



Contenido de metales pesados en la trama trófica del río Piura (Perú), relacionado con su presencia en el medio, conducta alimentaria y tasas de los procesos fisiológicos e ingesta

Heavy metal content in the food web of the Piura River (Peru), related to its presence in the environment, feeding behavior, and rates of physiological processes and intake

Ronald Wilmer Marcial Ramos^{1*}; Juan Francisco Cruz Gutiérrez²

1 Escuela profesional de Ciencias biológicas, Universidad Nacional de Piura, Urb. Miraflores s/n Castilla 20002.

2 Escuela profesional de Ingeniería química, Universidad Nacional de Piura, Urb. Miraflores s/n Castilla 20002.

* Autor correspondiente: rmarcialr@unp.edu.pe (R. W. Marcial Ramos).

ORCID de los autores

R. W. Marcial Ramos: <http://orcid.org/0000-0002-3836-1894>

J. F. Cruz Gutiérrez: <http://orcid.org/0000-0003-0362-9827>

RESUMEN

El alimento y medio constituyen las principales vías de exposición en los animales a los contaminantes, de manera que estimar la cantidad de estos y ubicar el nivel trófico del organismo, nos permite entender sus patrones de acumulación y el impacto que genera esto en la fauna acuática. Se determinaron los metales pesados Cd, Cr, Cu, Hg y Pb en la trama trófica del río Piura, se analizaron muestras de agua, sedimento y tejidos de 1 vegetal, 1 molusco, 1 crustáceo, 12 peces, 1 anfibio y 7 aves. El análisis se realizó por espectrofotometría de absorción atómica. Se encontró fuera del límite permisible, para agua Cu, Cr y Hg; sedimento Cu y Hg; *Eichornia crassipes*, especie vegetal, Pb y Cr; *Pisidium sp.* molusco bentónico, Pb, Cu, Cd y Cr; *Cherax quadricarinatus*, crustáceo, Pb, Cu y Cr. Peces exceden el límite para todas las especies Pb y Cd; Hg está por debajo en todas las especies y Cu excedido en *Liposarcus pardalis*, *Rhoadsia altipinna* y *Mugil cephalus* y Cr en *Liposarcus pardalis*, *Brycon atrocaudatus*, *Rhoadsia altipinna*, *Parachromis managuensis* y *Mugil cephalus*. En aves, fuera de límite para todas las especies Pb, Cr y Hg; Cu está por encima en *Egretta thula* y Cd en *Phalacrocorax brasilianus* y *Leucophaeus pipixcan*. La diferencia del contenido de metales pesados está relacionado a la presencia del elemento en el medio, conducta alimentaria y las tasas de los procesos fisiológicos e ingesta.

Palabras clave: Contaminación, ambiente lotico, cadenas alimenticias, bioacumulación, nivel trófico

ABSTRACT

Food and the environment are the main routes of exposure to contaminants in animals, so estimating the amount of these contaminants and locating the trophic level of the organism allows us to understand their accumulation patterns and the impact this has on aquatic fauna. The heavy metals Cd, Cr, Cu, Hg, and Pb were determined in the food web of the Piura River. Water, sediment, and tissue samples from one plant, one mollusk, one crustacean, 12 fish, one amphibian, and seven birds were analyzed. The analysis was performed by atomic absorption spectrophotometry. The following levels were found to be outside the permissible limits: Cu, Cr, and Hg in water; Cu and Hg in sediment; Pb and Cr in the plant species *Eichornia crassipes*; Pb, Cu, Cd, and Cr in the benthic mollusk *Pisidium sp.*; and Pb, Cu, Cd, and Cr in the crustacean *Cherax quadricarinatus*. All fish species exceeded the limits for Pb and Cd. Mercury (Hg) levels are below the limit in all species, while copper (Cu) levels are exceeded in *Liposarcus pardalis*, *Rhoadsia altipinna*, and *Mugil cephalus*, and chromium (Cr) levels are exceeded in *Liposarcus pardalis*, *Brycon atrocaudatus*, *Parachromis managuensis*, and *Mugil cephalus*. In birds, lead (Pb), chromium (Cr), and mercury (Hg) levels are above the limit in all species; copper levels are above the limit in *Egretta thula*, and cadmium (Cd) levels are above the limit in *Phalacrocorax brasilianus* and *Leucophaeus pipixcan*. The difference in heavy metal content is related to the presence of the element in the environment, feeding behavior, and the rates of physiological processes and ingestion.

Keywords: Pollution, lotic environment, food chains, bioaccumulation, trophic level.

Recibido: 09-04-2026.

Aceptado: 15-06-2026.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados en los ecosistemas acuáticos del Perú deriva de actividades mineras, industriales y urbanas, representando riesgos para la fauna y salud humana. Los peces y otros organismos acuáticos bioacumulan estos contaminantes, lo que afecta su seguridad para el consumo humano, Mamani et al. (2025).

La contaminación ambiental es un problema global, y los metales pesados son una de las principales preocupaciones, destacándose arsénico, cadmio, mercurio y plomo (Tomaila & Lannacone, 2018). La presencia de estos metales y metaloides en agua, suelos y aire constituye un problema grave, que afecta tanto la seguridad alimentaria como la salud pública a nivel global y local (Reyes et al., 2016), evidenciando la existencia de fuentes de contaminación de origen antropogénico (Armiñana et al., 2024).

A pesar de los esfuerzos de la Organización Mundial de la Salud por implementar programas y estrategias para prevenir la intoxicación por metales pesados (Arriaga et al., 2024), estos continúan generando efectos nocivos irreparables en la salud humana y animal, como el desarrollo de cáncer y trastornos teratogénicos. En altas concentraciones, estos metales alteran los procesos bioquímicos y fisiológicos, provocando diversas patologías. Por ello, es crucial proteger el ambiente del ingreso de estos elementos y reducir su presencia en industria, minería y sector agropecuario (Londoño et al., 2016).

La contaminación por metales pesados es preocupación constante para múltiples organizaciones debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación (González & Murga, 2020). Metales como mercurio, arsénico, plomo y cadmio, representan una amenaza significativa para la salud humana, animales y ecosistemas (Franco et al., 2023; Mancilla et al., 2023; Oliva et al., 2023; Robles, 2024).

El mecanismo de transferencia trófica de elementos traza está controlado por el ingreso del metal desde dos fuentes principales (disuelto en agua y alimento), por la capacidad de excreción y rutas de acumulación, y en ocasiones por el crecimiento de los organismos. La dieta es reconocida como la principal fuente de metales en los organismos acuáticos (Wang, 2002; Zhang & Ma, 2011) y es una importante vía para su transferencia a través de las cadenas y redes tróficas acuáticas (Rainbow, 2002; Wang, 2002).

Además, la transferencia y bioacumulación de elementos traza en los sistemas acuáticos depende de las propiedades fisicoquímicas de los elementos, de su concentración, fraccionamiento geoquímico y especiación química (Soto, 2011). Influyen también los factores biológicos y ecológicos de las especies que conforman una trama trófica, como son los hábitos alimenticios, hábitat, edad, sexo y estado de salud de los organismos. Además, la transferencia y bioacumulación de elementos traza depende de los mecanismos de detoxificación de los que disponga cada especie que conforma la trama y hasta del contenido de lípidos en los órganos y tejidos de los individuos.

Estos elementos pueden entrar a los cuerpos de agua a través de tres vías principales:

a) Vía atmosférica, se produce debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales u antrópicos (principalmente combustión de combustibles fósiles y procesos de fundición de metales).

b) Vía terrestre, producto de filtraciones de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados (minas, utilización de lodos como abono, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica, etc.) y otras causas naturales como la erosión de suelos, rocas y erupciones volcánicas, las cuales los llevan hasta los sistemas acuáticos.

c) Vía directa, la entrada de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales (Domínguez, 2006).

Los metales en las redes alimentarias pueden proceder de la columna de agua a través de la absorción de partículas en suspensión por parte del fitoplancton, el cual es consumido por animales filtradores, que a su vez son la base de la alimentación de otros consumidores. Los efectos de los diferentes contaminantes a los que están expuestos los organismos tanto en la columna de agua como en el sedimento van a depender en gran medida de la proporción y especiación de cada uno de ellos, de la naturaleza de la red trófica y de la posición de cada uno de los organismos dentro de la red (Di Giulio & Hinton, 2008).

La cuantificación de los metales pesados en redes tróficas, es un indicador del impacto que estos tienen en los organismos y por ende refleja la salud del ecosistema (Lakshmanan et al., 2010). Los organismos concentran los metales en sus tejidos mediante un proceso denominado bioacumulación, que implica el aumento progresivo de la cantidad de sustancia como consecuencia de que la velocidad de absorción supera la capacidad para eliminar dicha sustancia (Demir et al., 2024).

Los metales pesados son unos de los contaminantes ambientales más peligrosos, debido a que no son biodegradables y a su potencial de bioacumulación en los organismos vivos. Se consideran los siguientes: Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) (Basterrechea et al., 2003). Los metales pesados son contaminantes que entran al sedimento desde los cuerpos de agua, produciéndose un aumento progresivo de sus concentraciones en el tiempo y posterior bioacumulación en organismos que forman parte de esos ecosistemas. Estos elementos, en comparación con otros contaminantes, no son biodegradables y sufren un ciclo ecológico global, en el cual las aguas naturales son las principales vías, siendo críticos los efectos negativos que ellos ejercen, debido a que pueden causar graves daños a nivel celular, dada su capacidad para desnaturalizar proteínas, ser asimilados por el fitoplancton y organismos filtradores e incorporados a la cadena alimenticia, provocando graves alteraciones ecológicas y biológicas, no sólo al ecosistema, sino a los humanos (Dekker, 1992).

Los humedales costeros en Perú ocupan cerca del catorce por ciento del territorio nacional con más de seis millones y medio de hectáreas, siendo vitales para la biodiversidad, como reguladores del clima y ciclo hidrológico, además de servir como fuentes de recursos para consumo directo (Gómez et al., 2023).

La contaminación por metales pesados afecta los sistemas acuáticos y por ende a los organismos que habitan en ellos. Los estudios alimentarios representan la integración de múltiples componentes ecológicos como comportamiento, uso del hábitat, variables ambientales, flujo de energía intraespecífico e interespecífico (Duarte y García, 1999; Polo et al., 2007; Tripp y Arreguín, 2009) entre otros aspectos, sin embargo, estos estudios deben ser abordados considerando distintas perspectivas que pueden en algunos casos limitar o ampliar la interpretación de los resultados obtenidos.

Las investigaciones sobre metales pesados están proporcionando información valiosa para la población. No obstante, en Perú existen vacíos en el conocimiento sobre los factores que inciden en la exposición a estos metales a través de la alimentación (Morales et al., 2022). Además, se ha identificado la presencia de metales pesados, en el polvo urbano, lo que constituye otra fuente de contaminación ambiental en áreas urbanas y que llegan a los cuerpos de agua que las atraviesan, caso del río Piura. El aumento de estos contaminantes se atribuye al proceso de urbanización y representa una preocupación creciente debido a los graves

efectos que puede tener en la salud humana (Santoyo et al., 2024).

Los peces se han consolidado como bioindicadores especialmente valiosos de la calidad ambiental debido a su sensibilidad a diversos tipos de perturbaciones antrópicas, incluyendo la contaminación química, eutrofización, acidificación y modificación de hábitats (Habib et al., 2024 en Albán & Marcial, 2025).

Por otro lado, peces y crustáceos constituyen una fuente fundamental en la dieta familiar; sin embargo, la contaminación ambiental de origen antropogénico compromete su inocuidad, especialmente debido a la presencia de metales pesados (Masco et al., 2022). Sustancias como el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) son contaminantes de gran preocupación por su toxicidad y persistencia en el medio ambiente (Villanueva et al., 2023). El consumo de pescado contaminado con estos metales está afectando la seguridad alimentaria y salud pública (Lugo y Cadavid, 2020), ya que los peces y otros organismos acuáticos, pueden acumularlo a través del agua y la cadena trófica.

Por ello nos propusimos conocer la concentración de metales pesados en los componentes de la trama trófica del río Piura, se determinaron los metales pesados Cd, Cr, Cu, Hg y Pb en muestras biológicas, se construyó la trama trófica del río Piura y se determinaron las especies con mayores concentraciones de metales pesados y se relacionaron con los límites permisibles.

METODOLOGÍA

El río Piura, se sitúa en la región Piura, en el norte del Perú, entre los 0 y 3 600 m.s.n.m., la zona evaluada corresponde al tramo, entre el caserío Chapaira y la Presa Los Ejidos. Geográficamente, ubicada entre las coordenadas: 5° 7' 24" LS y 80° 37' 07" LO y 05° 9' 36" LS y 80° 36' 56" L.O (Figura 1).

Diseño de la fase de campo y laboratorio

Se desarrollaron tres etapas procedimentales; primero se realizó el muestreo de agua, sedimentos, especies de flora y fauna, posteriormente la etapa de determinaciones en condiciones de laboratorio. Y finalmente, el análisis posterior de los resultados obtenidos y la comparación de estos con los valores máximos permisibles. Se describe a continuación los diferentes procedimientos realizados tanto en campo, como en laboratorio.

Muestreos de Campo

Se hizo siguiendo metodologías específicas según el componente a muestrear. Se describe a continuación cada proceso.

Muestreo de Sedimentos

Los sedimentos superficiales en zonas de orilla del cuerpo de agua se obtuvieron utilizando un muestreador tipo Corer, este puede extraer muestras hasta de un metro de sedimento, siempre que el tipo de material permita su ingreso hasta esa

profundidad. El sedimento colectado, se trasvasó en recipientes especialmente tratados, de forma tal que no se altere su composición ni se contamine.

Muestreo de Agua

Se extrajo de la zona central del río Piura, sin turbulencia. Se evitó tomar agua de las márgenes ya que allí el agua no está perfectamente mezclada y puede haber sufrido efectos de evaporación o contaminación. La toma de muestras se realizó en dirección opuesta al flujo, primero aguas abajo y después aguas arriba. Para el análisis de metales se tomó la muestra hasta el ras (que no contenga burbujas). Se colocaron los frascos tapados en un cooler con ice pack y luego fueron transportados al laboratorio, mismo procedimiento se siguió para todas las muestras que necesitaron refrigeración. Los frascos fueron rotulados, se colocó el código de la estación, fecha y hora en que se tomó la muestra.

Muestreo de Flora Acuática

Se tomó sobre macrófitos emergentes que contienen porciones que permanecen permanentemente sumergidas, pero que no estén contaminadas por sedimentos del fondo. Se cortó el tallo por debajo del nivel del agua y/o se recogió la planta entera si era pequeña; se guardó la planta o el trozo cortado en una bolsa de plástico resellable.

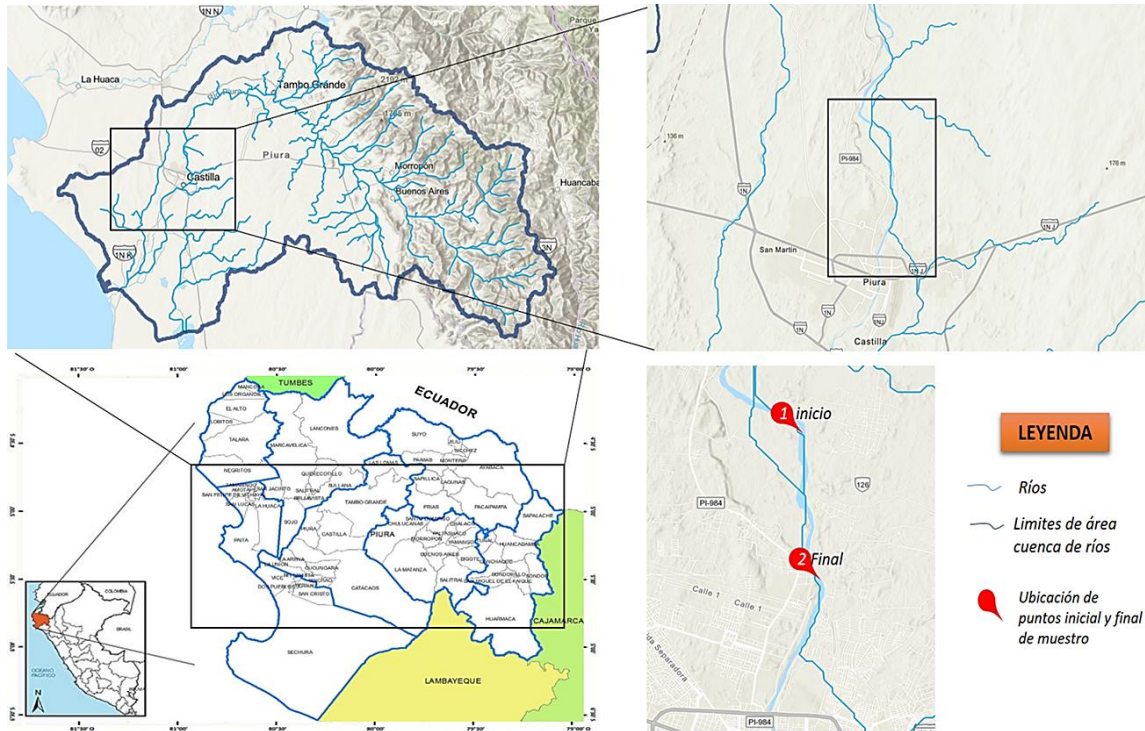


Figura 1. Ubicación de área del Río Piura evaluada.

En laboratorio se removió y agitó las plantas energicamente, durante 2 minutos, en un recipiente grande con agua destilada para eliminar todos los organismos fitobentónicos adheridos y restos inorgánicos. Se conservaron las muestras en bolsas resellables para su traslado al laboratorio para análisis de metales pesados.

Muestreo de Moluscos

Se colocó una red contra corriente en zonas con sustrato no consolidado, se removió el fondo de forma manual, con un esfuerzo y tiempo de muestreo estandarizado. Al final se colectaron todos los individuos atrapados en la red y se separaron según especie, rotulados y colocados en un cooler refrigerado. Traslados al laboratorio de Ecología de la Universidad Nacional de Piura, para determinar dieta y luego fueron congelados antes de ser transportados al laboratorio para el análisis de metales pesados.

Muestreo de Crustáceos

Se utilizaron redes manuales que son artes funcionales en pozas o zonas con poco flujo y calado; para recolectar camarones y otros crustáceos. El Cal Cal, permite mantener la base muy cerca del fondo del río, mientras se mueve la red hacia el espécimen o hábitat de interés, posteriormente se levanta la red con rapidez. La abertura de malla utilizada es el paño ciego (< 3 mm).

Se complementó el muestreo mediante la búsqueda intensiva de los organismos debajo de ramas, piedras de diverso tamaño, troncos o cañas huecas. Todo el material colectado se colocó en bolsas plásticas, luego se trasladó al laboratorio de ecología para análisis de contenido estomacal y extracción de músculos, que fueron congelados

para posterior análisis de metales pesados.,

Muestreo de Peces

Se realizó inspección y evaluación de las características del sitio potencial de monitoreo y grado accesibilidad del mismo. Se identificó el hábitat disponible para el muestreo. Además, se visualizó si en la columna de agua se presenta algún tipo de arrastre de material: árboles, ramas, basura, etc. Una vez evaluada las características del sitio, se eligió el arte o método de pesca, según las dificultades que se presentan al momento de colocar o utilizar las redes de colecta

Las redes de enmalle que se utilizaron fueron de Nylon, con abertura de malla de 1". Se ubicaron en zonas paralelas o perpendiculares a la orilla, siempre cuidando no existan elementos que puedan enredarse o dañar la red. Cada extremo de la red se amarró a una superficie fija (ejm. árboles, arbustos, piedras de gran tamaño, etc.).

Las atarrayas son redes circulares con plomos ordenados en la parte externa de la malla con líneas secundarias que se unen a una principal o "madre", esta es sujeta por la persona que realiza el lanzamiento. El tiempo y número de lanzamientos por estación se determinó en función de la captura. Se utilizó en lugares abiertos, sin interferencia al momento de lanzar o extraer la red (Zale et al., 2012).

Las redes manuales tipo Cal Cal, se utilizaron en pozas o zonas de orilla con poco flujo y calado; se emplearon para colectar peces pequeños. Se mantiene la base de la red muy cerca del fondo mientras se mueve hacia el espécimen o hábitat de interés, para posteriormente levantar la red con rapidez. Esta técnica se utilizó como complemento de los otros métodos de captura. La abertura de malla de este tipo de redes es pequeña (< 3 mm).

Además, complementariamente se utilizó la captura que realiza la pesca de subsistencia que se desarrolla en el río Piura, básicamente utilizan para la captura redes de enmalle, línea de mano y atarraya. Los peces de las especies que no contábamos aun como muestra se adquirieron de estos pescadores.

Muestreo de Anfibios

Para la captura de anfibios se prospectaron los microhábitats existentes (pozas, remansos, vegetación ribereña, troncos y otros tipos de hábitats). En cada microhábitat se realizaron 5 sesiones de búsqueda intensiva de 5 minutos de duración cada una, empezando aguas abajo. Durante estos muestreos se buscaron individuos adultos que se refugian durante el día en lugares frescos cercanos al curso de agua, incluyendo la vegetación de las orillas, las cuales también fueron prospectadas.

Parte de los individuos capturados fueron liberados y los que formaron parte de la muestra fueron trasladados al laboratorio de ecología, para determinar sus hábitos alimenticios a través del estudio de su contenido estomacal, luego fueron congelados antes de ser trasladados al laboratorio para el análisis de metales pesados.

Muestreo de Aves

Las aves capturadas provinieron de la actividad de cetrería, para ello se contó con el apoyo profesional de personal que trabaja en el rubro, quienes realizan actividades de control biológico en empresas dedicadas a la crianza de langostino y estas aves se comportan como aves plaga al afectar los rendimientos de producción en los cultivos, para efectos de la muestra se tomaron aquellas aves atrapadas por los rapaces y que provenían del río Piura.

Se analizó el tracto digestivo de cada especie, para conocer sus hábitos alimenticios y se les extrajo músculos, los cuales fueron dispuestos en bolsas resellables, rotulados y congelados. Cada muestra debidamente rotulada se transportó al laboratorio para el análisis de metales pesados.

Procedimientos de Laboratorio

Preparación de las muestras de pescado, moluscos, aves, anfibios, sedimentos, vegetal y agua para medición por absorción atómica, The Perkin-Elmer Corporation, 1996.

Muestras de pescado: para medir Cr, Cu, Cd, Pb y Hg con método de calcinación y método de absorción atómica a la llama:

a) Se pesó con una balanza gramera digital CAMRY EK9620K (sensibilidad: 0,01 g), 25 g de tejido húmedo seccionado con un cuchillo en partes pequeñas en una placa de vidrio y dejarla en una estufa, Ecocell modelo 22-Ecoline (Alemania), por 6 horas a 70 °C. Se transfirió el contenido a un crisol de porcelana de 60 mL y se continuó el secado por 4 horas a 130 °C.

b) Se pesó con una balanza UXILAI SCIENTIFIC (sensibilidad: 0,001 g, USA), en un crisol de porcelana, entre 2 a 5 g del material seco de (a) previamente molido en un mortero

c) Se colocó el contenido de (b) en una mufla

Biobase modelo MC5-12-VMC y calentar a 400 °C por espacio de 12 horas

d) Se enfrió el contenido de (c) con la ayuda de un desecador Tecnal modelo BDB010 470×370×510 mm y se disolvió la ceniza con 5 mL de HNO₃ (1:1), luego se evaporó lentamente en una plancha calefactora casi a sequedad.

e) Se colocó el crisol de (d) en la mufla por 1 hora a 400 °C, para obtener cenizas limpias.

f) El contenido de (e) se disolvió adecuadamente con ácido nítrico al 1,0 % (v/v) y se transfirió a una fiola Kyntel de 25 ml, se filtró y se aforó con ácido nítrico de 1,0%.

g) El contenido de (f) fue medido en el espectrofotómetro de absorción atómica a la llama ice 3400 AAS [Perkin Elmer Corporation, USA] para cuantificar Pb, Cd, Cu y Cr según la curva de calibración que le corresponda.

Método de absorción atómica con equipo de vapor frío para medir mercurio

Se acondicionó el equipo de vapor frío al espectrofotómetro de absorción atómica ice 3400 AAS [Perkin Elmer Corporation, USA]. Listos los reactivos de borohidruro de sodio, permanganato de potasio 3 M y la solución blanco de ácido nítrico al 1% (v/v) se procedió a equilibrar el equipo de vapor frío con gas nitrógeno de alta pureza.

Encendido el equipo de absorción atómica sin llama y programado para evaluar el mercurio se midió el blanco y las soluciones estándar cuyas concentraciones fueron de 10,0, 20,0 y 30,0 µg/L.

Muestras de anfibios, aves, crustáceos y moluscos

Se midieron los elementos de Pb, Cr, Cd, Cu y Hg de una manera similar a como se ha trabajado las muestras de peces.

La muestra de agua se acidificó con ácido nítrico, luego se filtró y se midió los elementos de Pb, Cr, Cd, Cu y Hg de una manera similar a la que midieron las muestras de peces.

Sedimento: se secó en estufa, luego se acidificó con ácido nítrico y se filtró, se midió los elementos de Pb, Cr, Cd, Cu y Hg de una manera similar a como se leyó las muestras de peces.

Muestreo de vegetales

a) Se pesaron 5,0 g de vegetal húmedo en partes pequeñas en una placa de vidrio y se dejó en una estufa por 3 horas a temperatura de 60 °C.

b) Se pesó en un crisol de 0,2 a 0,5 g del material seco de (a).

c) Se colocó el contenido de (b) en un matraz y adicionar 15 mL de ácido nítrico concentrado, se dejó reposar durante toda la noche.

d) Luego se calentó en una plancha a una temperatura de 220 °C hasta que cesó la producción de vapores rojos.

e) Se enfrió y agregaron 2 mL de ácido perclórico al 70%, se calentó nuevamente y se dejó evaporar a un pequeño volumen.

f) El contenido de (e) se disuelve adecuadamente con ácido nítrico al 1,0 % (v/v) y transferir a una fiola de 25 mL, se filtra y se afora con el ácido nítrico de 1,0%

g) El contenido de (f) fue medido en el espectrofotómetro de absorción atómica a la llama para cuantificar Pb, Cd, Cu y Cr según la curva de calibración que le corresponda.

Método de calcinación

(a) Se pesaron 25,0 g de tejido húmedo seccionado con un cuchillo en partes pequeñas en una placa de vidrio y se dejó en una estufa por 6 horas a 70 °C. Se transfirió el contenido a un crisol de 60 mL y se continuó el secado por 4 horas a 130 °C.

(b) Se pesó en un crisol de 2 a 5 g del material seco de (a) previamente molido en un mortero

(c) Se colocó el contenido de (b) en una mufla y se calentó a 400 °C por 12 horas.

(d) Enfriado el contenido de (c) con la ayuda de un

deseCADOR, se disolvió la ceniza con 5 mL de HNO₃ (1:1), luego se evaporó lentamente en una plancha casi a sequedad.

(e) Se colocó el crisol de (d) en la mufla por 1 hora a 400 °C, para obtener cenizas limpias.

(f) El contenido de (e) se disolvió adecuadamente con ácido nítrico al 1,0 % (v/v) y se transfirió a una fiola de 25 mL, se filtró y se aforó con ácido nítrico de 1,0%.

(g) El contenido de (f) fue medido en espectrofotómetro de absorción atómica a la llama para cuantificar Pb, Cd, Cu y cromo. La cuantificación de Hg se realiza con el mismo espectrofotómetro de absorción atómica, pero con la técnica adicional de vapor frío.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se caracterizaron los metales pesados en agua y sedimentos en el tramo evaluado del río Piura Tabla 1. Se puede observar que para el agua, Cu, Cr y Hg se encuentran por encima de los límites permisibles (Figura 2 (a), (b) y (c)), para sedimento lo hacen Cu y Hg (Figura 2 (d) y (e)).

Con respecto a la caracterización de los niveles de metales pesados en los componentes de flora y fauna del río Piura, en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de las muestras procesadas, a través de ello podemos observar que los metales evaluados están por encima de los límites en las especies estudiadas y que los procesos de bioacumulación y biomagnificación están operando el río Piura.

Eichornia crassipes "Jacinto de agua", ocupa el nivel de productores, presenta por encima de los límites permisibles Pb y Cr; *Pisidium sp.* molusco que actúa como consumidor primario, tiene a Pb, Cu, Cd y Cr; *Cherax quadricarinatus* crustáceo introducido, que habita actualmente en el río Piura, tiene Pb, Cu y Cr. Los anfibios estuvieron representados por *Rhinella marina* en el cual se encontraron excedidos los valores de Pb, Cd y Cr.

Para el caso de los peces, componente importante en la trama trófica del río Piura, hay metales que se exceden en el límite en casi todas las especies evaluadas como Pb; excepto *Trycomycterus punctulatum piurae* y Cd, excepto *Trycomycterus punctulatum piurae* y *Pimellodella yuncensis*, otros que están por debajo del límite en todas las especies, caso Hg y otros con presencia en diferentes niveles y solo excedido del límite en especies como el Cu en *Liposarcus pardalis*, *Rhoadsia altipinna*, *Trycomycterus punctulatum piurae* y *Mugil cephalus* y Cr en *Liposarcus pardalis*, *Brycon atrocaudatus*, *Rhoadsia altipinna*, *Parachromis managuensis* y *Mugil cephalus*.

Para el caso de las aves, la mayoría de ellas consumidores finales en la trama trófica del río Piura, algunos metales que se exceden en el límite

para todas las especies evaluadas, como Pb, Cr y Hg, otros que están por encima del límite, caso Cu en *Egretta thula* y Cd en *Phalacrocorax brasilianus* y *Leucophaeus pipixcan*.

Con respecto a la movilización de los metales pesados en la trama trófica del río Piura, en la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con el nivel trófico que ocupa el organismo, podemos observar que los metales pesados presentan mayores concentraciones en los organismos que ocupan niveles tróficos más altos, lo que está confirmando que está ocurriendo bioacumulación y biomagnificación. En relación a los primeros niveles tróficos, se evaluó a *Eichornia crassipes* "Jacinto de Agua", productor que supera los límites para Pb y Cr. *Pisidium sp.* bivalvo filtrador, que se alimenta de material en suspensión y fitoplancton, tiene a Pb, Cu, Cd y Cr por encima de los límites permisibles y con valores en relación con los productores mucho mayores. *Cherax quadricarinatus* crustáceo que se alimenta de material sedimentado, detritus y plancton, presenta por encima de los límites permisibles Pb, Cu y Cr, con valores mayores al nivel trófico anterior.

Los peces herbívoros ocupan el primer nivel de consumidores, casi todos se exceden en Pb y Cd; Hg por debajo del límite en todos, y otros metales solo fuera del límite en algunas especies, como Cu en *Liposarcus pardalis*, *Rhoadsia altipinna*, *Trycomycterus punctulatum piurae* y *Mugil cephalus* y Cr en *Liposarcus pardalis*, *Rhoadsia altipinna* y *Mugil cephalus* (Figura 7).

Los peces carnívoros ocupan el segundo y tercer nivel de consumidores, todos se exceden en Pb y Cd; Hg está por debajo del límite en todos y Cr solo excedido en *Brycon atrocaudatus* y *Parachromis managuensis* (Figura 7). *Rhinella marina* se alimenta básicamente de insectos, por lo tanto, considerado consumidor secundario, se le encontraron excedidos los valores de Pb, Cd y Cr.

Tabla 1
Concentración de metales pesados en agua y sedimentos del río Piura

Nº	Muestra	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Hg (ug/kg)
1	Agua	<0,01	0,238	<0,01	0,157	0,208
2	Sedimento	7,26	14,12	0,44	0,18	4,78

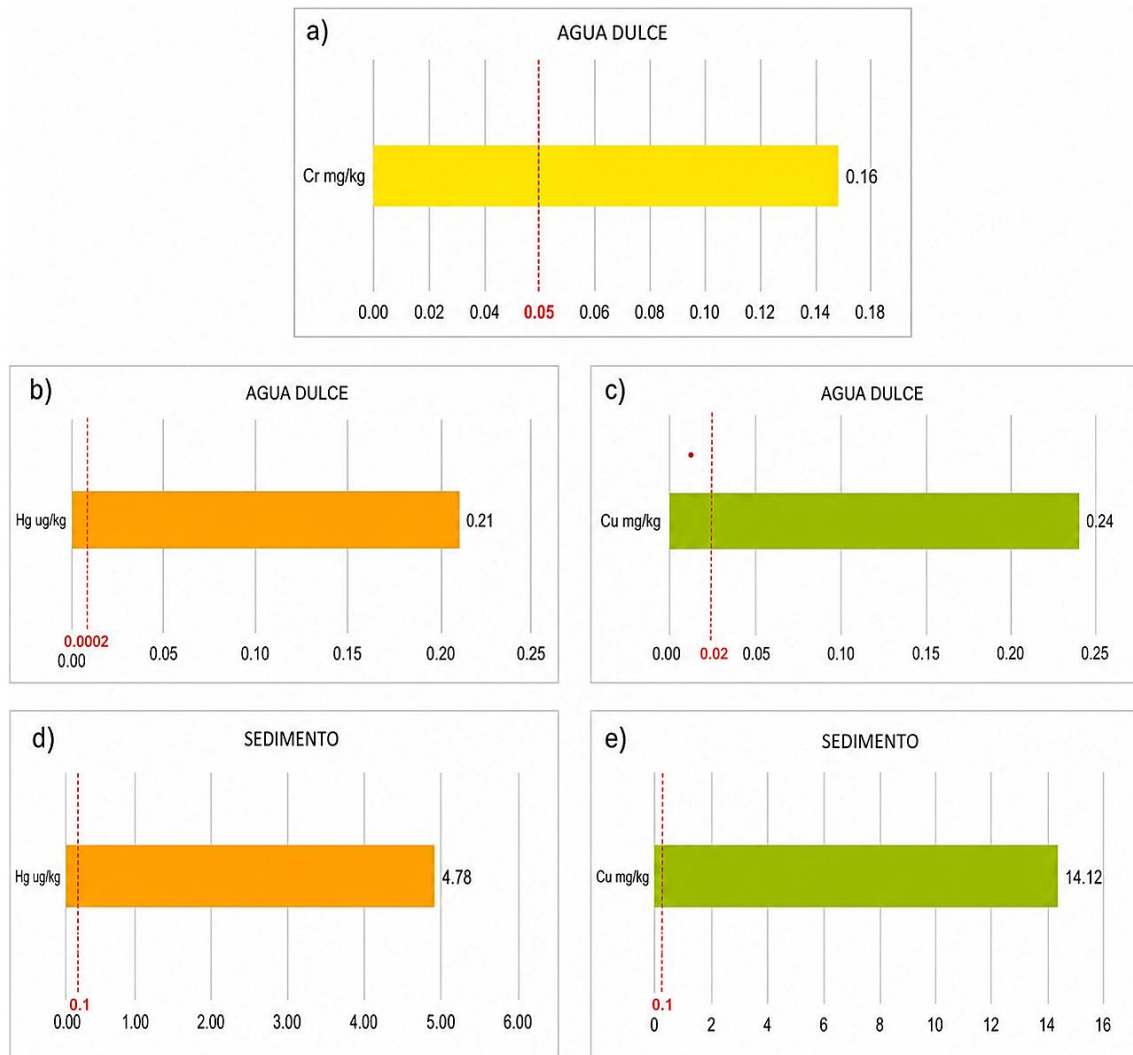


Figura 2. Niveles de metales pesados en agua y sedimentos (a) cobre en agua dulce (b) mercurio en agua dulce (c) cromo en agua dulce (d) mercurio en sedimento (e) cobre en sedimento.

Las aves, ocupan el segundo y tercer nivel de consumidores, Pb, Cr y Hg, están por encima del límite en todas las especies, Cu en *Egretta thula* y Cd en *Phalacrocorax brasilianus* y *Leucophaeus pipixcan*. Los valores más altos se observan en *Himantopus mexicanus*, *Larus belcheri* y *Phalacrocorax brasilianus* para el caso del Pb y *Leucophaeus pipixcan*, *Egretta thula*, *Larus belcheri* y *Phalacrocorax brasilianus*, para el Cu (Figura 6). Con respecto a las categorías tróficas en el río Piura, se pudo observar que estas corresponden a productores, detritívoros, herbívoros, omnívoros y carnívoros (Figura 3). La energía se mueve de los productores a los consumidores finales de modo unidireccional, ubicándose los niveles tróficos: productores, consumidores primarios, consumidores secundarios y consumidores terciarios (Figura 4), se trata de una trama trófica de cuatro niveles, lo que la hace más eficiente y con menor pérdida de energía en el sistema.

El 36,36% de las especies capturadas son consumidores de primer orden (predominantemente herbívoros), y pertenecen a los grupos taxonómicos: moluscos, crustáceos y peces, son los encargados de tomar la energía de los productores y ponerla a disposición de los siguientes niveles

tróficos. El 45,45% son consumidores de segundo orden y su dieta estuvo constituida principalmente por protozoos, insectos, crustáceos, moluscos y peces. El 18,18% de las especies restantes son consumidores de tercer orden (piscívoras) y pertenecieron a los grupos taxonómicos de peces y aves (Figura 5).

En Piura, las evidencias de contaminación por metales pesados en flora y fauna acuática son escasas. Las mayores concentraciones de metales con relación a los límites permisibles por componente se presentaron en agua Cu, Cr y Hg; sedimento Cu y Hg; fanerógamas acuáticas Pb y Cr; moluscos Pb, Cu, Cd y Cr; crustáceos Pb, Cu y Cr; peces Pb y Cd en casi todas las especies evaluadas; Cu en *Liposarcus pardalis*, *Trycomycter punctulatum piurae*, *Rhoadsia altipinna* y *Mugil cephalus*; Cr en *Liposarcus pardalis*, *Rhoadsia altipinna*, *Brycon atrocaudatus*, *Parachromis managuensis* y *Mugil cephalus*.

Para anfibios Pb, Cd y Cr y aves Pb, Cr y Hg en todas las especies evaluadas y Cu en *Egretta thula* y Cd en *Phalacrocorax brasilianus* y *Larus belcheri*.

Sierra et al. (2018) reportaron la presencia de Hg en plumas (840 ± 50 ng/g) de aves insectívoras, nectívoras y frugívoras en el parque natural Las

Orquídeas, Antioquia. Burgos et al. (2017) determinaron en la Bahía de Cispatá-Córdoba, cantidades de Hg en plumas de *Fregata magnificens* de 10190 ng/g, las cuales son inferiores a las concentraciones de Hg halladas en este estudio. Por otra parte, las mayores cantidades de Hg cuantificadas en sangre de *Dendrocygna autumnalis* (9,87±10,6 ng/mL) fueron inferiores a las obtenidas por Albuja et al. (2012) en 54 especies de aves silvestres asociadas a tres regiones mineras en Ecuador, con un valor máximo de 162,16 ng/mL.

El Pb es un metal pesado que se ha utilizado durante muchos años debido a su resistencia a la corrosión, ductibilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones. Es absorbido por inhalación, ingestión y a través de la piel (Bayona, 2009; Nava & Méndez, 2011). Las elevadas concentraciones pueden asociarse a los centros de mecánica automotriz rudimentarios, uso de combustibles, desgaste de neumáticos, lubricantes, pastillas para frenos, grasas y tráfico vehicular mediante los procesos de escurritía urbana (Trujillo & Torres, 2015). Estas actividades se observan en este entorno, debido a la cercanía de los centros urbanos y sus sistemas de transporte, lo que posibilita el movimiento del metal y su ingreso a la trama trófica del río Piura, más teniendo en cuenta que este atraviesa la ciudad de Piura y en él se vierten efluentes de diversa índole. Las principales vías de ingreso a los seres vivos son por inhalación de partículas de Pb generadas por combustión de algunos materiales y por ingestión de polvo, agua o alimentos contaminados (Zurera et al., 1987). Tiende a distribuirse en diferentes órganos, tejidos, huesos y dientes, donde se va acumulando con el paso del tiempo (Sanín et al., 1998). En la trama trófica del río Piura este elemento moviéndose entre sus niveles, si bien es cierto que en el agua su concentración (<0,01 mg/kg) está por debajo del límite permisible, no ocurre esto en los organismos, debido a los procesos de bioacumulación y biomagnificación.

Los organismos más afectados por este elemento incluyen varios grupos, para las aves la mayor concentración la tiene el pato cuervo (*Phalacrocorax brasilianus*), especie piscívora y que ocupa niveles tróficos superiores, la elevada concentración es obtenida por el consumo de especies que poseen el elemento, esto debido al proceso de biomagnificación. El Pb es un metal no esencial, con alta toxicidad, de importancia para la salud humana y ambiental; tiende a interactuar con el calcio, por lo cual se encuentra principalmente en plumas y huesos de aves (Estrada & Soler, 2015). Las cantidades de Pb halladas en *P. brasilianus* (31,22 mg/kg), pueden explicarse debido a aspectos puntuales en la ecología de la especie. En este sentido, los hábitos alimenticios de los individuos juegan un rol crucial en los procesos de bioacumulación y biomagnificación de contaminantes como los metales pesados. *P. brasilianus* es una especie de pato con hábitos alimenticios carnívoros, cuya dieta se basa mayoritariamente en peces y otros organismos acuáticos.

Otra especie con una elevada concentración de Pb es la cigüeñuela *Himantopus himantopus mexicanus* (18,72 mg/kg), ave que además de picotear en la superficie del agua en busca de alimento, también puede sumergir su cabeza en ella, e incluso remover el fondo con su pico, haciendo un movimiento lateral de su cabeza para conseguir su alimento, como los sedimentos poseen Pb (7,26 mg/kg) a parte de la dieta, otra fuente de ingreso de este elemento es a través de la ingesta de parte del fango con el alimento. Algunas aves utilizan gastrolitos, que ayudan a la digestión mecánica pero no resultan indispensables para la misma. Los gastrolitos también se encontraron en algunas aves piscívoras como el pingüino de Adelia (*P. adeliae*) González & Barbeito, 2014. Estos son otra fuente de Pb, más en aquellas aves que ingieren partículas de Pb para utilizarlas como gastrolitos.

Tabla 2

Concentración de metales pesados en las diferentes especies que componen la trama trófica del río Piura

Grupo Taxonómico	Especies	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Hg (ug/kg)
Vegetal	<i>Eichornia crassipes</i>	1,2019	9,5962	<0,01	1,3269	<0,01
Moluscos	<i>Pisidium sp.</i>	17,6667	70,125	3,2292	2,5417	<0,01
Crustáceos	<i>Cherax quadricarinatus</i>	6,9286	52,8214	0,3214	2,125	<0,01
Peces	<i>Mugil cephalus</i>	3,342	11,392	0,108	1,017	0,065
	<i>Oreochromis niloticus</i>	3,984	6,944	0,113	0,508	0,125
	<i>Parachromis managuensis</i>	7,79	2,895	0,121	3,734	0,043
	<i>Andinoacara rivulatus</i>	4,133	3,883	0,15	0,858	0,072
	<i>Brycon atrocaudatus</i>	7,108	6,192	0,208	8,625	0,102
	<i>Pseudocurimata troscheli</i>	3,092	6,833	0,108	0,892	0,053
	<i>Chinchaysuyoa labiata</i>	5,96	2,613	0,129	0,694	0,159
	<i>Rhoadsia altipinna</i>	6,487	30,921	0,289	16,974	0,118
	<i>Liposarcus pardalis</i>	2,07	16,656	1,516	5,602	0,062
	<i>Centropomus nigrescens</i>	0,75	8,5	<0,01	0,7167	<0,01
	<i>Pimelodella yuncensis</i>	1,9688	7,5	<0,01	<0,01	<0,01
	<i>Trycomycterus punctulatum piurae</i>	<0,01	30,7308	<0,01	<0,01	<0,01
Amphibios	<i>Rhinella marina</i>	14,4643	63,25	0,1429	4,6786	<0,01
Aves	<i>Larus belcheri</i>	15,419	14,674	0,233	6,064	0,049
	<i>Leucophaeus pipixcan</i>	1,727	14,267	3,68	16,513	0,06
	<i>Spatula cyanoptera</i>	1,5	16,823	0,427	0,805	0,043
	<i>Himantopus mexicanus</i>	18,725	11,092	0,325	1,625	0,044
	<i>Egretta thula</i>	2,427	40,885	0,167	1,021	0,03
	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	31,275	16,892	1,167	3,042	0,019
	<i>Ardea alba</i>	2,964	15,964	0,196	0,741	0,052

Tabla 3

Concentración de metales pesados en las diferentes especies que componen la trama trófica del río Piura de acuerdo al nivel trófico que ocupan

Nivel trófico	Taxón	Especies	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Hg (ug/kg)
Productor	Vegetales	<i>Eichornia crassipes</i>	1,2019	9,5962	<0,01	1,3269	<0,01
	Moluscos	<i>Pisidium sp.</i>	17,6667	70,125	3,2292	2,5417	<0,01
Consumidor primario	Crustáceos	<i>Cherax quadricarinatus</i>	6,9286	52,8214	0,3214	2,125	<0,01
		<i>Mugil cephalus</i>	3,342	11,392	0,108	1,017	0,065
	Peces	<i>Oreochromis niloticus</i>	3,984	6,944	0,113	0,508	0,125
		<i>Andinoacara rivulatus</i>	4,133	3,883	0,15	0,858	0,072
		<i>Pseudocurimata troscheli</i>	3,092	6,833	0,108	0,892	0,053
		<i>Rhoadsia altipinna</i>	6,487	30,921	0,289	16,947	0,118
		<i>Liposarcus pardalis</i>	2,07	16,656	1,516	5,602	0,062
	Amphibios	<i>Rhinella marina</i>	14,4643	63,25	0,1429	4,6786	<0,01
Consumidor secundario	Peces	<i>Parachromis managuensis</i>	7,79	2,895	0,121	3,734	0,043
		<i>Brycon atrocaudatus</i>	7,108	6,192	0,208	8,625	0,102
		<i>Chinchaysuyoa labiata</i>	5,96	2,163	0,129	0,694	0,159
		<i>Pimelodella yuncensis</i>	1,9688	7,5	<0,01	<0,01	<0,01
		<i>Trycomycterus punctulatum piurae</i>	<0,01	30,7308	<0,01	<0,01	<0,01
		<i>Centropomus nigrescens</i>	0,75	8,5	<0,01	0,7167	<0,01
	Aves	<i>Larus belcheri</i>	15,419	14,674	0,233	6,064	0,049
		<i>Leucophaeus pipixcan</i>	1,727	14,267	3,68	16,513	0,06
		<i>Spatula cyanoptera</i>	1,5	16,823	0,427	0,805	0,043
		<i>Himantopus mexicanus</i>	18,725	11,092	0,325	1,625	0,044
Consumidor terciario	Aves	<i>Egretta thula</i>	2,427	40,885	0,167	1,021	0,03
		<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	31,275	16,892	1,167	3,042	0,019
		<i>Ardea alba</i>	2,964	15,964	0,196	0,741	0,052

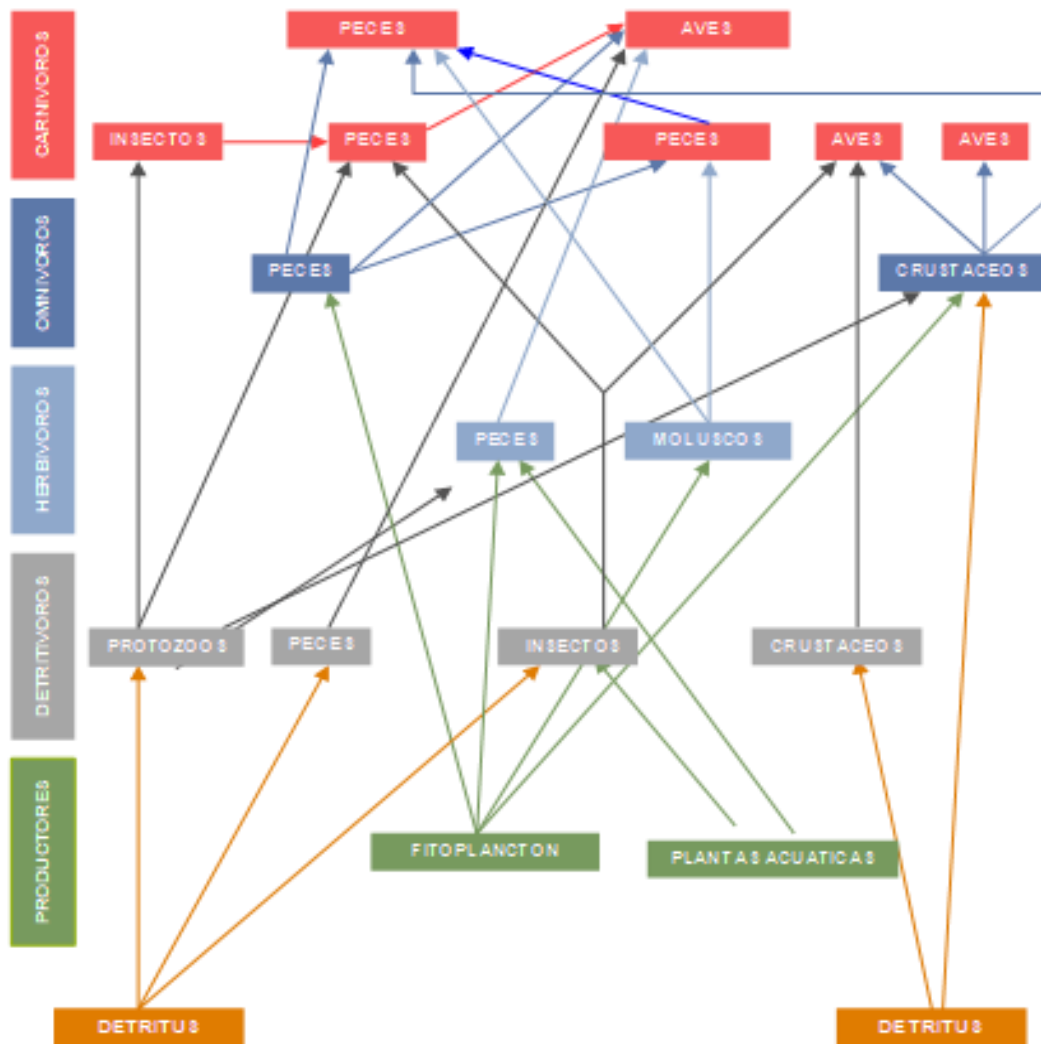


Figura 3. Categorías Tróficas de la fauna acuática del río Piura.

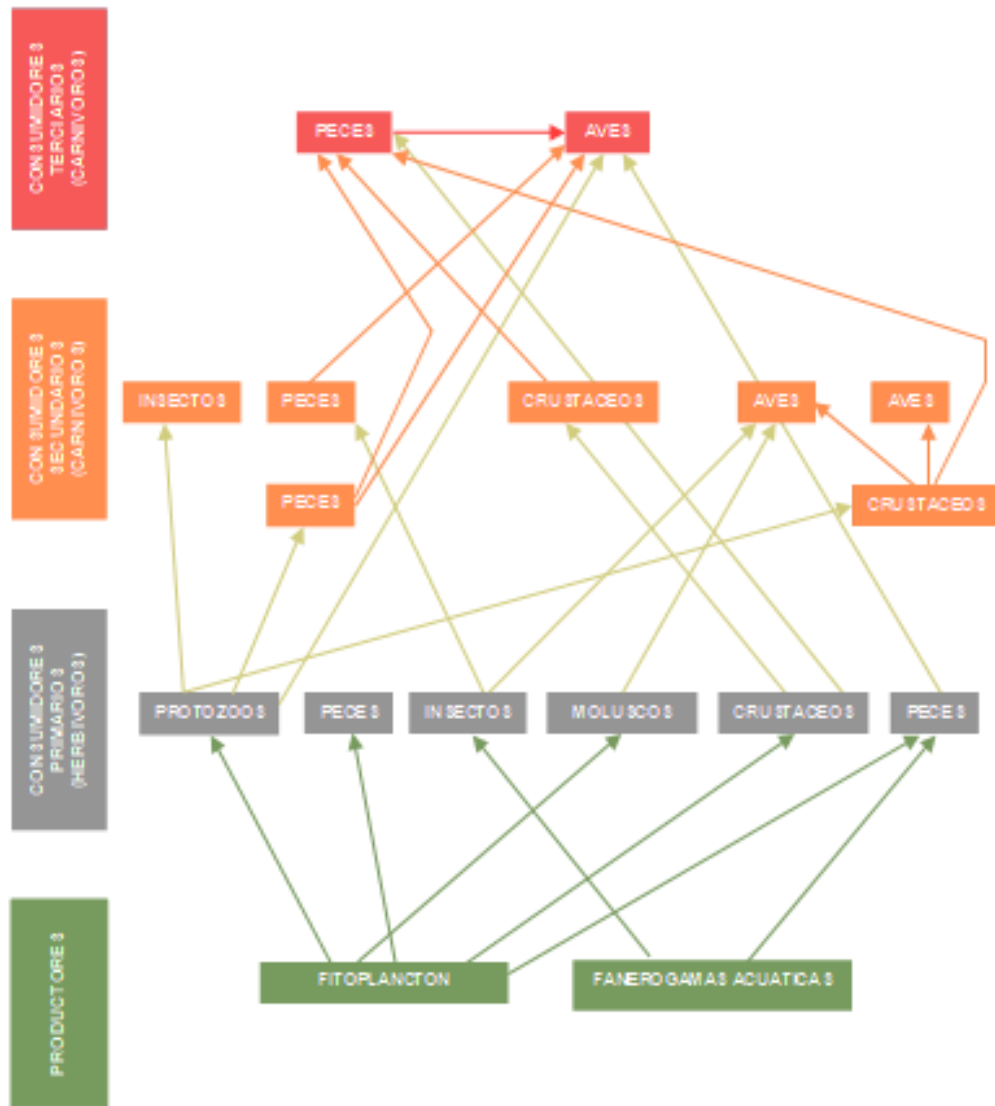


Figura 4. Niveles tróficos de la fauna acuática del río Piura.

En las aves se exagera el problema de la intoxicación con Pb, por el efecto combinado de dos factores: la conformación de su sistema digestivo, y por la elevada facilidad con la que las aves silvestres pueden hallar e ingerir objetos de Pb. Con respecto al primer factor, el estómago está dividido en dos partes: el estómago glandular (proventrículo) en donde se produce HCl y enzimas para la digestión y el estómago muscular (ventrículo) en el que muchas especies almacenan guijarros (gastrolitos) con las que muelen los alimentos (Suárez & Urios, 1999). Otra especie que presentó una alta concentración de Pb fue *Larus belcheri* (15,41 mg/kg), especie carnívora con una dieta generalista que incluye peces, crustáceos, insectos, por lo que se atribuyen los niveles de Pb a la ingesta de sus presas.

En aves silvestres, en particular en las acuáticas (patos, cisnes, ansares y flamencos), es donde el problema es más grave en términos numéricos. En España se calcula que mueren anualmente entre 30 - 50 mil aves (Guitart & Mateo, 1997), si bien es cierto en nuestro estudio no hemos evaluado la tasa de mortalidad por efecto de los problemas de salud generados por los niveles de Pb en ellas, debe ser

un factor a tener en cuenta a fin de evaluar el impacto que están generando estos elementos en la trama trófica del río Piura.

La intoxicación por Pb, además de signos neurológicos y hematológicos, causa trastornos gastrointestinales como regurgitación, vómito, diarrea y anorexia, entre otros efectos como emaciación, hipoproteïnemia, poliuria, polidipsia y biliverdinuria (Redig & Arent, 2008), teratogénesis y muerte embrionaria (Lightfoot & Yeager, 2008). Las consecuencias en aves expuestas a concentraciones subletales de metales pesados se relacionan con alteración en la reproducción, cambios del comportamiento, disminución de tamaño, peso y alteración en la embriogénesis (Tsipoura et al., 2011; Zhang & Ma, 2011). Los metales pesados han sido reconocidos como genotóxicos, ya que tienen efectos perjudiciales sobre el ADN y, además, han sido documentadas mutaciones en la línea germinal en aves y mamíferos en áreas industriales (Eeva et al., 2006). Se presentó también altos niveles de Pb en el molusco *Pisidium* sp. (17,66 mg/kg), organismo que vive enterrado en el sedimento y que se alimenta por filtración, ingestas mayores

provenirán de las partículas de sedimento que ingresan con el alimento (fitoplancton). Para que el Pb ingerido resulte peligroso, hay que considerar cuatro factores: dosis, frecuencia de ingestión, tiempo de permanencia en el estómago, y pH gástrico (el plomo metálico se ve mejor en medio ácido) (Suárez & Urios, 1999).

El impacto adverso de las actividades antropogénicas sobre la biodiversidad se manifiesta cada vez con mayor notoriedad, y en la actualidad, los anfibios destacan como el grupo de vertebrados más susceptible a nivel global, constituyendo aproximadamente el 41% de todas

las especies afectadas (Goessens et al., 2022). Factores tales como enfermedades emergentes, degradación de su hábitat, introducción de especies no nativas y contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos han sido identificados como determinantes significativos de esta amenaza (Deknock et al., 2022). En vista de estas amenazas identificadas, resulta de vital importancia evaluar la influencia y magnitud de sus efectos sobre las poblaciones de anfibios, con el propósito de contribuir al desarrollo de estrategias adecuadas para su gestión y conservación (Jayawardena et al., 2021).

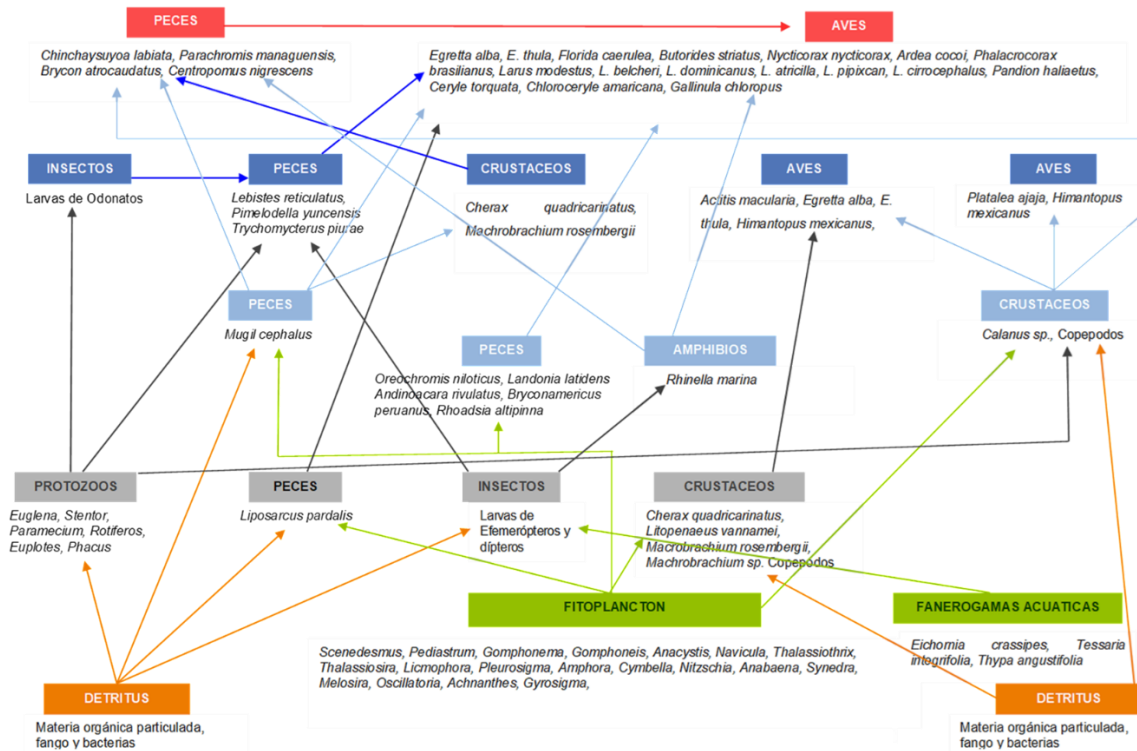


Figura 5. Niveles tróficos de la fauna acuática del río Piura.

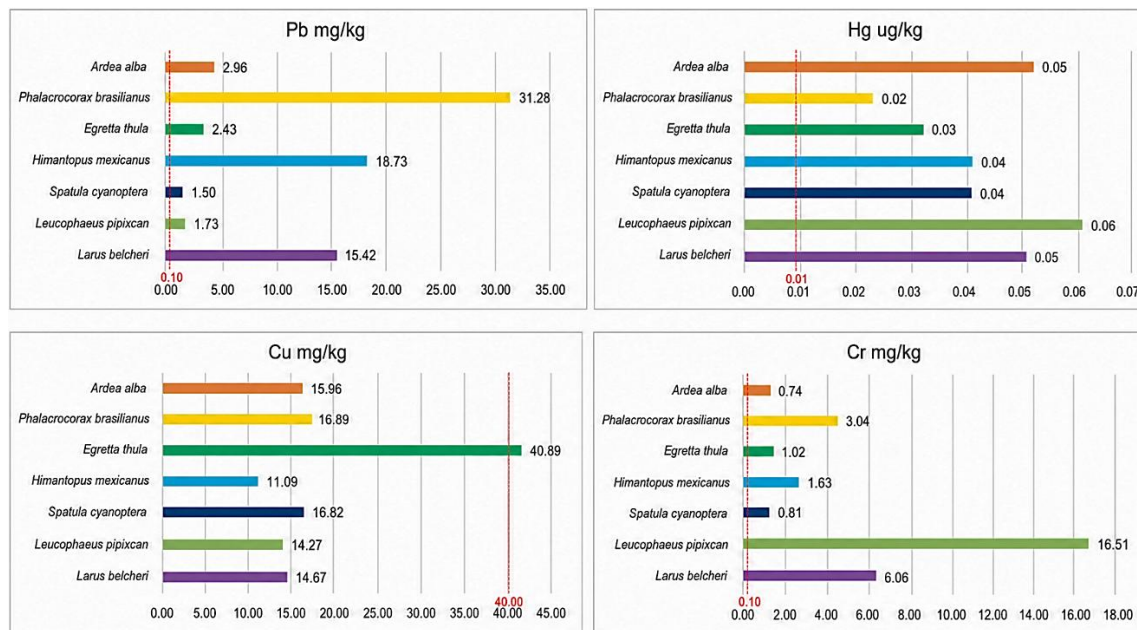


Figura 6. Niveles de plomo (Pb), mercurio (Hg), cobre (Cu) y cromo (Cr) en aves del río Piura y su grado de desviación en relación al límite permisible.

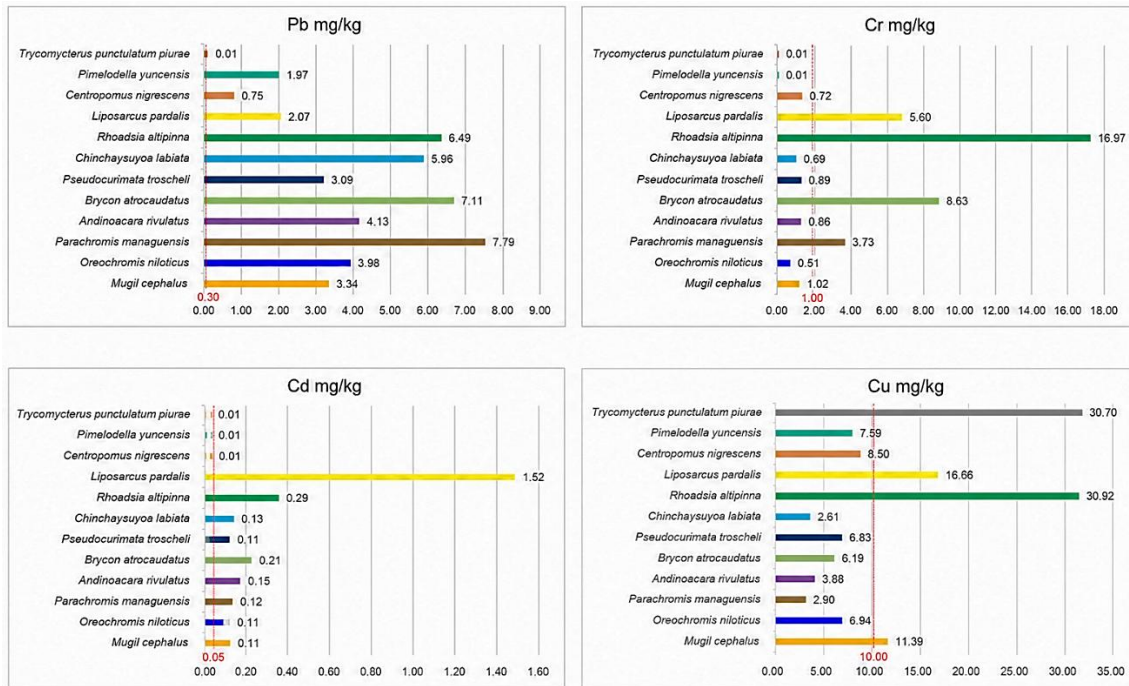


Figura 7. Niveles de plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y cobre (Cu) en peces del río Piura y su grado de desviación en relación al límite permisible.

Debido a su incapacidad para degradar, los metales pesados demuestran una marcada persistencia en el entorno natural, lo que resulta en su acumulación en una diversidad de tejidos corporales de los anuros, que incluyen, entre otros, pulmones, hígado, riñones, huesos, órganos reproductores y sistema inmunológico (Jayawardena et al., 2017). Esta acumulación de metales pesados en los tejidos corporales de los anfibios da lugar a la iniciación de procesos asociados al desarrollo de cáncer, mutaciones genéticas y malformaciones congénitas (Zhelev et al., 2020).

Además, las alteraciones en los parámetros morfofisiológicos fundamentales de los anfibios, permiten su utilización como indicadores biológicos informativos en la evaluación de la contaminación ambiental (Zhang et al., 2018). En el río Piura el anfibio *Rhinella marina* presenta una elevada concentración de Pb (14,46 mg/kg), el contacto con los sedimentos y la ingesta de especies que presentan Pb determina que esta especie resulte fuertemente afectada por concentraciones altas del elemento, por lo que será necesario evaluar impactos que se están generando en esta especie.

Los peces se encuentran en la parte superior de la cadena alimentaria de los ecosistemas acuáticos, por ende, pueden acumular grandes cantidades de metales pesados procedentes de alimentos, agua y sedimento (Zhao et al., 2012). Por lo tanto, los peces frecuentemente son utilizados como indicadores biológicos para conocer los niveles de metales pesados en donde habitan y para evaluar los riesgos ecológicos ocasionados por las descargas de desechos antropogénicos (Zhou et al., 2008), de igual forma, esta problemática se ha convertido en un tema de interés mundial, no sólo por la amenaza para los peces, sino también, por los

riesgos de salud para los consumidores frecuentes (Rahman et al., 2012). Para el río Piura, los peces que presentaron mayores concentraciones de Pb, fueron *Parachromis managuensis* (7,79 mg/kg) y *Brycon atrocaudatus* (7,10 mg/kg), ambas especies carnívoras y que ocupan los últimos niveles de consumidores. Hay que resaltar que estas especies son utilizadas en la alimentación por pobladores de los caseríos asentados a lo largo de ambas riberas del río, lo que está ocasionando que el Pb pase de las cadenas tróficas acuáticas a las terrestres, siendo necesario evaluar el impacto en estas poblaciones.

Estos resultados indican que hay movilización de metales pesados desde el sedimento a la fauna evaluada del río Piura. Esto es variable entre las especies, el Cu, oligoelemento encontrado en la corteza terrestre de forma natural en rocas y minerales, es esencial para procariontas y eucariotas (Flemming & Trevors, 1989). En el agua el Cu debe estar en una concentración < 1 300 ppb y en el sedimento entre 2 - 250 ppm, cerca de minerías los valores del Cu se llegan a encontrar en 17 mil ppm (Olivares et al., 2010). Los bivalvos son filtradores herbívoros, en el que su dieta consiste en fitoplancton, materia orgánica muerta y detritus, son organismos bentónicos. Por su tipo de alimentación los lleva a ser bioindicadores por su exposición a los metales presentes en sedimento y agua, ya que los metales se fijan en los tejidos de estos organismos (bioacumulación) (Byeong et al., 2006).

Para conocer los efectos de contaminantes en los organismos acuáticos, los moluscos son un modelo perfecto, porque se hace un análisis al tejido y se podrá tener un valor cuantitativo del elemento deseado (Brown & Luoma, 1995). Para el río Piura, la almeja de agua dulce *Pisidium sp.* posee el valor

más alto de Cu (70,12 mg/kg), corroborando lo mencionado por los autores, siendo los moluscos indicadores por excelencia del estado de contaminación de los cuerpos de agua, en este caso específico el río Piura.

Existen sospechas de que las intoxicaciones en poblaciones naturales de anfibios son muy frecuentes, siendo ésta una de las causas importantes de declives puntuales de poblaciones silvestres (Whitaker & Wright, 2019). La toxicosis del Cu es un trastorno metabólico que puede causar insuficiencia hepática crónica y problemas neurológicos que resultan de desviaciones de los niveles normales de Cu en el cuerpo. En larvas de anfibios, debido a su tamaño, los niveles de Cu son prácticamente imposibles de detectar, pero sí la reacción hepática que se ha visto en este caso. En anfibios, si bien una elevación de Cu ambiental se ha descrito como estimulante del crecimiento en larvas de rana leopardo meridional *Lithobates sphenoccephalus* (Lance et al., 2012), en este mismo estudio se indica que niveles demasiado altos provocan mortalidad. En otros experimentos con larvas de rana leopardo septentrional *Lithobates pipiens*, las dosis crecientes de Cu en el agua afectaron al desarrollo, crecimiento, tiempo de metamorfosis y, en última instancia, supervivencia de los individuos (Chen et al., 2007; Leduc et al., 2016). La segunda especie con mayor concentración de Cu es *Rhinella marina* (63,25 mg/kg), anfibio que se encuentra durante el día debajo de rocas, ramas, troncos y durante la noche ingresa al agua para alimentarse, dependiendo su dieta básicamente de insectos, por lo que a través del agua, sedimento y dieta está incorporando este elemento.

A parte de la actividad minera informal, el Cu aplicado en forma de sales inorgánicas, como se hace en agricultura, es muy soluble en agua. El origen de esta cantidad anómala de Cu puede estar relacionado con la transferencia de filtraciones de sulfato de cobre utilizado como fitosanitario en los campos destinados al cultivo de vid, o incluso un vertido accidental de este compuesto durante el lavado de utensilios agrícolas contaminados.

El desarrollo de los procesos de industrialización del mundo moderno trae como consecuencia la liberación de desechos que se incorporan al ecosistema, muchos de ellos son considerados altamente tóxicos para los organismos acuáticos, como es el caso de los iones de los metales pesados, los cuales son un grupo de elementos químicos biológicamente activos y de baja abundancia en las aguas naturales. Algunos metales traza, como Fe, Mn, Zn, Cu y Co, son nutrientes esenciales que sirven como co-factores de numerosas enzimas, pero Cu, Co y Zn son también tóxicos en altas concentraciones (Department of Energy, 1987).

La mayor concentración de Cu en los crustáceos decápodos se encuentra en hepatopáncreas y en sangre, donde forma parte del pigmento respiratorio o hemocianina (Bryan, 1968). Las sales de muchos metales pesados poseen ciertas propiedades biocidas (Waldichuk, 1974). El sulfato de cobre es un poderoso alguicida, de uso generalizado en acuicultura y en el tratamiento de

agua para consumo humano, tanto para el control de la vegetación acuática indeseable, como en la inducción de la muda en los camarones y langostinos adultos en la camaricultura. La toxicidad aguda del Cu difiere grandemente de acuerdo al nivel trófico del organismo y al estadio de su ciclo de vida (Department of Energy, 1987). Para el río Piura, el tercer organismo con una concentración alta de Cu es el crustáceo *Cherax quadricarinatus* (52,82 mg/kg), especie introducida en nuestros sistemas naturales, que vive asociada al fondo y se alimenta de fitoplancton, detritos y restos orgánicos. Las concentraciones altas de Cu están relacionadas básicamente al hábitat y dieta, se atribuyen estos niveles de Cu, en parte a la minería informal, producción de langostinos en Chapaira, tratamiento de agua potable en la planta de Curumuy y a las empresas agroindustriales.

La utilidad de las aves como bioindicadores de contaminación ambiental ha sido reconocida en múltiples trabajos (Nam & Lee, 2006; Pan et al., 2008), debido a que estas ocupan distintos niveles tróficos en los ecosistemas, están ampliamente distribuidas y son sensibles a cambios del ambiente, permitiendo así monitorear la salud ambiental del ecosistema en el que habitan (Ek et al., 2004; Brown et al., 1997; Vásquez et al., 2013). En relación al Cu, el ave que presentó la mayor concentración fue *Egretta thula* (40,88 mg/kg); seguida de *Phalacrocorax brasilianus* (16,89 mg/kg); *Spatula cyanoptera* (16,82 mg/kg) y *Ardea alba* (15,96 mg/kg). El Cu es un elemento esencial para la síntesis de hemoglobina y sistemas enzimáticos. Las fuentes de Cu más habituales son algunos materiales de cocina, cables eléctricos, algunas telas, material para soldar y monedas. En medicina humana, la intoxicación por Cu recibe el nombre de enfermedad de Wilson; se trata de un problema metabólico debido a una alteración en el cromosoma 13. Esta enfermedad ha sido tratada con Zn, ya que poseen efectos antagónicos al Cu. Aunque no se ha podido demostrar que el Zn inhibe la acumulación de Cu en el hígado, sí inhibe la absorción de Cu intestinal en personas. Tanto en humanos como en animales el Cu absorbido se acumula en el hígado, parte regresa al intestino vía bilis y es eliminado en las heces; y parte pasa a sangre circulante y se elimina en la orina. Cuando el hígado se sobrecarga de este metal, el Cu se libera masivamente a la sangre produciendo una hemólisis severa (Martorell, 2009).

El Cu es un metal esencial, sin embargo, se ha podido observar que en altas concentraciones induce daños en aves como anemia, trastornos del crecimiento, respiratorios, carcinogénicos, reproductivos, gastrointestinales, hematológicos, hepáticos y endocrinos (Manjula et al., 2015).

Szymczyk & Zalewski (2003) reportan que el Cd es absorbido a través del sistema digestivo y respiratorio, formando complejos con las proteínas que facilitan su transporte y almacenamiento en órganos como hígado, riñones y en menores cantidades, páncreas, hueso e intestino. El Cd provoca efectos negativos como retraso en el crecimiento, descenso de la producción de huevos,

adelgazamiento de la cáscara del huevo y alteraciones comportamentales (Pérez et al., 2005). Cr y Cd son cancerígenos según la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC). La exposición al Cr puede causar cáncer de pulmón y de igual modo, la exposición al Cd puede aumentar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón, riñón, vejiga, mama y endometrio. Los metales pueden acumularse en las células de cerebro, hígado, riñón, corazón, páncreas, tejido muscular, huesos, sangre, entre otros, en complejos peptídicos llamados metalotieninas. Los metales pesados pueden además causar en el hombre problemas como ulceraciones en la piel, irritaciones gastrointestinales, aparición de cáncer, enfermedades degenerativas y provocar mutaciones genéticas (Mejía, 2006).

Los niveles de Cd son mayores que los obtenidos en otras investigaciones en diferentes individuos del género *Phalacrocorax* (Burger & Gochfeld, 2001; Gil et al., 2006; Cid et al., 2009). El Cd por encima de 3 µg/g de peso seco en hígado y riñón es indicador de un incremento en la exposición ambiental al Cd (Scheuhammer, 1987), lo cual sucede en el presente estudio. En Pakistán, Abbasi et al. (2015), encontraron concentraciones de 1,03 µg/g de Cd en *N. nycticorax*. En India, Manjula et al. (2015) reportaron concentraciones de Cd en *Egretta garzetta* de 1,55 y 1,54 µg/g en dos localidades distintas. Las concentraciones en las especies de garzas en el río Piura son hasta 4,7 veces superiores que las reportadas por estos autores. Se ha informado que en aves este metal es tóxico en concentraciones mayores a 3 µg/g, e incluso en concentraciones más bajas (0,1 - 2 µg/g) puede alterar los patrones de crecimiento y causar efectos letales, Burger, 2013. Para el río Piura las especies de aves que presentaron las mayores concentraciones de Cd son *Leucophaeus pipixcan* (3,68 mg/kg); *Phalacrocorax brasilianus* (1,167 mg/kg); *Spatula cyanoptera* (0,427 mg/kg); *Himantopus mexicanus* (0,325 mg/kg) y *Larus belcheri* (0,233 mg/kg). El Cd produce afectación pulmonar y renal, osteomalacia y osteoporosis (Zubero et al., 2008).

La almeja de agua dulce *Pisidium sp.* es el organismo que posee el tercer valor más alto de Cd (3,22 mg/kg), a pesar de no ocupar este molusco un nivel trófico elevado, el hábitat donde vive lo hace susceptible al elemento, corroborando lo mencionado por diversos autores, que los moluscos son por excelencia indicadores del estado de contaminación de los cuerpos de agua. El vivir enterrado, filtrando agua para obtener su alimento, lo hace un organismo susceptible a bioacumular metales pesados como Cd. Los organismos filtradores pueden asimilar más del 50% de los metales presentes en el agua, ya sea en la forma particulada o disuelta (Wang & Fisher, 1998), aunque en este último caso está asociado principalmente a complejos organometálicos producidos como exudados del fitoplancton. En organismos bivalvos, como *Mytilus edulis* la tasa de retención de metales va de 1% a 3% por día para los metales Am, Cd, Se y Co, con una eficiencia de asimilación de la fase particulada entre 47% a 82%

para Cd y 17 a 51% para el Zn (Wang et al., 1996). El tercer organismo con un nivel alto de Cd es el crustáceo *Cherax quadricarinatus* (0,3214 mg/kg), vive asociado al fondo, se alimenta de fitoplancton, detritos y restos orgánicos. Las concentraciones de Cd están relacionadas básicamente al hábitat y dieta, Estas concentraciones pueden atribuirse en parte a la minería informal y al ingreso al cuerpo de agua de diversos productos químicos de uso en agricultura y a nivel domiciliario. Los crustáceos generalmente son especies bentónicas vágiles que habitan sobre el manto de sedimentos, lo que resulta en una mayor bioacumulación relativa de metales pesados (Zhao et al., 2012).

Para el río Piura, los peces que presentaron mayores concentraciones de Cd, fueron *Liposarcus pardalis* (1,516 mg/kg); *Rhoadsia altipinna* (0,289 mg/kg) y *Brycon atrocaudatus* (0,208 mg/kg). Mazzoni et al. (2010) encontraron que la dieta de la carachama (*L. pardalis*) consiste en detritos, fragmentos de plantas, diatomeas, algas filamentosas y cianobacterias. Además, es un pez omnívoro y de hábitos nocturnos, en el medio natural consume principalmente algas y pequeños crustáceos, vive asociado al lecho del cuerpo de agua, por lo que a través del agua y sedimentos está incrementando los niveles de Cd, más el efecto combinado de la dieta. *R. altipinna*, pez pequeño, que se alimenta de algas e invertebrados asociados al perifiton, por lo que el ingreso del Cd, además de estar relacionado con la dieta, está influenciado por los sedimentos que atrapan estas estructuras. *B. atrocaudatus*, especie carnívora, de los últimos niveles de consumidores, razón que explica los niveles de Cd que posee. Hay que resaltar que estos peces son utilizados en la alimentación por pobladores de los caseríos asentados a lo largo de ambas riberas del río Piura, haciendo que el Cd pase de las cadenas tróficas acuáticas a las terrestres, es necesario evaluar el impacto del elemento en estas poblaciones, sobre todo aquellas que consumen frecuentemente estos recursos.

Los anfibios, se caracterizan por poseer una piel permeable y porque su ciclo de vida es tanto acuático como terrestre. Ecológicamente, ayudan a controlar plagas, ya que se alimentan de insectos, así como de otros organismos (Zug & Zug, 1979); por lo que estos organismos, representan una parte fundamental del ecosistema, así como varias vías y rutas de exposición a contaminantes. La concentración de Cd en *Rhinella marina* (0,1429 mg/kg), elemento que se está incorporando a través del agua, sedimento y dieta en estos organismos.

Los cuerpos de agua usualmente transportan metales pesados en altas concentraciones como el Hg y en niveles traza como el Cd, producto de la actividad minera (Marrugo et al., 2007), así como también por la influencia de las descargas de lixiviados urbanos e industriales (Vallejo et al., 2016).

El Cd, es un metal pesado que posee una alta persistencia y nivel de absorción (Castro & Méndez, 2008). En este sentido, la contaminación por Cd genera principalmente, disminución en las tasas de fertilidad (Zafar et al., 2015; Alamdar et al., 2016), reducción de la función renal, hipertensión arterial,

teratogenicidad y disfunción hepática (Satarug et al., 2010; Zaza et al., 2015).

Se han reportado para distintas colonias de aves en una misma zona concentraciones de Cr, 1,03, 0,88 y 0,60 µg/g (Padula et al., 2010). Custer et al. (2008), encontraron concentraciones de 3,28, 3,16 y 2,48 µg/g en *N. nycticorax* en tres distintas colonias de una misma zona; Abdullah et al., 2015 obtuvieron concentraciones de 21,1 y 19 µg/g de Cr en *Bubulcus ibis* en dos localidades de la misma ciudad. Las concentraciones encontradas en aves del río Piura son mayores que las encontradas en estos estudios. Este metal se encuentra en aguas residuales de industrias de curtiduría, metalurgia, pinturas, cerámicas, textiles, fungicidas, ladrillos y pigmentos, Förstner, 1981. Esta puede ser la razón por la que este metal se presente en altas concentraciones en las aves, *Leucophaeus pipixcan* (16,513 mg/kg); *Larus belcheri* (6,064 mg/kg) y *Phalacrocorax brasilianus* (3,042 mg/kg). El cromo hexavalente (Cr+6) en aves es tóxico y puede causar trastornos endocrinos, reproductivos y malformaciones congénitas, además, de ser un potente carcinógeno (Manjula et al., 2015; Sfakianakis et al., 2015).

Navarro et al. (2010) observaron que el Cr se acumula principalmente en pluma (73%) y de manera muy inferior en hueso, donde se detectaron los niveles más bajos de Cr (3%). Este patrón de distribución coincide con el obtenido por Nam et al. (2005) en cormoranes grandes, sugiriendo, al igual que ocurre en el caso del Pb, que hay ciertos metales que sufren un elevado transporte hacia la pluma. Los niveles de Cr obtenidos superan a los hallados por Nam et al. (2005) en pluma, hígado y riñón (0,27, 0,23 y 0,22 µg/g de peso seco, respectivamente). Del mismo modo, superan a los obtenidos por otros autores en individuos del género *Phalacrocorax* de Minesota (USA) (Burger & Gochfeld, 1996) y de la costa de Namibia (Burger & Gochfeld, 2001). Estos resultados sugieren que el entorno del río Piura presenta niveles considerables de Cr, influenciado por los factores de presión de origen antrópico. No obstante, Eisler (1986) sugirió que los niveles tisulares de cromo superiores a 4 µg/g de peso seco son indicativos de contaminación. En el presente estudio, este valor es superado en todas las especies de aves evaluadas.

Las mayores concentraciones de Cr en peces se presentan en *Rhoadsia altipinna* (16,974 mg/kg); *Brycon atrocaudatus* (8,625 mg/kg), *Liposarcus pardalis* (5,602 mg/kg) y *Parachromis managuensis* (3,734 mg/kg), valores muy por encima de otros estudios, como Araya & Astudillo (2003), quienes determinaron la presencia de Cr en la desembocadura de los ríos Maule y Mataquito, VII Región, Chile, el Cr fluctuó entre 1,76 - 2,8 µg/g para *Mugil cephalus* (lisa) y 0,33 - 118 µg/g para *Eleginops maclovinus* (róbalo). Los metales depositados en el medio acuático pueden acumularse en la cadena alimenticia, causar daño ecológico y poner en peligro la salud humana provocando cáncer o daños al sistema nervioso central (USEPA, 1992; Zwieg et al., 1999; van den Broek, 2002).

Los metales pesados pueden entrar en los peces por tres posibles vías: siendo en orden de importancia, a través de las branquias, consideradas como vía directa, de la ingesta de alimentos y por último a través de la superficie corporal y a la hora de acumularse tienen órganos más afines que otros y la mayoría de los autores coinciden en resultados parecidos de patrones de acumulación (Amundsen et al., 1997).

La presencia de Cr hexavalente en los ambientes acuáticos está estrechamente relacionada con fuentes antrópicas. Deriva de manera general, de la oxidación industrial de las minas y depósitos de Cr y posiblemente de la combustión de combustibles fósiles, madera, papel y otros (IPCS, WHO, 1988). En particular el Cr es utilizado en aleaciones, catálisis, pigmentos, preservación de la madera y en las industrias como la del acero, vidrio, cemento y tanino (Abasi & Soni, 1984; Goyer, 1996).

Los anfibios anuros son los vertebrados más avanzados que conservan larvas de vida libre. La existencia de un ciclo de vida bifásico, sumado a que sus huevos no tienen cáscara, genera en muchos casos, una ontogenia expuesta que facilita el análisis de su desarrollo en comparación con otros grupos de tetrápodos. Siendo vertebrados ectotérmicos, la actividad de los anuros está estrechamente relacionada con las variables físicas de los ambientes acuático y terrestre (Sebastian, 2006).

Su piel es un órgano complejo que constituye la ruta principal de intercambio de gases para la respiración, agua e iones; quedando particularmente expuestos a la acción de tóxicos. No emigran del sitio en el cual eclosionan, lo cual los hace excelentes indicadores y registros de las condiciones locales. Si además, tenemos en cuenta la gran diversidad morfológica que presentan y su presencia en la mayor parte de los ecosistemas, abarcando también una gran cantidad de hábitats, podemos concluir que son varias las razones por las que los anfibios pueden ser considerados a la hora de seleccionar organismos de referencia para la realización de estudios de impacto ambiental, o de efectos de los contaminantes sobre poblaciones naturales, o simplemente como posibles indicadores de la calidad del ambiente (Sebastian, 2006). La concentración de Cr en *Rhinella marina* (4,6786 mg/kg), este elemento se está incorporando a través del agua, sedimento y dieta en estos organismos, presentando uno de los valores más altos en relación a toda la fauna evaluada.

La facilidad de colectarlos en un amplio rango de hábitats hace de los crustáceos candidatos ideales para el monitoreo de la contaminación. Pueden ser utilizados como 'centinelas' de la exposición crónica a bajas concentraciones de toxinas o como bioindicadores de episodios agudos de vertidos tóxicos que podrían no ser medidos en los muestreos de rutina de lagos y ríos (Thorp & Covich, 2015). *Cherax quadricarinatus* ha sido considerada como un buen prospecto para la acuicultura comercial por los atributos que presenta. Tiene un ciclo de vida simple, sin estadios larvales libres y alcanza la madurez sexual entre seis y nueve meses. Puede pesar entre 50 y 150 g al

final del primer año y alcanzar los 400 g de peso entre los cuatro y cinco años (Villarreal & Peláez, 1999). La concentración de Cr en la langosta australiana (2,125 mg/kg), organismo asociado al fondo y oportunista alimentario, llegando a comportarse como carroñero e incluso presentar casos de canibalismo. Las concentraciones altas de Cr están asociadas básicamente al hábitat y dieta, la presencia del elemento se atribuye en parte a la minería informal y al ingreso al cuerpo de agua de diversos productos químicos de uso en agricultura y a nivel domiciliario. Al ser bentónicas vágiles, desplazándose sobre sedimentos, lo que resulta en una mayor bioacumulación relativa de metales pesados (Zhao et al., 2012).

Las mayores concentraciones de Hg se presentaron en peces, de estos los que están más afectados por el elemento son, *Chinchaysuyoa labiata* (0,159 ug/kg); *Oreochromis niloticus* (0,125 ug/kg) *Rhoadsia altipinna* (0,118 ug/kg); *Brycon atrocaudatus* (0,102 ug/kg); *Andinoacara rivulatus* (0,072 ug/kg); *Mugil cephalus* (0,065 ug/kg); *Liposarcus pardalis* (0,062 mg/kg); *Pseudocurimata troscheli* (0,053 ug/kg) y *Parachromis managuensis* (0,043 ug/kg), valores muy por encima de otros estudios, sin embargo, todos ellos por debajo del límite permisible. Los resultados muestran que hay poca diferencia en la concentración de metales pesados entre los niveles tróficos, fitófago, iliófago, omnívoro y carnívoro, presentando las mayores concentraciones los carnívoros, como *Chinchaysuyoa labiata*, entre los dos primeros niveles es aún menor la diferencia, *Mugil cephalus* fitófago y *Liposarcus pardalis* iliófago, es posible que los iliófagos se contaminen al filtrar los detritus orgánicos en los lechos del río, por otra parte puede considerarse que estas concentraciones están directamente relacionadas con las actividades humanas que se desarrollan en la cuenca ampliada, en este caso las aguas no solo provienen de la cuenca del río Piura, sino también de la cuenca del Catamayo-Chira.

La presencia de mercurio en los peces se presenta debido a la capacidad de estos de acumular el metal, por su gran solubilidad en los lípidos. Se ha determinado que la concentración de Hg en peces puede ser 10 mil a 100 mil veces mayor a la encontrada en el propio sustrato o alimento. La ingesta de pescado con altas concentraciones de Hg produce graves daños en el humano (Wittwer, 2012). Para el río Piura, tanto para agua (0,208 ug/L) como para sedimento (4,708 ug/Kg), los valores están elevados en relación con el límite permisible y la concentración del metal en el sedimento es superior a la cantidad en el agua y en la biota.

Las mayores concentraciones de Hg para las aves del río Piura corresponden a *Leucophaeus pipixcan* (0,06 ug/kg); *Ardea alba* (0,052 ug/kg); *Larus belcheri* (0,049 ug/kg); *Himantopus mexicanus* (0,044 ug/kg) y *Spatula cyanoptera* (0,043 ug/kg). Todos los valores por encima del límite permisible. Esto pone en evidencia que todas las especies capturadas están bioacumulando metales pesados, lo cual podría generar problemas de salud pública

por la ingesta de estos organismos y la contaminación alimentaria por metales pesados, que es un problema persistente en la salud pública actual. Esto debido a la presencia de elementos tóxicos en trazas en el medio ambiente que mediante su capacidad geoquímica y escasa biodegradabilidad se infiltran en medios acuáticos provocando la incursión de éstos en recursos naturales consumidos por el hombre (Jianping et al., 2015). Las máximas concentraciones de Hg en hígado, riñón y encéfalo se han encontrado en Águila pescadora (*Pandion haliaetus*), mientras que en pluma se encontraron en Cernícalo vulgar (*Falco tinnunculus*). Los hábitats característicos de cada especie, la plasticidad de la dieta y la relación con el medio acuático en su alimentación son características que parecen estar relacionadas con las diferencias en las concentraciones de Hg (Ráez et al., 2024).

En los ecosistemas acuáticos, el mercurio puede provenir de la precipitación atmosférica o de la descarga de aguas residuales, principalmente industriales. Una vez que ingresa en los sistemas acuáticos, este elemento puede permanecer en el agua o depositarse en los sedimentos (Herruzo et al., 2010). Se encuentra en regiones donde se utilizan herbicidas, fungicidas y conservadores de semillas, y donde hay presencia de industrias como las de pinturas, papeleras y electroquímicas (Villarejo, 2004). En aves, el Hg es un potente neurotóxico, lo cual pone de manifiesto el riesgo de este metal en el ecosistema (Aggarwal et al., 2014). No se observan diferencias significativas para este metal tanto en raquis como en barba de todas las especies de aves estudiadas. La barba de *E. thula* tiene una concentración 0,8 a 0,3 veces mayor que el resto de las aves.

De acuerdo con Poppenga (1999), la intoxicación por mercurio también puede causar ataxia, debilidad en las extremidades, incapacidad de volar o caminar, párpados caídos, baja actividad física e hiporreactividad. También puede estimular la producción de huevos sin cáscara (Beasley, 1999). El mercurio (Hg) es un metal que en concentraciones de traza es altamente tóxico y dañino para los ecosistemas y para seres humanos. Este metal es fácilmente metilado por microorganismos, se bioacumula en la biota y se biomagnifica en la cadena alimentaria (Pérez & Peñuela (2012).

La contaminación por metales pesados afecta no solo el equilibrio en los ecosistemas, sino que también afecta la salud y bienestar de los humanos, por eso este problema tiene un alto impacto y es trascendental en salud pública, debido a que son muchas las fuentes de contaminación con éstos y además, pueden causar toxicidad, ya sea aguda o crónica. Entre los metales de impacto en la salud pública, por su exposición en el ambiente y especialmente por su potencial de ingestión vía alimentaria, se encuentran plomo, cromo, cadmio y mercurio. Plomo y mercurio tienen importancia por su neurotoxicidad, cromo es alergénico (Zubero et al., 2008). Plomo puede causar, entre muchos otros efectos, anemia, alteraciones histológicas y en la fisiología renal, gota, hipertensión, efectos neurológicos y neurotóxicos,

especialmente en niños, los cuales pueden ir desde letargia hasta ataxia, convulsiones y coma. Este metal además puede llevar a problemas en la audición, junto con problemas cognitivos y afectación de las capacidades de aprendizaje (Pérez et al., 2005).

Los peces, crustáceos y moluscos se consideran una fuente alimenticia saludable, debido a que tienen bajo contenido de grasas saturadas, alto contenido de proteínas y ácidos grasos omega que favorecen la salud (Olmedo et al., 2013; Ahmed et al., 2015). Sin embargo, la biota acuática acumula metales del agua circundante, de los sedimentos y de su dieta (Zhao et al., 2012; Jayaprakash et al., 2015; Jitar et al., 2015). Esto implica que su consumo se puede convertir en un problema de salud para las poblaciones que se alimentan de estos recursos (Palacio, 2007; Barrios et al., 2016), debido al potencial de toxicidad, persistencia y bioacumulación de dichos metales (Raknuzzaman et al., 2016; La Colla et al., 2018; Liu et al., 2019).

CONCLUSIONES

Los metales por encima del límite permisible son para *Eichornia crassipes*, productor, Pb (1,2019 mg/kg) y Cr (1,3269 mg/kg); *Pisidium sp.* consumidor primario, Pb (17,6667 mg/kg), Cu (70,125 mg/kg), Cd (3,2252 mg/kg) y Cr (2,5417 mg/kg); *Cherax quadricarinatus*, crustáceo omnívoro, Pb (6,9286 mg/kg), Cu (52,8214 mg/kg) y Cr (2,125 mg/kg). Para todos los peces evaluados, Pb y Cd; Cu excedido en *Liposarcus pardalis* (16,656 mg/kg), *Trycomycter punctulatum piurae* (30,7308 mg/kg), *Rhoadsia altipinna* (30,921 mg/kg) y *Mugil cephalus* (11,392 mg/kg) y Cr en *Liposarcus pardalis* (5,602 mg/kg), *Brycon atrocaudatus* (8,625 mg/kg), *Rhoadsia altipinna* (16,974 mg/kg), *Parachromis managuensis* (3,734 mg/kg) y *Mugil cephalus* (1,017 mg/kg). *Rhinella marina*, anfibio, carnívoro, excedidos los valores de Pb (14,4643 mg/kg), Cd (0,1429 mg/kg) y Cr (4,6786 mg/kg). Para las aves, la mayoría consumidores finales, se exceden en el límite para todas las especies evaluadas Pb, Cr y Hg; Cu excedido en *Egretta thula* (40,885 mg/kg) y Cd en *Phalacrocorax brasilianus* (1,167 mg/kg) y *Leucophaeus pipixcan* (3,68 mg/kg).

Las categorías tróficas en el río Piura, corresponden a productores, detritívoros, herbívoros, omnívoros y carnívoros. Ubicándose los niveles tróficos: productores, consumidores primarios,

Todos los componentes y las especies evaluadas tienen al menos un metal que excede el límite máximo permisible. Se espera que estos valores permitan visualizar un problema de salud ambiental, que si bien, existen políticas públicas para hacer frente a esta problemática, estas iniciativas no han sido efectivas, ni entienden la magnitud del problema, desde una perspectiva antropocéntrica. Poco o nada es lo que se hace y los ambientes y especies continúan bioacumulando estos contaminantes. En el contexto regional y nacional debe abordarse la relación entre los derechos de salud y medio ambiente, por contaminación a causa de metales pesados, como es el caso de pueblos asentados en ambas riberas del río Piura, están consumiendo especies de peces y otros organismos contaminados por metales pesados y segundo, a partir de la ruta de este consumo alertar a las autoridades de salud a fin de implementen medidas de prevención y protección de las poblaciones que consumen estos recursos.

consumidores secundarios y consumidores terciarios, corresponde a una trama trófica de cuatro niveles, lo que la hace más eficiente y con menor pérdida de energía en el sistema.

Los niveles de contaminación detectados, evidencian la necesidad de implementar programas de monitoreo, a fin de evaluar las fuentes de metales pesados. Es necesario también investigar los mecanismos de bioacumulación y biomagnificación que están operando en la trama trófica del río Piura.

Asimismo, deben realizarse evaluaciones de riesgo para la salud humana, considerando los patrones de consumo de las poblaciones asentadas en ambas riberas del río Piura, particularmente en los grupos vulnerables. Se sugiere evaluar estrategias de biorremediación como alternativas de mitigación, considerando la importancia socioeconómica y ecológica del río Piura para la región. Asimismo, determinar las fuentes de contaminación según metales, realizar campañas educativas e incorporar como tema de trabajo y debate en la Comisión Regional Ambiental (CAR) Piura y sus grupos técnicos.

Se sugiere también una evaluación médica y dosaje de metales pesados en la población expuesta. Sobre todo, aquella consumidora frecuente de los recursos que ofrece el río Piura.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Noé Costilla, investigador de la Universidad Nacional de Trujillo, quien nos apoyó en la determinación de los metales pesados. Al departamento académico de Ciencias Biológicas de

la Universidad Nacional de Piura, que nos permitió el uso de equipos y laboratorio para determinar los contenidos estomacales de las especies evaluadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbasi, S. A., & Soni, R. (1984). Teratogenic effects of chromium (VI) in environment as evidenced by the impact on larvae of amphibian *Rana tigrina*: implications in the environmental management of chromium. *Int J Environ Stud*, 23, 131-137.

Abbasi, N. A., Jaspers, V. L. B., Chaudhry, M. J. I., Ali, S., & Malik, R. N. (2015). Influencia de los taxones, el nivel trófico y la ubicación en la bioacumulación de metales tóxicos en las plumas de las aves: un estudio preliminar de biomonitorio con múltiples especies de aves de Pakistán. *Chemosphere*, 120, 527-537.

- Abdullah, M., Fasola, M., Muhammad, A., Malik, S. A., Bostan, N., Bokhari, H. Y., & Eqani, S. A. (2015). Avian feathers as a non-destructive bio-monitoring tool of trace metals signatures: A case study from severely contaminated areas. *Chemosphere*, *119*, 553-561. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.068>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2005). Toxicological profile for Nickel. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Atlanta, Georgia. 397 pp.
- Aggarwal, P., Gaur, S. Y., & Gauba, P. (2014). Neurotoxic and genotoxic effects of methylmercury. *Environ. Dev. Sustain.*, *16*(1), 71-78. <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9475-8>
- Ahmed, M., Shaheen, N., Islam, M., Habibullah, M., Islam, S., & Mohiduzzaman, M. (2015). Dietary intake of trace elements from highly consumed cultured fish (Labeo rohita, Pangasius pangasius and Oreochromis mossambicus) and human health risk implications in Bangladesh. *Chemosphere*, *128*, 284-292. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.016>
- Alamdar, A., Ali, S., Waqar, S., Sohail, M., Bhowmik, A., Cincinelli, A. 2016. Human Arsenic exposure via dust across the different ecological zones of Pakistan. *Ecotoxicol Environ Saf*, *126*, 219-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.044>
- Alban, A., & Marcial, R. (2025). Peces de la laguna Napique: Un riesgo para el consumo humano por acumulación de metales pesados (Pb, Cd, Hg, Cu). *Manglar*, *22*(4), 581-589.
- Albuja, L., Montalvo, D., Cáceres, F., & Jácome, N. (2012). Niveles de mercurio en aves silvestres de tres regiones mineras del sur del Ecuador*. *Politécnica*, *30*(3), 18-32.
- Amundsen, P. A., Staldivik, F. J., Lukin, A. A., Kashulin, N. A., Popova, O. A., & Reshetnikov, Y. S. (1997). Heavy metal contamination in freshwater fish from the border region between Norway and Russia. *Science of the total environment*, *201*(3), 211-224.
- Araya, C., & Astudillo, M. (2003). Estudio del Contenido de Cobre, Cromo y Plomo en *Mugil cephalus* y *Eleginus maclovirus* Provenientes del Estuario del Río Maule y Mataquito de la VII Región, Chile. Universidad de Talca.
- Armiñana, R., Morales, L., Padilla, A., & Quintero, O. (2024). Bioacumulación de metales pesados en los músculos de *Claria gariepinus* y su incidencia en la salud humana. *ULEAM Bahía Magazine (UBM)*, *5*(8), 10-17. <https://doi.org/10.56124/ubm.v5i8.0001>
- Arriaga, A. P., Caudillo, P., Salazar, J., Torres, E. D., Lares, J. de J., & Delgado, D. (2024). Intoxicación con metales pesados: una revisión de la literatura. *Ciencia y Frontera*, *2*, 16-28.
- Barros, O., Doria, C., & Marrugo, J. (2016). Metales pesados (Pb, Cd, Ni, Zn, Hg) en tejidos de *Lutjanus synagris* y *Lutjanus vivanus* de la Costa de La Guajira, Norte de Colombia. *Revista Veterinaria y Zootecnia*, *10*(2), 27-41.
- Basterrechea, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2003) Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química. Thomson Editores Spain. España. Pág. 31 - 293.
- Bayona, M. A. (2009). Evaluación microbiológica de alimentos adquiridos en la vía pública en un sector del norte de Bogotá. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, *12*(2), 9-17.
- Beasley, V. (Ed.). 1999. Toxicants with mixed effects on the central nervous system. *Veterinary Toxicology*. International Veterinary Information Service. www.ivos.org. Department of Veterinary Biosciences, College of Veterinary Medicine, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
- Brown, C., & Luoma, S. (1995). Use of the euryhaline bivalve *Potamocorbula amurensis* as a biosentinel species to assess trace metal contamination in San Francisco Bay. *Marine Ecology Progress Series*, *124*, 129-142.
- Brown, R.E., Brain, J.D., Wang, N. (1997). Reviews. The Avian Respiratory System: A Unique Model for Studies of Respiratory Toxicosis and for Monitoring Air Quality. *Environ Health Perspect*, *105*(2), 188-200.
- Bryan, G. W. (1968). Concentrations of zinc and copper in the tissues of Decapod Crustaceans. *J. mar. biol. Ass.*, *48*, 303-321.
- Burger, J., & Gochfeld, M. (1996). Heavy metal and selenium levels in Franklin's Gull (*Larus pipixcan*) parents and their eggs. *Arch Environ Contam Toxicol*, *30*, 487-491.
- Burger, J., & Gochfeld, M. (2001). Metal levels in feathers of cormorants, flamingos and gulls from the coast of Namibia in southern Africa. *Environ. Monit. Assess.* *69*, 195-203.
- Burgos, S., Navarro, A., Marrugo, J., Enamorado, G., & Urango, I. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the Cispata Bay, Colombia: A marine tropical ecosystem. *Mar Pollut Bull*, *120*(1-2), 379-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.01626>
- Byeong, L., Jung, L., & Samuel, L. (2006). Comparison of selenium bioaccumulation in the clams *Corbicula fluminea* and *Potamocorbula amurensis*: a bioenergetic modeling approach. *Marine Ecology Progress Series*, *175*, 177-189.
- Castro, M., & Méndez, M. (2008). Heavy metals: Implications associated to fish consumption. *Environ Toxicol Pharmacol*, *26*(3), 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2008.06.001>
- Chen, T. H., Gross, J. A., & Karasov, W. H. (2007). Adverse effects of chronic copper exposure in larval northern leopard frogs (*Rana pipiens*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, *26*, 1470-1475.
- Cid, F. D., Gatica, C., Antón, R. I., & Caviades, E. (2009). Contamination of heavy metals in birds from Embalse La Florida (San Luis, Argentina). *J. Environ. Monit.*, *11*, 2044-2051.
- Custer, T. W., Golden, N. H., & Rattner, B. A. (2008). Element patterns in feathers of nestling black-crowned night-herons, *Nycticorax nycticorax* L., from four colonies in Delaware, Maryland, and Minnesota. *B. Environ. Contam. Tox.*, *81*(12), 147-151. <https://doi.org/10.1007/s00128-008-9444-3>
- Department of Energy, USA. (1987). Physiological responses of marine organisms to environmental stresses. Dorigan, J. V. and F. L. Harrison (eds). DOE/ER-0317: 501 pp.
- Dekker, M. (1992). Heavy metals. In: Toxic metal chemistry in marine environments. SADIQ. New York. 390 pp.
- Deknock, A., Pasmans, F., Van Leewenberg, R., Van Praet, S., De Troyer, N., Goessens, T., Lammens, L., Brunel, S., Lens, L., Marteli, A., Croubels, S., & Goethals, P. (2022). Impact of heavy metal exposure on biological control of a deadly amphibian pathogen by zooplankton. *Science of The Total Environment*, *823*, 153800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153800>
- Di Giulio, R. T., & Hinton, D. E. (2008). The toxicology of fishes. CRC.
- Dominguez, F. C. (2006). Aplicación de métodos de pre-concentración/determinación de metales pesados en sedimentos y aguas: membranas líquidas-espectroscopía atómica y voltametría de redisolución. Universidad de Cadiz, España. Tesis Doctoral.
- Duarte, L. O., & García, C. B. (1999). Diet of the lane snapper, *Lutjanus synagris* (Lutjanidae), in the Gulf of Salamanca, Colombia. *Caribbean Journal of Science*, *35*, 54-63.
- Eeva, T., Belskii, E., & Kuranov, B. (2006). Environmental pollution affects genetic diversity in wild bird populations. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *60*8, 8-15.
- Eisler, R. (1986). Chromium hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report *85* (1.6). 60 pp.
- Ek, K. H., Morrison, G. M., Lindberg, P., & Rauch, S. (2004). Comparative tissue distribution of metals in birds in Sweden using ICP-MS and laser ablation ICP-MS. *Arch Environ Contam Toxicol*, *47*, 259-26930.
- Estrada, D. M. & Soler, D. (2014). Las aves como bioindicadores de contaminación por metales pesados en humedales. *Ornitología Colombiana*, *14*, 145-160.
- EPA. (2009). Environmental Protection Agency. National Recommended Water Quality Criteria. Priority Pollutants. USA. Pág. 22.
- Flemming, C., & Trevors, J. (1989). Copper Toxicity and Chemistry in the Environment: A Review. Kluwer Academic Publishers. *Water, Air, and Soil Pollution*, *44*, 143-158.
- Förstner, U. (1981). Metal transfer between solid and aqueous phases. En: Metal pollution in the aquatic environment (Förstner U. y Wittmann G.T., Eds.). Springer Science & Business Media. Berlín, Alemania, p. 502.
- Franco, E., Moity, N., Ramírez, J., Andrade, S., Hardisson, A., Paz, S., Rubio, C., Martín, V., & Gutiérrez, Á. J. (2023). Mercury in fish tissues from the Galapagos marine reserve: Toxic risk and health implications. *Journal of Food Composition and Analysis*, *115*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104969>
- Goessens, T., De Baere, S., Deknock, A., De Troyer, N., Van Leewenberg, R., Martel, A., Pasmans, F., Goethals, P., Lens, L., Spanoghe, P., Vanhaecke, L., & Croubels, S. (2022). Agricultural contaminants in amphibian breeding ponds: occurrence, risk and correlation with agricultural land use. *Science of The Total Environment*, *806*, 150661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150661>
- Gomez, A. J., Aponte, H., & Gonzales, S. (2023). ¿Cómo proteger los humedales costeros peruanos? Una respuesta a partir de un modelo conceptual de sus impulsores de cambio. *Boletín de investigaciones marinas y costeras*, *52*(2), 125-142.
- González, N., & Barbeito, C. (2014). Histología de las aves. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata.
- González, O., & Murga, L. R. (2020). Evaluación de metales pesados en ríos y truchas *Oncorhynchus mykiss* de la región Pasco, Perú. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, *3*(2), 32-48. <https://doi.org/10.46380/rias.v3i2.93>
- Goyer, R. A. (1996). Toxic Effects of Metals. In: Klaassen C. D., editor. Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. New York: McGraw-Hill. p 691-735.
- Guitart, R., & Mateo, R. (1997). Envenenamiento por Plomo en Humedales de España (Inédito: 1-6)
- Herruzo, F. G., Rubio, A. G., Lahoz, C. G., Alonso, C. V., & Maroto, J. M. R. (2010). El mercurio: situación actual, problemas y soluciones. *Ingeniería Química*, *48*, 84-91.

- IMA. (1995). Contaminación por Mercurio en Madre de Dios (Situación Actual del Río Madre de Dios).
- IPCS, WHO (1998). Environmental Health Criteria 61: Chromium. Geneva, World Health Organization.
- Jayaprakash, M., Senthil Kumar, R., Giridharan, L., Sujitha, S. B., Sarkar, S. K., & Jonathan, M. P. (2015). Bioaccumulation of metals in fish species from water and sediments in macrotidal Ennore creek, Chennai, SE coast of India: a metropolitan city effect. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, *120*, 243-255
- Jayawardena, U. A., Angunawela, P., Wickramasinghe, D. D., Ratnasooriya, W. D., & Udagama, P. V. (2017). Heavy metal-induced toxicity in the Indian green frog: Biochemical and histopathological alterations. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *36*, 2855-2867. <https://doi.org/10.1002/etc.3848>
- Jayawardena, U. A., Wickramasinghe, D., & Udagama, P. (2021). Cytogenotoxicity evaluation of a heavy metal mixture, detected in a polluted urban wetland: micronucleus and comet induction in the Indian Green frog (*Euphyllis hexadactylus*) erythrocytes and the *Allium Cepa* bioassay. *Chemosphere*, *277*, 130278. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130278>
- Jianping, X., Zartarian, V., Mintz, B., Weber, M., Bailey, K., & Geller, A. (2015). Modeling tribal exposures to methyl mercury from fish consumption. *Science of the Total Environment*, *533*, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.070>
- Jitar, O., Teodosiu, C., Oros, A., Plavan, G., & Nicoara, M. (2015). Bioacumulación de metales pesados en organismos marinos del sector rumano del Mar Negro. *New Biotechnology*, *32*(3), 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2014.11.004>
- La Colla, N. S., Botté, S. E., & Marcovecchio, J. E. (2018). Metales en zonas costeras impactadas con desechos urbanos e industriales: información sobre el patrón de acumulación de metales en especies de peces. *Journal of Marine Systems*, *181*, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.01.012>
- Lakshmanan, R., Kesavan, K., Sakkaravarthi, K., & Rajagopal, S. (2010). Concentration of (Fe, Mn, Mg, Ni) in five Species of Fishes Caught in Parangipettai Coastal Waters. *International Journal of ChemTech Research*, *2*(1), 620-623.
- Lance, S. L., Erickson, M. R., Flynn, R. W., Mills, G. L., Tuberville, T. D., & Scott, D. E. (2012). Effects of chronic copper exposure on development and survival in the southern leopard frog (*Lithobates [Rana] sphenoccephalus*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, *31*, 1587-1594.
- Laws, E. A. (1981). Aquatic Pollution. An Introductory Text. J. Wiley and Sons. N.Y.
- Leduc, J., Echaubard, P., Trudeau, V., & Lesbarreres, D. (2016). Copper and nickel effects on survival and growth of northern leopard frog (*Lithobates pipiens*) tadpoles in field-collected smelting effluent water. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *35*, 687-694.
- Lightfoot, T. L., & Yeager, J. M. (2008). Toxicidad de las aves de compañía y preocupaciones ambientales relacionadas. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, *11*(2), 229-259.
- Liu, X., Zhang, W., Hu, Y., Hu, E., Xie, X., Wang, L., & Cheng, H. (2015). Contaminación por arsénico de suelos agrícolas por operaciones concentradas de alimentación animal (CAFO). *Chemosphere*, *119*, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.067>
- Londoño, L. F., Londoño, P. T., & Muñoz, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *14*(2), 145-153.
- Lugo, W. P., & Cadavid, E. (2020). Revisión documental como estrategia para identificar contaminantes químicos del pescado bocachico (*Prochilodus magdalenae*) que influyen en la salud de los consumidores en el municipio de Monteiro Cordoba. Educación en Ciencia y Memorias VII Congreso Nacional de Investigación en Educación en Ciencias Tecnología. Asociación Colombiana para la Investigación en Educación en Ciencia y Tecnología, 11.
- Mamani, M., Blas, J., Izquierdo, S., Gil, C., Andrade, N., & Pari, D. (2025). Contenido de metales pesados en los peces en el Perú: Una revisión sistemática. *Revista de Investigación e innovación agropecuaria y de recursos naturales*, *12*(1), 131-141.
- Mancilla, O. R., Gómez, L., Palomera, C., Hernández, O., Guevara, R. D., Ortega, H. M., Flores, H., Can, Á., Sánchez, E. I., Avelar, J. U., & Cruz, E. (2023). Metales pesados en agua y macroinvertebrados de la cuenca del río Ayuquila-Armería (México) y sus afluentes. *Revista Terra Latinoamericana*, *41*, e1603. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1603>
- Manjula, M., Mohanraj, R., & Devi, M. P. (2015). Biomonitoring of heavy metals in feathers of eleven common bird species in urban and rural environments of Tiruchirappalli, India. *Environ. Monit. Assess.*, *187*(5). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4502-x>
- Marrugo, J., Lans, E., & Benitez, L. (2007). Hallazgo de mercurio en peces de la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, *12*, 878-886.
- Martorell, J. (2009). Intoxicaciones en aves. *Clin. Vet. Peq. Anim*, *29*(3), 172-178.
- Masco, M. L., Callo, Y., Loaiza, A., Cantero, A. N., & Surco, J. (2022). Evaluación de la concentración de metales pesados (Pb, Hg, Cd) y As en pescados expendidos en los mercados de la ciudad del Cusco, Perú. *Q'Euña*, *12*(2), 29-34. <https://doi.org/10.51343/rq.v12i2.975>
- Mejía, G. (2006). Aproximación teórica a la bioabsorción de metales pesados por medio de microorganismos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, *1*, 77-99
- MINAM. (2010). Contaminación por Mercurio en Madre de Dios (Situación Actual del Río Madre de Dios). Madre De Dios.
- Morales, E., Bustos, M., del P. Pinglo, F., Cueva, E., & Díaz, E. (2022). Estudios recientes de metales pesados en peces: Una revisión bibliográfica con énfasis en Perú. *Revista de Investigación Científica DEKAMUAGROPEC*, *3*(1), 10-19. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v3i1.68>
- Nam, D. H., & Lee, D. P. (2006). Monitoring for Pb and Cd pollution using feral pigeons in rural, urban, and industrial environments of Korea. *Sci Total Environ*, *375*, 288-2956.
- Nava, C., & Méndez, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, *16*(3), 140-147.
- Oliva, B. E., Muñoz, M., Chaulón, G., Mazariegos, C., Xajil, M., Santos, F., Quevedo, G., & Pérez, F. (2023). Metales en tejido muscular de peces y camarones de la Reserva Natural de Usos Múltiples Monterrico, Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, *10*(2), 116-133. <https://doi.org/10.36829/63cts.v10i2.1357>
- Olivares, M., Castillo, C., Arredondo, M., & Uauy, R. (2010). Cobre y Zinc en Nutrición Humana. En Gil, A. (Edición 2), Tratado de Nutrición, Tomo 3 Nutrición Humana en el estado de salud. (pp. 977-990). Editorial: Médica Panamericana.
- Olmedo, P., Hernandez, A. F., Pla, A., Femia, P., Navas-Acien, A., & Gil, F. (2013). Determination of essential elements (copper, manganese, selenium and zinc) in fish and shellfish samples. Risk and nutritional assessment and mercury selenium balance. *Food and Chemical Toxicology*, *62*, 299-307.
- Padula, V., Burguer, J., Newman, S. H., Elbin, S., & Jetner, C. (2010). Metals in feathers of black-crowned night-heron (*Nycticorax nycticorax*) chicks from the New York Harbor Estuary. *Arch. Environ. Contam. Tox.*, *59*(1), 157-165. <https://doi.org/10.1007/s00244-009-9427-3>
- Palacio, J. (2007). Ecotoxicología Acuática. 1a ed. Medellín, Colombia: Imprenta Universidad de Antioquia.
- Pan, C., Zheng, G., & Zhang, Y. (2008). Concentrations of Metals in Liver, Muscle and Feathers of Tree Sparrow: Age, Inter-Clutch Variability, Gender, and Species Differences. *Bull Environ Contam Toxicol*, *81*, 558-560.
- Pérez, M., Cid, F., Hernández, D., Oropesa, A. L., López, A., Fidalgo, L. E., & Soler, F. (2005). Contenido de metales pesados en hígado y plumas de aves marinas afectadas por el accidente del "Prestige" en la costa de Galicia. *Revista de Toxicología*, *22*, 191-199.
- Pérez, D. E., & Peñuela, G. A. (2012). Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud humana. *Rev. P+L*, *6*(2), 108-116.
- Polo, C., Baigorri, A., Galván, F., Grijalba, M., & Sanjuan, A. (2007). Hábitos alimentarios del tiburón zorro *Alopias superciliosus* (Lowe, 1839), en el Pacífico ecuatorial. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, *42*(1), 59-69.
- Poppenga, R. H. (1999). Intoxicaciones corrientes en aves acuáticas, somorgujos y aves de presa. Págs. 123-136 en: M. Uhart & M. E. Zaccagnini (eds). Manual de Procedimientos Operativos Estandarizados de Campo para Documentar Incidentes de Mortandad de Fauna Silvestre en Agroecosistemas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Ráez, M., Nieto, B., Ruiz, I., Navas, P., Mojica, M., Montalban, P., Jimenez, P., Fernandez, A., & Garcia, J. (2024). Exposición a Mercurio en Aves de Presa del Sudeste Español: Diferencias entre Especies. *Revista de Toxicología*, *41*(1), 39-40.
- Rahman, M. S., Molla, A. H., Saha, N., & Rahman, A. (2012). Study on heavy metals levels and its risk assessment in some edible fishes from Bangshi River, Savar, Dhaka, Bangladesh. *Food chemistry*, *134*(4), 1847-1854.
- Rainbow, P. (2002). Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why so what? *Mar. Environ. Res.*, *53*, 453-464.
- Raknuzzaman, M., Ahmed, M. K., Islam, M. S., Habibullah-Al-Mamun, M., Tokumura, M., Sekine, M., & Masunaga, S. (2016). Rastreo de la contaminación por metales en peces comerciales y crustáceos recolectados de la zona costera de Bangladesh y evaluación de riesgos para la salud. *Investigación en ciencias ambientales y contaminación*, *23*(17), 17298-17310. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6918-4>
- Redig, P. T., & L. R. Arent. (2008). Raptor Toxicology. *Veterinary Clinics of North America. Exotic Animal Practice*, *11*, 261-282.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud,

- ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Robles, M. (2024). Seguridad alimentaria: Riesgo asociados metales pesados sobre la salud humana. *Journal of American Health*, 7(2), 1-19.
- Sanín, L. H., González, T., Romieu, I., & Hernández, M. (1998). Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud. *Salud pública de México*, 40, 359-368.
- SANIPES. (2016). Manual de Indicadores Sanitarios y de Inocuidad para los Productos Pesqueros y Acuícolas para Mercado Nacional y de Exportación.
- Santoyo, M., Tenorio, M. G., & Juárez, L. I. (2024). Enemigos invisibles: Los metales pesados en el polvo de las calles y sus riesgos a la salud humana. *RD-ICUAP*, 10(24), 236-242. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2024.28.1280>
- Satarug, S., Garrett, S. H., Sens, M. A., & Sens, D. A. (2010). Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environ Health Perspect*, 118(2), 182-190. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901234>
- Scheuhammer, A. M. (1987). The chronic toxicity of aluminium, cadmium, mercury and lead in birds: a review. *Environ Pollut*, 46, 263-295.
- Sebastian, G. (2006) Análisis ecotoxicológico de una comunidad de Anuros de la Región Pampeana. Tesis Doctoral. Universidad de la Plata. 215 pp.
- Sfakianakis, D. G., Renieri, E., Kentouri, M., & Tzatsakis, A. M. (2015). Effect of heavy metals on fish larvae deformities: A review. *Environ. Res.*, 137, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.014>
- Sierra, L., Peñuela, S., Franco, L., Gomez, D., Diaz, J., Sierra, J, et al. (2018) Mercury levels in birds and small rodents from Las Orquideas National Natural Park, Colombia. *Environ Sci Pollut Res Int*, 25(35), 35055-35063. <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-3359-225>
- Soto, M. F. (2011). Transferencia de elementos traza en tramas tróficas acuáticas. *Hidrobiológica*, 21, 239-248.
- Suárez, C., & Urios, V. (1999). La contaminación por saturnismo en las aves acuáticas del Parque Natural de El Hondo y su relación con los hábitos alimenticios. *Humedales Mediterráneos*, 1, 83-90.
- Szymczyk, K., & Zalewski, K. (2003). Copper, Zinc, Lead and Cadmium Content in Liver and Muscles of Mallards (*Anas platyrhynchos*) and other Hunting Fowl Species in Warmia and Mazury in 1999-2000. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12, 381-386.
- The Perkin-Elmer Corporation. (1996). Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy. FP-5-Analysis of Fish and Seafood: Dry Ashing Procedure.
- Tomaila, J., & Lannacone, J. (2018). Toxicidad letal y subletal del arsénico, cadmio, mercurio y plomo sobre el pez Paracheirodon innesi neon tetra (Characidae). *Toxicología*, 35(2), 95-115.
- Torp, J., & Covich, A. (2015). Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. Academic Press, INC.
- Tripp, A., & Arreguin, F. (2009). The Use of Stable Isotopes and Stomach Contents to Identify Dietary Components of the Spotted Rose Snapper, *Lutjanus guttatus* (Steindachner, 1869), off the Eastern Coast of the Southern Gulf of California. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 4(6): 274-284.
- Trujillo, J. M., & Torres, M. A. (2015). Niveles de contaminación en tres sectores de Villavicencio, a través del índice de geo-acumulación (I-geo). *Orinoquia*, 19(1), 109-117.
- Tsipoura, N., Burger, J., Newhouse, M., Jeitner, C., Gochfeld, M., & Mizrahi, D. (2011). Lead, mercury, cadmium, chromium, and arsenic levels in eggs, feathers, and tissues of Canada geese of the New Jersey Meadowlands. *Environ. Res.*, 111(6), 775-784. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.05.013>
- USEPA. (2012). Criterios de calidad del agua para uso recreativo; Oficina del Agua, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: Washington, DC, EE. UU.
- Vallejo, P. P., Vásquez, L. F., Correa, I. D., Bernal, G. R., Alcántara, J., & Palacio, J. A. (2016). Impact of terrestrial mining and intensive agriculture in pollution of estuarine surface sediments: Spatial distribution of trace metals in the Gulf of Urabá, Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 111, 311-320.
- Van den Broek, J. L., Gledhill, K. S., & Morgan, D. G. (2002). Heavy metal concentrations in the mosquito fish, *Gambusia holbrooki*, in the Manly Lagoon catchment. In: UTS Freshwater Ecology Report 2002, Department of Environmental Sciences, University of Technology, Sydney.
- Van Den Broek, H., De Wolf, H., Backeljau, T., & Blust, B. (2010). Effect of metal accumulation on metallothionein level and condition of the periwinkle *Littorina littorea* along the Scheldt estuary (the Netherlands). *Env. Poll.*, 158, 1791-1799.
- Vásquez, A., Guevara, M., González, M., Cortez, R., & Arredondo, B. (2013). Crecimiento y composición bioquímica de *Thalassiosira pseudonana* (Thalassiosirales: Thalassiosiraceae) bajo cultivo semi-continuo en diferentes medios y niveles de irradiancias. *Revista de Biología Trópica*, 61(3), 1003-1013.
- Villanueva, T. L., Belizario, G., Chui, H., & Perez, K. (2023). Evaluación de la concentración de metales pesados en aguas superficiales del río Chacapalca para fines de riego. *Revista Boliviana de Química* 40(3), 89-96.
- Villarejo, A. L. D. (2004). Ecotoxicología y acción toxicológica del mercurio. *Anal. Real Acad. Nac. Farm.*, 70(4), 933-959.
- Villarreal, C., & Pelaez, P. (1999). Biología y cultivo de langosta de agua dulce *Cherax quadricarinatus*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste y Acuacultivos de Santo Domingo. México.
- Waldichuck, M. (1974). Some biological concerns in heavy metals pollution. In: Vernberg, F. J. and W. Vernberg (eds). *Pollution and Physiology of Marine Organisms*. Academic Press, N.Y.; pp. 1-59.
- Wang, W. (2002). Interactions of trace metals and different marine food chains. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 243, 295-309.
- Wang, W. X., & Fisher, N. S. (1998). Accumulation of trace elements in a marine copepod. *Limnology & Oceanography*, 43(2), 273-283.
- Wang, W. X., Fisher, N. S., & Louma, S. N. (1996). Kinetic determination of trace elements bioaccumulation in the mussel *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, 140, 91-113.
- Whitaker, B. R., & Wright, K. M. (2019). Amphibian Medicine 892-1013. In: Divers, S.J. & Stahl, S.J. (eds). *Mader's Reptile and Amphibian Medicine and Surgery*. Elsevier. St. Louis Missouri. USA.
- Who World Health Organization. (1996). Environmental Health Criteria. 2da Edición. Ginebra. Cooper (EHC 200), Cadmium (EHC 135), Zinc (EHC 221), Níquel (EHC 108), Lead (EHC 03) and Mercury (EHC 01).
- Wittwer, P. (2012). Efecto de la cocción sobre la concentración de mercurio (Hg) y selenio (Se) en productos pesquero. Tesis Licenciatura en Ciencias de los Alimentos, Universidad Astral de Chile.
- Zafar, A, Eqani, S, Bostan, N, Cincinelli, A, Tahir, F, Shah, S.2015. Toxic metals signature in the human seminal plasma of Pakistani population and their potential role in male infertility. *Environ Geochem Health*, 37(3), 515-527. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9666-8>.
- Zale, A., Nielsen, L., & Johnson, D. (2012). Fisheries Techniques. Bethesda, Maryland, United States American. Fisheries Society Press.
- Zaza, S., de Balogh, K., Palmery, M., Pastorelli, A. A., & Stacchini, P. (2015). Exposición humana en Italia al plomo, cadmio y mercurio a través del consumo de pescado y productos del mar de la zona pesquera del Atlántico centro-oriental. *Journal of food composition and analysis*, 40, 148-153.
- Zhang, W. W., & Ma, J. Z. (2011). Waterbirds as bioindicators of wetland heavy metal pollution. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 2769-2774.
- Zhang, W., Guo, R., Al, S., Yang, Y., Ding, J., & Zhang, Y. (2018). Longterm heavy metal pollution varied female reproduction investment in free-living Anura, *Bufo raddei*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 159, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.001>
- Zhao, X., Zhou, Y., Min, J., Wang, S., Shi, W., & Xing, G. (2012). La escorrentía de nitrógeno domina la contaminación del agua por nitrógeno proveniente de la rotación arroz-trigo en la región del lago Taihu de China. *Agricultura, ecosistemas y medio ambiente*, 156, 1-11.
- Zhelev, Z. M., Arnaudova, D., Popgeorgiev, G., & Tsonev, S. (2020). In situ assessment of health status and heavy metal bioaccumulation of adult *Pelophylax ridibundus* (Anura: ranidae) individuals inhabiting polluted area in southern Bulgaria. *Ecological Indicators*, 115, 106413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106413>
- Zhou, Q., J. Zhang, J. Fu, J. Shi & G. Jiang, (2008). Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606, 135-150.
- Zwieg, R. D., Morton, J. D., & Stewart, M. M. (1999). Source Water Quality for Aquaculture: A Guide for Assessment. The World Bank Washington D.C.
- Zubero, M. B., Aurrekoetxea, J. J. Ibarluzea, J. M., Arenaza, J. M., Bastertxea, C., Rodríguez, J., & Saénz, R. (2008). Metales Pesados (Pb, Cd, Cr y Hg) en población general adulta próxima a una planta de tratamiento de residuos urbanos de Bizkaia. *Revista Española de Salud Pública*, 82, 481-492.
- Zug, G., & Zug, P., (1979). The marine toad, *Bufo marinus*: a natural history resumé of native populations. Smithsonian contributions to zoology, pp. 284.
- Zurera, G., Estrada, B., Rincon, F., & Pozo, R. (1987). Niveles de contaminación por plomo y cadmio en vegetales comestibles. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 38(5), 805-812.