







CARACTERIZACIÓN DE MICROESTRUCTURAS EN OTOLITOS DE JUVENILES DE ANGUILA *Ophichthus remiger* DEL NORTE DEL PERÚ

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF OTOLITHS IN JUVENILE *Ophichthus remiger* FROM NORTHERN PERU

Luis Usca^{1,*} 
Jesús Rujel¹ 

Analucia Alarco² 
Emperatriz Gómez¹ 

Eliana Orosco² 
Jacqueline Palacios¹ 

¹ Instituto del Mar del Perú, Dirección General de Investigaciones de Recursos Demersales y Litorales, Callao, Perú.

² Investigador independiente, Lima, Perú.

*Correspondencia. E-mail: lusca@imarpe.gob.pe

Recibido: 15-08-2025, Aceptado: 24-04-2026, Publicado: 30-04-2026

RESUMEN

El presente estudio analiza la microestructura de los otolitos sagitta en juveniles de *Ophichthus remiger* del norte del Perú, con el objetivo de caracterizar sus microestructuras y determinar los patrones de crecimiento asociado a las primeras etapas de vida. Se examinó una muestra de 35 individuos (19–25 cm de longitud total, LT), cuyos otolitos fueron procesados y analizados mediante microscopía óptica. Se identificaron marcas ontogenéticas clave como el núcleo, la eclosión, la primera alimentación, la metamorfosis y la etapa postmetamórfica, así como las correspondientes zonas de crecimiento leptocéfala, metamórfica y postmetamórfica. A partir del conteo de microincrementos y la medición de los radios asociados a cada marca, se estimaron las tasas de crecimiento del otolito en las diferentes fases del desarrollo. Los resultados evidenciaron un incremento en el ancho de los microincrementos durante la fase de metamorfosis, seguido de una disminución en la etapa postmetamórfica. Se registraron tasas promedio de $1,20 \pm 0,1$ $\mu\text{m}/\text{día}$ durante la fase de primera alimentación, $2,11 \pm 0,4$ $\mu\text{m}/\text{día}$ en la fase metamórfica intermedia (M1) y $2,0 \pm 0,4$ $\mu\text{m}/\text{día}$ en la fase final (M2). Asimismo, la ocurrencia del periodo de transición metamórfica fue estimada entre 13 y 25 días. Estos resultados reflejan cambios en la dinámica de crecimiento asociados al desarrollo ontogenético temprano y aportan información relevante para la validación de la edad y modelar el crecimiento de la especie.

PALABRAS CLAVE: microincrementos, leptocéfala, metamorfosis, anguiliformes, check

ABSTRACT

This study investigates the sagittal otolith microstructure of juvenile *Ophichthus remiger* from northern Peru in order to characterize otolith features and describe growth patterns during the early stages of development. A total of 35 juveniles, ranging from 19 to 25 cm total length (TL), were examined. Otoliths were prepared and analyzed by optical microscopy. Distinct ontogenetic marks were identified, including the nucleus, hatching, first feeding, metamorphosis, and postmetamorphic stages, together with their corresponding leptocephalus, metamorphic, and postmetamorphic growth zones. Microincrement counts and radius measurements associated with each mark were used to estimate otolith growth rates throughout the different developmental phases. The results showed a noticeable increase in microincrement width during metamorphosis, followed by a reduction during the postmetamorphic stage. Mean growth rates were 1.20 ± 0.1 $\mu\text{m}/\text{day}$ during the first-feeding phase, 2.11 ± 0.4 $\mu\text{m}/\text{day}$ during the intermediate metamorphic phase (M1), and 2.0 ± 0.4 $\mu\text{m}/\text{day}$ during the final metamorphic phase (M2). The metamorphic transition period was estimated to occur between 13 and 25 days. These findings demonstrate clear shifts in growth dynamics linked to early ontogenetic development and provide valuable baseline information for age validation and growth modeling of *O. remiger*.

KEYWORDS: microincrements, leptocephalus, metamorphosis, Anguilliformes, check

1. INTRODUCCIÓN

La anguila *Ophichthus remiger* (Valenciennes, 1842) es una especie demersal que se distribuye desde el Pacífico central (Nicaragua) hasta el Pacífico sur (Chile) (CHIRICHIGNO & CORNEJO, 2001; FISHBASE, 2026). Habita fondos fangosos y areno-fangosos (CHIRICHIGNO & CORNEJO, 2001). Sus capturas se concentran principalmente en el Pacífico sur, destacando su pesquería en el norte del Perú (CASTILLO *et al.*, 2000), destinado principalmente al mercado asiático.

La estimación de la edad y el crecimiento en *O. remiger* se ha basado en el análisis de anillos anuales en otolitos sagitta (ARANCIBIA *et al.*, 2000; GOICOCHEA *et al.*, 2012; SCHUHBAUER, 2006) herramienta que constituye el fundamento principal para determinar la edad individual y comprender la dinámica poblacional de los peces (CAMPANA & THORROLD, 2001). Sin embargo, los estudios documentados muestran diferencias en los parámetros de crecimiento estimados, lo que puede deberse a la interpretación directa de las marcas translúcidas en los otolitos.

Los otolitos son estructuras cristalinas del oído interno de los peces, compuestas de carbonato de calcio precipitado sobre una matriz proteica (DEGENS *et al.*, 1969; CAMPANA, 1999). En peces osteíctios se distinguen tres tipos: sagitta, lapillus y asteriscus (PANFILI *et al.*, 2002). Su estructura interna, formada mediante procesos de biomineralización, queda registrada en unidades denominadas incrementos primarios o diarios (PANELLA, 1971) cuyo análisis permite estimar la edad de larvas y juveniles, las tasas de crecimiento diario y la fecha de nacimiento (CAMPANA & JONES, 1992; PANFILI *et al.*, 2002), constituyendo una herramienta ampliamente utilizada en ecología pesquera (CAMPANA, 2005).

La correcta interpretación de estas microestructuras, sin embargo, requiere un conocimiento previo de los eventos ecológicos clave del ciclo de vida temprano de la especie, tales como la fase leptocéfala y la metamorfosis, los cuales suelen quedar registrados como discontinuidades características en otolitos de Anguilliformes (MILLER, 2009; LEANDER *et al.*, 2013).

En *O. remiger*, la información sobre estas etapas tempranas es aún limitada. En otras es-

1. INTRODUCTION

Ophichthus remiger (Valenciennes, 1842) is a demersal species distributed from the central Pacific off Nicaragua to the southeastern Pacific off Chile (CHIRICHIGNO & CORNEJO, 2001; FISHBASE, 2026). It is commonly associated with muddy and sandy-mud substrates (CHIRICHIGNO & CORNEJO, 2001). Commercial catches are concentrated mainly in the southeastern Pacific, with northern Peru supporting one of the most important fisheries for the species (CASTILLO *et al.*, 2000), and production directed largely to Asian markets.

Age and growth studies of *O. remiger* have primarily been based on the interpretation of annual rings in sagittal otoliths (ARANCIBIA *et al.*, 2000; GOICOCHEA *et al.*, 2012; SCHUHBAUER, 2006). Otolith-based analyses constitute a fundamental approach for estimating individual age and understanding fish population dynamics (CAMPANA & THORROLD, 2001). Nevertheless, previously published studies have reported differences in growth parameter estimates, likely related to the direct interpretation of translucent zones in otoliths.

Otoliths are calcified structures located in the inner ear of fishes, formed by calcium carbonate deposited on an organic protein matrix (DEGENS *et al.*, 1969; CAMPANA, 1999). In teleost fishes, three otolith types are recognized: sagitta, lapillus, and asteriscus (PANFILI *et al.*, 2002). Their internal structure develops through biomineralization and records sequential units known as primary or daily increments (PANELLA, 1971). Examination of these increments allows estimation of larval and juvenile age, daily growth rates, and hatch dates (CAMPANA & JONES, 1992; PANFILI *et al.*, 2002), making otolith microstructure analysis one of the most widely applied tools in fisheries ecology (CAMPANA, 2005).

Reliable interpretation of otolith microstructures, however, requires an understanding of critical ecological transitions during the early life history of the species, particularly the leptocephalus stage and metamorphosis. In Anguilliformes, these events are often recorded as characteristic discontinuities or checks in otolith structure (MILLER, 2009; LEANDER *et al.*, 2013).

pecies de anguilliformes (Anguillidae) se ha documentado que el desarrollo larval se asocia a cambios morfológicos y de pigmentación (LECOMTE-FINIGER, 1992). Durante la fase leptocéfala, las larvas se concentran predominantemente en los primeros 100 m de profundidad durante la noche y se desplazan hacia aguas más profundas durante el día (MILLER, 2009). Esta distribución vertical dinámica, junto con la drástica transformación morfológica hacia la etapa de anguila cristal durante la metamorfosis, impone cambios fisiológicos y de comportamiento que quedan registrados como marcas distintivas en la microestructura de los otolitos, con implicancias directas para su lectura e interpretación.

Estos eventos han sido documentados en diversas especies del orden Anguilliformes. En *Anguilla anguilla* se han identificado marcas asociadas al núcleo, la primera alimentación, la metamorfosis leptocéfala y el cambio de ambiente (LECOMTE-FINIGER, 1992). En *A. rostrata*, CIERI y McCLEAVE (2001) validaron experimentalmente la marca de transición y las zonas de crecimiento postmetamórfico y marginal. Se ha demostrado además que la duración del estadio leptocéfalo y la tasa de crecimiento larval influyen en la variabilidad de estas marcas y en procesos clave como la migración y el reclutamiento (WANG & TZENG, 2000; LEANDER *et al.*, 2013). En el género *Ophichthus*, BISHOP *et al.* (2000) reportaron altas tasas de crecimiento en larvas leptocéfalas de *O. gomesii*, evidenciando que este estadio puede prolongarse durante varios meses en el plancton antes de la metamorfosis, favoreciendo la acumulación de reservas energéticas necesarias para la transición juvenil.

En este contexto, aunque la información específica para *O. remiger* es aún limitada, estos antecedentes proporcionan un marco conceptual sólido para interpretar las microestructuras en sus otolitos. La identificación y validación de marcas asociadas a eventos ontogenéticos resultan fundamentales para reconstruir la historia de vida temprana de la especie y mejorar la precisión en la estimación de la edad y el crecimiento. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivos caracterizar las microestructuras en otolitos de juveniles de *O. remiger* y determinar los patrones de crecimiento mediante el análisis de incrementos diarios.

For *O. remiger*, information on these developmental stages remains scarce. In other anguilliform taxa (Anguillidae), larval development has been linked to noticeable changes in morphology and pigmentation (LECOMTE-FINIGER, 1992). During the leptocephalus phase, larvae generally occupy the upper 100 m of the water column at night and migrate to deeper layers during daylight hours (MILLER, 2009). This diel vertical migration, combined with the pronounced morphological transformation that accompanies metamorphosis, generates physiological and behavioral changes that may be preserved as distinctive marks in otolith microstructure, directly influencing their interpretation.

Comparable patterns have been documented in several anguilliform species. In *Anguilla anguilla*, otolith marks associated with the nucleus, first feeding, leptocephalus metamorphosis, and habitat transition have been described (LECOMTE-FINIGER, 1992). In *A. rostrata*, CIERI and McCLEAVE (2001) experimentally validated the transition mark, together with postmetamorphic and marginal growth zones. Previous studies have also shown that the duration of the leptocephalus stage and larval growth rate contribute to variability in these marks and affect key processes such as migration and recruitment (WANG & TZENG, 2000; LEANDER *et al.*, 2013). Within the genus *Ophichthus*, BISHOP *et al.* (2000) reported rapid growth in leptocephalus larvae of *O. gomesii*, indicating that this stage may extend for several months in the plankton before metamorphosis, thereby promoting the accumulation of energetic reserves necessary for juvenile transition.

Although species-specific knowledge for *O. remiger* remains limited, these findings provide a solid conceptual basis for interpreting otolith microstructures in the species. Identifying and validating marks associated with ontogenetic transitions is essential for reconstructing early life-history trajectories and improving the precision of age and growth estimates. Therefore, the present study aims to characterize otolith microstructures in juvenile *O. remiger* and to determine growth patterns through the analysis of daily increments.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Muestra

Las muestras corresponden a otolitos sagitta extraídos de juveniles de anguila *O. remiger*, obtenidos de individuos capturados durante los monitoreos realizados por el Instituto del Mar del Perú – IMARPE en el norte del Perú (frente a Paita), durante el verano e invierno del 2023. Se analizaron 48 individuos entre 19 y 25 cm de longitud total (LT), los cuales fueron preservados en alcohol al 70 % hasta su procesamiento en el Laboratorio de Edad y Crecimiento del IMARPE.

Procesamiento de las muestras

En el laboratorio, se registró la longitud total (LT) de cada individuo al milímetro más cercano. Posteriormente, se extrajeron los otolitos para su procesamiento y análisis, siguiendo la metodología descrita por GREEN *et al.* (2009).

El procesamiento se inició con la limpieza de los otolitos bajo un microscopio estereoscópico al menor aumento (2x). Los otolitos se montaron en láminas portaobjetos con Cristal Bond, una resina caliente derretida, y se examinaron en un microscopio compuesto para el análisis de microestructuras.

El desgaste se realizó en la sección del plano sagittal mediante lijado progresivo con lijas al agua de grano 1000, seguido de un pulido con paño y pasta de alúmina de 0,3 μm , hasta exponer el núcleo y los microincrementos. Finalmente, se emplearon lijas de grano más fino (hasta 2500) para optimizar la visualización de los microincrementos.

Características microestructurales

Para la caracterización microestructural, se esquematizaron las fases del desarrollo inicial de la anguila *O. remiger* (Fig. 1), adaptando los modelos propuestos para especies de la familia Anguillidae (LECOMTE-FINIGER, 1992; WANG & TZENG, 2000; CIERI & McCLEAVE, 2001). Estas fases comprenden zonas de crecimiento correspondientes a las etapas leptocéfala, metamórfica y postmetamórfica.

2. MATERIALS AND METHODS

Sample Collection

The material analyzed consisted of sagittal otoliths extracted from juvenile *O. remiger* collected during monitoring surveys conducted by the Instituto del Mar del Perú – IMARPE in northern Peru, off Paita, during the austral summer and winter of 2023. A total of 48 individuals, measuring 19–25 cm total length (TL), were included in the study. Specimens were preserved in 70% ethanol until processing at the IMARPE Age and Growth Laboratory.

Otolith Preparation

In the laboratory, total length (TL) was recorded to the nearest millimeter for each specimen. Otoliths were then extracted and prepared for analysis following the procedures described by GREEN *et al.* (2009).

The preparation process began with cleaning the otoliths under a stereomicroscope at low magnification (2x). Each otolith was mounted on a glass slide using Crystal Bond thermoplastic resin and subsequently examined under a compound microscope for microstructural analysis.

Otolith grinding was carried out along the sagittal plane using progressively finer waterproof abrasive papers, beginning with 1000-grit paper. This was followed by polishing with a cloth pad and 0.3 μm alumina paste until the nucleus and surrounding microincrements became visible. Final polishing with finer abrasives (up to 2500 grit) was performed to enhance increment definition.

Microstructural Analysis

For the characterization of otolith microstructure, the early developmental phases of *O. remiger* were schematically established (Fig. 1), based on models previously proposed for members of the family Anguillidae (LECOMTE-FINIGER, 1992; WANG & TZENG, 2000; CIERI & McCLEAVE, 2001). These phases comprised growth zones corresponding to the leptocephalus, metamorphic, and postmetamorphic stages.

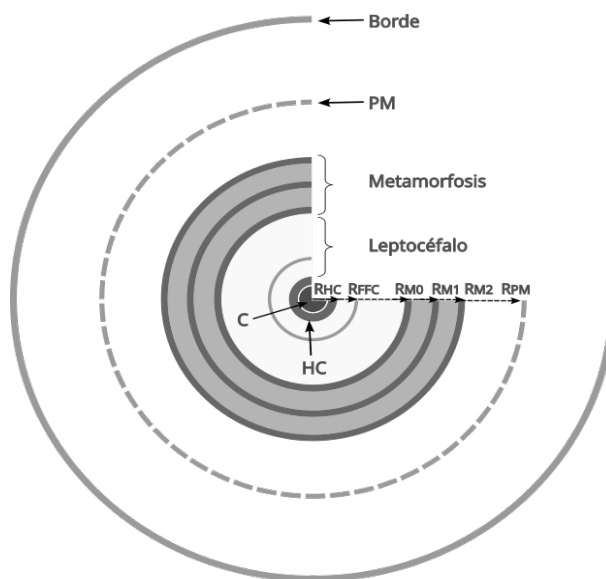


Figura 1.- Esquema de las características microestructurales en otolitos de anguila juvenil *O. remiger*, adaptado de LECOMTE-FINIGER (1992). Núcleo (C), Check de eclosión (HC), radio del check de eclosión (R_{HC}), radio de la marca de primera alimentación (R_{FFC}), radio del final de la zona leptocéfala e inicio de la metamorfosis (R_{M0}), radio de metamorfosis intermedia y final (R_{M1} , R_{M2}). Marca de post metamorfosis (PM) y borde del otolito

Figure 1. Schematic representation of the microstructural features in otoliths of juvenile *O. remiger*, adapted from LECOMTE-FINIGER (1992). Shown are the core (C), hatch check (HC), radius at the hatch check (R_{HC}), radius at the first-feeding mark (R_{FFC}), radius at the end of the leptocephalus stage and onset of metamorphosis (R_{M0}), radii at intermediate and late metamorphosis (R_{M1} , R_{M2}), the post-metamorphic mark (PM), and the otolith edge

Se identificaron *checks* asociadas a eventos ontogénicos clave, tales como el núcleo (C), la eclosión (HC), la primera alimentación (FFC), el proceso de metamorfosis (inicial M0, intermedia M1 y final M2) y la postmetamórfica (PM). Los radios correspondientes a cada una de estas marcas se midieron desde el centro del otolito hacia la región posterior. El conteo de los microincrementos se realizó con la herramienta de análisis del programa NIS-Elements, acoplado al microscopio Nikon. Durante este proceso, se ajustaron el contraste y el plano focal con el fin de optimizar la visualización de los microincrementos más definidos.

Para la interpretación de los microincrementos diarios, se ha seguido la caracterización de los incrementos primarios sugerido por PANFILI *et al.* (2009). Cada otolito fue leído por dos lectores independientes y la precisión fue establecida con el coeficiente de variación (CV) propuesto por CAMPANA y JONES (1992), los otolitos con CV > 5 % entre lectores, fueron rechazados.

Se midió el ancho de los incrementos diarios en cada zona de crecimiento (leptocéfala y metamorfosis), a partir de 10 mediciones por zona en cada otolito. En los casos en que los incrementos no eran claramente visibles, el número fue estimado según el patrón general de crecimiento observado.

Checks associated with major ontogenetic events were identified, including the core (C), hatching (HC), first feeding (FFC), metamorphosis (initial M0, intermediate M1, and final M2), and the postmetamorphic stage (PM). Radii corresponding to each mark were measured from the otolith core toward the posterior margin. Microincrements were counted using the image-analysis module of NIS-Elements software coupled to a Nikon microscope. During the reading process, contrast and focal depth were adjusted to optimize visualization of clearly defined increments.

Interpretation of daily increments followed the criteria for primary increments proposed by PANFILI *et al.* (2009). Each otolith was independently read by two readers, and precision was assessed using the coefficient of variation (CV) described by CAMPANA and JONES (1992). Otoliths with inter-reader CV values >5% were rejected.

Daily increment widths were measured within each growth zone (leptocephalus and metamorphic phases), based on ten measurements per zone for each otolith. When increments were not distinctly resolved, their number was estimated according to the general increment pattern observed.

3. RESULTADOS

Del total de 48 otolitos procesados, 35 fueron aptos para la lectura de microincrementos, representando el 72,9% de las muestras. Los 13 otolitos restantes (27,1%) fueron descartados por presentar dos tipos de problemas asociados al proceso de pulido: en algunos casos se perdió la visualización del núcleo por exceso de desgaste, mientras que en otros se deterioraron los incrementos del borde externo, impidiendo realizar un conteo completo de las microestructuras desde el núcleo hasta el borde del otolito.

A nivel microestructural, los otolitos de *O. remiger* analizados en este estudio mostraron patrones de crecimiento consistentes con los descritos para otras especies del orden Anguilliformes (Fig. 1). En las muestras examinadas, se observaron incrementos primarios dispuestos de forma concéntrica, caracterizados por la alternancia de una zona opaca y una zona translúcida. Asimismo, estos incrementos estuvieron delimitados por discontinuidades o checks, las cuales podrían estar asociadas a eventos ontogenéticos y/o cambios ambientales ocurridos durante el desarrollo temprano.

De acuerdo con este patrón, identificamos dos zonas de crecimiento claramente definidas en los otolitos analizados: una que se extiende desde el núcleo hasta la zona intermedia asociada a la metamorfosis y, otra desde esta región hasta el borde del otolito en individuos juveniles (Fig. 2). A nivel macroscópico, los otolitos presentan una morfología ovalada, con borde ligeramente crenulado y compresión lateral, destacando un centro opaco de forma aproximadamente circular (Fig. 3).

Zona leptocéfala

Corresponde a la región central del otolito, compuesta por incrementos concéntricos que forman una estructura claramente visible incluso sin desgaste. Se observan discontinuidades regulares, poco marcadas. Esta zona abarca desde el núcleo hasta la primera marca de metamorfosis.

En la zona central se identificó el núcleo (C), observado como una cavidad rodeada por un anillo oscuro, con un radio promedio $R_C = 2,99 \pm 0,7 \mu\text{m}$. A continuación, se registró una marca oscura y pronunciada, asumida como el check de eclosión (HC), con un radio $R_{HC} = 6,96 \pm 1,0 \mu\text{m}$. Luego, un check asumida como la primera alimentación (FFC) con un radio $R_{FFC} = 12,8 \pm 0,7 \mu\text{m}$.

3. RESULTS

Of the 48 otoliths processed, 35 were suitable for microincrement reading, representing 72.9% of the total sample. The remaining 13 otoliths (27.1%) were discarded because of polishing-related damage. In some specimens, excessive grinding eliminated the core, whereas in others the external marginal increments were altered, preventing complete counts from the core to the otolith edge.

At the microstructural level, the otoliths of *Ophichthus remiger* displayed growth patterns comparable to those described for other members of the order Anguilliformes (Fig. 1). Primary increments were arranged concentrically and consisted of alternating opaque and translucent zones. These increments were interrupted by discontinuities or checks, which were interpreted as records of ontogenetic events and/or environmental changes during early development.

Based on these features, two well-defined growth zones were distinguished in the analyzed otoliths: (1) an inner zone extending from the nucleus to the intermediate region associated with metamorphosis, and (2) an outer zone extending from that region to the otolith margin in juvenile individuals (Fig. 2). Macroscopically, the otoliths were oval, laterally compressed, and characterized by a slightly crenulated margin and a conspicuous, approximately circular opaque core (Fig. 3).

Leptocephalus Zone

This zone corresponds to the central portion of the otolith and is composed of concentric increments forming a structure visible even prior to polishing. Weak but regular discontinuities were observed throughout the region. It extends from the core to the first metamorphic mark.

The core (C) was identified as a cavity surrounded by a dark ring, with a mean radius of $R_C = 2.99 \pm 0.7 \mu\text{m}$. A prominent dark mark located outward from the nucleus was interpreted as the hatching check (HC), with a mean radius of $R_{HC} = 6.96 \pm 1.0 \mu\text{m}$. A subsequent check was assigned to the first feeding (FFC), with a mean radius of $R_{FFC} = 12.8 \pm 0.7 \mu\text{m}$.

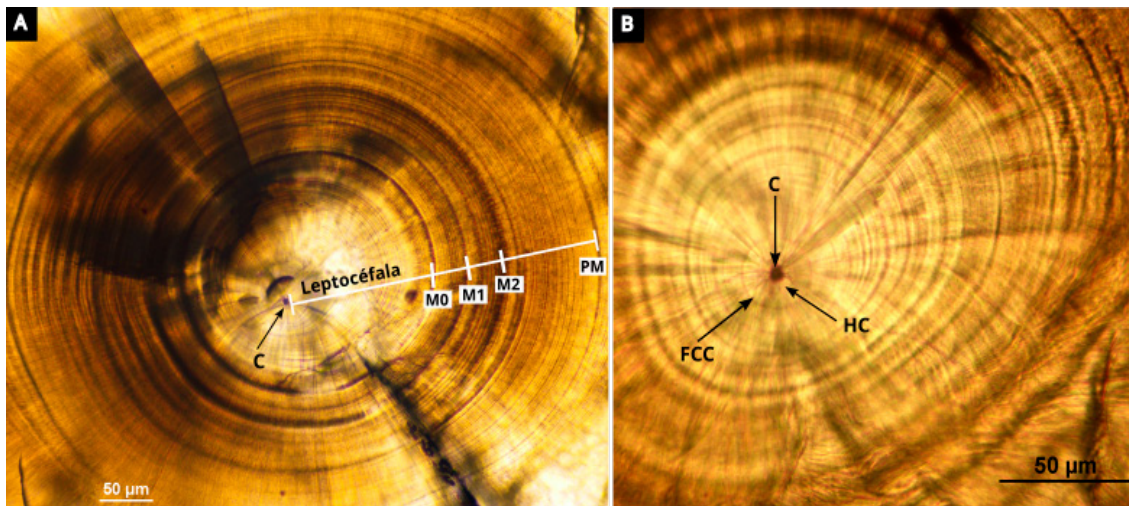


Figura 2.- Microestructuras de otolitos de anguila *O. remiger*. Otolitos de ejemplares de 23 cm LT a 20x (A) y 40x (B) de aumento. En A), zona central translúcida fase leptocéfala, identificación del núcleo (C), zona intermedia densa con marcas de metamorfosis (M_0 , M_1 , M_2), marca post metamorfosis y formación del primer translucido. En B), núcleo (C), marca de eclosión (HC) y primera alimentación (FCC)

Figure 2. Otolith microstructures of *O. remiger*. Otoliths from specimens measuring 23 cm TL, shown at 20x (A) and 40x (B) magnification. In (A), the translucent central zone corresponds to the leptocephalus stage, with identification of the core (C); the dense intermediate zone displays metamorphosis marks (M_0 , M_1 , M_2), the post-metamorphic mark, and the onset of the first translucent band. In (B), the core (C), hatch check (HC), and first-feeding check (FCC) are visible

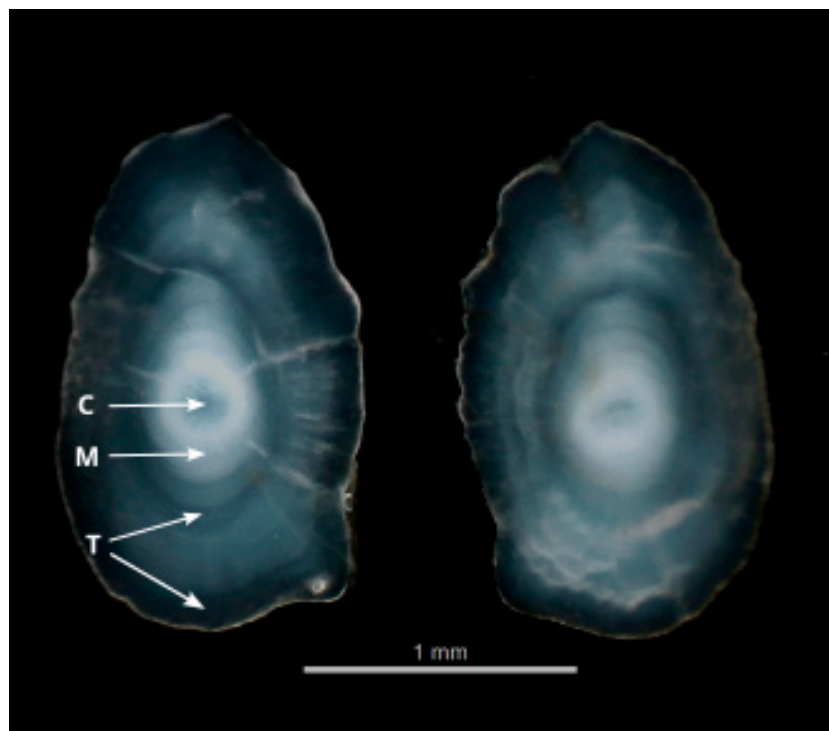


Figura 3.- Otolitos sagitta enteros de anguila *O. remiger* de 25 cm LT, vista bajo un microscopio estereoscópico. Zona central del otolito (C, núcleo) bordeado por la zona clara leptocéfala, seguido de una zona densa de metamorfosis (M), primer translucido y formación del segundo translucido al borde (T)

Figure 3. Whole sagittal otoliths from a 25 cm TL *O. remiger* individual, observed under a stereomicroscope. The otolith's central area (C, core) is delimited by a translucent zone corresponding to the leptocephalus stage, followed by a dense band associated with metamorphosis (M). Distally, the first translucent band is visible, along with the onset of a second translucent band forming at the otolith edge (T)

Los incrementos en esta zona son difíciles de observar con microscopía óptica. Finalmente, se identificó el primer check de metamorfosis (M_0), con un radio promedio $R_{M0} = 145,23 \pm 12 \mu\text{m}$, que delimita el fin de la región leptocéfala y representa un total estimado de 101 ± 10 incrementos diarios, con una precisión buena (CV promedio = 3,16 %).

Zona de metamorfosis

Esta zona corresponde a la región más difusa del otolito, donde se registra un crecimiento acelerado, con un ancho promedio de incremento de $2,11 \mu\text{m}$. Se presenta como una banda oscura bajo microscopía óptica, con múltiples discontinuidades o *checks*, entre las que destacan tres marcas principales (M_0 , M_1 y M_2).

La transición entre estas marcas se desarrolla en un intervalo estimado de 13 días durante la fase de metamorfosis y de 25 días en la fase postmetamórfica, alcanzando un radio promedio de $185,76 \mu\text{m}$. En conjunto, la formación de la zona de metamorfosis se completa aproximadamente a los 142 días (CV promedio = 3,7 %) con un radio final medio de $230,09 \mu\text{m}$ (Tabla 1).

Increments in this zone were difficult to resolve under optical microscopy. The first metamorphic check (M_0), occurred at a mean radius of $R_{M0} = 145.23 \pm 12 \mu\text{m}$, marking the end of the leptocephalus region. This phase comprised an estimated 101 ± 10 daily increments and showed good reading precision (mean CV = 3.16%).

Metamorphic Zone

This zone represents the most diffuse region of the otolith and was characterized by accelerated growth, with a mean increment width of $2.11 \mu\text{m}$. Under optical microscopy, it appeared as a dark band containing several discontinuities or checks, among which three major marks were recognized: M_0 , M_1 , and M_2 .

The interval between these marks was estimated at 13 days during metamorphosis and 25 days during the postmetamorphic phase, reaching a mean radius of $185.76 \mu\text{m}$. Overall, completion of the metamorphic zone occurred at approximately 142 days (mean CV = 3.7%), with a final mean radius of $230.09 \mu\text{m}$ (Table 1).

Tabla 1.- Medidas de radio ($\mu\text{m} \pm \text{DE}$) y el número de incremento (días $\pm \text{DE}$) a las marcas ontogenéticas en otolito de anguila *O. remiger*. Radio del núcleo (R_C), radio de la marca de eclosión (R_{HC}), radio de la marca de primera alimentación (R_{FFC}), radio de la marca leptocéfala (R_{M0}), radio de la marca intermedia de metamorfosis (R_{M1}), radio de la marca final de metamorfosis (R_{M2}) y radio a la marca de la zona post metamorfosis (R_{PM})

Table 1. Radius measurements ($\mu\text{m} \pm \text{SD}$) and increment counts (days $\pm \text{SD}$) at ontogenetic marks in otoliths of *O. remiger*. Measured variables include core radius (R_C), radius at the hatch check (R_{HC}), radius at the first-feeding check (R_{FFC}), radius at the leptocephalus mark (R_{M0}), radius at the intermediate metamorphosis mark (R_{M1}), radius at the final metamorphosis mark (R_{M2}), and radius at the post-metamorphic zone mark (R_{PM})

Medidas	R_C	R_{HC}	R_{FFC}	R_{M0}	R_{M1}	R_{M2}	R_{PM}
Radio (μm)	2.99 ± 0.7	6.96 ± 1.0	12.80 ± 0.7	145.23 ± 12	185.76 ± 17	230.09 ± 22	278.74 ± 27
N° Incrementos (días)				101 ± 10	121 ± 10	142 ± 11	165 ± 15

Patrones de crecimiento del otolito

Los patrones de crecimiento observados en la microestructura del otolito evidencian variaciones tanto en la formación de los incrementos primarios como en la edad estimada (en días) asociada a cada check, los cuales se vinculan a eventos ontogenéticos y/o cambios ambientales.

En la zona central se identificó un núcleo prominente; sin embargo, en algunos casos se

Otolith Growth Patterns

The growth patterns recorded in the otolith microstructure revealed variation in both increment formation and the estimated age (days) associated with each check, reflecting ontogenetic transitions and/or environmental influences.

A distinct core was observed in the central region; however, some otoliths exhibited more than one apparent core, producing

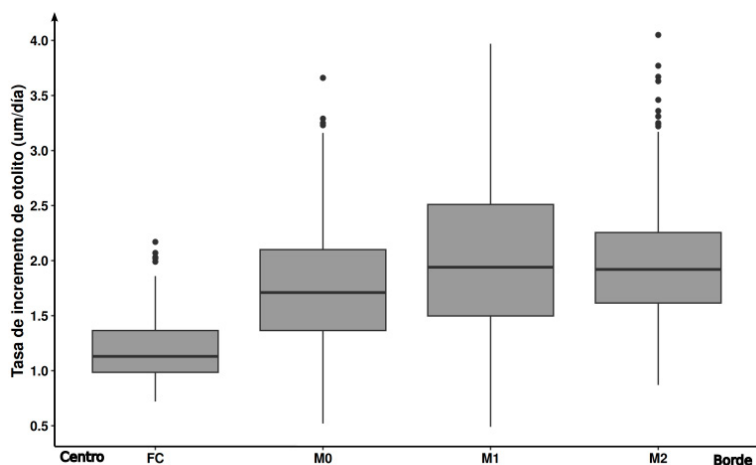


Figura 4.- Diagrama de caja (boxplot) de la distribución de la tasa de incremento del otolito ($\mu\text{m}/\text{día}$) de anguila *O. remiger* medido en las zonas correspondientes a la etapa leptocéfala (FC) y a las fases de metamorfosis: inicial (M_0), intermedia (M_1) y final (M_2). Origen de coordenadas hace referencia al centro del otolito

Figure 4. Boxplot showing the distribution of otolith increment rates ($\mu\text{m}/\text{day}$) in *O. remiger*, measured across regions corresponding to the leptocephalus stage (FC) and the metamorphic phases: early (M_0), intermediate (M_1), and final (M_2). The origin of the coordinate system refers to the otolith core

observó más de un núcleo aparente, lo que generó irregularidades en el patrón de crecimiento. Los primeros incrementos fueron estrechos y poco visibles al microscopio óptico, con anchos menores a $1\ \mu\text{m}$. Esta primera zona, correspondiente a la fase leptocéfala, presentó una tasa de crecimiento promedio entre $1,20 \pm 0,1\ \mu\text{m}/\text{día}$ en los primeros incrementos, hasta $1,44 \pm 0,3\ \mu\text{m}/\text{día}$ hacia el final de esta etapa, valores que se ubican dentro del rango intercuartil de los datos analizados (Fig. 4).

Durante el análisis de la zona de metamorfosis, los otolitos registraron tasas de crecimiento entre $1,81 \pm 0,5$ al inicio (M_0) hasta $2,11 \pm 0,4\ \mu\text{m}/\text{día}$ al intermedio (M_1), aunque con incrementos más delgados en las zonas de discontinuidad. Posteriormente, en la fase postmetamórfica, la tasa de crecimiento del otolito disminuyó a un promedio de $2,0 \pm 0,4\ \mu\text{m}/\text{día}$, coincidiendo con el inicio de la formación del primer anillo translucido (Fig. 4).

4. DISCUSIÓN

La ausencia de estadios larvales y juveniles tempranos en las muestras analizadas limitó la evaluación de cambios morfológicos ontogenéticos, particularmente aquellos relacionados con la pigmentación corporal descritos para Anguilliformes en fases iniciales de desarrollo (LECOMTE-FINIGER, 1992).

irregularities in increment deposition. The earliest increments were narrow and only weakly visible under optical microscopy, with widths $<1\ \mu\text{m}$. This initial zone, corresponding to the leptocephalus phase, showed mean growth rates from $1.20 \pm 0.1\ \mu\text{m}/\text{day}$ in the earliest increments to $1.44 \pm 0.3\ \mu\text{m}/\text{day}$ toward the end of the phase, values within the interquartile range of the analyzed dataset (Fig. 4).

Within the metamorphic zone, growth rates ranged from 1.81 ± 0.5 at the onset of metamorphosis (M_0) to $2.11 \pm 0.4\ \mu\text{m}/\text{day}$ at the intermediate stage (M_1), although narrower increments were consistently observed at discontinuity marks. During the subsequent postmetamorphic phase, growth declined to a mean of $2.0 \pm 0.4\ \mu\text{m}/\text{day}$, coinciding with the initiation of the first translucent annulus (Fig. 4).

4. DISCUSSION

The absence of larval and early juvenile stages in the material examined limited the assessment of ontogenetic morphological changes, particularly those associated with body pigmentation that have been documented for Anguilliformes during the earliest phases of development (LECOMTE-FINIGER, 1992).

Las microestructuras de los otolitos de juveniles de *Ophichthus remiger* evidenciaron un patrón morfológico y estructural consistente con lo descrito para otras especies del orden Anguilliformes. En particular, se observó un núcleo oscuro de forma circular, rodeado por incrementos primarios concéntricamente, lo que concuerda con los patrones reportados en especies como *Anguilla anguilla*, *A. japonica*, *A. marmorata* y *A. rostrata* (LECOMTE-FINIGER, 1992; WANG & TZENG, 2000; SHIN *et al.*, 2022; ARAI, 2022). Esta similitud sugiere que los procesos de formación y registro de crecimiento en los otolitos de *O. remiger* siguen un esquema comparable al descrito para otros Anguilliformes, reforzando la aplicabilidad de estos modelos para la interpretación de su historia de vida temprana.

En *O. remiger*, la primera zona identificada, correspondiente a la fase leptocéfala, tiene una duración estimada de más de tres meses, similar a lo descrito en *A. marmorata* (KUROKI *et al.*, 2005; LEANDER *et al.*, 2013). Durante este estadio ocurre un evento crítico en peces tropicales: la transición de la absorción del vitelo a la primera alimentación, asociado al cambio de alimentación y la formación del primer incremento primario (PANFILI *et al.*, 2009). Si bien los incrementos asociados a la primera alimentación no pudieron ser detectados directamente por las limitaciones ópticas del microscopio (incrementos $<1 \mu\text{m}$), su ocurrencia fue inferida considerando una duración aproximada de siete días, como se ha documentado en *A. japonica* (SHIN *et al.*, 2022) y coincide con lo observado en especies pelágicas (PANFILI *et al.*, 2002).

La fase de metamorfosis en *O. remiger* aparece como un área difusa tras la zona translúcida (leptocéfala). Este período marca la transición ontogenética hacia la vida juvenil y el asentamiento, eventos especialmente relevantes en especies tropicales (PANFILI *et al.*, 2009). Además, se ha estimado que esta fase dura entre 13 y 25 días, incluyendo la transición postmetamórfica (M2-PM), como se ha observado en otras especies de ophichthidos (POWLES *et al.*, 2006). La presencia de marcas asociadas a esta fase sugiere posibles adaptaciones ambientales más que cambios morfológicos estrictamente visibles. Al respecto, se han registrado ejemplares de *O. remiger* a profundidades cercanas a los 400 m, con una clara estratificación espacial de tallas (IMARPE, 2022), lo que podría reflejar migraciones verticales y ajustes fisiológicos registrados en la densidad del otolito (LEANDER *et al.*, 2013; MILLER & TSUKAMOTO, 2020).

The otolith microstructures of juvenile *Ophichthus remiger* showed morphological and structural features consistent with those described for other anguilliform species. A dark, circular nucleus surrounded by concentrically deposited primary increments was clearly observed, matching patterns previously reported for *Anguilla anguilla*, *A. japonica*, *A. marmorata*, and *A. rostrata* (LECOMTE-FINIGER, 1992; WANG & TZENG, 2000; SHIN *et al.*, 2022; ARAI, 2022). This correspondence suggests that otolith accretion and growth recording in *O. remiger* follow developmental processes comparable to those of other Anguilliformes, supporting the use of these reference models to interpret its early life history.

In *O. remiger*, the first identified growth zone, corresponding to the leptocephalus phase, was estimated to last more than three months, similar to the duration reported for *A. marmorata* (KUROKI *et al.*, 2005; LEANDER *et al.*, 2013). During this stage, a critical transition occurs in tropical fishes: the shift from endogenous yolk reserves to first feeding, associated with the onset of exogenous nutrition and the deposition of the first primary increment (PANFILI *et al.*, 2009). Although increments linked to first feeding could not be directly resolved because of optical limitations ($<1 \mu\text{m}$), their occurrence was inferred assuming an approximate duration of seven days, as reported for *A. japonica* (SHIN *et al.*, 2022), and consistent with observations in pelagic fishes (PANFILI *et al.*, 2002).

The metamorphic phase in *O. remiger* was represented by a diffuse zone located beyond the translucent leptocephalus region. This interval marks the ontogenetic transition toward juvenile life and settlement, processes of particular ecological importance in tropical species (PANFILI *et al.*, 2009). The duration of this phase was estimated at 13–25 days, including the postmetamorphic transition (M2-PM), in agreement with estimates for other ophichthid species (POWLES *et al.*, 2006). The presence of marks associated with this phase may reflect environmental acclimation rather than only externally visible morphological change. Specimens of *O. remiger* have been recorded at depths approaching 400 m, with marked spatial stratification by size (IMARPE, 2022), suggesting vertical displacements and physiological adjustments that may be preserved in otolith density patterns (LEANDER *et al.*, 2013; MILLER & TSUKAMOTO, 2020).

MILLER (2009) señala que la ocurrencia de la metamorfosis en Anguilliformes varía desde menos de 100 días en *A. celebesensis* (ARAI *et al.*, 2001) hasta cerca de 250 días en *A. dieffenbachii* (MARUI *et al.*, 2001), etapa durante la cual se producen transformaciones morfológicas drásticas y desplazamientos hacia nuevos hábitats con diferentes fuentes de alimento, lo cual se ha vinculado a un aumento en la tasa de crecimiento. La ocurrencia estimada para *O. remiger* (~142 días) se encuentra dentro del rango reportado para el grupo, y las tasas de crecimiento observadas (~2,11 µm/día) sugieren un patrón comparable al descrito en otros Anguilliformes, posiblemente relacionado con el gradiente latitudinal que presentan en su área de distribución (IMARPE, 2022). Asimismo, en *A. marmorata* se ha documentado durante esta fase un aumento en el ancho de los incrementos otolíticos (KUROKI *et al.*, 2005) lo que refuerza la asociación entre los cambios fisiológicos y las señales registradas en la microestructura del otolito.

En general, los resultados de este estudio se encuentran dentro de los rangos estimados para Anguilliformes tropicales (Tabla 2), particularmente con lo reportado para *A. marmorata* (KUROKI *et al.*, 2005) y *A. japonica* (LEANDER *et al.*, 2013). Esta última presenta tasas de crecimiento más altas y una duración más breve de la metamorfosis en ambientes tropicales, en comparación con regiones templadas (MILLER, 2009).

According to MILLER (2009), the onset of metamorphosis in Anguilliformes ranges from fewer than 100 days in *A. celebesensis* (ARAI *et al.*, 2001) to nearly 250 days in *A. dieffenbachii* (MARUI *et al.*, 2001). This stage involves substantial morphological transformation and movement into habitats with different feeding conditions; processes often associated with increased growth rates. The estimated timing for *O. remiger* (~142 days) lies within the known range for the group, and the observed growth rate (~2.11 µm/day) indicates a pattern similar to that of other anguilliform fishes, potentially influenced by the latitudinal gradient across its distribution (IMARPE, 2022). Increased otolith increment width during metamorphosis has also been described in *A. marmorata* (KUROKI *et al.*, 2005), further supporting the link between physiological transitions and otolith microstructural signals.

In general, the values obtained in the present study fall within the ranges reported for tropical Anguilliformes (Table 2), particularly those described for *A. marmorata* (KUROKI *et al.*, 2005) and *A. japonica* (LEANDER *et al.*, 2013). The latter species exhibits faster growth and a shorter metamorphic period in tropical waters than in temperate regions (MILLER, 2009).

Tabla 2.- Características microestructurales de los otolitos sagitta en peces del orden Anguilliformes, reportadas por diversos autores en distintas regiones. Se presentan las medidas de los radios de las marcas ontogénicas (R, µm ± desviación estándar, DE) y el número de incrementos diarios (N, días ± DE)

Table 2. Microstructural characteristics of sagittal otoliths in anguilliform fishes, as reported by various authors across different regions. Measurements of radii at ontogenetic marks (R, µm ± standard deviation, SD) and daily increment counts (N, days ± SD) are presented

Especie	Zona geográfica	R _{HC}	R _{FFC}	N _{FFC}	R _{MO}	N _{MO}	R _{M2}	N _{M2}	N _{PM}	Autor
<i>A. anguilla</i>	Atlántico noreste		9.8±1.7				59.5±12.2	350.2±40.43		Wang y Tzeng, 2000
<i>A. anguilla</i>	Atlántico noreste	4.92±2.07	9.8±1.7	10			105.6±7.8	216-276±30		Lecomte-Finiger,1992
<i>A. japonica</i>	Taiwan		12±1.5	7-10		50 - 260				Shinoda <i>et al.</i> , 2004
<i>A. japonica</i>	Taiwan							138.7±14.3		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. japonica</i>	China							148.1±14.7		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. japonica</i>	China							157.4±16.1		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. japonica</i>	Japón							143.3±7.9		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. japonica</i>	Filipinas							110.4±12.8		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. japonica</i>	Taiwan							112.4±12.3		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. japonica</i>	Japón							117.7±16.8		Leander <i>et al.</i> , 2013
<i>A. marmorata</i>	Pacífico suroeste	5.01±1.47		10	23.22 - 112.81	22 - 137	122.22	147		Kuroki <i>et al.</i> , 2005
<i>A. marmorata</i>	Japón					79 - 157			10 - 20	Arai, 2022
<i>A. marmorata</i>	Japón					103 - 138			14 - 27	Arai, 2022
<i>A. marmorata</i>	Japón					100 - 155			12 - 24	Arai, 2022
<i>A. marmorata</i>	Japón					100 - 152			13 - 27	Arai, 2022
<i>A. rostrata</i>	Atlántico noreste	4.68±1.85	9.5±1.5				64.7±10.9	200.2±23.84		Wang y Tzeng, 2000
<i>O. gomesii</i>	Golfo de México			4-6						Bishop <i>et al.</i> , 2000
<i>O. remiger</i>	Norte de Perú	6.96±1.0	12.80±0.7		145.23±12	84 -126	230.09±22.9	142±11	31 - 54	Estudio actual

Radio(s) a la marca (µm): eclosión (R_{HC}), primera alimentación (R_{FFC}), metamorfosis inicial o leptocéfala (R_{MO}) y metamorfosis final (R_{M2}). Edad (días): primera alimentación (N_{FFC}), metamorfosis inicial (N_{MO}), metamorfosis final (N_{M2}) y postmetamorfosis (N_{PM}).

El crecimiento del otolito de *O. remiger* en la fase leptocéfala muestra un patrón progresivo, con ancho de incrementos que aumentan desde 0,67 $\mu\text{m}/\text{día}$ tras la eclosión hasta 1,75 $\mu\text{m}/\text{día}$ al finalizar esta fase, aproximadamente a los tres meses, acorde a lo observado en *A. anguilla* (LECOMTE-FINIGER, 1992) y *A. rostrata* (WANG & TZENG, 2000). Este rápido crecimiento parece estar asociado a una estrategia basada en la baja demanda respiratoria y energética (BISHOP *et al.*, 2000). Tras la zona translúcida leptocéfala, se observa una zona difusa perteneciente a la zona de metamorfosis donde la tasa de crecimiento del otolito se incrementa a un máximo promedio de 2,11 $\mu\text{m}/\text{día}$, disminuyendo luego progresivamente hacia la zona post metamorfosis. El aumento en el ancho de incremento en los otolitos de larvas de anguila es utilizado como un marcador para determinar el inicio de la metamorfosis y comparar las duraciones larvarias entre diferentes especies (MARUI *et al.*, 2001).

En especies de anguila, durante la transición morfológica de la metamorfosis hacia la etapa juvenil, se ha reportado una disminución del tamaño corporal, coincidiendo con la transformación de una forma corporal comprimida lateralmente a una más redondeada, típica de anguilas juveniles (TSUKAMOTO *et al.*, 2009). Debido a que el intestino avanza y el tejido se reabsorbe, las larvas no se alimentan durante la metamorfosis (OTAKE, 2003). Aunque esta fase suele estar asociada a una caída en el ritmo de crecimiento somático (MILLER, 2009; LEANDER *et al.*, 2013), los resultados muestran una tasa intermedia elevada en el crecimiento de los otolitos entre los días 100 y 150, como lo observado en *A. anguilla* (LECOMTE-FINIGER, 1992). Este cambio, en el que las tasas de crecimiento individuales disminuyen a medida que las larvas alcanzan su tamaño máximo y comienza la metamorfosis, ocurre alrededor de los 100 días en leptocéfalos anguílidos del Indo-Pacífico, como *A. marmorata*, *A. bicolor pacifica*, *Anguila celebesensis* y *A. borneensis* (KUROKI *et al.*, 2006), lo que refuerza los hallazgos de este estudio.

Las tasas de crecimiento relativamente bajas observadas en leptocéfalos de *Anguilla* spp. han sido asociadas a historias de vida altamente especializadas, caracterizadas por extensas migraciones reproductivas y una fase larval prolongada que puede superar un año antes de la metamorfosis (SMITH, 1989). Aunque en *O. remiger* no se han identificado con precisión las áreas de desove, la estratificación espa-

Otolith growth in *O. remiger* during the leptocephalus phase followed a progressive trend, with increment widths increasing from 0.67 $\mu\text{m}/\text{day}$ after hatching to 1.75 $\mu\text{m}/\text{day}$ near the end of the phase, approximately three months later. This pattern is consistent with that observed in *A. anguilla* (LECOMTE-FINIGER, 1992) and *A. rostrata* (WANG & TZENG, 2000). Such rapid increment expansion may reflect a life-history strategy based on relatively low respiratory and energetic demands (BISHOP *et al.*, 2000). Beyond the translucent leptocephalus zone, a diffuse metamorphic region was observed in which growth reached a mean maximum of 2.11 $\mu\text{m}/\text{day}$, before declining progressively toward the postmetamorphic zone. In anguilliform larvae, increases in increment width are commonly used to identify the onset of metamorphosis and compare larval durations among species (MARUI *et al.*, 2001).

During the morphological transition from metamorphosis to the juvenile stage, anguilliform species often exhibit a reduction in body size, coinciding with the transformation from a laterally compressed body form to the more cylindrical shape typical of juveniles (TSUKAMOTO *et al.*, 2009). Because the intestine reorganizes and tissues are reabsorbed, larvae do not feed during metamorphosis (OTAKE, 2003). Although this phase is generally associated with reduced somatic growth (MILLER, 2009; LEANDER *et al.*, 2013), the present study recorded relatively high intermediate otolith growth rates between days 100 and 150, similar to those described for *A. anguilla* (LECOMTE-FINIGER, 1992). Comparable patterns have been reported in Indo-Pacific anguillid leptocephalids such as *A. marmorata*, *A. bicolor pacifica*, *Anguila celebesensis*, and *A. borneensis*, where growth rates decline as larvae approach maximum size and metamorphosis begins at approximately 100 days (KUROKI *et al.*, 2006).

The relatively low growth rates documented in the leptocephalids of *Anguilla* spp. have been linked to highly specialized life histories characterized by extensive spawning migrations and prolonged larval phases that may exceed one year before metamorphosis (SMITH, 1989). Although the spawning grounds of *O. remiger* remain unidentified,

cial de las tallas sugiere la posible ocurrencia de desplazamientos migratorios, los cuales podrían estar relacionados con las tasas de crecimiento observadas. En tanto, un periodo larval prolongado podría representar una estrategia adaptativa que favorece el mantenimiento de tasas de crecimiento reducidas durante la fase leptocéfala, en concordancia con patrones descritos para otros Anguilliformes.

Los resultados del presente estudio constituyen una primera aproximación a la microestructura de otolitos de *O. remiger* y plantean diversas líneas de investigación para profundizar en el conocimiento de su historia de vida temprana. Entre ellas, la validación de la periodicidad diaria de los incrementos mediante técnicas de marcado en individuos mantenidos en cautiverio, lo que permitiría confirmar la periodicidad asumida en este estudio y reducir la incertidumbre en las estimaciones de edad y crecimiento. Asimismo, el análisis de microquímica de otolitos podría contribuir a delimitar las zonas de reproducción y las rutas de reclutamiento de la especie en el Pacífico suroriental. Finalmente, la identificación de las áreas de desove representa una prioridad para comprender el ciclo de vida completo de *O. remiger*, dado que la estratificación espacial de tallas reportada en el norte del Perú (IMARPE, 2022) sugiere posibles desplazamientos migratorios cuyo origen aún no ha sido determinado.

5. CONCLUSIONES

El análisis de las microestructuras de los otolitos de *Ophichthus remiger* permitió identificar patrones de crecimiento consistentes con los descritos para otros Anguilliformes, incluyendo la esquemización de las principales fases de desarrollo: leptocéfala, metamórfica y postmetamórfica.

La estimación de la ocurrencia de la fase de metamorfosis (13 – 25 días) y las tasas de crecimiento observadas (1,20 – 2,11 $\mu\text{m}/\text{día}$) se encuentran dentro de los rangos reportados para el grupo, lo que respalda la validez de los criterios utilizados para la interpretación de los incrementos primarios de otolitos.

La limitada disponibilidad de individuos en estadios tempranos constituye una restricción importante, por lo que se recomienda complementar estos análisis con estudios adicionales que permitan validar la formación de los incrementos en las primeras fases de vida.

the spatial stratification of size classes suggests possible migratory movements that may be associated with the growth patterns observed here. A prolonged larval period may therefore represent an adaptive strategy that favors reduced growth during the leptocephalus phase, consistent with patterns reported for another Anguilliformes.

This study represents an initial contribution to the understanding of otolith microstructure in *O. remiger* and identifies several priorities for future research. Validation of daily increment periodicity through marking experiments in captive individuals would help confirm the assumptions used here and reduce uncertainty in age and growth estimates. Otolith microchemical analyses may also provide insight into spawning areas and recruitment pathways in the southeastern Pacific. Finally, identifying spawning grounds remains essential for understanding the complete life cycle of *O. remiger*, particularly because the spatial size stratification reported for northern Peru (IMARPE, 2022) suggests migratory movements whose origin remains unresolved.

5. CONCLUSIONS

The analysis of otolith microstructures in *Ophichthus remiger* revealed growth patterns consistent with those reported for other Anguilliformes and allowed the identification of the principal developmental phases: leptocephalus, metamorphic, and postmetamorphic stages.

The estimated duration of the metamorphic phase (13–25 days) and the observed growth rates (1.20–2.11 $\mu\text{m}/\text{day}$) fall within the ranges documented for the group, supporting the reliability of the criteria used to interpret primary otolith increments.

A major limitation of the present study was the low availability of specimens in the earliest developmental stages. Further research is therefore needed to validate increment deposition during the initial phases of life.

Taken together, these findings provide a solid foundation for age validation and future growth studies in *O. remiger*, thereby improving current knowledge of the species' life history and biology.

En conjunto, los resultados proporcionan una base sólida para la validación de la edad y el desarrollo de estudios de crecimiento en *O. remiger*, contribuyendo a mejorar el conocimiento biológico de esta especie.

6. REFERENCIAS

- ARAI, T. (2022). Early life history and recruitment processes of a tropical anguillid eel *Anguilla marmorata* to the Pacific Coast, as revealed by otolith Sr: Ca ratios and microstructure. *Biology*, 11, 803. <https://doi.org/10.3390/biology11060803>
- ARAI, T., LIMBONG, D., OTAKE, T. & TSUKAMOTO, K. (2001). Recruitment mechanisms of tropical eels *Anguilla* spp. and implications for the evolution of oceanic migration in the genus *Anguilla*. *Marine Ecology Progress Series*, 216, 253–264. <https://doi.org/10.3354/meps216253>
- ARANCIBIA, H., ALARCÓN, L., CABALLERO, R., CONCHA, R. & CARMONA, A. (2000). *Nuevas pesquerías para Chile Central. Anguila común (Ophichthus pacifici). Proyecto FONDEF D971-1058. Desarrollo de nuevas pesquerías de recursos marinos bentónicos, pelágicos y demersales en Chile Central (Documento Técnico N° 3)*. UNITED, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción.
- BISHOP, R. E., TORRES, J. J. & CRABTREE, R. E. (2000). Chemical composition and growth indices in leptocephalus larvae. *Marine Biology*, 137, 205–214. <https://doi.org/10.1007/s002270000362>
- CAMPANA, S. E. & THORROLD, S. R. (2001). Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 30–38. <https://doi.org/10.1139/f00-177>
- CAMPANA, S. E. & JONES, C. M. (1992). Analysis of otolith microstructure data. En D. K. Stevenson & S. E. Campana (Eds.), *Otolith microstructure examination and analysis* (Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 117, Cap. 5, pp. 73–100). Department of Fisheries and Oceans. <https://acortar.link/2gzVmJ>
- CAMPANA, S. E. (2005). Otolith elemental composition as a natural marker of fish stocks. En S. X. Cadrin, K. D. Friedland & J. R. Waldman (Eds.), *Stock identification methods* (Cap. 12, pp. 227–245). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012154351-8/50013-7>
- CAMPANA, S. E. (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 188, 263–297. <https://doi.org/10.3354/meps188263>
- CASTILLO, R., GÓMEZ, E. & PAREDES, B. (2000). Pesquería y biología de la anguila común *Ophichthus pacifici* (Günther) en el Perú. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú*, (134), 3–19. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/1168>
- CHIRICHIGNO, N. & CORNEJO, R. (2001). *Catálogo comentado de los peces marinos del Perú* (Publicación especial). Instituto del Mar del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/9516>
- CIERI, M. D. & McCLEAVE, J. D. (2001). Validation of daily otolith increments in glass-phase American eels *Anguilla rostrata* (Lesueur) during estuarine residency. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 257, 219–227. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(00\)00333-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(00)00333-6)
- DEGENS, E. T., DEUSER, W. G. & HAEDRICH, R. L. (1969). Molecular structure and composition of fish otoliths. *Marine Biology*, 2, 105–113. <https://doi.org/10.1007/BF00347005>
- FISHBASE. (2026). *Ophichthus remiger* (Valenciennes, 1842) [FishBase. World Wide Web electronic publication]. Consultada el 09 de febrero del 2026 de, www.fishbase.org
- GOICOCHEA, C., MOSTACERO, J. & MOQUILLAZA, P. (2012). Edad y crecimiento de *Ophichthus remiger* (Valenciennes) en el norte del mar peruano, 2004. *Inf Inst Mar Perú*, 39(1-2), 9–17. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/2197>
- GREEN, B. S., MAPSTONE, B. D., CARLOS, G. & BEGG, G. A. (Eds.). (2009). *Tropical fish otoliths: Information for assessment, management and ecology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5775-5>
- INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ [IMARPE]. (2022). *Prospección biológica pesquera del recurso anguila Ophichthus remiger, entre los 03°24' y 07°00's, del 17 al 22 de agosto de 2022 –operación anguila I* (Informe Correspondiente al Oficio N° 992-2022-IMARPE/PCD). <https://acortar.link/JDsqrnv>
- KUROKI, M., AOYAMA, J., MILLER, M. J., ARAI, T., SUGHA, H. Y., MINAGAWA, G., WOUTHUYZEN, S. & TSUKAMOTO, K. (2005). Correspondence between otolith microstructural changes and early life history events in *Anguilla marmorata* leptocephali and glass eels. *Coastal Marine Science*, 29(2), 154–161. <https://acortar.link/AQBki6>
- KUROKI, M., AOYAMA, J., MILLER, M. J., WOUTHUYZEN, S., ARAI, T. & TSUKAMOTO, K. (2006). Contrasting patterns of growth and migration of tropical anguillid leptocephali in the western Pacific and Indonesian Seas. *Marine Ecology Progress Series*, 309, 233–246. <https://doi.org/10.3354/meps309233>
- LEANDER, N. J., TZENG, W. N., YEH, N. T., SHEN, K. N. & HAN, Y. S. (2013). Effects of metamorphosis timing and the larval growth rate on the latitudinal distribution of sympatric freshwater eels, *Anguilla japonica* and *A. marmorata*, in the western North Pacific. *Zoological Studies*, 52, 30. <https://doi.org/10.1186/1810-522X-52-30>
- LECOMTE-FINIGER, R. (1992). Growth history and age at recruitment of European glass eels (*Anguilla anguilla*) as revealed by otolith microstructure. *Marine Biology*, 114, 205–210. <https://doi.org/10.1007/BF00349520>
- MARUI, M., ARAI, T., MILLER, M. J., JELLYMAN, D. J. & TSUKAMOTO, K. (2001). Comparison of early life history between New Zealand temperate eels and Pacific tropical eels revealed by otolith microstructure and microchemistry. *Marine Ecology Progress Series*, 213, 273–284. <https://doi.org/10.3354/meps213273>

- MILLER, M. J. & TSUKAMOTO, K. (2020). The behavioral ecology and distribution of leptocephali: marine fish larvae with unforeseen abilities. *Marine Biology*, 167, 168. <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03778-8>
- MILLER, M. J. (2009). Ecology of anguilliform leptocephali: remarkable transparent fish larvae of the ocean surface layer. *Aqua-BioScience Monographs*, 2(4), 1-94. <https://acortar.link/XNbH4w>
- OTAKE, T. (2003). Metamorphosis. En K. Aida, K. Tsukamoto & K. Yamauchi (Eds.), *Eel Biology* (pp. 61-74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-4-431-65907-5_5
- PANELLA, G. (1971). Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns. *Science*, 173(4002), 1124-1127. <https://doi.org/10.1126/science.173.4002.1124>
- PANFILI, J., DE PONTUAL, H., TROADEC, H. & WRIGHT, P. J. (2002). *Manual of fish sclerochronology*. Ifremer-IRD. <https://acortar.link/BnFODK>
- PANFILI, J., TOMÁS, J. & MORALES-NIN, B. (2009). Otolith microstructure in tropical fish. En B. S. Green, B. D. Mapstone, G. Carlos & G. A. Begg (Eds.), *Tropical fish otoliths: Information for assessment, management and ecology. Reviews: Methods and Technologies in Fish Biology and Fisheries* (pp. 212-248). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5775-5_7
- POWLES, P. M., HARE, J. A., LABAN, E. H. & WARLEN, S. M. (2006). Does eel metamorphosis cause a breakdown in the tenets of otolith applications? A case study using the speckled worm eel (*Myrophis punctatus*, Ophichthidae). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63, 1460-1468. <https://doi.org/10.1139/f06-052>
- SCHUHBAUER, A. (2006). *Fishery and population dynamics of the punctuated snake-eel, Ophichthus remiger, (Ophichthidae), North Perú* [Thesis]. Faculty for Biology & Chemistry, University of Bremen.
- SHIN, M.-G., RYU, Y.-W., CHOI, Y.-H. & KIM, S.-K. (2022). Morphological and allometric changes in *Anguilla japonica* larvae. *Biology*, 11(3), 407. <https://doi.org/10.3390/biology11030407>
- SMITH, D. G. (1989). Introduction to leptocephali. En E. B. Böhlke (Ed.), *Fishes of the Western North Atlantic* (Vol. 1., Part. 9, pp. 657-668). Sears Foundation for Marine Research.
- TSUKAMOTO, K., YAMADA, Y., OKAMURA, A., KANEKO, T., TANAKA, H., MILLER, M. J., HORIE, N., MIKAWA, N., UTOH, T. & TANAKA, S. (2009). Positive buoyancy in eel leptocephali: an adaptation for life in the ocean surface layer. *Marine Biology*, 156, 835-846. <https://doi.org/10.1007/s00227-008-1123-8>
- WANG, C. H. & TZENG, W. N. (2000). The timing of metamorphosis and growth rates of American and European eel leptocephali: A mechanism of larval segregative migration. *Fisheries Research*, 46, 191-205. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(00)00146-6)

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Jacques Panfili del Institut de Recherche pour le Développement (IRD - UMR MARBEC) por su valioso apoyo en la interpretación de microestructuras de otolitos y por las orientaciones brindadas durante el desarrollo de este estudio.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge Jacques Panfili of the Institut de Recherche pour le Développement (IRD - UMR MARBEC) for his valuable assistance in the interpretation of otolith microstructures and for the guidance provided throughout this study.