

Metales pesados en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* y especies acompañantes en Pantanos de Centla, Tabasco, México

Heavy metals in muscle of *Pterygoplichthys pardalis* and companion species in Pantanos of Centla, Tabasco, México

Adriana Alvarado-Arcia¹, Rebeca I. Martínez-Salinas², Everardo Barba-Macías³, Juan J. Morales-López⁴ y Arturo Torres-Dosal^{5*}

Recibido: 02 de septiembre de 2022.

Aceptado: 13 de agosto de 2024.

Publicado: diciembre de 2024.

RESUMEN

La ingesta de pescado es reconocida por sus beneficios a la salud humana, debido al aporte de macro y microelementos esenciales para los seres vivos, proteínas, vitaminas A, B12 y D; sin embargo, simultáneamente puede representar riesgos a la salud por la bioacumulación de elementos químicos tóxicos como el Cd, Hg y Pb. Los productos de pescado deben cumplir con límites máximos permisibles de estos elementos para asegurar que su consumo es inocuo. Los peces de agua dulce del género *Pterygoplichthys* (plecos) son especies exóticas invasoras que han generado impactos negativos a nivel ecosistémico, económico y social en el sureste de México. El objetivo de esta investigación fue determinar la concentración de Cd, Hg, Mn y Pb en el músculo del pez *Pterygoplichthys pardalis* en lagunas de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla en Tabasco, México; con la finalidad de definir si estas concentraciones son mayores a los límites máximos permisibles enunciados por normatividad internacional para su aprovechamiento con fines alimentarios. Para ello, se realizó una cuantificación de metales por medio de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito y generador de hidruros en muestras de músculo de plecos y otras especies acompañantes. La concentración evaluada de los metales en plecos capturados en la RBPC se encuentra por debajo de los niveles máximos sugeridos en normatividad internacional para carne de pescado e incluso, es menor a los valores reportados en años anteriores por otros autores. Dados estos resultados, la carne de estos peces puede considerarse como aceptable para consumo específicamente en la temporada de lluvias, siendo una solución para disminuir las necesidades nutricionales de personas en áreas rurales y urbanas de México.

Palabras clave: Cadmio, manganeso, mercurio, pez diablo, plomo.

SUMMARY

Fish consumption is recognized for its benefits to human health due to the contribution of essential macro and micro elements for living beings, proteins, and vitamins A, B12, and D. However, it can simultaneously represent health risks due to the bioaccumulation of toxic chemical elements such as Cd, Hg, and Pb. Fish products must comply with the maximum permissible limits of these elements to ensure that their consumption is safe. The genus of freshwater fish *Pterygoplichthys* spp (plecos) is a set of invasive exotic species that have generated negative impacts at the ecosystem, economic, and social levels in southeastern Mexico. The objective of this research was to determine the concentration of Cd, Hg, Mn, and Pb in the muscle of the fish *Pterygoplichthys pardalis* in lagoons of the Pantanos de Centla Biosphere Reserve in Tabasco (RBPC), Mexico, with the purpose of defining whether these concentrations are mayor than the maximum permissible limits set forth by international regulations, for their use for food purposes. To this end, metal quantification was carried out by means of atomic absorption spectrometry with a graphite furnace and hydride generator in muscle samples of plecos and other accompanying species. The concentration of these metals in plecos caught in the RBPC is below the maximum levels suggested in international regulations for fish meat and is even lower than the values reported in previous years by other authors. Given these results, the meat of these fish can be considered acceptable for consumption in rainy season, being a solution to reduce the nutritional needs of people in rural and urban areas of Mexico.

Key words: Cadmium, devil fish, lead, manganese, mercury.

¹ Estudiante de Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable, Departamento de Salud, El Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR, Periférico Sur s/n, María Auxiliadora, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, C. P. 29290, México.

² Profesora Investigadora de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, UNICACH. Libramiento Norte Poniente No. 1150, Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29000, México.

³ Investigador del Departamento de Ciencias de la Sustentabilidad, El Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR, Carretera a Reforma Km. 15.5 s/n, Guineo 2da. Sección, Villahermosa, Tabasco, C. P. 86280, México.

⁴ Responsable del Laboratorio de Análisis Instrumental, El Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR, Periférico Sur s/n, María Auxiliadora, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, C. P. 29290, México.

⁵ Investigador del Departamento de Salud, El Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR, Periférico Sur s/n, María Auxiliadora, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, C. P. 29290, México.

***Corresponding author:**

Arturo Torres-Dosal: e-mail: atorres@ecosur.mx

To quote as:

Alvarado-Arcia, A., R. Martínez-Salinas, E. Barba-Macías, J. Morales-López & A. Torres-Dosal. 2024. Metales pesados en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* y especies acompañantes en Pantanos de Centla, Tabasco, México. *Hidrobiológica* 34 (3): 191-206.

INTRODUCCIÓN

El pescado representa aproximadamente el 17 % de la ingesta total de carne a nivel mundial, constituyendo una fuente rica en proteína de alta calidad y biodisponibilidad. Además, contiene aminoácidos esenciales, así como ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3 (n-3 LCPUFA) (Kobayashi *et al.*, 2015; FAO, 2016; Reksten *et al.*, 2020). Por lo tanto, su consumo podría ser una alternativa para abordar los desafíos nutricionales y de seguridad alimentaria de países en vías de desarrollo. El músculo de pescado puede contener entre un 50 y un 90 % de proteína y vitaminas A, B12 y D; hierro, selenio, zinc, calcio y yodo (Kawarazuka & Béné, 2011; Groth, 2017; Cano-Salgado *et al.*, 2022; Escalera-Vázquez, s/f). El consumo de estos productos contribuye a reducir la incidencia de enfermedades cardiovasculares, metabólicas y neurológicas, las cuales aumentan el riesgo de morbilidad y mortalidad en la población (Kromhout *et al.*, 2012; Tørris *et al.*, 2014).

Sin embargo, los peces pueden estar expuestos a sustancias químicas peligrosas presentes en los ecosistemas que habitan. Las vías de exposición suelen ser a través de las agallas, el tracto digestivo y la piel (escamas o placas dérmicas). Los elementos tóxicos pueden ser bioacumulados en sus tejidos, especialmente en hígado, agallas, riñones y músculo (Depledge & Sanders, 1998). Adicionalmente pueden biomagnificarse en los peces consumidores, de acuerdo con el tipo de dieta y la tasa de consumo de otros organismos acuáticos (Ahmed *et al.*, 2016; Duque *et al.*, 2015). Cabe destacar que los elementos cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) pueden encontrarse tanto de forma natural como asociados a ciertas actividades humanas. Estos elementos no se degradan en el medio ambiente, por lo que su persistencia es potencialmente alta. Sus concentraciones pueden verse incrementadas en ríos, suelos, sedimentos, aire y biota debido a actividades antrópicas, especialmente aquellas de origen industrial y minero. Son elementos no esenciales para los organismos; su toxicidad está asociada a la capacidad de mimetizar a otros elementos esenciales como el calcio (Ca), hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) para enlazarse principalmente a complejos orgánicos sulfhidrilos e interferir con la funcionalidad de proteínas, enzimas transportadoras, mecanismos de señalización y otros procesos dentro de la célula (Bridges & Zalups, 2010). Por otra parte, el manganeso (Mn) es un oligoelemento esencial involucrado en sistemas bioquímicos como un activador de enzimas, necesario para el crecimiento y función normal de animales terrestres y peces (Nie *et al.*, 2016).

Depledge & Sanders (1998) indican que los metales tóxicos pueden dirigirse a órganos objetivo en los peces. Es así como el Cd se acumula en riñones, hígado y agallas; el Hg se almacena en músculo, tejido adiposo e hígado y el Pb se encuentra en hígado, branquias, riñones, músculo, huesos y escamas; los tres elementos traspasan la membrana embrionaria por lo que pueden encontrarse en los huevos. La ingesta de estos tejidos por parte de los seres humanos puede aumentar el riesgo de exposición a dichos metales.

En el cuerpo humano, el Cd tiende a acumularse en hígado y riñones, generando problemas de proteinuria significativa y daño renal (EPA, 1989). La forma orgánica de Hg, conocida como metilmercurio (MeHg), se absorbe a través del consumo de pescado por el sistema gastrointestinal y puede acumularse en los riñones y el cerebro. Esto puede ocasionar deterioro en el desarrollo neuropsicológico en niños menores de 7 años, ya que el elemento puede pasar de la placenta de la madre al feto (EPA, 2001). De manera similar, el Pb tiene efectos

adversos significativos en el desarrollo neuroconductual de niños, aunque no haya evidencias de toxicidad y los niveles en sangre sean tan bajos que no alcancen una concentración umbral, a diferencia de otros elementos tóxicos (EPA, 2004). El Mn, cuando se encuentra en niveles altos en niños de 4 a 8 años (> 3 mg/día), puede causar problemas neurológicos (LPI, 2022).

Algunos estudios han comparado los beneficios del consumo de pescado contra el riesgo por exposición a sustancias peligrosas, con resultados contrastantes en los que la especie y edad de los organismos, asociada al tamaño y hábitos alimenticios, puede definir la estrategia para su consumo (Groth, 2017; Moriarity *et al.*, 2020; Vilavert *et al.*, 2017). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), el Reglamento de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Reglamento de la Comisión Europea (CE) Nro. 1881 y las Normas Oficiales Mexicanas han establecido valores máximos de contenido de metales pesados en productos pesqueros consumibles, como una medida para controlar la exposición humana a estos elementos.

El Golfo de México alberga pesquerías comerciales de importancia nacional para México y los Estados Unidos de Norteamérica (Harris *et al.*, 2012). Los ríos Grijalva y Usumacinta son dos de los mayores cuerpos de agua que desembocan en el Golfo de México desde el estado de Tabasco. Existen reportes de concentraciones de metales pesados en aguas y sedimentos del delta de éstos (Villanueva & Botello, 1992; Trefry *et al.*, 2007; Pérez-Cruz *et al.*, 2013; Alvarado-Arcia *et al.*, 2014; Mendoza-Carranza *et al.*, 2016; Flores *et al.*, 2018; Musalem-Castillejos *et al.*, 2018; Ruiz-Fernández *et al.*, 2019) que son mayores a los valores guía para sedimentos de agua dulce reportados por CCME (2001). Por lo que, se considera que, en ciertas regiones, los organismos acuáticos podrían estar expuestos a metales pesados.

Esto ha sido corroborado mediante estudios de biodisponibilidad de metales en especies de organismos acuáticos en la zona (Villanueva & Botello, 1992; Vázquez *et al.*, 2008; Vázquez-Sauceda *et al.*, 2011; Lorenzo-Márquez *et al.*, 2016; Mendoza-Carranza *et al.*, 2016). Estos estudios indican que existe bioacumulación de sustancias peligrosas en los tejidos de los organismos y por ende, riesgo de exposición a la salud humana por el consumo de los mismos.

La creciente demanda de alimentos ha focalizado la atención en el aprovechamiento de algunas especies invasoras de crecimiento rápido y mayores densidades poblacionales, como una oferta alimentaria válida. Uno de los géneros de peces invasores con amplia distribución a nivel mundial es *Pterygoplichthys* spp (Linnaeus, 1758; Froese & Pauly, 2019), perteneciente al orden Siluriformes, familia Loricariidae, comúnmente conocidos como plecos, bagres acorazados, peces armados o pez diablo (Orfinger & Goodding, 2018). Son peces de agua dulce neotropicales detritívoros-herbívoros, nativos de la cuenca del río Amazonas en Suramérica (Wakida-Kusunoki *et al.*, 2016). El primer reporte de su presencia en México fue en el río Mezcala, estado de Guerrero en el año 1995 (Guzmán & Barragán, 1997) y desde entonces, su distribución en cuerpos de agua del norte, centro y sur de México ha sido constante (Barba-Macías *et al.*, 2014; Mejía-Mojica *et al.*, 2012; Sánchez *et al.*, 2015; Wakida-Kusunoki *et al.*, 2016). En la zona sur del país se han registrado densidades entre 0.02 y 1.30 individuos/m² (Barba-Macías *et al.*, 2014), con un porcentaje importante de contribución a la densidad total de la comunidad de peces, principalmente en lagunas desconec-

tadas en temporada de lluvias, con tamaño predominante entre 21 y 30 cm de longitud estándar (Escalera-Vázquez *et al.*, 2019).

Los impactos negativos, tanto ecológicos como económicos, sociales y culturales, generados por la presencia del pleco en la planicie de inundación de los ríos Grijalva y Usumacinta en el estado de Tabasco, han sido reportados durante varios años (Barba-Macías & Cano-Salgado, 2014; Low-Feng *et al.*, 2014; Escalera-Vázquez *et al.*, 2019). Su elevado potencial de invasión se debe principalmente a altas tasas de reproducción, dieta generalista, ausencia de depredadores y su capacidad de adaptación a condiciones extremas, tales como ambientes con deficiencias de oxígeno, niveles elevados de sólidos suspendidos y salinidad (Capps *et al.*, 2011; Lorenzo-Márquez *et al.*, 2016; Mendoza-Alfaro *et al.*, 2009; Mendoza-Alfaro & Koleff-Osorio, 2014).

Estos peces han sido observados en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC; Pérez-Cruz *et al.*, 2013; Amador-del Ángel & Wakida-Kusunoki, 2014; Sánchez *et al.*, 2015; Barba-Macías *et al.*, 2017; Sánchez *et al.* 2019), una de las áreas de humedales más extensas de Norteamérica; desarrollada entre la planicie palustre y la planicie fluviodeltaica de los ríos Grijalva, Usumacinta y San Pedro-San Pablo en la Planicie Costera del Golfo Sur (Ramos-Reyes *et al.*, 2016; Zavala-Cruz *et al.*, 2016). Un estudio de Vargas-Rivas *et al.* (2022) que utilizó la amplificación genética de regiones mitocondriales de CYTB y COI, identificó un haplotipo único compartido para los especímenes capturados en las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta, lo que sugiere que aun cuando existen diferencias morfológicas, los peces de este género presentes en la región son *Pterygoplichthys pardalis* (Castelnau, 1855) o de origen híbrido, resultado de un solo evento de invasión. También se ha detectado la conformación de una red trófica alrededor de estos peces, con depredadores naturales como el cormorán de doble cresta *Phalacrocorax auritus* (Lesson, 1831), el cormorán del neotrópico *P. brasiliensis* (Gmelin, 1789) y peces piscívoros como *Centropomus undecimalis* (Bloch, 1792), *C. poeyi* (Chávez, 1961) y *Megalops atlanticus* (Valenciennes, 1847; López-García *et al.*, 2018); incorporándose también al ser humano como parte de dicha red, con el aprovechamiento de su carne para uso agropecuario (alimentación de animales de granja como ganado, aves de corral y otros peces; Cano-Salgado, 2011; Monares-Gallardo *et al.*, 2012; Humedales Usumacinta A. C., 2013; Filigrana-Celorio, 2016; Cano-Salgado *et al.*, 2022; Escalera-Vázquez *s/f*) así como consumo directo en preparaciones gastronómicas como ceviches, frituras, entre otros.

Estas actividades contribuyen a la regulación de la población de peces invasores en la RBPC, lo cual disminuye los impactos ecológicos generados. También permiten una reconfiguración económica y cultural de las familias pescadoras, orientada en el aprovechamiento del pez, en la que pueden generar ingresos a través de la venta de estos peces para cubrir los gastos asociados con la rotura y sustitución de redes, así como para compensar la limitada abundancia de otros peces en los cuerpos de agua del lugar. Es importante destacar que los plecos han sido reconocidos como monitores eficaces de la biodisponibilidad de sustancias contaminantes en el medio acuático (Viana-Finoto *et al.*, 2017). Por lo que resulta imprescindible identificar las concentraciones de estos compuestos antes de proponer el consumo y aprovechamiento de su carne. Cabe mencionar que las lagunas, canales y ríos de la RBPC son cuerpos de agua vulnerables al aumento de la salinidad debido al intercambio con agua de mar del Golfo de México, como consecuencia del cambio climático y su cercanía con la línea de costa (Ramos Reyes

et al., 2016). Además, estos cuerpos de agua son afectados por la concentración de sustancias químicas contaminantes provenientes de los ríos Grijalva, Usumacinta, San Pedro y San Pablo y del Golfo de México.

La mayoría de los estudios de metales pesados realizados en la región se llevaron a cabo durante períodos de sequía (Pérez-Cruz *et al.*, 2013; Lorenzo-Márquez *et al.*, 2016; Mendoza-Carranza *et al.*, 2016) lo que resultó en concentraciones de estos elementos superiores a las recomendadas en las guías de calidad ambiental de sedimentos y agua. Sin embargo, es importante destacar que los estados de Chiapas y, especialmente Tabasco, tienen un régimen hídrico con presencia de lluvias durante al menos 7 meses al año (Cruz-Ramírez *et al.*, 2019). Es necesario determinar las concentraciones de metales en los organismos acuáticos durante los períodos lluviosos para identificar si la dilución característica que se presenta en la concentración de metales en el agua y sedimento en esta temporada, también se refleja en los organismos. Dado que los cuerpos de agua en la zona de estudio presentan conexión lateral, esta dilución permitiría definir estrategias de consumo no solo para el pleco, sino también para otras especies comerciales.

La cuantificación de las concentraciones de metales pesados en la carne del pez *Pterygoplichthys pardalis* es un primer paso para definir si su consumo constituye o no un riesgo a la salud humana o de los animales que sean alimentados con los productos derivados de él, como harinas, ensilados, aceites, colágeno, entre otros. El objetivo de esta investigación fue determinar la concentración de los metales Cd, Hg, Mn y Pb en el músculo del pez *Pterygoplichthys pardalis* y especies acompañantes capturadas en temporada de lluvias en lagunas de la RBPC, dentro de la planicie de inundación de los ríos Grijalva y Usumacinta en el estado de Tabasco, México. Esto se llevó a cabo con la finalidad de establecer si el aprovechamiento de la carne de este pez era seguro para el consumo humano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estado de Tabasco tiene una superficie de 24,661 km², limitando hacia el norte con el Golfo de México, al sur con el estado de Chiapas y con Guatemala, al oeste con el estado de Veracruz y al este con el estado de Campeche. Su territorio forma parte de las cuencas de los ríos Tonalá (oeste), Grijalva (centro) y Usumacinta (este). Los ríos Grijalva y Usumacinta, ambos transfronterizos con Guatemala, son los cuerpos de agua de mayor importancia en el sureste mexicano; forman parte de la Región Hidrológica-Administrativa XI, Frontera Sur, Subregión Bajo Grijalva o Grijalva-Villahermosa, según CONAGUA (2014). La importancia ecosistémica de esta región se centra en la biodiversidad, servicios y bienes ambientales que en ella se desarrollan, captando un escurrimiento anual que alcanza el 30 % del total nacional (INECC, 2007; Plascencia-Vargas *et al.*, 2014).

A lo largo del río Grijalva existen cuatro presas (Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas; INECC, 2007; DOF, 2018) mientras que el río Usumacinta mantiene un cauce natural sin grandes obras hidráulicas. La RBPC se encuentra ubicada en la unión de los cauces de ambos ríos al norte del estado de Tabasco, entre las coordenadas geográficas 17°57'53" y 18°39'03"N y 92°06'39" y 92°47'58"O" (Fig. 1). La reserva está conformada por cuerpos de agua permanentes o semi-permanentes, sobre depresiones de entre 1 a 5 msnm con pendientes

menores a 1 % con buena conectividad lateral en períodos de lluvia (Zavala- Cruz *et al.*, 2016). El clima es cálido subhúmedo, con lluvias en verano y precipitaciones anuales que oscilan entre 1,100 y 2,000 mm y una temperatura media anual superior a 25 °C (Mendoza-Carranza *et al.*, 2016; Ramos-Reyes *et al.*, 2016). De acuerdo con Cruz-Ramírez *et al.* (2019) en la zona baja de la cuenca del río Usumacinta se han identificado tres períodos climáticos: mínima inundación, máxima inundación y transición (marzo-junio, julio-noviembre y diciembre-febrero, respectivamente).

Muestreo

Se seleccionaron cuatro puntos de muestreo dentro de la RBPC correspondientes a las lagunas El Viento (18°14'23.23"N, 92°39'51.17"O; con número de especímenes capturados de n=16), San Isidro (18°24'03.5" N, 92°28'25.1" O; n=16), San Pedrito (18°21'52.9" N, 92°36'03.5" O, n=16) y El Coco (18°29'10.5" N, 92°41'20.3" O; n=14). Las lagunas San Isidro y San Pedrito tienen como afluente principal al río Usumacinta, la laguna El Viento al río Grijalva y la laguna El Coco a ambos ríos (Fig. 1). Los sitios fueron elegidos por ser áreas de importancia pesquera, por su función como vasos reguladores naturales de las inundaciones y por la presencia abundante de pecos (Barba-Macías *et al.*, 2017).

El muestreo se realizó del 1 al 5 de septiembre y del 5 al 10 de octubre del año 2015 durante la temporada de máxima inundación, con la colaboración de pescadores locales, usando redes de monofilamento de 15 m de largo por 2 m de ancho. La identificación taxonómica de las especies se basó en el sistema propuesto por Miller *et al.* (2009), y se trabajó con todos los especímenes capturados, independientemente de su sexo. En este estudio se consideró que los pecos pertenecían a la especie *Pterygoplichthys pardalis*, de acuerdo con lo descrito por

Vargas-Rivas *et al.* (2022). El sacrificio de los especímenes se realizó tomando como guía las indicaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG/ZOO-2014 (DOF, 2015). Todos los ejemplares fueron sometidos a una necropsia para obtener el tejido muscular de cada individuo y se depositaron en tubos cónicos de polipropileno de 50 ml marca Corning. Las muestras de tejido fueron transportadas en condiciones de refrigeración a 4 °C y posteriormente se almacenaron en congelación a -20 °C hasta su análisis en laboratorio.

Procesamiento y determinación de metales en las muestras

Para la extracción de metales totales de las muestras de músculo, se pesaron 0.3 g de tejido en una balanza Explorer Pro OHAUS (con 0.0001 g de sensibilidad). Se procesaron en un sistema de digestión asistido por microondas CEM Mars6 utilizando vasos de teflón. A la muestra se agregaron 9 mL de HNO₃ marca JT BAKER grado Instra analyzed. La mezcla se dejó en reposo durante una hora para favorecer la predigestión del tejido. Posteriormente se inició el proceso de digestión mediante el método precargado "Animal Tissue" bajo las siguientes condiciones de trabajo: temperatura de 190 °C y una potencia de 290-1800 W, en una rampa de 20 minutos con períodos de mantenimiento y enfriamiento de 15 minutos cada uno.

Las muestras se sometieron a dos ciclos de digestión hasta alcanzar una solución incolora y transparente. Entre cada ciclo de digestión, las muestras permanecieron cerradas hasta su enfriamiento para evitar la pérdida de analitos. Una vez digeridas, las muestras se dejaron enfriar y se trasvasaron a un matraz volumétrico clase A de 25 mL, ajustando el volumen con HNO₃ 2%. Las muestras se filtraron con papel Whatman Nro. 50 y se almacenaron a 4 °C.

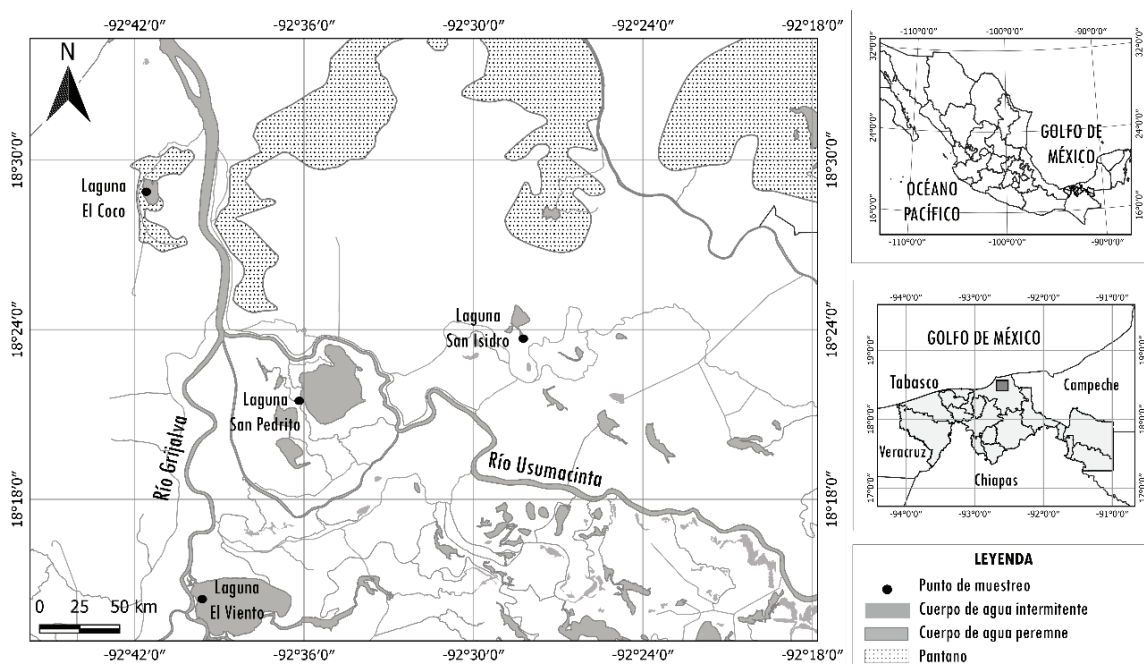


Figura 1. Mapa de ubicación de puntos de muestreo en la RBPC. Fuente: Elaboración propia.

La cuantificación de metales se realizó de acuerdo con los métodos EPA 7010 (EPA, 1998) y EPA 7471B (EPA, 2007) por medio de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito y por vapor frío, respectivamente. Para ello, se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica Marca Varian modelo SpectrAA220, equipado con horno de grafito marca Agilent GTA 110 y generador de hidruros marca Agilent VGA77. Los límites de cuantificación fueron los siguientes: Cd = 3.16 $\mu\text{g kg}^{-1}$; Mn = 126.20 $\mu\text{g kg}^{-1}$; Hg = 12.63 $\mu\text{g kg}^{-1}$ y Pb = 6.31 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Como control de calidad se utilizó el material de referencia de tejido de hígado de bovino del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST 1577c) con un porcentaje de recuperación del 95-97 %. Todos los análisis se realizaron en los Laboratorios de Análisis Instrumental de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) ubicados en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. Los resultados del análisis de metales en tejido de organismos diferentes a *Pterygoplichthys pardalis* se reportaron a nivel de filo (Otros peces / Crustáceos). Todas las concentraciones de metales totales en los organismos se expresaron en microgramos (μg) de metal por kilogramo (kg) de músculo, $\mu\text{g kg}^{-1}$ (o partes por billón, ppb).

Análisis estadístico

En los resultados se presentaron la mediana, el error estándar y el rango (mínimo - máximo) de concentraciones de metales en el tejido de los peces y crustáceos por laguna, filo y por tipo de dieta. Se usaron medianas como medidas de tendencia central, para disminuir la influencia de los valores extremos obtenidos. Se realizaron pruebas de Brown-Forsyth para evaluar la homogeneidad de varianzas. Cuando no se cumplieron los requerimientos de normalidad y homocedasticidad se hicieron transformaciones logarítmicas de los datos. Además, se efectuaron análisis de varianza de una vía (ANOVA) para definir si existían diferencias significativas entre el contenido de metales en los tejidos de peces (plecos y otros) y crustáceos; entre lugares y por dieta característica (carnívoros, herbívoros, detritívoros). Se consideraron como significativos los valores de $p < 0.05$.

El análisis de las posibles diferencias en la concentración de metales en músculo de peces por puntos de muestreo se realizó solamente para los plecos, debido a que no todas las especies acompañantes se encontraron en las cuatro lagunas.

En los resultados de las concentraciones de Pb no se cumplió con los requerimientos de homocedasticidad, por lo que se procedió a realizar análisis no paramétricos para definir si existían diferencias significativas, aplicando la prueba de Wilcoxon y Kruskal-Wallis. Todos los análisis fueron ejecutados usando el software estadístico JMP 15.0.0 (SAS Institute Inc., 2019), mientras que los gráficos presentados fueron construidos con el software SigmaPlot 12. El mapa de ubicación se construyó usando el programa QGIS 3.16.3.

RESULTADOS

Especies capturadas

Durante el periodo de muestreo en las lagunas El Coco, el Viento, San Isidro y San Pedrito de la RBPC, se capturaron un total de 77 organismos. De este conjunto, 62 especímenes pertenecieron a la especie *Pterygoplichthys pardalis* (plecos) mientras que los restantes 15 especímenes correspondieron a especies acompañantes, incluyendo peces y crustáceos de las familias Cyprinidae, Cichlidae, Clupeidae y Portuniidae. Para obtener información detallada sobre la diversidad de peces y crustáceos en cada laguna se proporciona la Tabla 1.

Metales totales en plecos

La concentración media de Pb en el músculo de los plecos capturados varió de 14.38 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en la laguna San Pedrito a 101.20 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en la laguna El Viento, con una concentración media para la RBPC de 67.78 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Tabla 2; Fig. 2). Todos los valores se mantuvieron por debajo del contenido máximo permisible de 300 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en carne de pescado, establecido en el Reglamento (UE) N° 1881/2006 de la Unión Europea (DOUE, 2006) y del límite máximo de 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en productos de pescado, señalado en la NOM-242-SSA1-2009 (DOF, 2009).

La concentración de Cd en las muestras se encontró en un rango de 8.75 a 19.32 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en San Pedrito y San Isidro respectivamente. La concentración media de Cd fue de 13.80 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Tabla 2; Fig. 2). Todos los valores determinados fueron menores al contenido máximo permisible de 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de DOUE (2006) y de 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de DOF (2009).

Las concentraciones de Hg en los plecos capturados en las lagunas San Pedrito, San Isidro y El Coco estuvieron por debajo del límite de cuantificación (12.63 $\mu\text{g kg}^{-1}$) mientras que en la laguna El Viento, la concentración de Hg fue de 22.85 $\mu\text{g kg}^{-1}$. El contenido máximo permisible para metilmercurio (MeHg) es de 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en DOUE (2006) y de 1,000 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en DOF (2009).

Para el Mn, las concentraciones mínima y máxima se encontraron en la laguna El Viento (797.24 $\mu\text{g kg}^{-1}$) y en la laguna San Isidro (1,735.47 $\mu\text{g kg}^{-1}$) respectivamente. El valor medio de la concentración de Mn en el músculo de los plecos capturados en la RBPC fue de 1,380.59 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Tabla 2; Fig. 3).

Las cantidades de Pb y Hg en el músculo de especímenes de plecos fueron mayores en la laguna El Viento (Figs. 1 y 2); con diferencias significativas entre las concentraciones de las muestras de las lagunas El Viento y El Coco, con respecto a las de las lagunas San Pedrito y San Isidro (letras diferentes en Fig. 2). El contenido más bajo de Pb en músculo de plecos se presentó en la laguna San Pedrito, mientras que los valores de Cd y Mn fueron cercanos a la media para toda la RBPC (Figs. 2 y 4). A su vez, se identificaron diferencias estadísticas significativas en la concentración de Mn en músculo de plecos capturados en la laguna San Isidro con respecto a los capturados en las otras lagunas (letras diferentes en Tabla 2 y Fig. 3).

Metales totales en otros organismos

La concentración media de Pb en las especies acompañantes, que incluyen otros peces y crustáceos, fue de 104.96 $\mu\text{g kg}^{-1}$, mientras que la concentración de Cd fue de 3.16 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Tabla 3; Fig. 4). El Hg en las muestras de músculo de los peces y crustáceos fue de 26.16 $\mu\text{g kg}^{-1}$ y de 873.36 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para el Mn. Las concentraciones de Hg y Pb en el músculo de plecos fueron menores y con diferencias estadísticas significativas a las encontradas en el músculo de las especies acompañantes ($p < 0.05$; letras diferentes en Tabla 3 y Fig. 4). Las concentraciones de Cd y Mn en el músculo de los especímenes de plecos fueron mayores, con respecto al músculo de otros organismos (para Mn; $p < 0.05$; Tabla 3; Fig. 5).

De las 77 muestras de músculo de especímenes de peces y crustáceos analizados, se observó que 29 (38 %) registraron valores de Cd menores o iguales a los Límites de cuantificación (LC) establecidos en el equipo utilizado. Para el Mn, 4 muestras (5 %) tuvieron concentraciones en tejido menores o iguales al LC, mientras que en el caso del Pb, 10 muestras (13%) mostraron valores menores al LC reportado. En

cuanto al Hg, de los 47 especímenes analizados, 29 de ellos (62 %) presentaron valores menores o iguales al LC.

Metales totales en crustáceos

Las concentraciones de Pb, Cd, Hg y Mn en el músculo de los especímenes de *Callinectes similis* (Williams, 1966) fueron menores a los límites normativos establecidos en DOUE (2006) y DOF (2009), con valores de 39.70, 3.15, 73.99 y 1,979.47 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente. En estos organismos se encontraron las mayores concentraciones de Hg y de Mn (Tabla 3). Además, se observó que la concentración de Hg en el músculo de los cangrejos capturados en la laguna El Coco fue mayor que en los peces capturados en las cuatro lagunas ($p < 0.05$; Tablas 2 y 3).

Metales totales según hábitos alimenticios

De acuerdo con la clasificación según los hábitos alimenticios (Tabla 1), los organismos herbívoros presentaron las mayores concentraciones de Pb y Hg en músculo (123.77 y 52.20 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente); y los detritívoros las menores concentraciones de estos elementos (74.35 y 12.63 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente; Tabla 4). En el caso de los organismos

carnívoros, las mayores concentraciones correspondieron al Cd y Mn (15.74 y 1950.54 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente; Tabla 4). Sólo se encontraron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de Mn (letras diferentes en Tabla 4 y Fig. 5).

DISCUSIÓN

Metales totales en peces y otros organismos

Las concentraciones de Cd, Hg y Pb determinadas en esta investigación se encuentran por debajo de los niveles máximos permisibles según las normativas internacionales y nacionales para peces y otros organismos acuáticos. Los límites establecidos por la FAO (2019) y la Unión Europea para carne de pescado, no fueron excedidos (DOUE, 2006; Tablas 2 y 3) y tampoco los límites máximos de 500, 1000 y 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ dispuestos por la normatividad en México (NOM-027-SSA1-2009; DOF, 2009). Se considera que estos contenidos de metales son representativos para la población de peces de la reserva durante la temporada de lluvias, por lo que los mismos podrían ser comercializados para su consumo y uso legal a nivel nacional e internacional, en lo que respecta a los metales pesados.

Tabla 1. Especies de peces y crustáceos capturados en cuatro lagunas de la RBPC en época de lluvias del año 2015. La identificación taxonómica de las especies se basó en el sistema propuesto por Miller *et al.* (2009). Se consideró que los peces capturados pertenecían a la especie *Pterygoplichthys pardalis*, de acuerdo con lo descrito por Vargas-Rivas *et al.* (2022). El nivel trófico fue determinado de acuerdo con lo definido en FishBase (Froese & Pauly, 2019)

Punto de muestreo	Filo	n	Familia	Especies (nombre común)	Nivel trófico; Dieta
Laguna El Coco (n= 22)	Peces (n= 19)	14	Loricariidae	<i>Pterygoplichthys pardalis</i> (Plecoc, pez armado)	2.0; Detritívoro
		2	Cichlidae	<i>Thorichthys meeki</i> (Mojarra boca de fuego), <i>Thorichthys pasionis</i> (Mojarra de la pasión)	2.0; Detritívoro
		2	Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i> (Carpa común), <i>Ctenopharyngodon idella</i> (Carpa herbívora)	2.1; Herbívoro
	Crustáceos (n=3)	1	Clupeidae	<i>Dorosoma petenense</i> (Sardina maya)	2.8; Carnívoro
		3	Portunidae	<i>Callinectes similis</i> (Jaiba azul)	2.7; Carnívoro
		16	Loricariidae	<i>Pterygoplichthys pardalis</i> (Plecoc, pez armado)	2.0; Detritívoro
Laguna El Viento (n=20)	Peces (n= 20)	2	Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i> (Tilapia)	2.0; Detritívoro
		2	Clupeidae	<i>Dorosoma petenense</i> (Sardina maya), <i>Dorosoma anale</i> (Sardina del Papaloapan)	2.8; Carnívoro
		16	Loricariidae	<i>Pterygoplichthys pardalis</i> (Plecoc, pez armado)	2.0; Detritívoro
Laguna San Isidro (n=17)	Peces (n= 17)	1	Cichlidae	<i>Petenia splendida</i> (Tenhuayaca)	4.5; Carnívoro
		16	Loricariidae	<i>Pterygoplichthys pardalis</i> (Plecoc, pez armado)	2.0; Detritívoro
Laguna San Pedrito (n=18)	Peces (n= 18)	1	Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i> (Carpa común)	2.1; Herbívoro
		1	Clupeidae	<i>Dorosoma anale</i> (Sardina del Papaloapan)	2.8; Carnívoro

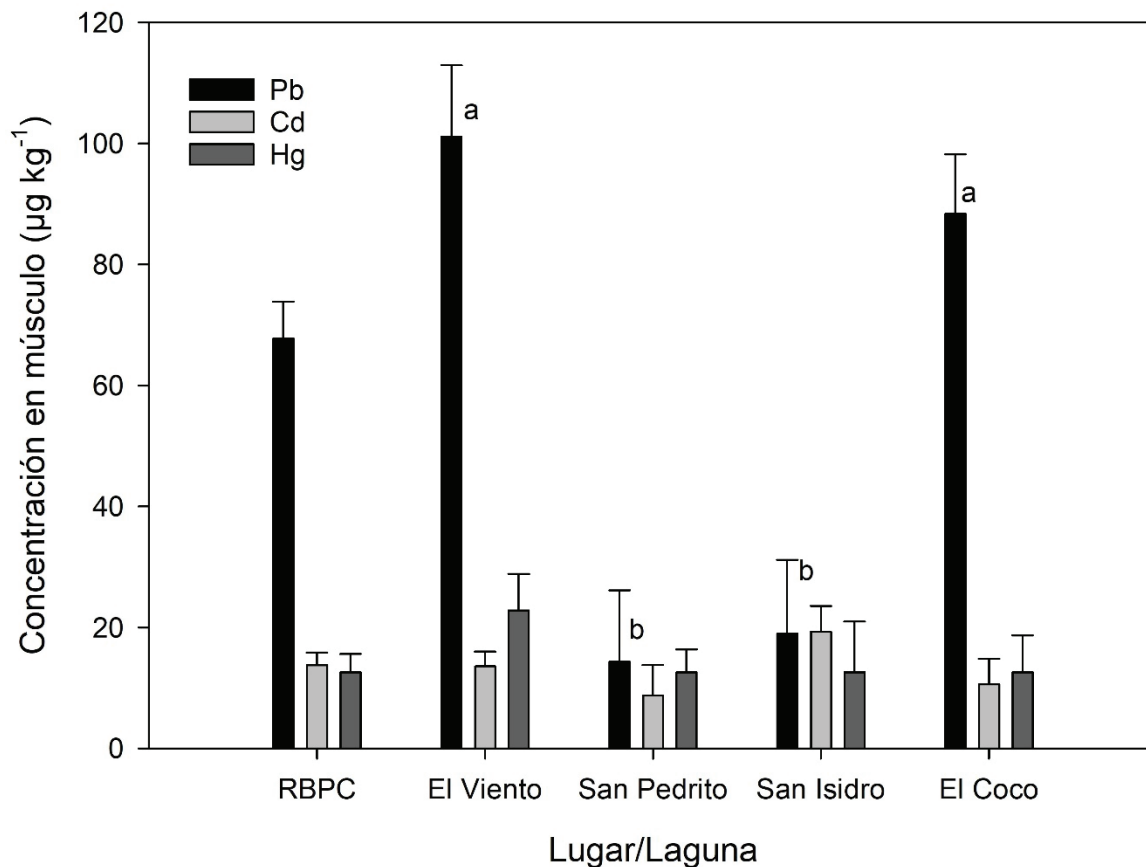


Figura 2. Concentraciones medias (medianas) de Pb, Cd y Hg y error estándar en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* capturados en lagunas de la RBPC. Letras diferentes identifican diferencias estadísticamente significativas ANOVA ($p < 0.05$). La unidad de medida es μg de metal por kg de tejido en peso húmedo ($\mu\text{g kg}^{-1}$) o partes por billón (ppb).

En cuanto a la concentración media de Cd en el músculo de los peces en este estudio, se observó que fue mayor que en los peces y crustáceos capturados (Tabla 3). No se encontraron diferencias significativas entre lagunas ni entre cuencas (Grijalva y Usumacinta; $p > 0.05$). La concentración media de Hg en músculo de peces fue menor a la de otros organismos en la RBPC ($26.16 \pm 8.60 \mu\text{g kg}^{-1}$; Tabla 3). Por otro lado, se encontró que los especímenes de la RBPC tuvieron contenidos de Pb por encima del LC para el 87 % de las muestras. De forma general, los peces tuvieron una concentración media de Pb en tejido, mayor al de los crustáceos ($67.78 \pm 6.11 \mu\text{g kg}^{-1}$ y $39.70 \pm 22.94 \mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente; Tabla 3), aunque esta diferencia no presentó significancia estadística ($p > 0.05$). Los valores de Pb en peces y específicamente en peces de la RBPC para época de lluvias del año 2015 son menores a los reportados por otros autores en la zona (Pérez-Cruz *et al.*, 2013; Lorenzo-Márquez *et al.*, 2016; Tabla 5).

Para el presente estudio, la concentración promedio de Mn en especímenes de peces de la RBPC fue menor al de los crustáceos (Tabla 3). Aunque el contenido de Mn en los peces capturados fue mayor al reportado por Lorenzo-Márquez *et al.* (2016) en el período de secas de 2014, fue menor al determinado en áreas cercanas a yacimientos mineros en la zona central de México ($51,450 \mu\text{g kg}^{-1}$; Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2020) y del Valle de Culiacán en Sinaloa ($2,300 \mu\text{g kg}^{-1}$; Izagui-

re-Fierro *et al.*, 1992; Tabla 5). El contenido de Mn en especímenes capturados en la laguna San Isidro (cuenca del río Usumacinta) fue mayor al de las lagunas El Coco y El Viento (cuenca Grijalva) y San Pedrito (Fig. 1), siendo estas diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$; Tabla 2; Fig. 3).

Las concentraciones de Pb, Cd y Mn analizadas en este estudio fueron menores a las reportadas por Pérez-Cruz *et al.* (2013), Mendoza-Carranza *et al.* (2016) y Lorenzo-Márquez *et al.* (2016) en la RBPC y en la planicie aluvial de los ríos Grijalva y Usumacinta (Tabla 5), durante la época de mínima inundación (marzo-junio) de los años 2008, 2009 y 2014, respectivamente. La diferencia entre los valores de metales obtenidos a través de los años en áreas cercanas a la RBPC o en la misma reserva, refleja la variabilidad en las condiciones fisicoquímicas del medio y la influencia de la estacionalidad climática en los resultados. Durante la época de máxima inundación, se observa una dilución de las concentraciones de metales pesados en el músculo de los organismos. La concentración media de Pb, Cd y Hg reportada en este estudio fue significativamente menor a las reportadas en zonas aledañas al Golfo de México en los estados de Veracruz, Tamaulipas y Tabasco (Villanueva & Botello, 1992; Vázquez-Sauceda *et al.*, 2011; Ramírez-Islas *et al.*, 2018; Tabla 5) y la mayoría de las presentadas en Ramírez-Ayala *et al.* (2020) para el sureste mexicano.

Metales totales en crustáceos

En esta investigación, la concentración media de Hg en el músculo de *Callinectes similis* fue de $73.99 \pm 23.42 \mu\text{g kg}^{-1}$, mientras que en plecos fue de $12.63 \pm 3.02 \mu\text{g kg}^{-1}$, lo que indica que los crustáceos presentan un valor de Hg mayor, con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$; Tabla 2). De acuerdo con Lewis & Chancy (2008), la costa norte del Golfo de México tiene advertencias de consumo de Hg en peces y organismos de aguas costeras. Estos autores describieron que el valor promedio de Hg en *Callinectes similis* en esta región ($857.90 \mu\text{g kg}^{-1}$) fue menor a lo reportado en peces ($933.10 \mu\text{g kg}^{-1}$), lo cual es contrario a los resultados obtenidos en este estudio, posiblemente debido a la diferencia en los hábitos alimenticios y especies de peces analizadas. Harris *et al.* (2012) indican que los “puntos calientes” de introducción de Hg al Golfo de México y sus organismos, están ubicados en las regiones de Texas y Florida. Dichos autores consideran a la deposición atmosférica como la principal causa de los niveles de Hg en suelos, sedimentos, agua y alimentos en la región, lo cual puede estar asociado a la ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) en el contenido de Hg de los especímenes de plecos en las diversas lagunas de la RBPC.

Metales pesados según hábitos alimenticios

El comportamiento alimenticio de los organismos acuáticos puede influir en la concentración de metales pesados que contengan sus

tejidos. De acuerdo con los resultados del análisis realizado, los organismos carnívoros presentaron la mayor concentración de Mn en el músculo ($1,950.54 \pm 328.42 \mu\text{g kg}^{-1}$; Tabla 4), seguidos por los detritívoros con $1,296.29 \pm 89.83 \mu\text{g kg}^{-1}$ y, por último, los herbívoros con $126.20 \pm 249.05 \mu\text{g kg}^{-1}$ ($p < 0.05$; Tabla 4; Fig. 3). Se presume que la escorrentía y la concentración de Mn en suspensión en el agua, junto con el perfil topográfico de los cauces de ríos y lagunas tuvo influencia sobre la cantidad del metal en la biota acuática de la zona, siendo más biodisponible para los organismos acuáticos, especialmente durante la temporada de lluvias; mientras que, en la época de secas los metales enlazados a partículas y materia orgánica tendieron a depositarse de acuerdo con la velocidad de flujo de los cuerpos de agua lóticos o lénticos. La concentración de Mn en el tejido de plecos pudo estar asociada a sus hábitos de buscar alimento en el fondo de los cuerpos de agua, mezclando con su boca las zonas en las que ocurren diferentes reacciones geoquímicas que involucran la reducción de oxígeno, nitratos y de óxidos de Mn y Fe. Estas reacciones son más pronunciadas en la región cercana a la interface agua-sedimento, donde la solubilidad de las formas reducidas puede ser mayor (Depledge & Sanders, 1998).

En el caso de los metales Pb y Hg se observa una tendencia que ha sido identificada en otras investigaciones, con una mayor concentración en organismos acuáticos herbívoros que en carnívoros, es decir desde niveles tróficos menores a mayores (Ali & Khan, 2018; Bawuro *et al.*, 2018; Ramírez-Ayala *et al.*, 2020).

Tabla 2. Concentración media (mediana) de Pb, Cd, Hg y Mn en tejido muscular los organismos capturados en la RBPC en época de lluvias del año 2015 según el lugar de captura. RBPC: Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla. Las concentraciones se presentan en $\mu\text{g kg}^{-1} \pm$ error estándar (mínimo-máximo). Letras diferentes indican diferencias significativas ANOVA ($p < 0.05$). Se anexan límites máximos permisibles de estos elementos en reglamento N°1881/2006 de la Comisión Europea y NOM-242-SSA1-2009.

Laguna	n	Pb $\mu\text{g kg}^{-1}$	Cd $\mu\text{g kg}^{-1}$	Mn $\mu\text{g kg}^{-1}$	n	Hg $\mu\text{g kg}^{-1}$
RBPC	62	67.78 ± 6.11 (6.31-154.41)	13.80 ± 2.03 (3.16-61.72)	$1,380.59 \pm 91.11$ (360.92-3,358.85)	36	12.63 ± 3.021 (12.63-78.20)
El Viento	16	101.20 ± 11.72^a (18.74-154.41)	13.60 ± 2.40 (3.16-32.49)	797.24 ± 248.79^a (378.88-3,358.55)	8	22.85 ± 6.00 (12.63-54.37)
San Pedrito	16	14.38 ± 11.80^b (6.31-127.04)	8.75 ± 5.04 (3.16-61.72)	$1,277.31 \pm 147.82^a$ (475.19-2,293.43)	10	12.63 ± 3.76 (12.63-40.79)
San Isidro	16	19.01 ± 12.16^b (6.31-127.12)	19.32 ± 4.25 (3.16-58.56)	$1,735.47 \pm 114.86^b$ (564.94-2,433.85)	10	12.63 ± 7.92 (12.63-78.20)
El Coco	14	88.38 ± 9.84^a (17.82-122.79)	10.63 ± 4.22^a (3.16-50.12)	940.67 ± 171.55^a (360.92-2,328.81)	8	12.63 ± 6.10 (12.63-60.31)
Contenido máximo permisible según Reglamento (UE) N° 1881/2006 de la Unión Europea		300	50	-		500
Límite máximo establecido en la NOM-242-SSA1-2009		500	500	-		1000

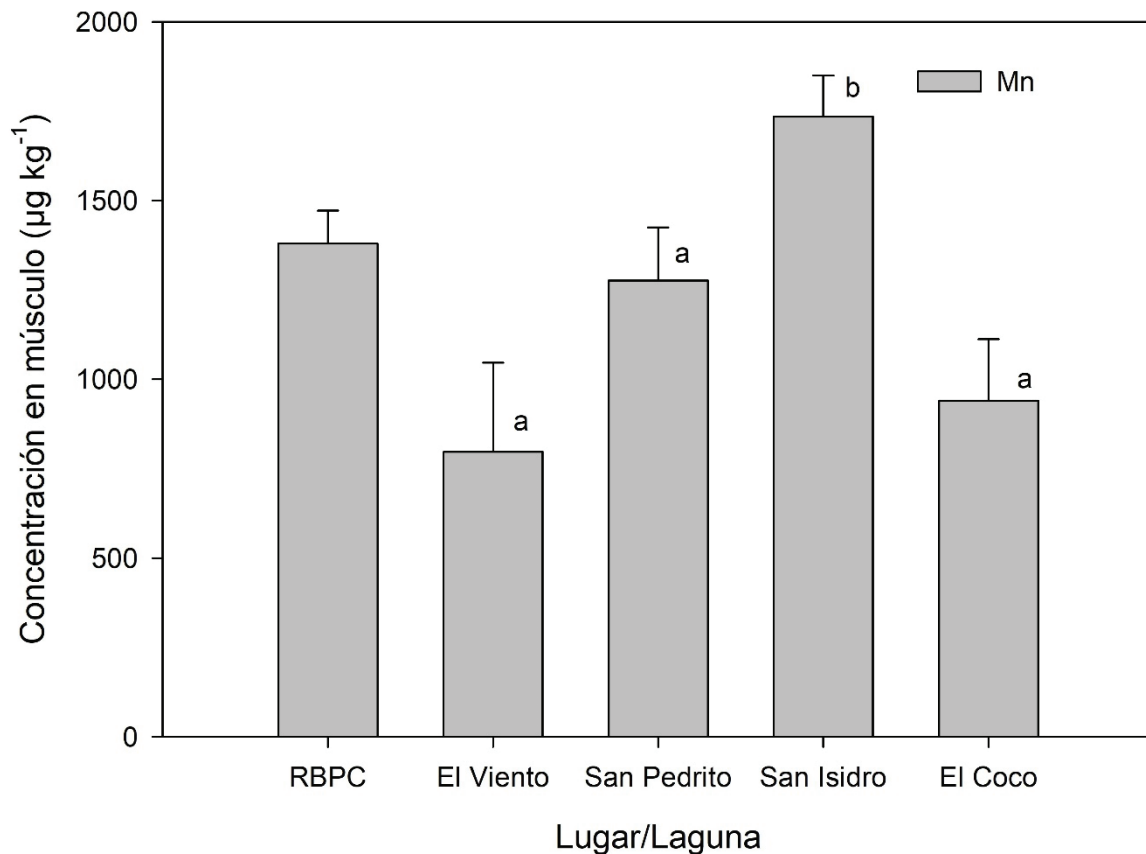


Figura 3. Concentraciones medias (medianas) de Mn y error estándar en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* capturados en lagunas de la RBPC. Letras diferentes identifican diferencias estadísticamente significativas ANOVA ($p < 0.05$). La unidad de medida es μg de metal por kg de tejido en peso húmedo ($\mu\text{g Kg}^{-1}$) o partes por billón (ppb).

Tabla 3. Concentración media (mediana) de Cd, Mn, Pb y Hg en tejido muscular de plecos, otros organismos (peces y crustáceos) y de crustáceos capturados en la RBPC en época de lluvias del año 2015. Las concentraciones se presentan en $\mu\text{g kg}^{-1} \pm$ error estándar (mínimo-máximo). Letras diferentes indican diferencias significativas ANOVA ($p < 0.05$). Se anexan límites máximos permisibles de estos elementos en reglamento N°1881/2006 de la Comisión Europea y NOM-242-SSA1-2009.

Organismos	n	Pb	Cd	Mn	Hg *
		$\mu\text{g kg}^{-1}$	$\mu\text{g kg}^{-1}$	$\mu\text{g kg}^{-1}$	$\mu\text{g kg}^{-1}$
Plecos	62	67.78 ± 6.11^a (6.31-154.41)	13.80 ± 2.03 (3.16-61.72)	$1,380.59 \pm 91.11^e$ (360.92-3,358.85)	12.63 ± 3.02^c (12.63-78.20)
Otros organismos (Peces + crustáceos)	15	104.96 ± 9.00^b (33.01-167.36)	3.16 ± 10.70 (3.16-122.92)	873.36 ± 257.76^f (126.20-2,904.38)	26.16 ± 8.60^d (12.63-89.28)
Crustáceos	3	39.70 ± 22.94 (33.01-104.96)	3.15 ± 5.90 (3.16-20.88)	$1,979.47 \pm 196.53$ (1,632.86-2,313.61)	73.99 ± 23.42^b (12.63-89.28)
Contenido máximo permisible según Reglamento (UE) N° 1881/2006 de la Unión Europea		300	50	-	500
Límite máximo establecido en la NOM-242-SSA1-2009		500	500	-	1000

(*) El número de muestras (n) para la determinación de Hg fue de 36 plecos, 8 peces + crustáceos y 3 crustáceos.

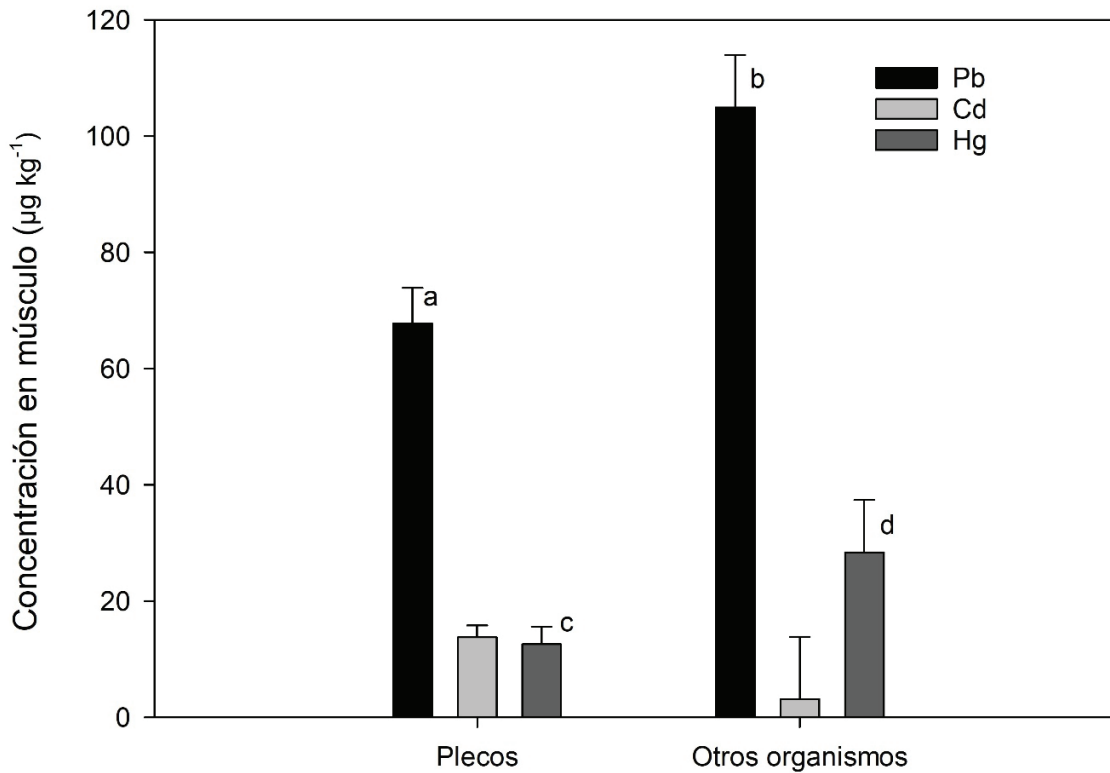


Figura 4. Concentraciones medias (medianas) de Pb, Cd y Hg y error estándar en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* y otros organismos capturados en lagunas de la RBPC. Letras diferentes identifican diferencias estadísticamente significativas ANOVA ($p < 0.05$). La unidad de medida es μg de metal por kg de tejido en peso húmedo ($\mu\text{g Kg}^{-1}$) o partes por billón (ppb).

En sedimentos de la RBPC, otros autores han encontrado concentraciones promedio de $1,280 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Cd y $44,520 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Pb durante la época de secas del año 2008 (Pérez-Cruz *et al.*, 2013) y $20,460 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Cd y $20,527 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Pb para un período indefinido (Navarrete-Domínguez *et al.*, 2020); algunos de los cuales sobrepasan los índices guía de calidad ambiental de $600 \mu\text{g kg}^{-1}$ para Cd y $35,000 \mu\text{g kg}^{-1}$ para Pb, estipulados en CCME (2001). Los procesos anuales de movilización de sedimentos durante la temporada de lluvias podrían disminuir notablemente las concentraciones de los metales pesados en los cuerpos de agua continentales, transportando las partículas

de tamaño fino (limos y arcillas, generalmente asociadas a mayores concentraciones de metales pesados) hacia la plataforma continental del Golfo de México donde tienden a acumularse en los primeros milímetros de la interface agua-sedimento (Hernández-Candelario *et al.*, 2019; Ruiz-Fernández *et al.*, 2019). En algunas de estas investigaciones se indicó que existía una correlación positiva entre el contenido de los elementos en los organismos y las concentraciones en los sedimentos de la zona; lo cual sugiere que la biología y los hábitos alimenticios pueden propiciar la bioacumulación de elementos químicos en la biota.

Tabla 4. Concentraciones medias (medianas) de Pb, Cd, Hg y Mn en tejido muscular de organismos capturados en la RBPC en época de lluvias del año 2015 según sus hábitos alimenticios o dieta. Las concentraciones se presentan en $\mu\text{g kg}^{-1} \pm$ error estándar (mínimo-máximo). Letras diferentes indican diferencias significativas ANOVA ($p < 0.05$).

Dieta	n	Pb ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Cd ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Mn ($\mu\text{g kg}^{-1}$)
Carnívoro	8	101.92 ± 104.96 (33.01-126.03)	15.74 ± 14.20 (3.16-110.02)	46.73 ± 12.41 (12.63-89.28)	$1,950.54 \pm 328.42^a$ (126.20-2,904.38)
Herbívoro	3	123.77 ± 126.03 (89.50-167.36)	3.16 ± 0.20 (3.16)	52.50 ± 0.20 (52.50)	126.20 ± 249.05^b (126.20-873.36)
Detritívoro	66	74.35 ± 39.71 (6.31-154.41)	13.56 ± 2.52 (3.16-122.92)	12.63 ± 2.77 (12.63-78.20)	$1,296.29 \pm 89.83^a$ (265.11-3,358.85)

Se observó una tendencia de mayor concentración de Pb en los organismos capturados en lagunas dentro de la cuenca del río Grijalva (lagunas El Viento y El Coco) con respecto a aquellas que se encuentran a un lado del cauce del río Usumacinta (lagunas San Pedrito y San Isidro; Fig. 2). Esta diferencia pudo reflejar un mayor contenido de este elemento en el medio acuático y en los sedimentos del río Grijalva, tomando en cuenta su mayor perturbación por obras hidráulicas, cambio de uso de suelo y la cercanía de los afluentes de las faldas del Volcán Chichonal y la región de yacimientos minerales metálicos de Ixhuatán en la Sierra Madre del Norte de Chiapas.

Consideraciones finales

En esta investigación se logró cuantificar el contenido de Pb, Cd, Hg y Mn en músculo de peces y crustáceos capturados en época de lluvias del año 2015 en la RBPC en Tabasco. Las concentraciones fueron menores a los niveles límites máximos permitidos en productos pesqueros descritos por la normatividad nacional e internacional; incluso están por debajo de los valores reportados en años anteriores por otros autores para épocas de secas.

Estos resultados sugieren que el consumo de la carne de estos peces y crustáceos puede considerarse como aceptable en esta época del año, siendo una solución para disminuir las necesidades nutricio-

nales de personas en áreas rurales y urbanas de México, debido a su contenido de proteína animal.

Considerando las bajas concentraciones de metales en el tejido de los organismos analizados, se podrían promover estrategias de consumo y uso del pez *Pterygoplichthys pardalis* en la RBPC, con un monitoreo constante de los niveles de Cd, Hg, Mn y Pb. La ingesta de productos de pescado puede ofrecer una solución viable para las personas diagnosticadas con deficiencias de Mn, la cual puede provocar una intolerancia a la glucosa similar a la de la diabetes mellitus; la ingesta diaria adecuada se ha definido en 2 mg/día y el nivel máximo de ingesta tolerable es de 11 mg/día (Oregon State University, 2020). Se destaca que la toxicidad de este elemento en humanos es baja, debido a una limitada absorción y una rápida eliminación pre-sistémica del Mn por el hígado (Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2020).

Promover el consumo de la carne de *Pterygoplichthys pardalis* durante la temporada de máxima inundación (julio-noviembre) puede considerarse una estrategia viable para aprovechar esta especie invasora como una fuente adicional de proteína con un alto valor nutricional como sucede en Suramérica, donde el pez es consumido constantemente por la población. Esta iniciativa podría contribuir a la reducción paulatina de la densidad de especímenes del pez invasor en la región y ayudar al restablecimiento de la biodiversidad pesquera en los cuerpos

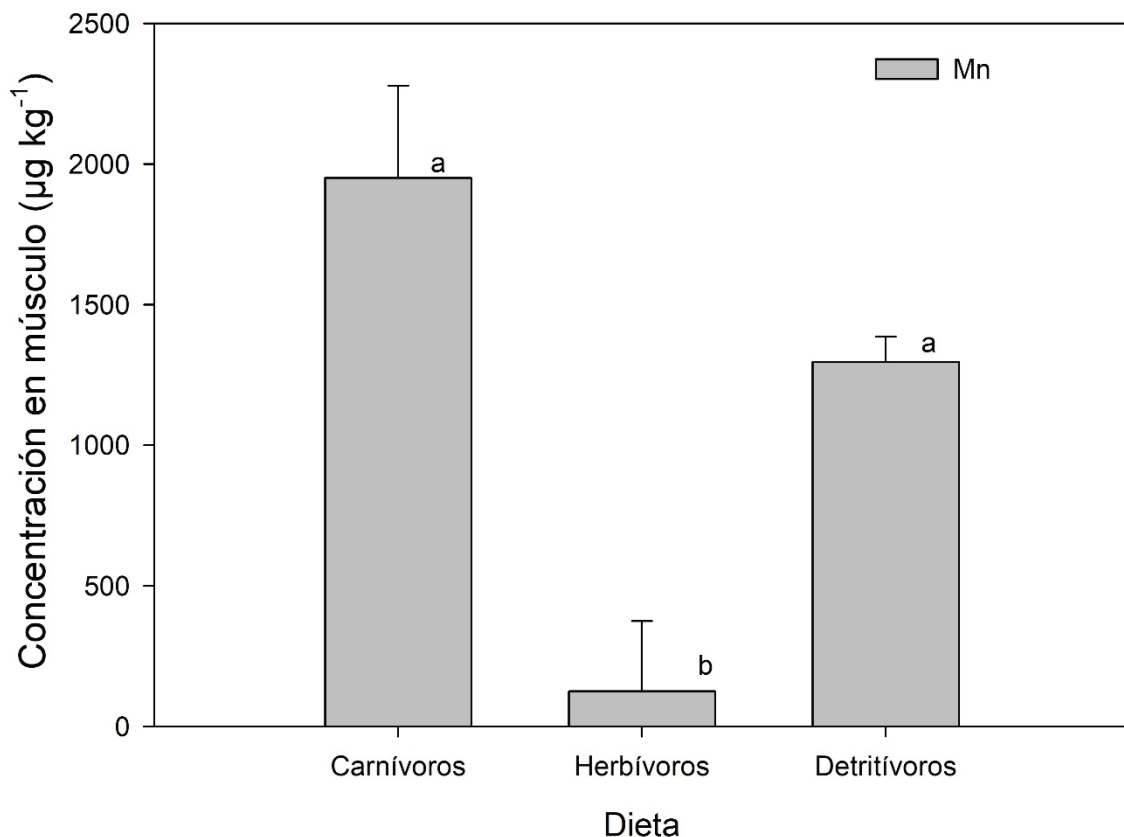


Figura 5. Concentraciones medias (medianas) de Mn y error estándar en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* capturados en lagunas de la RBPC, según la dieta. Letras diferentes identifican diferencias estadísticamente significativas ANOVA ($p < 0.05$). La unidad de medida es µg de metal por kg de tejido en peso húmedo (µg Kg⁻¹) o partes por billón (ppb).

de agua de la cuenca baja de los ríos Grijalva y Usumacinta, trayendo consigo una mejora en los medios de vida de las comunidades ribereñas.

Según datos de FAO (2018), se estima que cerca de 20 millones de toneladas de pescado se utilizan para fines alimentarios indirectos, como la preparación de harinas y aceite de pescado, con una tendencia fluctuante desde 1994. La harina y el aceite de pescado se consideran los ingredientes más nutritivos y digeribles para los piensos destinados a los peces cultivados a través de acuicultura. Se suman también otros productos, como el colágeno y el biodiesel. Además, algunos estudios han demostrado la factibilidad técnica de reemplazar la harina de pescado comercial con harina de músculo de *Pterygoplichthys* spp. para la alimentación de especies de peces más grandes (Filigrana-Celorio, 2016).

Aunado a los impactos a nivel ecológico ocasionados por la introducción del pez en México, se añade la contaminación ambiental generada en las orillas de los cuerpos de agua, debido a la descomposición del pez al ser sacado de las redes por los pescadores locales. Es necesario así, un cambio en la percepción respecto a la utilidad del pez, con el objetivo de desarrollar propuestas de aprovechamiento sustentables en el tiempo. Esto podría contribuir al desarrollo de una economía circular, mediante la creación de biorrefinerías locales que permitan la separación del producto destinado a consumo humano y aquel destinado a otros aprovechamientos, como harina de pescado, ensilados y biofertilizantes (Dahiya *et al.*, 2018).

Es esencial que, dentro de la promoción del aprovechamiento de la carne del pez invasor *Pterygoplichthys pardalis* se evalúe la relación riesgo/beneficio de su consumo de manera continua y de forma habi-

Tabla 5. Concentraciones medias, desviaciones estándar y valores mínimos-máximos de concentraciones de Pb, Cd, Hg y Mn reportadas en diferentes investigaciones en las zonas aledañas al Golfo de México y otros estados de México. Las concentraciones se presentan en μg de metal por kilogramo de tejido, $\mu\text{g kg}^{-1}$.

Autores	Ubicación	Filo	n	Pb	Cd	Hg	Mn
				$\mu\text{g kg}^{-1}$	$\mu\text{g kg}^{-1}$	$\mu\text{g kg}^{-1}$	$\mu\text{g kg}^{-1}$
Este estudio	RBPC	Peces (plecos)	62	67.78 \pm 6.11 (6.31-154.41)	13.80 \pm 2.03 (3.16-61.72)	12.63 \pm 3.021 (12.63-78.20)	1,380.59 \pm 91.11 (360.92-3,358.85)
Pérez-Cruz <i>et al.</i> (2013)	RBPC	Bivalvos	25-50	2,290 \pm 1,100 (760-4,960)	280 \pm 130 (150-500)	-	-
Mendoza-Carranza <i>et al.</i> (2016)	RBPC	Peces		120 \pm 530	130 \pm 330	-	-
		Crustáceos		-	140 \pm 230	-	-
Gutiérrez-Ruiz <i>et al.</i> (2020)	Hidalgo	Peces	25	-	-	-	51,450 \pm 77,320 (10,700-399,800)
	Tamaulipas		6-8	-	-	498	-
Ramírez-Islas <i>et al.</i> (2018)	Veracruz	Peces	6-8	-	-	334	-
	Tabasco		8-10	-	-	192	-
	Campeche		9	-	-	294	-
Lorenzo-Márquez <i>et al.</i> (2016)	Planicie aluvial ríos Grijalva-Usumacinta	Peces (plecos)	240	204.62 \pm 141.53 (56.29-481.01)	38.04 \pm 8.32 (28.93 \pm 53.02)	-	734.70 \pm 984.36 (81.90-3,117.27)
Vázquez-Sauceda <i>et al.</i> (2011)	Laguna costera san Andrés, Tamaulipas	Bivalvos	24	802 \pm 92 (730-860)	2,270 \pm 140 (2,210-2,330)	-	-
Vázquez <i>et al.</i> (2008)	Golfo de México	Peces marinos		520 (7-2,462)	-	48 \pm 38 (6-157)	-
	Veracruz			3,580 \pm 1,976 (1,860-5,850)	2,120 \pm 1,533 (1,540-2,760)	260 \pm 376 (20-740)	-
Villanueva & Bote-llo (1992)	Tabasco	Bivalvos		945 \pm 855 (230-3,040)	7,090 \pm 1,030	112.5 \pm 97.5 (60-140)	-
	Campeche			2,345 \pm 1,297.5 (250-5,800)	2,740 \pm 1,222.5	26.25 \pm 14.5 (4-51)	-
Izaguirre-Fierro <i>et al.</i> (1992)	Sinaloa	Peces	15	960 \pm 1123 (ND-2,800)	460 \pm 89.44 (400-600)		2,300 \pm 2,540.70 (500-6,500)

tual. Los resultados de dicha evaluación podrían respaldar la creación de una estrategia de comunicación de riesgos, orientada a transformar la percepción de los pescadores de la región de la llanura de inundación de los ríos Grijalva y Usumacinta, de forma tal que se pueda reconocer al pez como una nueva fuente de ingresos que ayude a mejorar sus condiciones de vida y bienestar.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias a recursos humanos y financieros provenientes del Proyecto “Monitoreo y prevención de dispersión del pez diablo en afluentes de la Reserva de la Biósfera de Pantanos de Centla” de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), desarrollado en el período 2015 – 2016. Además, se contó con el respaldo del Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), a través del Apoyo a la Incorporación de Nuevos profesores de tiempo completo (Folio S11-6\2019-1120). Adriana Alvarado Arcia es estudiante doctoral del programa de Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y recibe la beca 423618 otorgada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) en México.

REFERENCIAS

- AHMED, M., T. AHMAD, M. LIAQUAT, K. S. ABBASI, I. B. A. FARID & M. JAHANGIR. 2016. Tissue specific metal characterization of selected fish species in Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment Environmental Monitoring and Assessment* 188. DOI:10.1007/s10661-016-5214-6.
- ALI, H. & E. KHAN. 2018. Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. *Environmental Chemistry Letters* 16: 903–917. DOI:10.1007/s10311-018-0734-7.
- ALVARADO-ARCIA, A., C. ILIZALITURRI-HERNÁNDEZ, R. MARTÍNEZ-SALINAS & A. TORRES-DOSAL. 2014. Riesgos ambientales y de salud por metales (cadmio y mercurio) presentes en el suelo y sedimentos del río Grijalva. En: González-Espinoza, M. & M. Manse-Brunel (coords). *Montañas, pueblos y agua. Dimensiones y realidades de la cuenca Grijalva Vol. I*, El Colegio de la Frontera Sur, pp. 240–256.
- AMADOR-DEL ÁNGEL, L. E. & A. T. WAKIDA-KUSUNOKI. 2014. Especies acuáticas exóticas e invasoras del estado de Tabasco, México Exotic and invasive aquatic species of Tabasco state, Mexico. En: Mendoza-Alfaro, R. E. & P. Koleff-Osorio (coords.). *Especies invasoras acuáticas: Casos de estudio en ecosistemas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 177–198.
- BARBA-MACÍAS, E. & M. P. CANO-SALGADO. 2014. Abundancia del plecos (*Pterygoplichthys pardalis*) en sistemas lagunares y ribereños de la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. En: Mendoza-Alfaro, R. E. & P. Koleff-Osorio (coords.). *Especies invasoras acuáticas: Casos de estudio en ecosistemas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 293–311.
- BARBA-MACÍAS, E., J. JUÁREZ-FLORES & M. MAGAÑA-VÁZQUEZ. 2014. Nuevos registros de plecos (*Pterygoplichthys pardalis*) (Siluriformes: Loricariidae) en las cuencas del río Grijalva y Tonalá, Pajonal-Machona, Tabasco. En: Low-Feng, A., P. A. Quijón & E. Peters-Recagno (eds). *Distribución de especies invasoras: Casos de estudio*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), University of Prince Edwards Island (UPEI), Ciudad de México, México. pp 233–251.
- BARBA-MACÍAS, E., M. MENDOZA-CARRANZA, C. TRINIDAD-OCAÑA, J. JUÁREZ-FLORES & M. L. MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ. 2017. *Contrastes en el manejo del cangrejo azul y el pez diablo: perspectiva de los pobladores de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, Tabasco*. El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. 48 p.
- BAWURO, A. A., R. B. VOEGBORLO & A. A. ADIMADO. 2018. Bioaccumulation of Heavy Metals in Some Tissues of Fish in Lake Geriyo, Adamawa State, Nigeria. *Journal of Environmental and Public Health* 2018: 1-7.
- BRIDGES, C. C. & R. K. ZALUPS. 2010. Ionic and molecular mimicry and the transport of metals. *Cellular and Molecular Biology of Metals* 204: 241–294.
- CCME (CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT). 2001. *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life SUMMARY*. Disponible en línea en: <https://ccme.ca/en/summary-table> (consultado el 20 junio 2022).
- CANO-SALGADO, M., C. ALVAREZ-GONZÁLEZ, R. MARTÍNEZ-GARCÍA, E. S. PEÑA-MARÍN, U. RODRÍGUEZ-ESTRADA, E. MACÍAS, R. CIVERA-CERECEDO & E. GOYTORTUA-BORRES. 2022. *Pterygoplichthys* spp. (Siluriformes: Loricariidae) meal is suitable for the culture of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Cichlidae) juveniles. *Ciencia Rural* 52 (1), 1-10. DOI: 10.1590/0103-8478cr20200801
- CANO-SALGADO, M. P. 2011. El plecos (*Pterygoplichthys* spp.): su invasión y el abordaje de las cooperativas balanquenses. Tesis de Doctorado en Ecología y Desarrollo Sustentable. El Colegio de la Frontera Sur. Villahermosa, Tabasco, México. 167 p.
- CAPPS, K. A., L. G. NICO, M. MENDOZA-CARRANZA, W. ARÉVALO-FRÍAS, A. J. ROPICKI, S. A. HEILPERN & R. RODILES-HERNÁNDEZ, 2011. Salinity tolerance of non-native suckermouth armoured catfish (Loricariidae: *Pterygoplichthys*) in south-eastern Mexico: Implications for invasion and dispersal. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 21: 528–540.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2014. *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el Consejo de Cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*. Disponible en línea en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99961/PMPMS_CC_R_os_Grijalva_y_Usumacinta.pdf (consultado el 12 de febrero de 2022).
- CRUZ-RAMÍREZ, A. K., M. SALCEDO, A. J. SÁNCHEZ, E. BARBA-MACÍAS & J. D. MENDOZA-PALACIOS. 2019. Relationship among physicochemical conditions, chlorophyll-a concentration, and water level in a tropical river–floodplain system. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16: 3869–3876. DOI:10.1007/s13762-018-2127-7.
- DAHIYA, S., A. N. KUMAR, J. S. SRAVAN, S. CHATTERJEE, O. SARKAR & S. V. MOHAN. 2018. Bioresource Technology Food waste biorefinery: Sustainable strategy for circular bioeconomy. *Bioresource Technology* 248: 2–12. DOI:10.1016/j.biortech.2017.07.176.
- DEPLEDGE, M. H. & B. SANDERS. 1998. *Metal Metabolism in Aquatic Environments*. Springer-Science+Business Media. London, United Kingdom. 460 pp.

- DOF (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). 2009. *Norma Oficial Mexicana NOM-027-SSA1-2009, Productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba*. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. Disponible en línea en: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4295/salud2a/salud2a.htm> (consultado el 19 de julio de 2022).
- DOF (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). 2015. *Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG/ZOO-2014 Métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres*. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. Agosto 15. Disponible en línea en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5643329&fecha=21/02/2022#gsc.tab=0 (consultado el 09 de febrero de 2022).
- DOF (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). 2018. *ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Lagartero, Yahahuita, Zacualpa, Papizaca, Presa La Concordia, Selegua, San Miguel, La Concordia, Aguacatenco, Aguzarca, San Pedro, Grande o Salinas, Presa La Angostura, Hondo, Tuxtla Gutiérrez, Suchiapa, Santo Domingo, Presa Chicoasén, Chicoasén, Encajonado, Cintalapa, Soyatenco, Alto Grijalva, De La Venta, Chapopote, Presa Nezhualcóyotl, Tzimbac, Zayula, Presa Peñitas, Paredón, Platanar, Mezcalapa, El Carrizal, Tabasquillo, Cunduacán, Samaría, Caxcuchapa, Basca, Yashijá, Shumulá, Puxcatán, Chacté, De los Plátanos, Tulijá, Macuxpana, Almendro, Chilapa, Tacotalpa, Chilapilla, De la Sierra, Pichucalco, Viejo Mezcalapa, Azul, Tzanconeja, Perlas, Comitán, Margaritas, Jatate, Ixcán, Chajul, Lacanjá, San Pedro, Laguna Miramar, Euseba, Caliente, Seco, Santo Domingo, Lacantún, San Pedro, Chixoy, Chocaljah, Chacamax, Usumacinta, Grijalva, Palizada, San Pedro y San Pablo, Laguna del Este, Laguna de Términos, Mamatel, Cumpan y Laguna del Pom y Atasta, pertenecientes a la Región Hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta*. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. Abril 10. Disponible en línea en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5518766&fecha=10/04/2018.
- DOUE (DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA). 2006. *Reglamento (CE) No 1881/2006 Contenido máximo de determinados contaminantes en los alimentos*. Diario Oficial de la Unión Europea. Disponible en línea en: <https://www.boe.es/doue/2006/364/L00005-00024.pdf> (consultado el 19 de febrero 2022).
- DUQUE, G., J. IGOR HLEAP, C. JIMÉNEZ, J. L. MARRUGO NEGRETE, M. P. MONTOYA, I. C. SÁNCHEZ, H. SUÁREZ MAHECHA & Á. WILLS FRANCO. 2015. *Evaluación de riesgo de mercurio en peces de aguas continentales en Colombia*. Ministerio de Salud y Protección Social y el Instituto Nacional de Salud. Reporte técnico. Bogotá, Colombia. 60 p. Disponible en línea en: https://www.ins.gov.co/Direcciones/Vigilancia/Publicaciones/ERIA_y_Plaguicidas/ER_MERCURIO_EN_PECES.pdf (consultado el 19 de marzo de 2022).
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 1989. *Integrated Risk Information System (IRIS): Cadmium; CASRN 7440-43-9*. Disponible en línea en: https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=141 (consultado el 07 febrero de 2022).
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 1998. *Method 7010 Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometry*. Environmental Protection Agency. 20 p. Disponible en línea en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa-7010.pdf> (consultado el 09 de marzo de 2022).
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 2001. *Integrated Risk Information System (IRIS): Methylmercury (MeHg) CASRN 22967-92-6*. Disponible en: https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=73 (consultado el 07 febrero de 2022).
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 2004. *Integrated Risk Information System (IRIS): Lead and compounds (inorganic) CASRN 7439-92-1*. Disponible en línea en: https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=277 (consultado el 07 febrero de 2022).
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 2007. *Method 7471B Mercury in solid or semisolid waste (Manual cold-vapor technique)*. Environmental Protection Agency. 11 p. Disponible en línea en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/7471b.pdf> (consultado el 09 de marzo de 2022).
- ESCALERA-VÁZQUEZ, L. H. (n.d.). *Caracterización fisicoquímica del Hyposotomus plecostomus y alternativas de utilización*. Instituto Politécnico Nacional (IPN). Reporte técnico. México. Disponible en línea en: http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20050858_2030.pdf (consultado el 26 de junio de 2022).
- ESCALERA-VÁZQUEZ, L. H., J. E. GARCÍA-LÓPEZ, A. SOSA-LÓPEZ, N. CALDERÓN-CORTÉS & D. HINOJOSA-GARRO. 2019. Impact of the non-native locariid fish *Pterygoplichthys pardalis* in native fish community on a seasonal tropical floodplain in Mexico. *Aquatic Ecosystem Health & Management* 22: 462–472. DOI:10.1080/14634988.2019.1700343.
- FILIGRANA-CELORIO, G. 2016. *Uso de la harina de pez diablo (Pterygoplichthys spp) en la alimentación de tilapia nilótica (Oreochromis niloticus)*. Tesis de Maestría en Ciencias de los Recursos Naturales y Desarrollo Rural, El Colegio de la Frontera Sur. Villahermosa, Tabasco, México. 56 p.
- FLORES, C. M., E. DEL ANGEL, D. M. FRIAS & A. L. GÓMEZ. 2018. Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 9: 39–57.
- FROESE, R. & D. PAULY. 2019. *Pterygoplichthys pardalis (Castelnau, 1855) Amazon sailfin catfish*. Fish Base. Disponible en línea en: www.fishbase.org (consultado el 23 de enero de 2022).
- GROTH, E. 2017. Scientific foundations of fish-consumption advice for pregnant women: Epidemiological evidence, benefit-risk modeling, and an integrated approach. *Environmental Research* 152: 386–406.
- GUTIÉRREZ-RUIZ, M., J. F. PARROT, C. RAMÍREZ-NÚÑEZ, L. PÉREZ-MANZANERA, D. AMARO-RAMÍREZ & L. JARDINES-MENDOZA. 2020. Tridimensional spatial distribution of manganese in a river impacted by metallurgical activity and mining. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: 10.1007/s11356-020-10727-x.
- GUZMÁN, A. F. & J. S. BARRAGAN. 1997. Presencia de bagres sudamericanos (Osteichthyes: Loricariidae) en el río Mezcala, Guerrero, México. *Vertebrata Mexicana* 3: 1–4.
- HARRIS, R., C. POLLMAN, W. LANDING, D. EVANS, D. AXELRAD, D. HUTCHINSON, S. L. MOREY, D. RUMBOLD, D. DUKHOVSKOY, D. H. ADAMS, K. VIJAYARAGHAVAN, C. HOLMES, R. D. ATKINSON, T. MYERS & E. SUNDERLAND. 2012. Mercury in the

- Gulf of Mexico: Sources to receptors. *Environmental Research* 119: 42–52. DOI:10.1016/j.envres.2012.08.001.
- HERNÁNDEZ-CANDELARIO, I. DEL C., M. L. LARES, V. F. CAMACHO-IBAR, L. LINACRE, E. GUTIÉRREZ-MEJÍA & P. PÉREZ-BRUNIUS. 2019. Dissolved cadmium and its relation to phosphate in the deep region of the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems* 193: 27–45. DOI:10.1016/j.jmarsys.2019.01.005.
- HUMEDALES USUMACINTA A. C. 2013. *Proyecto de aprovechamiento integral del pez diablo Cuenca Grijalva-Usumacinta*. Reporte técnico. Disponible en línea en: <https://vdocuments.mx/proyecto-de-aprovechamiento-integral-del-pez-diablo-cuenca-grijalva-usumacinta.html?page=1> (consultado el 10 de julio de 2022).
- INECC (INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO). 2007. La cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Disponible en línea en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/402/cuencas.html> (consultado el 14 de junio de 2022).
- IZAGUIRRE-FIERRO, G., F. PAEZ-OSUNA & J. I. OSUNA-LÓPEZ. 1992. Heavy metals in fishes from Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico. *Ciencias Marinas* 18: 143–151.
- KAWARAZUKA, N. & C. BÉNÉ. 2011. The potential role of small fish species in improving micronutrient deficiencies in developing countries: Building evidence. *Public Health Nutrition* 14: 1927–1938.
- KOBAYASHI, M., S. MSANGI, M. BATKA, S. VANNUCCINI, M. M. DEY & J. L. ANDERSON. 2015. Fish to 2030: The Role and Opportunity for Aquaculture. *Aquaculture Economics and Management* 19: 282–300.
- KROMHOUT, D., S. YASUDA, J. M. GELEIJNSE & H. SHIMOKAWA. 2012. Fish oil and omega-3 fatty acids in cardiovascular disease: do they really work?. *European Heart Journal* 33: 436–443.
- LEWIS, M. & C. CHANCY. 2008. A summary of total mercury concentrations in flora and fauna near common contaminant sources in the Gulf of Mexico. *Chemosphere* 70: 2016–2024.
- LPI (LINUS PAULING INSTITUTE). 2022. Centro de información de micronutrientes Manganeso. Oregon State University. Corvallis, Oregon. Disponible en línea en: <https://lpi.oregonstate.edu/es/mic/minerales/manganeso#toxicidad> (consultado el 17 de marzo de 2022).
- LÓPEZ-GARCÍA, K. DEL C., M. A. RODRÍGUEZ-SANTIAGO, L. E. AMADOR-DEL ÁNGEL, M. I. GRANO-MALDONADO, S. M. LAFFÓN-LEAL & S. SANTOS GUZMÁN. 2018. The Invasive armored suckermouth catfish *Pterygoplichthys pardalis* (Siluriformes: Loricariidae) as part of diet of the double-crested cormorant *Phalacrocorax auritus* (Phalacrocoracidae) in two tropical regions of Mexico. *Biotempo* 15: 17–21.
- LORENZO-MÁRQUEZ, H., A. TORRES-DOSAL, E. BARBA-MACÍAS, C. A. ILIZALITURRI-HERNÁNDEZ, R. I. MARTÍNEZ-SALINAS, J. J. MORALES-LÓPEZ & I. SÁNCHEZ-MORENO. 2016. Estimación de riesgo de exposición a metales pesados por consumo de plecos (*Pterygoplichthys* spp.) en infantes de comunidades ribereñas de los ríos Grijalva y Usumacinta, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 32: 153–164.
- LOW-FENG, A., P. A. QUIJÓN & E. PETERS-RECAGNO. 2014. *Distribución de especies invasoras: Casos de estudio de ecosistemas en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), University of Prince Edwards Island (UPEI), Ciudad de México, México. 659 p.
- MEJÍA-MOJICA, H., F. DE J. RODRÍGUEZ-ROMERO & E. DÍAZ-PARDO. 2012. Recurrencia histórica de peces invasores en la reserva de la biósfera Sierra de Huautla, México. *Revista de Biología Tropical* 60: 669–681.
- MENDOZA-ALFARO, R. E. & P. KOLEFF-OSORIO. 2014. *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Mexico. 560 p.
- MENDOZA-ALFARO, R., J. P. FISHER, W. COURTENAY, C. RAMÍREZ-MARTÍNEZ, A. ORBE-MENDOZA, C. ESCALERA-GALLARDO, P. ÁLVAREZ-TORRES, P. KOLEFF-OSORIO & C. B. SALVADOR. 2009. Evaluación trinacional de riesgos de los plecos (Loricariidae). Directrices trinacionales para la evaluación de riesgos de las especies acuáticas exóticas invasoras. Comisión para la Cooperación Ambiental. Montreal, Canadá. Disponible en línea en: https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/especies/Invasoras/files/Directrices_estcaso_espanol.pdf (consultado el 09 de mayo de 2022).
- MENDOZA-CARRANZA, M., A. SEPÚLVEDA-LOZADA, C. DIAS-FERREIRA & V. GEISSEN. 2016. Distribución y bioconcentración de metales pesados en una red trófica acuática tropical: un estudio de caso de una laguna estuarina tropical en el sureste de México. *Environmental Pollution* 210: 155–165.
- MILLER, R. R., W. L. MINCKLEY, S. M. NORRIS & J. J. SCHMITTER SOTO. 2009. *Peces dulceacuícolas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Sociedad Ictiológica Mexicana, A. C., El Colegio de la Frontera Sur, Consejo de Peces del Desierto. Ciudad de México, México. 280 p.
- MONARES-GALLARDO, I., L. F. CEJA-TORRES, C. ESCALERA-GALLARDO, G. OCHOA-ESTRADA & S. VÁZQUEZ-GÁLVEZ. 2012. Tamaño de partícula y tiempo de aplicación pre-siembra de harina de pescado (*Plecostomus* spp.) en producción de calabacita. *Terra Latinoamericana* 30: 147–155.
- MORIARTY, R. J., E. N. LIBERDA & L. J. S. TSUJI. 2020. Subsistence fishing in the Eeyou Istchee (James Bay, Quebec, Canada): A regional investigation of fish consumption as a route of exposure to methylmercury. *Chemosphere* 258: 11.
- MUSALEM-CASTILLEJOS, K., R. LAINO-GUANES, R. BELLO-MENDOZA, M. GONZÁLEZ-ESPINOZA & N. RAMÍREZ-MARCIAL. 2018. Water quality of the Grijalva river in the Chiapas and Tabasco border. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5: 55-64. DOI: 10.19136/era.a5n13.1334.
- NAVARRETE-DOMÍNGUEZ, M., R. E. ZAMUDIO-ALEMÁN, M. DEL R. CASTAÑEDA-CHÁVEZ & F. LANGO-REYNOSO. 2020. *Evaluación de la concentración de metales pesados (Cd, Pb y V) en sedimentos acuáticos de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco*. En Lango-Reynoso, F., V. Lango-Reynoso, M. Castañeda-Chávez, J. Montoya-Mendoza & C. Landeros-Sánchez (coords.). *20 años de Tecnología e Innovación Sustentable*. Xalapa. Veracruz, México, pp 113–129.
- NIE, J. Q., X. H. DONG, B. P. TAN, S. Y. CHI, Q. H. YANG, H. Y. LIU & Z. SHUANG. 2016. Effects of dietary manganese sources and levels on growth performance, relative manganese bioavailability, antioxidant activities and tissue mineral content of juvenile cobia (*Rachycentron canadum* L.). *Aquaculture Research* 47: 1402–1412.
- OREGON STATE UNIVERSITY. 2020. Manganeso | Linus Pauling Institute | Oregon State University. Centro de Información de Micronutrientes. Disponible en línea en: <https://lpi.oregonstate.edu/es/mic/minerales/manganeso> (consultado el 12 de mayo de 2022).

- ORFINGER, A. B. & D. D. GOODING. 2018. The global invasion of the suckermouth armored catfish genus *Pterygoplichthys* (Siluriformes: Loricariidae): Annotated list of species, distributional summary, and assessment of impacts. *Zoological Studies* 57: 1–16.
- FAO (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA). 2016. *El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura. Resumen*. Roma. 24 p.
- FAO (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA). 2018. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible*. Informe. Roma. 250 p.
- FAO (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA). 2019. *Norma General para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos CXS 193-1995*. Codex Alimentarius. Normas Internacionales de los Alimentos. 76 p. Disponible en línea en: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/es/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193s.pdf (consultado el 12 de febrero de 2022).
- PÉREZ-CRUZ, Y., L. RANGEL-RUIZ & J. GAMBOA-AGUILAR. 2013. Metales en almejas y sedimentos en la Reserva de la Biósfera “Pantanos de Centla” Tabasco, México. *Hidrobiológica* 23: 1–8.
- PLASCENCIA VARGAS, H., N. RAMÍREZ MARCIAL, M. GONZÁLEZ ESPINOZA & J. D. ÁLVAREZ SOLÍS. 2014. Características físico-bióticas de la cuenca del río Grijalva. En: González Espinoza, M. & M. C. Manse-Brunel (eds). *Montañas, Pueblo y Agua. Dimensiones y realidades de la cuenca Grijalva Vol 1*. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México, pp. 29–79.
- RAMÍREZ-AYALA, E., ARGUELLO-PÉREZ, M. A., TINTOS-GÓMEZ, A., PÉREZ-RODRÍGUEZ, R., DÍAZ-GÓMEZ, J. A., BORJA-GÓMEZ, I., SEPÚLVEDA-QUIROZ, C. A., PATIÑO-BARRAGÁN, M., LEZAMA-CERVANTES, C. & J. SALOMÉ-BAYLÓN. 2020. Review of the biomonitoring of persistent, bioaccumulative, and toxic substances in aquatic ecosystems of Mexico: 2001-2016. *Latin American Journal of Aquatic Research* 48 (5): 705–738
- RAMÍREZ-ISLAS, M. E., A. DE LA ROSA-PÉREZ, F. ALTUZAR-VILLATORO & P. RAMÍREZ-ROMERO. 2018. Total mercury concentration in two marine fish species, mackerel (*Scomberomorus* sp.) and snapper (*Lutjanus* sp.), from several Mexican fishing ports. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 13894–13905.
- RAMOS-REYES, R., J. ZAVALA-CRUZ, L. M. GAMA-CAMPILLO, D. PECH-POOL & M. A. ORTIZ-PÉREZ. 2016. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68: 581–598.
- REKSTEN, A. M., T. SOMASUNDARAM, M. KJELLEVOLD, A. NORDHAGEN, A. BØKEVOLL, L. M. PINCUS, A. A. M. RIZWAN, A. MAMUN, S. H. THILSTED, T. HRUT & I. AAKRE. 2020. Nutrient composition of 19 fish species from Sri Lanka and potential contribution to food and nutrition security. *Journal of Food Composition and Analysis* 91: 103508. DOI:10.1016/j.jfca.2020.103508.
- RUIZ-FERNÁNDEZ, A. C., J. A. SANCHEZ-CABEZA, L. H. PÉREZ-BERNAL & A. GRACIA. 2019. Spatial and temporal distribution of heavy metal concentrations and enrichment in the southern Gulf of Mexico. *Science of the Total Environment* 651: 3174–3186. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.10.109.
- SÁNCHEZ, A. J., N. ÁLVAREZ-PLIEGO, H. ESPINOSA-PÉREZ, R. FLORIDO, A. MACOSAY-CORTEZ, E. BARBA, M. Á. SALCEDO & A. GARRIDO-MORA. 2019. Species richness of urban and rural fish assemblages in the Grijalva Basin floodplain, southern Gulf of Mexico. *Cybiu* 43: 239–254.
- SÁNCHEZ, A. J., R. FLORIDO, N. ÁLVAREZ-PLIEGO & M. Á. SALCEDO. 2015. Distribución de *Pterygoplichthys* spp. (Siluriformes: Loricariidae) en la cuenca baja de los ríos Grijalva-Usumacinta. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86: 1099–1102.
- SAS INSTITUTE INC. 2019. JMP 15.0.0. SAS Institute Inc., www.jmp.com.
- TØRRIS, C., M. MOLIN & M. C. SMASTUEN. 2014. Fish consumption and its possible preventive role on the development and prevalence of metabolic syndrome—a systematic review. *Diabetology and Metabolic Syndrome*: 1–11. Disponible en línea en: <http://www.dmsjournal.com/content/6/1/112>(consultado el 27 de marzo de 2022).
- TREFRY, J. H., R. P. TROCINE, M. L. McELVAINE, R. D. REMBER & L. T. HAWKINS. 2007. Total mercury and methylmercury in sediments near offshore drilling sites in the Gulf of Mexico. *Environmental Geology* 53: 375–385.
- VARGAS-RIVAS, A., E. BARBA-MACÍAS, A. J. SÁNCHEZ & G. CASTELLANOS-MORALES. 2022. Lack of mtDNA genetic diversity despite phenotypic variation and environmental heterogeneity in the exotic suckermouth armored catfish (*Pterygoplichthys pardalis*). *Biological Invasions*: 22 p. DOI: 10.1007/s10530-022-02961-w
- VÁZQUEZ-SAUCEDA, M., G. AGUIRRE-GUZMÁN, J. G. SÁNCHEZ-MARTÍNEZ & R. PÉREZ-CASTAÑEDA. 2011. Cadmium, lead and zinc concentrations in water, sediment and oyster (*Crassostrea virginica*) of San Andres Lagoon, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 86: 410–414.
- VÁZQUEZ, F., T. R. FLORVILLE-ALEJANDRE, M. HERRERA & L. M. D. DE LEÓN. 2008. Metales pesados en tejido muscular del bagre *Ariopsis felis* en el sur del Golfo de México (2001-2004). *Latin American Journal of Aquatic Research* 36: 223–233.
- VIANA-FINOTO, L., Y. SUÁREZ-RONDÓN, C. A. CARDOSO-LIMA, B. CRISPIM DO AMARAL, A. GRISOLIA-BARUFFATI & S. E. LIMA-JUNIOR. 2017. Mutagenic and genotoxic effects and metal contaminations in fish of the Amambai River, Upper Paraná River, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research* 24: 27104–27112.
- VILAVERTE, L., F. BORRELL, M. NADAL, S. JACOBS, F. MINNENS, W. VERBEKE, A. MARQUES & J. L. DOMINGO. 2017. Health risk/benefit information for consumers of fish and shellfish: FishChoice, a new online tool. *Food and Chemical Toxicology* 104: 79–84.
- VILLANUEVA, S. & A. V. BOTELLO. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 8: 47–61. Disponible en línea en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37080104%0ACómo> (consultado el 23 de agosto de 2022).
- WAKIDA-KUSUNOKI, A., L. AMADOR-DEL ÁNGEL, E. ROMERO-HERNÁNDEZ & L. BOZADA ROBLES, 2016. Range expansion of the invasive Amazon sailfin catfish, *Pterygoplichthys pardalis* (Castelnau, 1855), in the central and southeastern Gulf of Mexico. *Limnetica* 35 (2): 297–302.
- ZAVALA-CRUZ, J., R. JIMÉNEZ-RAMÍREZ, D. PALMA-LÓPEZ, F. BAUTISTA & F. GAVI-REYES. 2016. Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3: 161–171.