

Niveles de pH gastrointestinal posprandial en juveniles de *Piaractus brachypomus* (Serrasalminidae) y *Schizodon fasciatus* (Anostomidae)

A. R. Palomino-Ramos^{*1}, J. J. Coasaca-Céspedes², J. A. Bastidas-Henostroza¹,
A. E. Romant-Alegre² y J. C. Francia-Quiroz²

Recibido: 31/08/2022. Aprobado: 23/02/2023

RESUMEN

Se realizó un estudio comparativo para determinar variaciones del pH gastrointestinal posprandial en juveniles de *Piaractus brachypomus* (n = 21) y *Schizodon fasciatus* (n = 21) en condiciones de cultivo. Previo ayuno de 24 horas, los peces fueron alimentados tres veces al día a saciedad aparente, empleando una dieta mixta, conformada por alimento balanceado y músculo de corazón de pollo (proporción 1:1). La estimación del pH en el estómago, en la porción anterior y en la porción media del intestino se realizó antes de la alimentación y ocho horas posprandial, utilizando un electrodo de pH con punta tipo lanza. Se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) de los valores de pH en el estómago y en la porción media del intestino, según el tiempo de digestión en ambas especies; mientras que, en la porción anterior del intestino, solo *S. fasciatus* mostró diferencias significativas ($p < 0,05$). En ambas especies se observó un incremento del pH estomacal a la primera hora posprandial (2,39 a 4,78 en *P. brachypomus*, 4,47 a 4,73 en *S. fasciatus*), motivado por el efecto del alimento ingerido y con una reducción de los valores al finalizar el experimento. Durante las horas de evaluación, los valores de pH intestinal para *P. brachypomus* y *S. fasciatus* estuvieron entre 6,68 y 7,47 y 6,86 y 7,60, respectivamente, aumentando de manera distal a lo largo del intestino. Se concluye que ambas especies presentan una acidificación estomacal permanente, mientras que la porción anterior y media del intestino mantienen un pH ligeramente neutro durante la digestión y asimilación del alimento.

Palabras clave: digestión, estómago, intestino, peces amazónicos.

Postprandial gastrointestinal pH levels in juveniles of *Piaractus brachypomus* (Serrasalminidae) and *Schizodon fasciatus* (Anostomidae)

ABSTRACT

A comparative study to determine variations in postprandial pH values along the gastrointestinal tract was performed among juveniles of *Piaractus brachypomus* (n = 21) and

¹ Universidad Científica del Sur. Carrera de Ingeniería Acuicola. Carretera Panamericana Sur Km. 19, Villa El Salvador 15067. Lima, Perú.

^{*} Autor de correspondencia. Correo electrónico: apalominor@cientifica.edu.pe

² Universidad Científica del Sur. Carrera de Biología Marina. Carretera Panamericana Sur Km. 19, Villa El Salvador 15067. Lima, Perú.

Schizodon fasciatus (n = 21) in rearing conditions. After fasting for 24 hours, the fish were fed three times a day to apparent satiety, with a mixed diet containing pelleted balanced food and chicken heart muscle (ratio 1:1). The evaluation was made before feeding and postprandial (eight hours), where the pH values of the stomach, in the anterior and in the middle portions of the intestine were estimated, using a pH electrode with a lance-type tip. Significant differences ($p < 0.05$) at the stomach and the middle portions of the intestine, according to the digestion time were observed in both species, while at the anterior portions of the intestine, only *S. fasciatus* showed significant differences ($p < 0.05$). In both species, an increase in stomach pH was observed in the first postprandial hour (2,39 to 4,78 in *P. brachypomus*, 4,47 to 4,73 in *S. fasciatus*), led by the effect of the ingested food, and the pH values were reduced at the end of the experiment. During the evaluation hours, intestinal pH values for *P. brachypomus* and *S. fasciatus* were between 6,68 and 7,47 and 6,86 and 7,60, respectively, increasing distally along the intestine. It is concluded that both species present a permanent stomach acidification, and that the anterior and middle portions of the intestine maintain a slightly neutral pH during digestion and assimilation of food.

Keywords: digestion, pH, gastrointestinal tract, Amazonian fish.

INTRODUCCIÓN

El tracto gastrointestinal de los peces es un sistema complejo de órganos, con secciones funcionales bien diferenciadas, donde cada una de ellas presenta condiciones únicas en la digestión de nutrientes (Bucking y Wood 2009), ampliamente variables según el grupo trófico, los hábitos alimentarios, el estadio de desarrollo y el tipo de dieta ingerida por las especies (Goodrich *et al.* 2020), especialmente en lo que se refiere a la hidrólisis y asimilación de proteínas. La optimización de la digestión proteica en peces juega un rol importante para alcanzar una alta eficiencia y rentabilidad en la piscicultura (Márquez *et al.* 2012). Varios factores afectan la eficiencia de la digestión proteica en peces, como: predigestión ácida en el estómago, tipo y actividad de proteasas involucradas en la hidrólisis, condiciones intestinales de pH y el tiempo total de reacción para el funcionamiento óptimo de tales proteasas (Márquez *et al.* 2012).

Los valores de pH en el tracto gastrointestinal difieren tanto entre especies como en individuos de la misma especie (Deguara *et al.* 2003; Solovyev *et al.* 2015; Yúfera *et al.* 2012). Generalmente, estos valores fisiológicos de pH no son similares a los valores de pH óptimos para la actividad enzimática gastrointestinal de las especies (Solovyev *et al.* 2016). Valores óptimos de pH para la máxima eficiencia de las enzimas digestivas demostradas *in vitro*, como el caso de la pepsina, se encuentran en el rango de 2,00 a 3,00, según lo reportado para varias especies como *Clarius guriepinus*, *Oncorhynchus mykiss*, *Scophthalmus maximus*, *Sparus aurata* (Deguara *et al.* 2003; Munilla–Morán y Saborido–Rey 1996; Uys y Hecht 1987). Esta situación podría causar variaciones en la acción óptima de la pepsina (por los altos valores del pH estomacal presentados en algunas especies de peces), así como en la actividad proteolítica durante el tránsito gastrointestinal. Por ejemplo, *O. mykiss* presenta un rango de pH gástrico entre

3,40 y 3,80, *S. aurata*, entre 2,50 y 5,50, y *Piaractus mesopotamicus*, entre 3,00 y 5,12, respectivamente (Deguara *et al.* 2003; Gonçalves–França *et al.* 2017; Sugiura *et al.* 2006).

El conocimiento de los valores fisiológicos del pH complementa los diversos estudios relacionados a la actividad enzimática y la capacidad digestiva de las diversas especies de peces en cultivo, y esto puede mejorar el proceso de manejo alimentario y la actividad acuícola (Hlophe *et al.* 2014; Solovyev *et al.* 2016). Sin embargo, es necesario aún disponer de información detallada sobre la variación de los valores de pH en diferentes segmentos del tracto gastrointestinal y sus efectos sobre la actividad enzimática que ayuden a entender un poco más sobre el ritmo circadiano digestivo de los peces (Solovyev *et al.* 2016).

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue conocer la variación de los niveles de pH en el tracto digestivo de juveniles de “paco” (*Piaractus brachyomus*) y “lisa amazónica” (*Schizodon fasciatus*) en condiciones experimentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Declaración de ética

El Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur, con fecha 18 de septiembre de 2018, aprobó las actividades de este proyecto de investigación según Constancia N.º 14-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2018.

Localización

El presente estudio fue desarrollado en las instalaciones del Centro Experimental Ambiental (CEA) de la Carrera de Ingeniería

Ambiental de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Científica del Sur, ubicado en el distrito de Villa El Salvador, provincia y departamento de Lima, Perú.

Condiciones experimentales

Juveniles de *P. brachyomus* (n=21) de $58,25 \pm 0,57$ g de peso húmedo total (PHT) y $14,23 \pm 0,12$ cm de longitud total (LT), y *S. fasciatus* (n=21) de $53,65 \pm 4,61$ g de PHT y $17,38 \pm 0,94$ cm de LT, provenientes de la empresa “Aquacultura Tambopata”, ubicada en Puerto Maldonado (Madre de Dios, Perú), fueron trasladadas a las instalaciones del CEA de la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú). Los peces se acondicionaron por dos semanas en tanques circulares de fibra de vidrio reforzado (250 L) a una densidad de siete individuos por tanque, separados por especie, y se verificó que no presentarían enfermedades y tuvieran un buen comportamiento alimentario.

Sistema de cultivo

Los ejemplares de *P. brachyomus* y *S. fasciatus* se mantuvieron en un sistema de recirculación conformado por seis unidades de tanques circulares de fibra de vidrio reforzado de 250 L, con caudal de $0,80 \text{ L min}^{-1}$, equipado con filtros mecánicos y biológicos, calentadores con termostato ($27 \text{ }^\circ\text{C}$), aireación constante por una bomba de aire ($0,035 \text{ Mpa}$, 70 L min. , 80 W , $220\text{--}240 \text{ V/50Hz}$), y se conservaron los parámetros de calidad de agua óptimos para peces amazónicos ($27 \text{ }^\circ\text{C}$, $5,00 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, pH $7,20$, y $0,025 \text{ NH}_3/\text{NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$). El experimento se manejó con un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas de oscuridad. Además, los tanques se cubrieron con mallas de nylon para evitar que los peces se escaparan. Los individuos

de *P. brachypomus* se mantuvieron en tres tanques circulares, mientras que los individuos de *S. fasciatus*, en los otros tres tanques.

Alimentación

Los peces se alimentaron por una semana con una dieta mixta (DM 1:1) conformada por alimento balanceado Aquatech 35 Tilapia (35,00% de proteína bruta, 5,00% de lípidos, 4,00% de fibra, 1,20% de calcio y 0,80% de fósforo) y músculo de corazón de pollo (previo retiro de cartilago y grasa, y posterior lavado con solución salina). Esta dieta mixta fue empleada para garantizar un mejor consumo del alimento por parte de los peces, dado que la inclusión del ingrediente cárnico permitió una mejor atractabilidad de las dietas. La alimentación se suministró a saciedad aparente en una frecuencia de tres veces al día.

Determinación de pH gastrointestinal

Después de tres semanas en condiciones de cultivo controlado, se procedió con la cuantificación del pH en el sistema gastrointestinal de *P. brachypomus* (n = 21) con $69,74 \pm 7,44$ g de PHT y $14,84 \pm 0,85$ cm

de LT y *S. fasciatus* (n=21) con $65,32 \pm 13,95$ g de PHT y $18,15 \pm 1,06$ cm de LT, respectivamente. Los peces fueron sometidos con anterioridad a un periodo de ayuno por 24 horas, considerado suficiente para la evacuación gástrica completa (Hlophé *et al.* 2014). Luego se procedió a medir el pH antes de la alimentación (hora 0) y posterior de ingerir la DM (hora 1, 2, 3, 4, 6 y 8). En cada hora de evaluación se sacrificaron tres organismos por especie (un ejemplar por tanque, totalizando tres por hora de evaluación según especie), empleando una solución de benzocaína de 100 mg/L, según Neiffer y Stamper (2009) y se procedió a disectar a los organismos por la zona abdominal, con la finalidad de reconocer y extraer el estómago (E) y el intestino anterior (IA) y medio (IM) por cada individuo sacrificado. Cada porción intestinal recolectada consideró cerca de un tercio de la longitud intestinal. Finalmente, el pH gastrointestinal se midió utilizando un pHmetro EcoSense pH100A Meter (YSI, Estados Unidos), con un electrodo de pH con punta tipo lanza (PE06HD, Lutron), el cual se introdujo en cada sección del sistema digestivo (figura 1), según los tiempos establecidos.

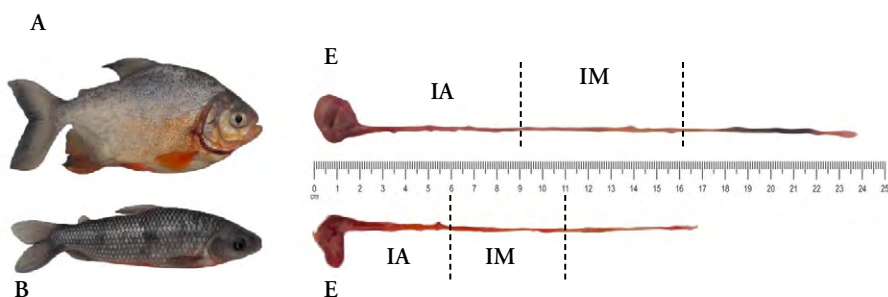


FIGURA 1. A. Anatomía digestiva y estimación del pH estomacal de *P. brachypomus*. B. Anatomía digestiva y estimación del pH estomacal de *S. fasciatus*. E: estómago, IA: intestino anterior, IM: intestino medio.

Fuente: elaboración propia.

Análisis estadístico

Los valores de pH obtenidos en las diferentes secciones del tracto gastrointestinal de ambas especies se sometieron a las pruebas estadísticas de Jarque–Bera y Barlett para verificar la distribución normal y homogeneidad de varianzas de los datos, respectivamente. Para este análisis, se consideraron los tres segmentos gastrointestinales, estómago (E), intestino anterior (IA) e intestino medio (IM) como unidades experimentales en grupos, aplicando la prueba ANOVA a dos vías ($p < 0,05$), para determinar diferencias significativas considerando los factores de especie y hora, posteriormente, se utilizó la prueba Tukey. Para el análisis estadístico, se utilizó el programa RStudio V 4.0.3.

RESULTADOS

Estómago

El efecto del tiempo sobre los valores de pH posprandial en el estómago mostró diferencias significativas en ambas especies ($p < 0,05$) frente a las demás porciones intestinales evaluadas. Previo a la alimentación, los valores de pH fueron de $2,39 \pm 0,31$ en *P. brachypomus* y de $4,47 \pm 0,00$ en *S. fasciatus*. A la primera hora posterior a que los peces consumieran la DM, se observó un incremento del pH en los estómagos de todos los organismos (figura 2). Para el caso de *P. brachypomus*, luego de la segunda hora en que los individuos se alimentaran, se evidenció que el pH volvió a disminuir hasta la sexta hora, con un posterior incremento al finalizar el experimento para todas las evaluaciones. En el caso de *S. fasciatus*, la tendencia a disminuir después de la

segunda hora siguió hasta la cuarta hora, luego del cual se observó un incremento de los valores de pH más evidente hasta la octava hora posprandial, en comparación con *P. brachypomus* (figura 2). Estas diferencias observadas en ambas especies, de preferencias alimentarias por frutos y material vegetal, podrían estar influenciadas por el tipo de dieta utilizada y su efecto tampón.

Intestino anterior

El efecto del tiempo sobre los valores de pH posprandial generó diferencias significativas en *S. fasciatus* ($p < 0,05$), lo cual parece indicar que el estado de alimentación, con DM, afecta al pH en esta sección intestinal para esta especie herbívora. Los datos de pH en el intestino anterior para *S. fasciatus* y *P. brachypomus* indican que antes de la alimentación se encuentran entre $7,04 \pm 0,00$ a $7,31 \pm 0,10$, lo cual hace referencia a un entorno neutro. A partir de la primera hora de alimentación con DM, se puede observar que el pH se incrementa para las dos especies, hasta la segunda hora (figura 3). Sin embargo, el pH para *P. brachypomus* disminuye a la tercera y cuarta hora posterior a la ingestión del alimento, y a partir de ese momento, se evidencia un incremento desde la sexta hora hasta finalizar las evaluaciones de pH (figura 3). En el caso de *S. fasciatus*, se determinó que el pH continúa aumentando desde la segunda hasta la octava hora, posterior al consumo de la DM. Todas las variaciones son mínimas (figura 3).

Intestino medio

El efecto del tiempo sobre los valores de pH posprandial en este segmento

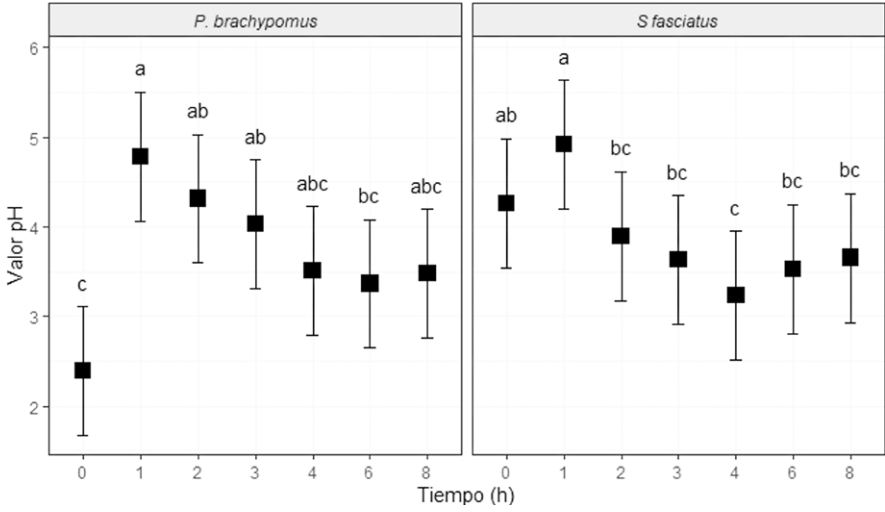


FIGURA 2. Valores de pH estomacal de *P. brachypomus* y *S. fasciatus* durante el proceso digestivo (ocho horas). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre horas de digestión a nivel estomacal para cada especie.

Fuente: elaboración propia.

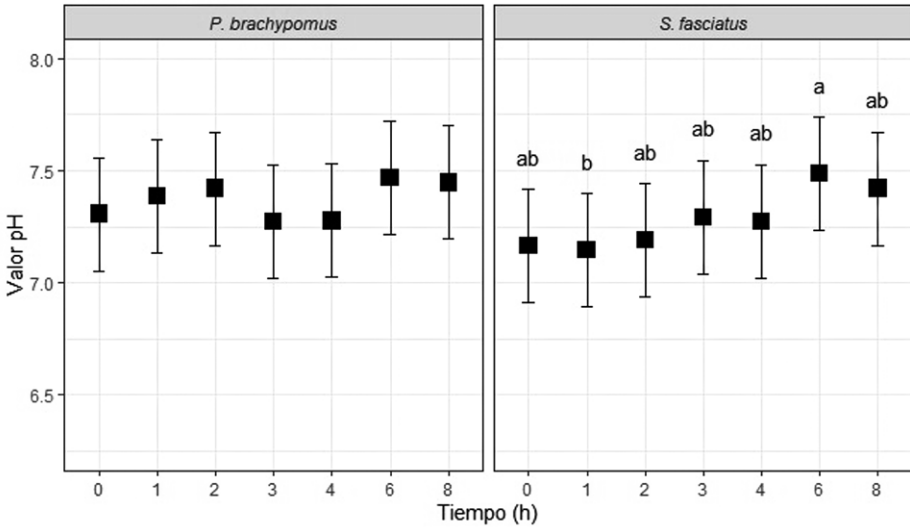


FIGURA 3. Valores de pH del intestino anterior de *P. brachypomus* y *S. fasciatus* durante el proceso digestivo (ocho horas). Letras distintas indican diferencias significativas entre horas de digestión en el intestino anterior para cada especie ($p < 0,05$). Ausencia de letras indica que no existe diferencia significativa.

Fuente: elaboración propia.

gastrointestinal presentó diferencia significativa para ambas especies ($p < 0,05$). El pH del intestino medio para *P. brachypomus* y *S. fasciatus* es ligeramente menor, en comparación con el pH del intestino anterior en todas las evaluaciones previas a la alimentación con DM (figura 4). Al analizar las variaciones de pH durante el consumo de DM, se aprecia un aumento de este desde la primera hasta la tercera hora, y luego se observa su reducción hacia la cuarta hora de alimentación (figura 4). Finalmente, a la sexta y octava hora de consumo de la DM, ocurre un incremento del pH para todos los ejemplares (figura 4).

DISCUSIÓN

En teleósteos, se han descrito dos estrategias básicas de acidificación gástrica. Por

una parte, especies que mantienen una acidificación permanente en el estómago y, por otra parte, especies que mantienen un ambiente luminal neutro entre comidas. Además, la acidificación gástrica solo se inicia al entrar el alimento en el estómago, y los valores neutros se recuperan cuando este se vacía (Solovyev *et al.* 2015; Yúfera *et al.* 2012). Especies que presentan una acidificación permanente pueden tener una subida de pH gástrico motivada por el efecto tampón del alimento ingerido (Bucking y Wood 2009).

El pH observado para *P. brachypomus* ($pH = 2,39 \pm 0,31$) mostró una acidificación gástrica en ayunas, como también se ha reportado para juveniles de *P. mesopotamicus* ($pH = 1,47$) (Gonçalves-França *et al.* 2017). Esta situación podría sugerir la estrategia de la especie al ingerir alimentos

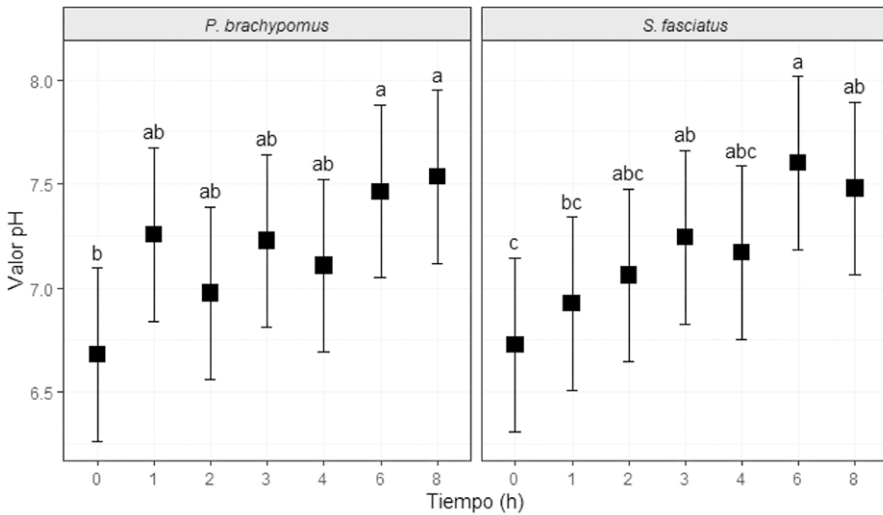


FIGURA 4. Valores de pH del intestino medio de *P. brachypomus* y *S. fasciatus* durante el proceso digestivo (ocho horas). Letras distintas indican diferencias significativas entre horas de digestión en el intestino medio para cada especie ($p < 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

de difícil digestión, creando un ambiente ácido en el estómago (García Gallego y Sanz Runs 2009). *P. brachypomus* se caracteriza por su carácter omnívoro frugívoro y preferencia por granos duros, restos de vegetales, así como por frutas de cortezas resistentes (Guimarães y Martins 2015), materiales difícilmente digeribles a pesar de su grupo trófico.

La acidificación gástrica permanente también ha sido descrita en especies de hábitos carnívoros, como *O. mykiss* y juveniles de *Rachycentron canadum*, los que presentaron un estómago permanentemente ácido, con pH gástrico luminal de 2,72 y 2,76, respectivamente (Bucking y Wood 2009; Yúfera *et al.* 2016).

En *S. fasciatus*, el valor de pH estomacal sobre valores de cuatro en situación de ayuno evidenciaría también una estrategia de acidificación permanente. No existen reportes sobre la variación de pH a nivel del tracto digestivo para *S. fasciatus* o de alguna especie del género *Schizodon* que permitan corroborar los valores encontrados en este estudio. Diversas especies de este género han sido descritas como herbívoras, teniendo como preferencia alimentaria macrófitas C_4 (Forsberg *et al.* 1993; Jepsen y Winemiller 2007; Manetta *et al.* 2003), vegetales caracterizados por poseer la ruta del ácido carboxílico para la fijación de carbono, y ser una fuente alimenticia pobre para la mayoría de los herbívoros (Caswell *et al.* 1973).

Para el caso de *S. fasciatus*, Soares y Almeida (1986) mencionan que esta especie es de gremio trófico herbívoro, consumiendo macrófitas acuáticas, perifiton, algas, raíces, hojas y frutos del bosque inundable; mientras que Mérona y Rankin-de-Mérona (2004) sostienen en su estudio una preferencia exclusiva

por hojas. Estudios en *Tilapia rendalli* y *Oreochromis mossambicus*, herbívoros que se alimentan de macrófitas y algas, presentaron valores de pH estomacal por encima de 4,00 (Hlophé *et al.* 2014), similar a lo reportado en este estudio. Sin embargo, el resultado obtenido debe tomar en cuenta las condiciones del experimento, que consideró una dieta mixta con un ingrediente cárnico húmedo para una especie herbívora.

El aumento del pH posterior a la ingesta de alimento en *P. brachypomus* y *S. fasciatus* puede relacionarse con el proceso de neutralización, debido al consumo de agua asociado a la alimentación, lo que ocasiona la dilución de las secreciones ácidas del estómago, así como la capacidad *buffer* del alimento (Bucking y Wood 2006; Bucking y Wood 2009; Kristiansen y Rankin 2001). Esta variación en el ritmo posprandial ha sido reportada para *P. mesopotamicus* (Gonçalves-França *et al.* 2017), así como especies de hábitos alimentarios diferentes como *O. mykiss*, aunque no el mismo grado, y *R. canadum* (Bucking y Wood 2009; Sugiura *et al.* 2006; Yúfera *et al.* 2016).

La rápida disminución del pH gástrico en *P. brachypomus* y *S. fasciatus*, luego de alcanzar el máximo ascenso en la primera hora posprandial, puede atribuirse a la expulsión y absorción de líquidos, y pareciera tener relación con la alcalinidad y dureza del agua utilizada en el experimento, y que debe ser demostrada en estudios posteriores. De acuerdo con Bucking y Wood (2009), el alto grado de disolución de Ca^{2+} y Mg^{2+} en la fase fluida del quimo gástrico se correlaciona con grandes tasas de absorción del estómago y, por consiguiente, una disminución del pH gástrico. Si bien es cierto que

no se hizo una medición de alcalinidad y dureza, es sabido que las aguas donde se realizó el estudio se caracterizan por su alta dureza.

Otra explicación a la disminución rápida del pH estomacal puede deberse a los procesos digestivos posprandiales. La presencia de alimento en el estómago estimula la secreción de ácido gástrico, una mezcla de ácido y enzimas digestivas, ocasionando la disminución del pH (De-guara *et al.* 2003, Gonçalves–França *et al.* 2017), lo que justificaría los cambios en los valores de pH del estómago observados en este estudio. Resultados similares fueron reportados para alevinos y juveniles de *S. aurata* (Márquez *et al.* 2012; Yúfera *et al.* 2004), así como una tendencia similar para juveniles de *T. rendalli* (Hlophe *et al.* 2014) en las siguientes ocho horas posprandial.

Otra razón que explica la tendencia decreciente del pH posprandial estaría relacionada con el tipo de alimento. Taylor y Grosell (2006) demostraron que los perfiles de pH de cada dieta influyen en su capacidad *buffer* y, por consiguiente, en los valores del pH gástrico posprandial, lo cual explica situaciones de mayor acidificación o no, independiente de los valores preprandiales. Papastamatiou y Lowe (2004) reportaron para tiburón leopardo (*Triakis semifasciata*) alimentado con calamar una tendencia similar a lo encontrado en nuestro estudio, con un aumento inicial del pH gástrico, seguido de una rápida disminución del pH. Esta variación posprandial puede ser afectada con la digestibilidad inherente de la presa, el contenido de lípidos y energía y la presencia de colágeno en el tejido de la presa.

Los rangos de pH gástrico medido durante la digestión en ambas especies fueron

similares, $3,36 \pm 0,35 - 4,78 \pm 0,17$ y $3,23 \pm 0,33 - 4,73 \pm 0,28$, respectivamente. Esta situación apuntaría a una capacidad limitada de los juveniles de *P. brachypomus* y *S. fasciatus* para alcanzar las condiciones óptimas de la acción enzimática de la pepsina. Esta limitación podría deberse a las características de la dieta suministrada, en vista de que las especies estudiadas tienen una preferencia alimentaria por los frutos y material vegetal. La dieta suministrada puede cambiar o causar una modificación en la actividad enzimática (Enes *et al.* 2015). Además, la información sobre las características de los pepsinógenos y las pepsinas de los peces tropicales de agua dulce, sobre todo de las especies de este estudio, es limitada.

Dada la anatomía funcional del estómago y el intestino, se evidencia un cambio de niveles o valores de pH de ácido a alcalino, debido a la neutralización del quimo, a medida que ingresa al intestino anterior (Gonçalves–França *et al.* 2017; Grosell *et al.* 2005; Taylor y Grosell 2006; Wilson *et al.* 2002). Esta neutralización se debe a la bilis, la secreción activa de HCO_3^- por parte del páncreas, y el HCO_3^- suministrado por un aumento del intercambio apical $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ (Grosell *et al.* 2005; Taylor y Grosell 2006; Wilson *et al.* 2002).

En el caso de *P. brachypomus*, las variaciones del pH a lo largo de las horas evaluadas no mostraron cambios significativos para la sección del intestino anterior ($7,27 \pm 0,10$ a $7,47 \pm 0,06$). Estos resultados presentan las mismas particularidades a los reportados en *P. mesopotamicus*, así como en juveniles de *S. aurata* (Gonçalves–França *et al.* 2017; Yúfera *et al.* 2004). Esto parece indicar que el estado de alimentación no afecta fuertemente al pH en esta sección intestinal. La creación de ambientes ácidos

en el estómago permitiría un quimo que pueda ser hidrolizado sin inconvenientes por parte de las enzimas pancreáticas en el intestino anterior y su aprovechamiento en el intestino medio. Las condiciones alcalinas permiten mantener la integridad del epitelio intestinal y la actividad de las enzimas pancreáticas e intestinales (Bucking y Wood 2009).

Estudios realizados parecen indicar que especies con digestión estomacal más ácida son capaces de alcalinizar rápidamente el intestino anterior, tal como se ha observado en *Dicentrarchus labrax* L. (Nikolopoulou *et al.* 2011). Sin embargo, en el presente estudio, los valores del pH a nivel intestinal estuvieron en un ambiente de neutro a ligeramente alcalino, pasando de $\text{pH} = 7,31 \pm 0,10$ (preingesta) a $\text{pH} = 7,42 \pm 0,18$ (segunda hora posprandial). Esta situación probablemente se debería a una baja actividad del intercambiador apical $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$, el cual secreta de manera adicional HCO_3^- , amortiguando el H^+ secretado y liberado con el quimo gástrico, y de esta forma, incrementa el pH de la luz intestinal (Bucking y Wood 2009; Taylor y Grosell 2006; Taylor *et al.* 2007). Se desconoce su accionar en los procesos de digestión en los peces neotropicales.

No se observó un aumento de la alcalinidad en el intestino medio con relación al intestino anterior para *P. brachypomus* y *S. fasciatus*. Esta situación difiere de lo reportado en *D. labrax* L., *O. mykiss*, *S. aurata*, *T. rendalli* y *O. mossambicus* (Bucking y Wood 2009; Hlophe *et al.* 2014; Nikolopoulou *et al.* 2011; Yúfera *et al.* 2004). La alcalinidad tiende al aumento mientras se avanza distalmente a lo largo del intestino, pasando de un promedio de pH de 6,00 a 8,00 (intestino anterior) a una media de 7,00 a

9,00 (intestino inferior). (Deguara *et al.* 2004). El incremento de la alcalinidad responde a la acumulación de secreciones de HCO_3^- en el quimo por parte del intercambiador $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ (Bucking y Wood 2009). Una explicación sugerida radicaría en que el intercambiador apical $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ no tendría una secreción activa de HCO_3^- en peces neotropicales.

En la sección del intestino anterior y medio de *S. fasciatus*, las diferencias significativas encontradas permitirían establecer la influencia de la alimentación sobre los valores del pH posprandial, probablemente mediado por las condiciones digestivas de la especie según sus hábitos alimentarios. *S. fasciatus* ha sido descrita como una de las raras especies capaces de alimentarse de macrófitas C_4 (Forsberg *et al.* 1993; Mortillaro *et al.* 2015). Estas macrófitas no son una preferencia alimentaria por la mayoría de los peces en los ecosistemas amazónicos, debido a su baja digestibilidad aún para los herbívoros, sin embargo, presenta alta cantidad de ácidos grasos esenciales y poliinsaturados (Caswell *et al.* 1973; Mortillaro *et al.* 2015).

Es probable que *S. fasciatus* haya desarrollado ciertas caracterizaciones de su fisiología digestiva para el aprovechamiento de material alimenticio difícilmente digeribles. Esto podría explicar las diferencias significativas encontradas a lo largo del tiempo de digestión. La longitud intestinal corta observada en nuestro estudio parecería indicar un hábito diferente a lo reportado, y no quedaría claro porque *S. fasciatus* presenta esta particularidad. No existen estudios al respecto que permitan entender esta configuración gastrointestinal, siendo importante realizar un estudio enfocado en esta región gastrointestinal para esta especie.

En el presente estudio, el análisis de la variación del pH gastrointestinal se centró durante las primeras ocho horas de digestión, con una dieta en particular y similar para ambas especies. No todos los peces exhiben un mismo patrón de respuesta del pH gastrointestinal al consumo de alimentos. Las variaciones pueden deberse a diferencias en la metodología del estudio, como la técnica y horas de medición, el intervalo de muestreo, el tamaño y composición del alimento, y por la naturaleza de la especie (Papastamatiou y Lowe 2004). Estos factores se deben considerar para una comprensión más precisa de la variación del pH gastrointestinal antes y durante la alimentación de peces amazónicos, *P. brachypomus* y *S. fasciatus*, donde el conocimiento generado pueda mejorar su rendimiento en actividades de cultivo.

CONCLUSIÓN

Existe variación en los ritmos del pH gástrico e intestinal en relación con la degradación y asimilación de la dieta, según las características alimenticias de cada especie. De acuerdo con las variaciones de pH estomacal, juveniles de *P. brachypomus* y *S. fasciatus* presentan una acidificación gástrica permanente como estrategia digestiva a lo largo de las primeras ocho horas de digestión. A nivel intestinal, ambas especies presentan una alcalinización ligera, sin embargo, es más marcada en *S. fasciatus* en función al tiempo de digestión, probablemente debido a la estrategia de digestión de sus preferencias alimentarias.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Estudios en Acuicultura Sostenible (GEAS) de la carrera de Ingeniería Acuícola de la Universidad Científica del Sur, así como a la carrera de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias Ambientales.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener relaciones de interés comercial o personal en el marco de la investigación que condujo a la producción del manuscrito sometido.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo financiero del “Fondo Semilla 2018” de la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Científica del Sur.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos generados durante este estudio se incluyen en este artículo.

REFERENCIAS

- Bucking C, Wood CM. 2006. Water dynamics in the digestive tract of the freshwater rainbow trout during the processing of a single meal. *J Exp Biol*. [Internet]. [publicado 2006 May 15]; 209:1883-1893. Disponible en: <https://journals.biologists.com/jeb/article/209/10/1883/16050/Water-dynamics-in-the-digestive-tract-of-the>
- Bucking C, Wood CM. 2009. The effect of postprandial changes in pH along the gastrointestinal tract on the distribution of ions between the solid and fluid phases of chime in rainbow trout. *Aquacult Nutr*. 15:282-296. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2008.00593.x>

- Caswell H, Reed F, Stephenson SN, Werner PA. 1973. Photosynthetic pathways and selective herbivory: a hypothesis. *Am. Nat.* 107:465-480. <https://doi.org/10.1086/282851>
- Deguara S, Jauncey K, Agiuss C. 2003. Enzyme activities and pH variations in the digestive tract of gilthead sea bream. *J Fish Biol.* 62:1033-1043. <https://doi.org/10.1046/j.1095-8649.2003.00094.x>
- Enes P, García-Meilán I, Guerreiro I, Couto A, Pousão-Ferreira P, Gallardo MA, Oliva-Teles A. 2015. Utilization of dietary starch by juvenile white sea bream *Diplodus sargus* at different feeding frequencies. *Aquacult Nutr.* 21:926-934. <https://doi.org/10.1111/anu.12227>
- Forsberg BR, Araujo-Lima CARM, Martinelli LA, Victoria RL, Bonassi JA. 1993. Autotrophic Carbon Sources for Fish of the Central Amazon. *Ecology.* 74:643-652. <https://doi.org/10.2307/1940793>
- García Gallego M y Sanz Runs A. 2009. Los hidratos de carbono en la alimentación de los peces. En F. Sanz (Ed.), *La nutrición y alimentación en piscicultura* (pp. 275-326). Serie Publicaciones Científicas y Tecnológicas. Fundación Observatorio Español de Acuicultura. [Internet]. Disponible en: https://www.observatorio-acuicultura.es/sites/default/files/images/adjuntos/libros/la_nutricion_y_alimentacion_en_piscicultura.pdf
- Goodrich HR, Bayley M, Birgersson L, Davison WG, Johannsson OE, Kim AB, My PL, Tinh TH, Thanh PN, Thanh HDT, Wood CM. 2020. Understanding the gastrointestinal physiology and responses to feeding in air-breathing Anabantiform fishes. *J Fish Biol.* 2020 (96):986-1003. <https://doi.org/10.1111/jfb.14288>
- Gonçalves-França W, Pontes TC, Martins-Dutra F, Liebert F, Cupertino-Ballester E, Portz L. 2017. Gastrointestinal tract pH measurement in juveniles Pacu *Piaractus mesopotamicus* (Characiformes: Characidae). *Panam J Aquat Sci* [Internet]. [publicado 2017 September]; 12(3):254-258. Disponible en: [https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_12\(3\)_254-258.pdf](https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_12(3)_254-258.pdf)
- Grosell M, Wood CM, Wilson RW, Bury NR, Hogstrand C, Rankin C, Jensen FB. 2005. Bicarbonate secretion plays a role in chloride and water absorption of the European flounder intestine. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* [Internet]. [publicado 2005 April 01]; 288(4):R936-R946. Disponible en: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpregu.00684.2003>
- Guimarães IG, Martins GP. 2015. Nutritional requirement of two Amazonian aquacultured fish species, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1816) and *Piaractus brachypomus* (Cuvier, 1818): a mini review. *J Appl Ichthyol.* 31:57-66. <https://doi.org/10.1111/jai.12976>
- Hlophé SN, Moyo NAG, Ncube I. 2014. Postprandial changes in pH and enzyme activity from the stomach and intestines of *Tilapia rendalli* (Boulenger, 1897), *Oreochromis mossambicus* (Peters, 1852) and *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *J Appl Ichthyol.* 30:35-41. <https://doi.org/10.1111/jai.12290>
- Jepsen DB, Winemiller KO. 2007. Basin geochemistry and isotopic ratios of fishes and basal production sources in four neotropical rivers. *Ecol of Freshwater Fish.* 16:267-281. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2006.00218.x>
- Kristiansen HR, Rankin JC. 2001. Discrimination between endogenous and exogenous water sources in juvenile rainbow trout fed extruded dry feed. *Aquat Living Resour.* 14:359-366. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(01\)01131-7](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(01)01131-7)
- Manetta GI, Benedito-Cecilio E, Martinelli M. 2003. Carbon sources and trophic position of the main species of fishes of Baía River, Paraná River floodplain, Brazil. *Braz. J. Biol.* [Internet]. [publicado 2003 August 15]; 63(2):283-290. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/53LL3JwWZvZBsV9JvKgdFYS/?lang=en>
- Márquez L, Robles R, Morales G, Moyano FJ. 2012. Gut pH as a limiting factor for digestive proteolysis in cultured juveniles of the gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Fish Physiol Biochem.* 38:859-869. <https://doi.org/10.1007/s10695-011-9573-1>

- Mérona B, Rankin-de-Mérona J. 2004. Food resource partitioning in a fish community of the central Amazon floodplain. *Neotrop. Ichthyol.* [Internet]. [publicado 2008 January 02]; 2(2):75-84. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/ni/a/HTRCshKj6H9RSzZkVvZpkKb/?lang=en>
- Mortillaro JM, Pouilly M, Wach M, Freitas CEC, Abril G, Meziane T. 2015. Trophic opportunism of central Amazon floodplain fish. *Freshw Biol.* 60:1659-1670. <https://doi.org/10.1111/fwb.12598>
- Munilla-Morán R, Saborido-Rey F. 1996. Digestive enzymes in marine species. I. Proteinase activities in gut from redfish (*Sebastes mentella*), seabream (*Sparus aurata*) and turbot (*Scophthalmus maximus*), *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology.* 113(2):395-402. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(95\)02057-8](https://doi.org/10.1016/0305-0491(95)02057-8).
- Neiffer DL, Stamper MA. 2009. Fish Sedation, Anesthesia, Analgesia, and Euthanasia: Considerations, Methods, and Types of Drugs. *ILAR J.* [Internet]. [publicado 2009 October 01]; 50(4):343-360. Disponible en: <https://academic.oup.com/ilarjournal/article/50/4/343/868661>
- Nikolopoulou D, Moutou KA, Fountoulaki E, Venou B, Adamidou S, Alexis MN. 2011. Patterns of gastric evacuation, digesta characteristics and pH changes along the gastrointestinal tract of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.). *Comp Biochem Physiol A: Mol Integr Physiol.* 158:406-414. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2010.11.021>
- Papastamatiou YP, Lowe CG. 2004. Postprandial response of gastric pH in leopard sharks (*Triakis semifasciata*) and its use to study foraging ecology. *J Exp Biol.* [Internet]. [publicado 2004 January 01]; 207(2):225-232. Disponible en: <https://journals.biologists.com/jeb/article/207/2/225/2608/Postprandial-response-of-gastric-pH-in-leopard>
- Soares MGM, Almeida RG, Junk WJ. 1986. The tropic status of the fish fauna in lago Camaleão e macrophyte dominated Floodplain Lake in the middle Amazon. *Amazoniana.* 9(4):511-526. Disponible en: <http://hdl.handle.net/21.11116/0000-0004-76B4-C>
- Solovyev MM, Kashinskaya EN, Izvekova GI, Glupov VV. 2015. pH values and activity of digestive enzymes in the gastrointestinal tract of fish in Lake Chany (West West Siberia). *J Ichthyol.* 55(2):251-258. <https://doi.org/10.1134/S0032945215010208>
- Solovyev MM, Kashinskaya EN, Rusinek OT, Izvekova GI. 2016. Physiological pH values in the digestive tract of perch *Perca fluviatilis* from different habitats. *J Ichthyol.* 56(2):231-237. <https://doi.org/10.1134/S0032945216010148>
- Sugiura SH, Roy PK, Ferraris RP. 2006. Dietary acidification enhances phosphorus digestibility but decreases H⁺/K⁺-ATPase expression in rainbow trout. *J Exp Biol.* 209:3719-3728. [Internet]. [publicado 2006 October 01]. Disponible en: <https://journals.biologists.com/jeb/article/209/19/3719/16346/Dietary-acidification-enhances-phosphorus>
- Taylor JR, Grosell M. 2006. Feeding and osmoregulation: dual function of the marine teleost intestine. *J Exp Biol.* [Internet]. [publicado 2006 August 01]; 209(15):2939-2951. Disponible en: <https://journals.biologists.com/jeb/article/209/15/2939/16199/Feeding-and-osmoregulation-dual-function-of-the>
- Taylor JR, Whittamore JM, Wilson RW, Grosell M. 2007. Postprandial acid-base balance and ion regulation in freshwater and seawater-acclimated European flounder, *Platichthys flesus*. *J. Comp. Physiol. B.* 177:597-608. <https://doi.org/10.1007/s00360-007-0158-3>
- Uys W, Hecht T. 1987. Assays on the digestive enzymes of sharp-toothed catfish, *Clarias gariepinus* (Pisces: Clariidae), *Aquaculture*, Volume 63(1-4):301-313. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90080-9)
- Wilson RW, Wilson JM, Grosell M. 2002. Intestinal bicarbonate secretion by marine teleost fish—why and how? *Biochim Biophys Acta.* [Internet]. [publicado 2002 November 13]; 1566 (1-2):182-193. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005273602006004>
- Yúfera M, Fernández Díaz C, Vidaurreta A, Cara JB, Moyano FJ. 2004. Gastrointestinal pH and development of the acid digestion in larvae

- and early juveniles of *Sparus aurata* (Pisces: teleostei). Mar Biol. 144:863-869. <https://doi.org/10.1007/s00227-003-1255-9>
- Yúfera M, Moyano FJ, Astola A, Pousão-Ferreira P, Martínez-Rodríguez G. 2012. Acidic digestion in a teleost: Postprandial and circadian pattern of gastric pH, pepsin activity, and pepsinogen and proton pump mRNAs expression. PLoS ONE. [Internet]. [publicado 2012 March 20]; 7(3): e33687. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0033687>
- Yúfera M, Nguyen MV, Engrola S, Conceição L, Jordal EO, Le MH, Espe M, P.Q. Hung PQ, Rønnestad I. 2016. Cobia exhibits a permanent gastric acidity as digestion strategy. Aquaculture Europe 16 (2016). [Internet]. [publicado 2016 September]; Abstract book:1132-1133. Disponible en: https://digital.csic.es/bitstream/10261/146972/4/cobia_Yuferaf.pdf

Forma de citación del artículo:

Palomino-Ramos AR, Coasaca-Céspedes JJ, Bastidas-Henostroza JA, Romání-Alegre AE y Francia-Quiroz JC. 2023. Niveles de pH gastrointestinal posprandial en juveniles de *Piaractus brachyomus* (Serrasalminidae) y *Schizodon fasciatus* (Anostomidae). Rev Med Vet Zoot. 70(2):192-205. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v70n2.104565>