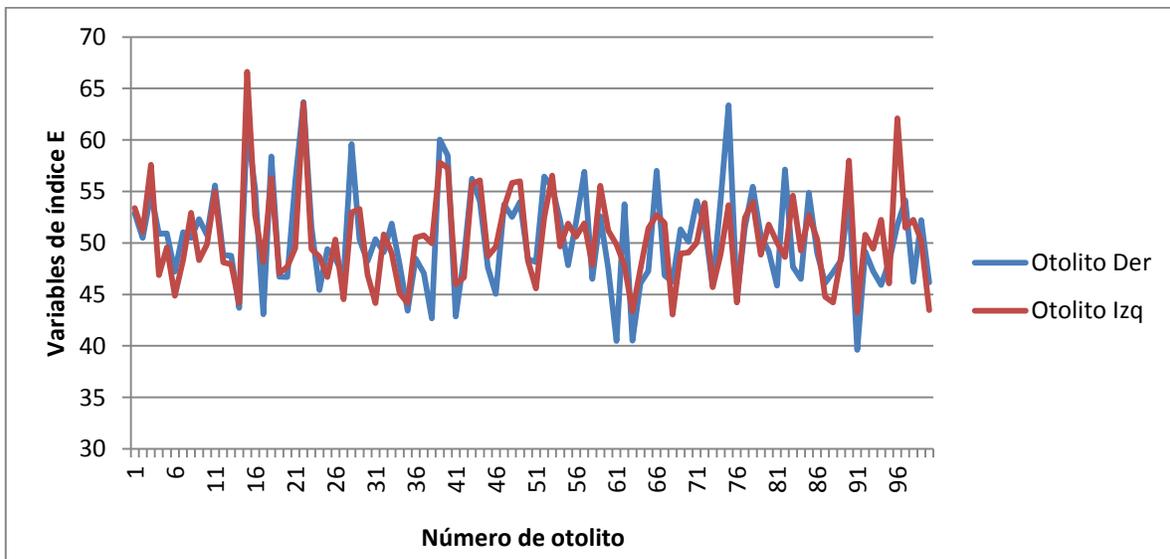


Figura 26. Gráfica de la secuencia (considerando un arreglo arbitrario) de los valores del índice E en otolitos derechos e izquierdos.

## **DISCUSIÓN**

### **Descripción de la *sagitta***

La morfología y la topografía de la *sagitta* varía de acuerdo con el desarrollo de los individuos. Las *sagittae* de las clases de talla 1 y 2 fueron las más homogéneas en cuanto a las características de la topografía del otolito, con bordes sinuosos y con una cisura poco profunda pero conspicua. Los otolitos de las clases de talla 3 a la 8 presentaron cambios en la topografía con aberraciones en el canal acústico, bordes irregulares, cristas de proporciones variables, intermitencia en la presencia de la cisura e incluso deformaciones de la zona del ostio, con formaciones de cristales atípicos.

La forma de los otolitos de las especies que componen la familia Scorpeanidae es muy variable (Tuset *et al.*, 2008) y no existe una forma que lo defina consistentemente, esto puede ser intrínseco a la amplia variabilidad fenotípica presente en este grupo.

A diferencia de lo reportado por Tuset *et al.* (2003) que encontró que los cambios morfológicos más importantes en las *sagittae* de varias especies de serránidos ocurren cerca de la talla de primera madurez. En el presente trabajo, los cambios más evidentes en la forma del otolito ocurren en las clases de talla mayores (ver figuras 21, 22, 23, 24).

### **Morfometría tradicional**

El intervalo de longitudes de los 110 organismos analizados fue  $81\text{mm} \leq \text{LP} \leq 337\text{mm}$ , con un valor promedio de 248.4mm. La talla máxima reportada para *P. volitans* en el Golfo de México es 390mm (Aguilar-Perera *et al.*, 2013), mientras que frente a las costas de Carolina del Norte en EUA, Whitfield *et al.* (2006) reportan peces león de 450mm de longitud total. Es necesario tomar en cuenta que en el ámbito natural de distribución de este complejo de especies en el Indo-Pacífico, las tallas máximas no superan los 380 mm (Randall *et al.*, 1997).

La relación entre la longitud de los otolitos, analizados por separado con respecto a la longitud patrón del pez, es de tipo potencial. El ajuste del modelo fue significativo ( $p < 0.05$ ) y los valores de las pendientes indican alometría negativa. Jawad *et al.* (2011) reportan que, normalmente, la relación entre la longitud del pez y las dimensiones del otolito es de tipo lineal y los ajustes del modelo suelen ser mejores cuando se trata de individuos jóvenes que en peces en etapas ontogénicas más avanzadas. Sin embargo, factores como la alimentación y las condiciones del hábitat son factores que intervienen en esta relación (ver figura 11).

Se investigó la relación entre el diámetro ocular y la longitud del pez. En este caso, la asociación entre las variables fue del 77.0% para los otolitos derechos y del 79.5% para los otolitos izquierdos. Estos resultados permiten decir que estas variables se encuentran correlacionadas (ver figura 12).

L'Abe'e-Lund *et al.* (1993) sugieren que la forma de los otolitos está controlada genéticamente y se ha demostrado que, en muchos casos, los organismos que habitan a profundidades mayores de 1000 m suelen tener otolitos de mayor tamaño (Lombarte y Cruz, 2007; Schulz-Mirbach *et al.*, 2008.).

Tuset *et al.* (2010) no encontraron diferencias estadísticas en la morfometría del otolito entre *Aphanopus carbo* y *A. intermedius* considerando variables como el peso de los otolitos, la altura y el área del surco, pero indican que los otolitos de los individuos de *A. carbo* que habitan a mayores profundidades son más grandes tanto en tamaño como en peso. Por lo tanto, el tamaño de estas estructuras es indicativo de la profundidad de las aguas en las que habita.

Paxton (2000) realizó una extensiva revisión sobre la relación existente entre el tamaño de los otolitos y otras variables como el hábitat del pez o su capacidad de luminiscencia. Concluyó que, en general, no existen patrones definidos para “predecir” el tamaño de los otolitos a partir de, por ejemplo, el tamaño de los ojos, o la presencia o ausencia de vejiga natatoria, debido a que el tamaño de los otolitos responde más a condicionantes de carácter auditivo o físico, ya sea ambientales (ruido de fondo en la columna de agua o movimientos

abruptos del mar, que ocasiona movimientos abruptos del otolito dentro de la membrana otolítica) o propias del pez.

Wilson (1985) encontró que la longitud de la *sagitta* versus la longitud de la cabeza disminuyó progresivamente con el aumento de profundidad y sugiere que el tamaño de *sagitta* en 6 especies de macrouridos, con ámbitos de distribución que van de los 227 m a 3,400 m está controlado por factores ambientales y sugiere que esta relación, por lo tanto, tiene poca importancia taxonómica. En el presente trabajo la profundidad máxima de muestreo fue de 30m, sin embargo, en su hábitat nativo la profundidad máxima en la que se ha visto el pez león es de 50m (Whitfield, 2002). Nuttall (2014), durante una campaña en la que usaron submarinos no tripulados para observar el fondo del Golfo de México, reporta que la profundidad máxima a la que se avistó el pez león fue de 112,4m, con las mayores abundancias entre los 80 m y 89.9m. Apunta que los números poblacionales van en aumento y se puede esperar que *P. volitans* se disperse ampliamente por toda la zona mesofótica, que abarca hasta los 200m de profundidad. Los resultados de este trabajo indican que el tamaño de los otolitos del pez león y la longitud del pez están correlacionados y pueden describirse con modelos potenciales con índices de alometría negativos por lo que el tamaño relativamente más grande de los otolitos de los peces de menor tamaño puede reflejar que, al menos en alguna de sus etapas ontogénicas, la distribución de estos organismos puede alcanzar profundidades grandes, contrariamente a lo que se podría esperar en un pez epipelágico asociado a arrecifes.

## ***Morfometría Geométrica***

### **Coloración**

Los peces que viven en arrecifes de coral despliegan una amplia variedad de coloraciones corporales, que son utilizadas como caracteres de valor taxonómico. Sin embargo, el alto grado de similitud entre patrones de coloración de algunas especies, aunado a las dificultades de tipo logístico o técnico en la

determinación en campo o por video-transectos, hacen que la determinación taxonómica de peces usando sólo los patrones corporales de coloración sea poco precisa (Brock, 1982).

Las agrupaciones entre la forma de los otolitos derechos e izquierdos según la coloración externa del pez (clara, intermedia, oscura) que se muestran en las figuras 17, 18, 19 y 20 permiten observar que las nubes de puntos correspondientes a cada coloración se encuentran bien segregadas. Los valores de lambda (0.0176 para otolitos derechos y 0.0275 para izquierdos) indican que la forma de los otolitos es distinta considerando la coloración de los peces como variable de agrupación y la discriminación entre los grupos de otolitos es óptima.

En el caso particular del pez león, que en el Océano Atlántico es un complejo de dos especies, *Pterois volitans* y *P. miles* (Whitfield *et al.*, 2002) existe una problemática para distinguir una especie de otra, ya que los datos merísticos y el patrón de coloración definido son similar. Sin embargo, se ha observado que organismos de ambas especies recolectados a mayores profundidades suelen presentar una tonalidad más clara y carecen de barras de coloración oscura en la región lateral de la cabeza (Schultz, 1986).

La deposición del carbonato de calcio en los peces es un proceso que es independiente del crecimiento corporal y es regulado por un conjunto de genes que ya están definidos (Söllner *et al.*, 2003). Existe evidencia de que la forma de los otolitos responde con una mayor especialización a los requisitos de audición de hábitats particulares de cada pez (Gauldie, 1988; Lombarte, 1992; Aguirre y Lombarte, 1999). Cruz y Lombarte (2004) logran diferenciar entre especies de familias que tienen diferentes patrones de coloración y especies que pertenecen a un grupo que produce sonidos usando el tamaño relativo de los otolitos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren que las distintas coloraciones externas de los peces león pueden relacionarse con los patrones morfológicos de los otolitos. Si bien las características de coloraciones de los peces pueden estar relacionadas con variables como el sexo o la profundidad en la que habitan, (Wilson, 1985) la ubicación geográfica (Begg y Brown, 2000) o el

nicho ecológico que ocupan (Gauldie y Crampton, 2002), en este trabajo no pudieron analizarse debido a la naturaleza de la obtención de las muestras.

Es necesario el uso de herramientas genéticas para esclarecer la identidad taxonómica de cada uno de los tres grupos de coloración que se proponen en este trabajo. Puebla *et al.* (2007) demostraron que potencialmente un solo rasgo, como lo es el patrón de coloración, si es utilizado bajo selección natural disruptiva y a la vez utilizado para dar señales de apareamiento selectivo, genera agrupaciones de peces con formas de color simpátricas, que son genéticamente distintas, lo que puede representar el comienzo de un evento de especiación.

Además hay que tener en cuenta que en parte las diferencias que distinguen cada ecotipo reflejan el hecho de que el desarrollo de los otolitos está limitado por ciertos factores ambientales estresantes. Así, las adaptaciones que presenta cada ecotipo responden a la manera en la que actúan los factores de estrés. Estos ecotipos pueden ser usados para establecer la relación filogenética entre grupos de organismos como lo hizo Lombarte *et al.* (1991) al agrupar las especies de la familia Nototheniidae según la forma de sus otolitos y encontrar que fue similar al cladograma filogenético basado en caracteres anatómicos.

### **Clases de talla**

Los otolitos de los peces león de distinta talla cambian de forma a lo largo del desarrollo. En las figuras 21, 22, 23 y 24 se aprecian las agrupaciones entre la forma de los otolitos derechos e izquierdos y cada una de las 8 clases de talla de los peces león. En las primeras dos gráficas, se observan las agrupaciones de puntos correspondientes a los otolitos derechos y los resultados indican que el cambio de forma ocurre en los primeros tres ejes que están definidos por los valores de lambda, que usa como un criterio para evaluar las diferencia de los grupos (en el Eje 1 de 0.0000,  $df=672$ ,  $p=1.72 \times 10^{-15}$ ; en el Eje 2 de 0.0000,  $df=570$ ,  $p=1.37 \times 10^{-5}$  y en el Eje 3 de 0.0001,  $df=470$ ,  $p=0.008$ ), recordando que cuando los valores son cercanos a cero, la discriminación es casi perfecta, lo que implica que los grupos se encuentran separados.

Los organismos cuyas tallas se encuentran más alejadas de los demás, considerando las variables canónicas 1 y 2, pertenecen a las clases 1, 3 y 8 (Figura 21). La gráfica de las variables 1 y 3 señala que las clases de talla que más se alejan son la 1, 2 y 3 (Figura 22). La razón de que las primeras clases de talla se separen del resto puede deberse a que la forma de los otolitos los organismos jóvenes o inmaduros, puede estar influenciada por las características del ambiente que tienen un efecto en los procesos de deposición de las matrices orgánica e inorgánica y que, por lo tanto, distorsionan su forma en comparación con los adultos (Lombarte *et al.*, 2003). Sin embargo, las trayectorias ontogenéticas son congruentes y resultan en otolitos con formas similares en las primeras etapas de vida de los peces, en comparación con las etapas ontogénicas más avanzadas en las que los cambios de forma pueden deberse a situaciones individuales y condiciones ambientales del nicho ecológico (Capoccioni *et al.*, 2010; Vignon, 2012). Es importante resaltar que los hábitats de las etapas juveniles del pez león difieren de las etapas más avanzadas, lo cual puede resultar en diferentes efectos en la forma de los otolitos, y eso verse reflejado en la forma de las primeras etapas.

La otra clase de talla que se separa del resto es la 8. Un aspecto que es importante resaltar es el hecho de que la mayoría de los otolitos en las clases de talla mayores presentaban algún tipo de deformación o cristalización vaterítica lo cual puede atribuirse a que los peces estén bajo un constante estrés (Oxman, 2007). El origen del estrés es incierto aunque se ha determinado que la forma de los otolitos de peces adultos que viven en un medio ambiente extremo no se ve afectada por los factores abióticos del lugar (Schulz-Mirbach *et al.*, 2011) lo cual apunta a que la naturaleza de los factores estresantes para los peces león en etapas adultas no tiene que ver con el nicho explotado.

Por otro lado, un alto nivel de polimorfismo en los otolitos de los organismos que forman una población, plantea la posibilidad de que diferentes tipos de selección local puedan mantener tal patrón de polimorfismo. El primer tipo posible de selección local es que la densidad de nicho es alta, es decir, hay muchos pequeños nichos cada uno ocupado por relativamente pocos peces especializados

que corresponde a una comunidad con clímax k-seleccionado. La segunda posibilidad es que los números y tipos de nichos varían con el tiempo lo que lleva a generaciones con diferentes puntos fuertes y selección de diferentes características de nicho (Gauldie y Crampton, 2002).

Las figuras 23 y 24 muestran las agrupaciones de los otolitos izquierdos que tienen valores de lambda cero en los 3 ejes. En figura 23 las clases de talla que se separan del resto son la 1, 2 y 3 mientras que en la figura 24 las clases con más diferencia de forma son la 1, 2 y 8. Existe variación en los vectores de deformación de las mallas que se muestran en las figuras 21 y 22; sin embargo, la información general de las gráficas obtenidas con los datos de otolitos izquierdos permite llegar a la misma interpretación que aquellas correspondientes a los otolitos derechos.

Vignon y Morat (2010) afirman que existe un alto grado de co-variación entre otolitos izquierdos y derechos para todas las diferencias por pares probados, por lo que probablemente la genética, el medio ambiente y la interacción entre el medio ambiente actúan en ambos otolitos. Si se considera de manera indirecta, la razón de la estabilidad intraespecífica de la forma de los otolitos puede obedecer a una limitación biológica, debido su función como transductores de sonido (Gauldie 1988, Lychakov y Rebane 2000). Los resultados de este estudio permiten concluir que la información que proviene de los otolitos izquierdos permite hablar de las mismas tendencias en el comportamiento de las variables analizadas.

Como se ha visto, debido a que la forma de los otolitos es moldeada a partir de la información genética y afectada por las diferentes presiones ambientales. Es necesario que la medición de todas esas variables sea lo más precisa posible para poder dilucidar de la manera más acertada posible la implicación que tienen los factores endógenos y exógenos en el cambio de forma. Es claro que la comprensión de la estructura de la población de una especie invasora es crucial para diseñar las leyes y reglamentos encargados de la gestión de las acciones de control, debido a que la correcta extracción de los individuos, en tiempo, lugar y forma es imperante para lograr un control efectivo.

## **Análisis ecológico**

Los valores de los índices E y R pueden usarse para caracterizar la *sagitta* de peces marinos y se pueden utilizar como otros índices en estudios de ecología de peces. El índice E ( $E = AO/LO\%$ ) expresa la tendencia de la forma de la *sagitta* (circular o elongado). El índice R ( $R = LR/LO\%$ ) expresa el porcentaje de la longitud de la *sagitta* que corresponde al rostro. El índice E se puede utilizar para discriminar entre las *sagittae* de los peces asociada al sustrato y las *sagittae* de peces epipelágicos. El índice R se puede utilizar para discriminar entre las *sagittae* de los diferentes ecotipos: Índices de más de 30 se encuentran en peces epipelágicos y los índices más bajos que 30 se encuentran en todos los peces que tienen alguna relación con sustratos blandos (Volpedo y Echeverría 2003).

Se obtuvo un valor de E y R para cada otolito derecho e izquierdo de todos los peces muestreados. En el caso del índice E todos los valores obtenidos de ambos otolitos son mayores 30 que es el umbral, por lo que los peces león se pueden considerar epipelágicos, para el índice R los valores mínimos son 15 y 18 (hábitos de vida asociada a fondos blandos) los valores máximos 41 y 45 (hábito de vida pelágica) y los valores promedio de 29 y 30 de otolitos derechos e izquierdos respectivamente, en los 3 casos, son similares. El resultado de la comparación estadística (t – Student) entre otolitos izquierdos y derechos en ambos índices mostraron que los otolitos de *P. volitans* no difieren significativamente. Sin embargo, la variación entre los valores mínimos y máximos del índice R es grande, situación que puede ser explicada de la misma manera que el comportamiento de las gráficas de los análisis de variables canónicas de morfometría geométrica. Esto significa que existen diferencias entre los hábitat de los peces en etapas tempranas con respecto de los adultos, mismas que determinan la forma de los otolitos, tal como lo proponen Aguirre y Lombarte (1999) que observaron variaciones en las proporciones del área de los otolitos y del sulco acústico de *Mullus* spp. que pueden estar asociadas con diferencias en la alimentación y nichos espaciales. Las especies del género *Mullus* tienen hábitos

alimentarios muy similares y todos se alimentan de forma oportunista al igual que el pez león.

La utilidad de los caracteres morfológicos depende enteramente de lo bien que se entienden sus propiedades biológicas. En el caso de los otolitos, pueden ser una herramienta adecuada para el correcto entendimiento de los patrones de dispersión y hábitos de vida del pez león. Esta especie, en el Parque Arrecifes de Puerto Morelos, parece tener una distribución diferencial con respecto a la profundidad. Las densidades poblacionales mayores se encuentran en sitios profundos y no en la barrera arrecifal, situación que complica el control de esta especie invasora, pues su extracción ahí no es posible debido a que rebasa el límite para el buceo SCUBA. Además también se tiene que tomar en cuenta que el potencial reproductivo del pez es muy alto (Morris *et al.* 2009), lo que permite una ventaja adaptativa, potenciando las posibilidades de invasión a nuevos ambientes. Estos procesos adaptativos pueden estar reflejándose en la forma de los otolitos y aportar un grado de dificultad aún mayor en la interpretación de los resultados de un estudio morfológico de la que normalmente tienen poblaciones de peces que no están en proceso de adaptación a nuevos ambientes.

## **CONCLUSIONES**

- Existe una relación entre la longitud del pez y la del otolito que se ajusta a una función potencial. Los valores de los exponentes obtenidos fueron de 0.6439 para los otolitos derechos y de 0.6195 para los otolitos izquierdos.
- La forma de los otolitos *sagitta* de *Pterois volitans* del ANP Arrecifes de Puerto Morelos, tiene al menos 2 morfotipos diferentes, uno corresponde a los individuos pertenecientes a etapas ontogénicas tempranas ( $81 \leq LP \leq 144$ ) y otro para etapas ontogenéticas avanzadas ( $LP > 145$ ).
- *Pterois volitans* presenta tres patrones de coloración bien diferenciados y los otolitos pertenecientes a los individuos de cada tipo cromático poseen otolitos definidos por un morfotipo característico.
- El índice E indica que los peces león son organismos epipelágicos de acuerdo con la clasificación de Helfman *et al.*, 2009.
- El índice R determina que hay peces león con hábitos de vida epipelágica y otros con hábitos de vida que los asocia a fondos blandos.

## APÉNDICE 1

A continuación se muestra el archivo de texto introducido o “protocolfile” en el programa Semiland6, en donde se definen las curvas del objeto analizado.

```
1 1 1 1
1 2 2 1
1 3 3 1
1 4 4 1
1 5 5 1
2 1 6 1
2 2 7 1
2 3 8 1
2 4 9 1
2 5 10 1
2 6 11 1
2 7 12 1
2 8 13 1
3 1 14 1
3 2 15 1
3 3 16 1
3 4 17 1
3 5 18 1
3 6 19 1
3 7 20 1
3 8 21 1
3 9 22 1
3 10 23 1
3 11 24 1
3 12 25 1
3 13 26 1
3 14 27 1
4 1 28 1
4 2 29 1
4 3 30 1
4 4 31 1
4 5 32 1
4 6 33 1
4 7 34 1
4 8 35 1
4 9 36 1
4 10 37 1
4 11 38 1
4 12 39 1
4 13 40 1
4 14 41 1
4 15 42 1
4 16 43 1
4 17 44 1
4 18 45 1
4 19 46 1
4 20 47 1
4 21 48 1
4 22 49 1
4 23 50 1
```

## **LITERATURA CITADA**

Aguirre, H., Lombarte, A. 1999. Ecomorphological comparisons of sagittae in *Mullus barbatus* and *M. surmuletus*. *Journal of Fish Biology* 55: 105–114.

Aguilar-Perera, A., Tuz-Sulub, A., 2010: Non-native, invasive red lionfish (*Pterois volitans* [Linnaeus, 1758]: Scorpaenidae), is first recorded in the southern Gulf of Mexico, off the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Aquat. Invasions* 5: S9–S12.

Aguilar-Perera, A., L. Perrera-Chan, L. Quijano-Puerto. 2013. Record body size for the non-native Lionfish *Pterois volitans* (Scorpaeniformes) in the southern Gulf of Mexico. *Gulf and Caribbean Research* 25:121-123.

Begg, G.A., Brown, R.W., 2000. Stock identification of haddock *Melanogrammus aeglefinus* on Georges Bank based on otolith shape analysis. *Trans. Am. Fish. Soc.* 129: 935–945.

Bellwood, D.R. and P.C. Wainwright, 2001. Locomotion in labrid fishes: implications for habitat use and cross-shelf biogeography on the Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 20: 139-150.

Bohórquez-Herrera, J., 2009. Ecomorfología alimentaria de algunas especies de peces asociadas a fondos blandos. Tesis. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN.

Bookstein, F.L. 1997. Landmark methods for forms without landmarks: localizing group differences in outline shape. *Med. Image Anal.* 1: 225-243.

Brock, R. E., 1982. A critique of visual census method for assessing coral reef fish populations. *Bulletin of Marine Science* 32: 269-276.

Campana, S.E., Casselman, J.L., 1993. Stock discrimination using otolith shape analysis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50: 1062-1083.

Capoccioni, F., Costa, C., Aguzzi, J., Menesatti, P., Lombarte, A., Ciccotti, E., 2010. Ontogenetic and environmental effects on otolith shape variability in three Mediterranean European eel (*Anguilla anguilla*, L.) local stocks. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 397: 1-7.

Cardinale, M., Doering-Arjes, P., Kastowsky, M., Mosegaard, H., 2004. Effects of sex, stock and environment on the shape of known-age Atlantic cod (*Gadus morhua*) otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 61: 158-167.

Castonguay, M., Simard, P., Gagnon, P., 1991. Usefulness of Fourier analysis of otolith shape for Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) stock discrimination. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48: 296-302.

Clifton, K.B. y Motta, P.J. 1998. Feeding morphology, diet, and ecomorphological relationships among five Caribbean labrids (Teleostei, Labridae). *Copeia* 1998: 953-966.

Cott H.B. Methuen & Co. Ltd; London, UK: 1940. Adaptive coloration in animals.

Courtenay WR 1995. Marine fish introductions in southeastern Florida. *American Fisheries Society Introduced Fish Section Newsletter* 1995(14):2-3.

Cruz, A. & A. Lombarte. 2004. Otolith size and their relationship with colour pattern and sound production. *Journal of Fish Biology*, 65: 1512-1525.

Deng, X., H.J. Wagner, A.N. Popper, 2011. The inner ear and its coupling to the swim bladder in the deep-sea fish *Antimora rostrata* (Teleostei: Moridae) *Deep Sea Res. I*, 58 : 27-37.

Duarte-Neto P., Lessa R., Stosic B., Morize E. 2008. The use of sagittal otoliths in discriminating stocks of common dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) off northeastern Brazil using multishape descriptors. ICES Journal of Marine Science. 65(7):1144.

Fortunato R.C., Avigliano E. 2014. Presence of genus *Pterois* (Oken, 1817) (scorpaeniformes, scorpaenidae): extension of invasive range in caribbean sea and first published record for los frailes archipelago. J. F. Sciences.com. 8(2): 88-91

Gagliano, M., McCormick, M.I., 2004. Feeding history influences otolith shape in tropical fish. Mar. Ecol. Prog. Ser. 278: 291-296.

Gauldie, R.W., 1988, Function, form and time-keeping properties of fish otoliths, Comparative Biochemistry and Physiology A, 91(2): 395-402.

Gauldie, R.W., Crampton, J. S. 2002. An eco-morphological explanation of individual variability in the shape of the fish otolith: comparison of the otolith of *Hoplostethus atlanticus* with other species by depth. J. Fish. Biol., 60: 1204-1221.

Gauldie, R.W., Nelson, D.G.A., 1988. Aragonite twinning and neuro-protein secretion are the cause of daily growth rings in fish otoliths. 90: 501-509.

Gauldie, R.W., 1993. Polymorphic crystalline structure of fish otoliths. Journal of Morphology, 218(1): 1-28.

Hamner R.M., Freshwater D.W., Whitfield P.E., 2007. Mitochondrial cytochrome b analysis reveals two invasive lionfish species with strong founder effects in the western Atlantic. J Fish Biol 71: 214-222.

Hare JA, Whitfield PE, 2003. An integrated assessment of the introduction of lionfish (*Pterois volitans/miles* complex) to the Western Atlantic Ocean. NOAA Tech Memo NOS NCCOS, 21.

Helfman G. Collette B.B, Facey D.E., Bowen B.W. 2009 The diversity of fishes. 2nd Edition. Wiley-Blackwell, 719 pp.

Hoese H.D., R.H. Moore, 1977. Fishes of the Gulf of Mexico. Texas, Louisiana, and Adjacent Waters. Texas A&M University Press, College Station TX. 327 p.

Hüssy, K., 2008. Otolith shape in juvenile cod (*Gadus morhua*): ontogenetic and environmental effects. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 364: 35-41.

Jawad L. A, Ambuali A., Al-Mamr J.M., y Al-Busaidi H.K., 2011. Relationships between fish length and otolith length, width and weight of the indian mackerel *rastrelliger kanagurta* (cuvier, 1817) collected from the sea of Oman. Ribarstvo : Croatian Journal of Fisheries

Klingenberg, C. P., and W. Eklöv. 1996. A combined morphometric and phylogenetic analysis of an ecomorphological trend: pelagization in Antarctic fishes (Perciformes: Nototheniidae). Biological Journal of the Linnean Society 59:143-177.

L'Abbe'e-Lund, J. H. & Jensen, A. J. 1993. Otoliths as natural tags in the systematics of salmonids. Environmental Biology of Fishes 36: 389–393.

Lombarte, A. (1992). Changes in otolith area: sensory area ratio with body size and depth. Environmental Biology of Fishes 33: 405–410.

Lombarte A. Castellón, A. 1991. Inter-specific and intra-specific otolith variability in the genus *Merluccius* as determined by image analysis. *Can. J. Zool.*, 69: 2442-2449.

Lombarte A. and A. Cruz. – 2007. Otolith size trends in marine communities from different depth strata. *J. Fish. Biol.*, 71: 53-76.

Lombarte A., M. Palmer, J. Matallanas, J. Gómez-Zurita and B. Morales-Nin. Ecomorphologic comparisons of otolith sagittae in *Nototheniidae*. 2009. 4th International symposium fish otolith research and application. Monterrey (EE.UU) *Environ Biol Fish* 89: 607–618.

Lombarte, A., Lleonart, J., 1993. Otolith size changes related with body growth, habitat depth and temperature. *Environ. Biol. Fishes* 37: 297–306.

Lorenz, K. 1966 *On aggression*. London, UK: Methuen.

Mascareñas I., Arburto O., Balart E., 2003, *Otolitos de peces de arrecife del Golfo de California*, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, México B.C.S., 120 p.

McEachran, J. D., J. D. Fechhelm. *Fishes of the Gulf of Mexico, Volume 2: Scorpaeniformes to Tetraodontiformes*. Austin, TX: University of Texas Press, 2005.

Monteiro, L.R., Di Benedetto, A.P.M., Guillermo, L.H., Rivera, L.A., 2005. Allometric changes and shape differentiation of sagitta otoliths in sciaenid fishes. *Fish. Res.* 74: 288–299.

Morris, J.A. Jr., J.L. Akins, A. Barse, D. Cerino, D.W. Freshwater, S.J. Green, R.C. Muñoz, C. Paris, P.E. Whitfield. 2009. *Biology and ecology of the invasive*

lionfishes, *Pterois miles* and *Pterois volitans*. Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute 29:409-414

Nelson J. S. 2006. Fishes of the world. 4ta edición. Wiley and Son Inc.; Alberta Canadá.

Nuttall M. F., Johnston M.A., Eckert R.J., Embesi J.A, Hickerson E.L., Schmahl G.P., 2014 Lionfish (*Pterois volitans* [Linnaeus, 1758] and *P. miles* [Bennett, 1828]) records within mesophotic depth ranges on natural banks in the Northwestern Gulf of Mexico. *BioInvasions Records*, Volume 3.

Oxman D.S., Barnett-Johnson R., Smith M.E., Coffin A., Miller D.L., Josephson R., Popper A.N. 2007. The effect of vaterite deposition on sound reception, otolith morphology, and inner ear sensory epithelia in hatchery-reared Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*;64: 1469-1478.

Parmentier E., Chardon M., Vandewalle P. 2002 Preliminary study on the ecomorphological signification of the sound-producing complex in Carapidae 139-151.

Paxton, J.R. 2000. Fish otoliths: do sizes correlate with taxonomic group, habitat, and/or luminescence? S.P. Collin & N.J. Marshall (ed). pp 1299-1303 In *Sensory Processing of the Aquatic Environment*. Philosophical Transactions, series B Biological Sciences. Royal Society of London.

Platt, C., Popper, A.N., 1981. Fine structure and function of the ear. In: Tavolga, W.N., Popper, A.N., Fay, R.R. (Eds.), *Hearing and Sound Communication in Fishes*. Springer-Verlag, New York, pp. 2-37.

Popper, A. N., 1976, Ultrastructure of the auditory regions in the inner ear of the lake whitefish. *Science* 192: 1020- 1023.

Popper, A. N. and Fay, R. R. 2010. Rethinking sound detection by fishes. *Hear. Res.*, doi:10.1016/j.heares.2009.12.023

Puebla, O., Bermingham, E., Guichard, F. & Whiteman, E. 2007. Colour pattern as a single trait driving speciation in *Hypoplectrus* coral reef fishes? *Proceedings of the Royal Society of London Series B* 274: 1265-1271.

Randall, J. E. & Randall, H. A. 1960 Examples of mimicry and protective resemblance in tropical marine fishes. *Bull. Mar. Sci.* 10: 444–480.

Randall JE, Allen GR, Steene RC 1997 *Fishes of the Great Barrier Reef and Coral Sea*. University of Hawaii Press, Honolulu.

Reichenbacher, B., Feulner, G.R., Schulz-Mirbach, T., 2009. Geographic variation in otolith morphology among freshwater populations of *Aphanius dispar* (Teleostei, Cyprinodontiformes) from the southeastern Arabian Peninsula. *J. Morphol.* 270, 469-484.

Rholf, F. J. 2008 tpsDig 2, Versión 2.12 Department of Ecology and Evolution, State Univ. of New York at Stony Brook, Stony Brook.

Schofield PJ, Langston JN, Fuller PL 2009. *Pterois volitans/miles*. USGS Nonindigenous Aquatic Species Database, Gainesville, FL. <http://nas.er.usgs.gov/queries/FactSheet.asp?speciesID=963>. Citado 10 Ago 2014.

Schultz ET, 1986 *Pterois volitans* and *Pterois miles*: Two Valid Species, *Copeia*, pp. 686-690.

Schulz-Mirbach, T., Ladich, F., Riesch, R. & Plath, M. 2010. Otolith morphology and hearing abilities in cave- and surface-dwelling ecotypes of the Atlantic molly,

Poecilia mexicana (Teleostei: Poeciliidae). Hearing Research DOI:10.1016/j.heares.2010.04.001

Schulz-Mirbach, T., C. Stransky, J. Schlickeisen, B. Reichenbacher. 2008. Differences in otolith morphologies between surface- and cave-dwelling populations of *Poecilia mexicana* (Teleostei, Poeciliidae) reflect adaptations to life in an extreme habitat. *Evol. Ecol. Res.*, 10: 537-558.

Schulz-Mirbach, T., Riesch, R., García de León, F.J., Plath, M. 2011. Effects of extreme habitat conditions on otolith morphology – a case study on extremophile livebearing fishes (*Poecilia mexicana*, *P. sulphuraria*). *Zoology* 114: 321-334.

Sheets, H.D. Dept. of Physics, Canisius College, Buffalo, NY 14208, Dept. of Geology, SUNY at Buffalo, Buffalo NY 14260, <http://www3.canisius.edu/~sheets/morphsoft.html>, citado 25/11/2013.

Simoneau, M., Casselman, J.M., Fortin, R., 2000. Determining the effect of negative allometry (length/height relationship) on variation in otolith shape in lake trout (*Salvelinus namaycush*), using Fourier-series analysis. *Can. J. Zool.* 78, 1597-1603.

Söellner C., Burghammer M., Busch-Nentwich E., Berger J., Schwarz H., Riekel C., Nicolson T., 2003. Control of crystal size and lattice formation by starmaker in otolith biomineralization. *Science* 302: 282-286.

Tuset V.M., Lombarte A., Assis C. 2008 Otolith atlas for the western Mediterranean, north and central eastern Atlantic; *Scientia Marina*, 7-198.

Tuset, V.M., Lombarte A., González J.A., Pertusa J.F., Lorente. M.J., 2003. Comparative morphology of the sagittal otolith in *Serranus* spp. *J. Fish Biol.*, 6: 1491-1504.

Tuset VM, Piretti S, Lombarte A, González JA, 2010. Using sagittal otoliths and eye diameter for ecological characterization of deep-sea fish: *Aphanopus carbo* and *A. intermedius* from NE Atlantic waters, *Scientia Marina* 74 (4), 807-814

Vignon, M., 2012. Ontogenetic trajectories of otolith shape during shift in habitat use: Interaction between otolith growth and environment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 420-421: 26.

Vignon, M., Morat, F., 2010. Environmental and genetic determinant of otolith shape revealed by a non-indigenous tropical fish. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 411: 231-241.

Virgina, I.A. 1991. Basic adaptation of the digestive system in bony fishes as a function of diet. *J Ichthyol*, 31: 8-20.

Volpedo, A.V., Echeverria, D.D., 1997, Morfología de la Sagitta de lenguados del Mar Argentino (Bothidae, Paralichthyidae y Achiropsettidae)., *Thalassas* 13: 113-126 pp.

Volpedo A.V., Echeverría D. D. 2000. Catálogo y claves de otolitos para la identificación de peces del mar argentino. Editorial Dunken. Buenos Aires, Argentina, 90p.

Volpedo A.V, Echeverria D. D. 2003. Ecomorphological patterns of the sagitta in fish on the continental shelf off Argentine *Fisheries Research* 60: 551–560.

Whitfield, P.E., Gardner T, Vives SP, Gilligan MR, Courtenay Jr WR, Ray GC, Hare J.A., 2002. Biological invasion of the Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans* along the Atlantic coast of North America. *Mar Ecol Prog Ser* 235:289–297.

Whitfield, P.E., J.A. Hare, A.W. David, S.L. Harter, R.C. Munoz, and C.M. Addison. 2006. Abundance estimates of the Indo-pacific lionfish *Pterois volitans/miles* complex in the western North Atlantic. *Biological Invasions* 9:53-64.

Wilson, R. R. Jr., 1985. Depth-related changes in sagitta morphology in six macrourid fishes of the Pacific and Atlantic Oceans. *Copeia* 1985, 1011–1017.

Wright, P.J., Panfili, J., Morales-Nin, B., Geffen, A.J., 2002. Différents types de pièce calcifiée, In: Panfili, J., Pontual, H.D.E., Troadec, H., Wright, P.J. (Eds.), *Manuel de sclérochronologie des poissons*. Coédition Ifremer – IRD, pp. 31-88.

Zar, Herrold. 2010. *Biostatistical Analysis*. 5th Edition. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 944 pp.