

Bioacumulación por mercurio en peces y riesgo por ingesta en una comunidad nativa en la amazonia peruana

Bioaccumulation of mercury in fish and risk of ingestion in an indigenous community in the Peruvian Amazonia

Grober Panduro^{1,2}, Gian Carlos Rengifo^{1,2}, Juan Luis Barreto^{1,2}, Ángel K. Arbaiza-Peña^{1,2}, José Iannacone^{3,4,5,6}, Lorena Alvarino⁵, Brian Crnobrna^{1,2}

RESUMEN

El mercurio (Hg) es un metal pesado tóxico que provoca daños en el sistema nervioso central, altera el comportamiento humano y provoca impacto en la biota acuática. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la bioacumulación por Hg en peces y el riesgo por ingesta en una Comunidad Nativa (CN) en la amazonia peruana durante la estación seca y lluviosa. La CN Santa Rosa de Tamaya y Tipishca se encuentra en la cuenca baja del río Abujao. El estudio se realizó con 119 habitantes agrupados en 22 familias, con edades promedio de 9 y 38 años para niños y adultos, respectivamente. Los peces fueron colectados empleando principalmente redes de arrastre y fueron identificados siguiendo el procedimiento morfológico taxonómico estándar. El contenido de Hg en músculo de los peces se hizo mediante espectrometría de fluorescencia atómica. Los resultados muestran que las cuatro especies de mayor consumo por la CN fueron *Pterygoplichthys pardalis* (Castelnau, 1855) «Carachama» (Loricariidae), *Prochilodus nigricans* Spix y Agassiz, 1829 «Boquichico» (Prochilodontidae), *Pseudoplatystoma punctifer* (Castelnau, 1855) «Doncella» (Pimelodidae) y *Calophysus macropterus* (Lichtenstein, 1819) «Mota» (Pimelodidae). El nivel de exposición fue extremadamente alto y la peligrosidad fue media. La dosis máxima de consumo permisible por semana de metilmercurio (MeHg) según la OMS es de 1.6 µg MeHg/kg/semana. Este límite fue superado por *C. macropterus* para niños de la CN. Se concluye que el riesgo a la salud del poblador de la CN de la Amazonía peruana por el MeHg es alto.

Palabras clave: bioacumulación, exposición, peligrosidad, riesgo a la salud

¹ Negocios Amazónicos Sustentables EIRL, Pucallpa, Perú

Sur, Lima, Perú

⁴ Laboratorio de Parasitología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

⁵ Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA), Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú

⁶ E-mail: joseiannacone@gmail.com

Recibido: 27 de octubre de 2019

Aceptado para publicación: 1 de junio de 2020

Publicado: 11 de agosto de 2020

ABSTRACT

Mercury (Hg) is a toxic heavy metal that causes damage to the central nervous system, alters human behavior, and has an impact on aquatic biota. The aim of this study was to evaluate the bioaccumulation by Hg in fish and the risk for ingestion in an indigenous community (IC) in the Peruvian Amazonia during the dry and rainy season. The community Santa Rosa de Tamaya y Tipishca is located in the lower basin of the Abujao River. The study was carried out with 119 inhabitants grouped into 22 families, with average ages of 9 and 38 years for children and adults, respectively. The fish were collected using mainly trawl nets and were identified following the standard taxonomic morphological procedure. The Hg content in fish muscle was done using atomic fluorescence spectrometry. The results show that the four most consumed fish species by the NC were *Pterygoplichthys pardalis* (Castelnau, 1855) «Amazon sailfin catfish» (Loricariidae), *Prochilodus nigricans* Spix and Agassiz, 1829 «Black prochilodus» (Prochilodontidae), *Pseudoplatystoma punctifer* (Castelnau, 1855) «Spotted Tigerr Shovelnose catfish» (Pimelodidae) and *Calophysus macropterus* (Lichtenstein, 1819) «Zamurito» (Pimelodidae). The level of exposure was extremely high and the danger was medium. The maximum allowable dose of methylmercury (MeHg) per week according to WHO is 1.6 µg MeHg/kg/week. This limit was exceeded by *C. macropterus* for NC children. It is concluded that the health risk of the population of the CN of the Peruvian Amazon by MeHg is high.

Key words: bioaccumulation, exposure, danger, health risk

INTRODUCCIÓN

La presencia de metales pesados (MP) en los cuerpos de agua causa un impacto negativo en el ecosistema acuático y en la salud pública de los residentes locales (Osoreo *et al.*, 2012; García-Sotero y Alva-Astudillo, 2013; Chota *et al.*, 2014; Castaño *et al.* 2015; Dong *et al.*, 2015; Alegre *et al.*, 2018). Los ambientes acuáticos son contaminados por el uso de mercurio (Hg) y del metilmercurio (MeHg) que se acumulan en el agua, sedimento y biota de los ríos como un residuo de la actividad minera-aurífera ilegal a pequeña escala (Ortega y Hidalgo, 2008; Brack *et al.*, 2011; Caballero-Espejo *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2018). El Hg, y principalmente el MeHg generan reacciones químicas y biológicas que terminan integrándose a la cadena trófica de las especies ícticas al unirse a las proteínas de los peces, por lo que no son eliminados a través de la limpieza o la cocción, de allí que

terminan siendo incorporados en la dieta de las personas (Ashe, 2012; Yard *et al.*, 2012; García-de Sotero y Alva-Astudillo, 2013; Gonzales *et al.*, 2014; Manavi y Mazunder, 2018; Martínez *et al.*, 2018; Junaidi *et al.*, 2019).

Al revisar los riesgos del Hg y del MeHg en la salud humana, se ha encontrado que el consumo de alimentos como el pescado contaminado por Hg ocasiona efectos principalmente neurotóxicos, inmunotóxicos, teratogénicos y en el sistema reproductor, siendo los niños uno de los grupos poblacionales más sensibles (Faial *et al.*, 2018; Manavi y Mazunder, 2018; Junaidi *et al.*, 2019; Vargas-Licona y Marrugo-Negrete, 2019). La Unión Europea y el Codex Alimentarius indican que el contenido máximo de Hg en la carne de pescado es de 0.5 µg·g⁻¹ de peso fresco (EU, 2017; Junaidi *et al.*, 2019; UNEP Environment, 2019; Vargas-Licona y Marrugo-Negrete, 2019).

Se ha evaluado la longitud, estacionalidad y posición trófica de los peces de Madre de Dios, Perú, y su relación con las concentraciones de Hg en los ríos amazónicos bajo la acción de minería artesanal (Roach *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2018). Muchas variables de confusión deben ser tomadas al contrastar el Hg y el MeHg en los peces como: especie de pez, posición trófica, comportamiento de alimentación, degradación del hábitat y fuentes de energía. Los peces que presentan la mayor cantidad de Hg son aquellos que presentan mayor posición trófica, predominantemente los depredadores piscívoros (Ortega *et al.*, 2012; Roach *et al.*, 2013; Gonzales *et al.*, 2014; Walczak y Reichert, 2016; Zamora-Arellano *et al.*, 2017; Vargas-Licon y Marrugo Negrete, 2019).

En Ucayali, región localizada en la amazonia peruana, existen extractores ilegales de oro en la cuenca del río Aguaytía y en mayor cantidad en la cuenca del río Abujao (Brack *et al.*, 2011). La contaminación por Hg está impactando a los peces dulceacuícolas de esta zona por efecto de esta actividad antrópica, repercutiendo en sus procesos reproductivos, que, al ser consumidos por los pobladores, afectan su salud, y constituyen un riesgo creciente, debido a que el pescado forma parte de su dieta diaria (Raimann *et al.*, 2014; Faial *et al.*, 2018; Manavi y Mazunder, 2018). Esto se manifiesta en un serio problema de salud pública y ambiental, debido a que el ciclo de contaminación y bioacumulación por Hg y MeHg es permanente (Roach *et al.*, 2013; Raimann *et al.*, 2014; Faial *et al.*, 2015; Zamora-Arellano *et al.*, 2017; Manavi y Mazunder, 2018).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la bioacumulación por Hg en peces y el riesgo por ingesta en una comunidad nativa en la amazonia peruana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en la Comunidad Nativa (CN) Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, distrito de Masisea, Región Ucayali, ubicada en la parte central oriental de la amazonia peruana. La zona se encuentra a una altitud de 150 msnm y presenta clima tropical, temperatura media de 26.4 °C y precipitaciones de hasta 1726 mm por año.

Recolección de Datos

La población de la CN cuenta con una población de 119 habitantes establecidos dentro de la comunidad, conformada por 62 adultos (de 15 años a más) y 57 menores (de 5 a 14 años). Los 119 habitantes se encuentran distribuidos en 22 familias, siendo este el número poblacional que se manejó para el desarrollo de los formatos vivenciales.

Para la identificación específica de los peces de mayor consumo se siguió el procedimiento morfológico taxonómico estándar (Buitrago-Suarez y Burr, 2007; Ortega *et al.*, 2012). Se permaneció en la CN con las 22 familias durante una semana para observar su alimentación diaria, distribuyendo 11 familias (50%) para la estación húmeda (quincena de noviembre de 2015 a quincena de mayo de 2016) y 11 familias (50%) para la estación seca (quincena de mayo de 2016 a quincena de noviembre de 2016), obteniendo así las cantidades de consumo de pescado diario y semanal per-cápita en ambas estaciones del año y en base a las especies de mayor consumo. En todos los casos, el pescado destinado al consumo fue pesado empleando una balanza digital manual.

Se registró la edad y peso de las personas en las dos estaciones. Se pesó a 50 niños (5-14 años) y 54 adultos (mayores de 15 años)

utilizando una balanza digital. La edad y el peso se utilizó para discriminar el nivel de exposición al Hg y MeHg en niños y en adultos (Zamora-Arellano *et al.*, 2017). Se empleó la prueba de t de Student para comparar los pesos de los niños y adultos entre ambas estaciones. De igual forma se usó esta prueba para comparar el consumo semanal per cápita en ambas estaciones del año.

Especies Ícticas de Mayor Consumo

La colecta de los peces se realizó en el río Abujao en áreas libres de troncos, árboles o arbustos. Se hicieron capturas vivas y pasivas empleando redes de arrastre de 10 m de largo y 2 m de profundidad, con abertura de malla de 5 mm. Se realizaron 10 arrastres en un área aproximada de 200 a 350 m². En zonas con vegetación marginal y de difícil acceso, se realizó la colecta con red atarraya de 2" y 2 m de largo. Finalmente, se emplearon tres tipos de juegos de redes de monofilamento de 2", 3" y 4" de 40 m de largo por 4 m de ancho para la captura pasiva de peces, por un tiempo de 12 h de exposición por cada red. Los peces capturados en las redes que no pertenecían a las especies consumidas por la CN fueron liberados e introducidos nuevamente al río. Se siguió estrictamente el protocolo establecido por el MINAM (2014).

Mercurio (Hg)

La obtención de muestras del músculo de pescado para el análisis de Hg en el laboratorio se hizo según MINAM (2014). Se seleccionaron ejemplares completos de los peces con un peso mayor a 300 g de donde se obtuvieron filetes en condiciones asépticas que fueron colocados en bolsas de polietileno e inmediata congelación con envases provistos con «ice pack». Se capturaron tres individuos de cada especie de mayor consumo. El análisis del contenido de Hg en músculo se hizo según el protocolo de Chota *et al.* (2014) en base al método de la EPA 7474 (validado Revisado 2007 (EPA, 2007) por espec-

trometría de fluorescencia atómica. Los valores para cada especie de pez fueron comparados con respecto a los valores de concentración máxima permisible en músculo de 0.50 µg·g⁻¹ para peces frescos que establece la Unión Europea (UE, 2017), el Codex Alimentarius (FAO/WHO, 2015; UNEP Environment, 2019) y varios investigadores (Castilhos *et al.*, 2006, Zamora-Arellano *et al.*, 2017, Junaidi *et al.*, 2019). También se consideró como valor de comparación el valor límite de concentración máxima permisible de 0.30 µg·g⁻¹, establecido por la USEPA/USFDA (2004).

Muestras y Especies por Estación

Se analizaron cinco muestras por cada estación húmeda y seca, de las cuales una muestra fue capturada en una zona sin influencia de contaminación de Hg por la minería ilegal, actividad que se desarrolla a la altura del caserío «28 de Julio». Se tomaron muestras de *Prochilodus nigricans* Spix y Agassiz, 1829 «Boquichico» (Prochilodontidae) a 1.8 km aguas arriba de este caserío en el río Abujao. Las cuatro especies ícticas clasificadas como las de mayor consumo por los pobladores de la CN se colectaron en la zona de influencia de la minería ilegal, en cada estación climática: *Pterygoplichthys pardalis* Castelnau, 1855 «Carachama» (Loricariidae), *P. nigricans*, *Pseudoplatystoma punctifer* (Castelnau, 1855) «Doncella» (Pimelodidae), y *Calophrysus macropterus* (Lichtenstein, 1819) «Mota» (Pimelodidae).

Nivel de Exposición por Ingesta (DOSE)

Los valores de Hg que los pobladores ingieren por semana se evaluaron con base al MeHg (González *et al.*, 2014; Rodríguez y Piedra, 2016). Se consideró que el 100% del contenido de Hg en el músculo de los peces se encuentra en forma de MeHg (González *et al.*, 2014; Zamora-Arellano *et al.*, 2017). Se utilizó la fórmula citada por Fernández y Gonzales (2009): DOSE (MeHg) = ([Consumo

Cuadro 1. Nivel de riesgo a la salud por consumo de MeHg

Niveles de riesgo a la salud humana		Peligrosidad (concentración bioacumulada y dosis a la semana de MeHg)			
		Baja	Media	Alta	Extremadamente alta
Exposición (cantidad de consumo)	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Alto
	Media	Bajo	Medio	Alto	Alto
	Alta	Medio	Alto	Alto	Extremadamente alto
	Extremadamente alta	Alto	Alto	Extremadamente Alto	Extremadamente Alto

Fuente: Sardiñas-Peña *et al.* (2001)

mo de carne de pescado por semana en g] x [Concentración de Hg elemental $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$] / Peso corporal en kg.

El riesgo a la salud humana por consumo de músculo de pescado con Hg fue evaluado teniendo en cuenta lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003), donde el nivel máximo de consumo permisible a la semana de MeHg fue de $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso corporal para niños y de $3.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso corporal para adultos (WHO, 2003; Raimann *et al.*, 2014).

Para determinar los riesgos a la salud de la población de la CN, se tomaron los datos de consumo permisible a la semana y la sumatoria de los valores de Hg en las especies de pescado de mayor consumo (Cuadro 1; Sardiñas-Peña *et al.*, 2001).

Aspectos Éticos

Los autores señalan que se cumplió con toda la normatividad vigente nacional e internacional. Esta investigación se enmarca en lo validado por la Mesa Técnica de la Línea de Base Ambiental Ucayali, Perú, bajo los

lineamientos establecidos por el MINAM, Autoridad Nacional del Agua (ANA), Oficina de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y Ministerio de Energía y Minas (MINEM). El permiso de colecta para comunidades hidrobiológicas de la investigación denominada «Línea de base ambiental y protocolo de monitoreo ambiental en la zona de influencia a la Reserva Sierra del Divisor» fue autorizado por la Resolución Directoral 110-2015 GRU-ARAU-GRRNGMA-DGFFS para ser ejecutado por la Universidad Nacional de Ucayali (UNU). Asimismo, se realizó una reunión de acuerdos con la CN y los investigadores del proyecto.

RESULTADOS

Población de Peces en las Capturas

El Cuadro 2 muestra la población de peces conformada por 15 especies. De estas, *P. pardalis*, *P. nigricans* y *P. punctifer* alcanzaron el 100% de preferencia de consumo de las familias y *C. macropterus* fue preferida por el 91% de las familias.

Cuadro 2. Relación de peces más frecuentemente capturados y consumidos en la Comunidad Nativa Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, Ucayali, Perú

Nombre común	Especie	Familia	NF	%
Bagre	<i>Platysilurus mucosus</i> (Vaillant, 1880)	Pimelodidae	11	50
Boquichico*	<i>Prochilodus nigricans</i> Spix y Agassiz, 1829	Prochilodontidae	22	100
Carachama*	<i>Pterygoplichthys pardalis</i> Castelnau, 1855	Loricariidae	22	100
Chambira	<i>Rhaphiodon vulpinus</i> Spix y Agassiz, 1829	Cynodontidae	8	36
Chío	<i>Curimatella</i> sp C. H. Eigenmann y R. S. Eigenmann, 1889	Curimatidae	8	36
Corvina	<i>Plagioscion squamosissimus</i> (Heckel, 1840)	Sciaenidae	14	64
Doncella*	<i>Pseudoplatystoma punctifer</i> (Castelnau, 1855)	Pimelodidae	22	100
Fasaco	<i>Hoplias malabaricus</i> (Bloch, 1794)	Erythrinidae	10	45
Lisa	<i>Schizodon fasciatus</i> Spix y Agassiz, 1829	Andstomidae	15	68
Llambina	<i>Potamorhina altamazonica</i> (Cope, 1878)	Curimatidae	16	73
Mota*	<i>Calophysus macropterus</i> (Lichtenstein, 1819)	Pimelodidae	20	91
Palometa	<i>Mylossoma duriventre</i> (Cuvier, 1818)	Characidae	15	68
Paña	<i>Serrasalmus spilopleura</i> Kner, 1858	Characidae	13	59
Piro	<i>Pterodoras</i> sp Bleeker, 1862	Doradidae	9	41
Sardina	<i>Triportheus</i> sp Cope, 1872	Characidae	15	68

NF = Número de familias de la Comunidad Nativa

* Especies de mayor consumo en la CN

Edad y Peso de los Pobladores

El peso promedio en niños y adultos en las dos estaciones climáticas no presentó diferencias significativas (niños; $t=1.10$; adultos: $t=0.88$) (Cuadro 3).

Consumo de Pescado

El consumo per-cápita de pescado semanal de los pobladores adultos fue mayor que el de los niños ($t=7.07$) (Cuadro 4). El

consumo per-cápita de pescado semanal en niños y adultos en las dos estaciones climáticas no presentó diferencias significativas (niños; $t=0.83$; adultos: $t=1.61$) (Cuadro 4).

Concentración de MeHg en Peces

Las concentraciones de Hg en las cuatro especies más consumidas por la población son indicadas en el Cuadro 5. *Calophysus macropterus* registra la concen-

Cuadro 3. Edad y peso promedio de la población en la Comunidad Nativa Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, Ucayali, Perú, según la estación del año

Población	Número (n)	Edad promedio	Estación húmeda (kg)	Estación seca (kg)
Niños (5-14 años)	57	9	29.7 ± 4.6	31.0 ± 3.3
Adultos (≥15 años)	62	38	60.8 ± 8.8	62.3 ± 8.6

Cuadro 4. Consumo semanal per-cápita de la población en la Comunidad Nativa Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, Ucayali, Perú

Población	Estación	
	Húmeda (g/semana)	Seca (g/semana)
Niños	1450 ± 101	1573 ± 106
Adultos	2344 ± 127	2720 ± 195

tración más alta de Hg y *P. pardalis* la concentración más baja de Hg, en ambas estaciones.

Ingesta Semanal de MeHg

En la estación húmeda, dos de las cuatro especies de peces superaron el nivel máximo de consumo permisible semanal para niños (1.6 $\mu\text{g MeHg/kg}$ de peso corporal), y solamente *C. macropterus* lo superó para los adultos (3.2 $\mu\text{g MeHg/kg}$ de peso corporal) (Figura 1). En la estación seca (Figura 2) se observó un incremento en la dosis consumida de MeHg, donde las cuatro especies se encuentran por encima del nivel establecido por la OMS en niños y de tres especies en adultos. *C. macropterus* presentó los valores más altos en ambas las temporadas.

Evaluación del Riesgo

El riesgo está relacionado con el consumo de pescado, siendo el consumo promedio per cápita de 2532 g a la semana por adulto; es decir, 132 kg por adulto por año.

Si bien se muestra la presencia de MeHg en el tejido muscular de los peces, ninguna de las muestras superó las concentraciones máximas permisibles descritas por la USEPA de 0.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y de la FAO/OMS de 0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Así, tomando como criterio la concentración bioacumulada más alta obtenida (0.19 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en los músculos de los peces, se clasificó el consumo como nivel de Peligrosidad Media con base a la referencia de la FAO/OMS y como Alta Peligrosidad con base a la referencia de la USEPA, según el Cuadro 1.

La magnitud de la exposición fue estimada con base a la cantidad de consumo, clasificada como exposición «extremadamente alta» y la peligrosidad o toxicidad, clasificada como peligrosidad «media» manifestada por la concentración de MeHg en el músculo de los peces de mayor consumo, donde se aplicó la fórmula citada para encontrar el riesgo a la salud. Se clasificó como nivel de riesgo «alta» a la salud humana a pesar de que los niveles de concentración bioacumulada de MeHg no superan los límites máximos permisibles, siendo superado el nivel de exposición por la cantidad de consumo de pescado, quedando evidenciado que el mayor riesgo para la salud de la población es la intoxicación de las personas con Hg.

Cuadro 5. Concentración de metilmercurio (MeHg) en músculo de los peces en las dos estaciones del año en la Comunidad Nativa Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, Ucayali, Perú

Especie	Estación húmeda ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Estación seca ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
<i>Prochilodus nigricans</i> (muestra blanca)	< 0.01	0.01
<i>Pterygoplichthys pardalis</i>	0.02	0.06
<i>Prochilodus nigricans</i>	0.05	0.09
<i>Pseudoplatystoma punctifer</i>	0.03	0.11
<i>Calophysus macropterus</i>	0.13	0.19

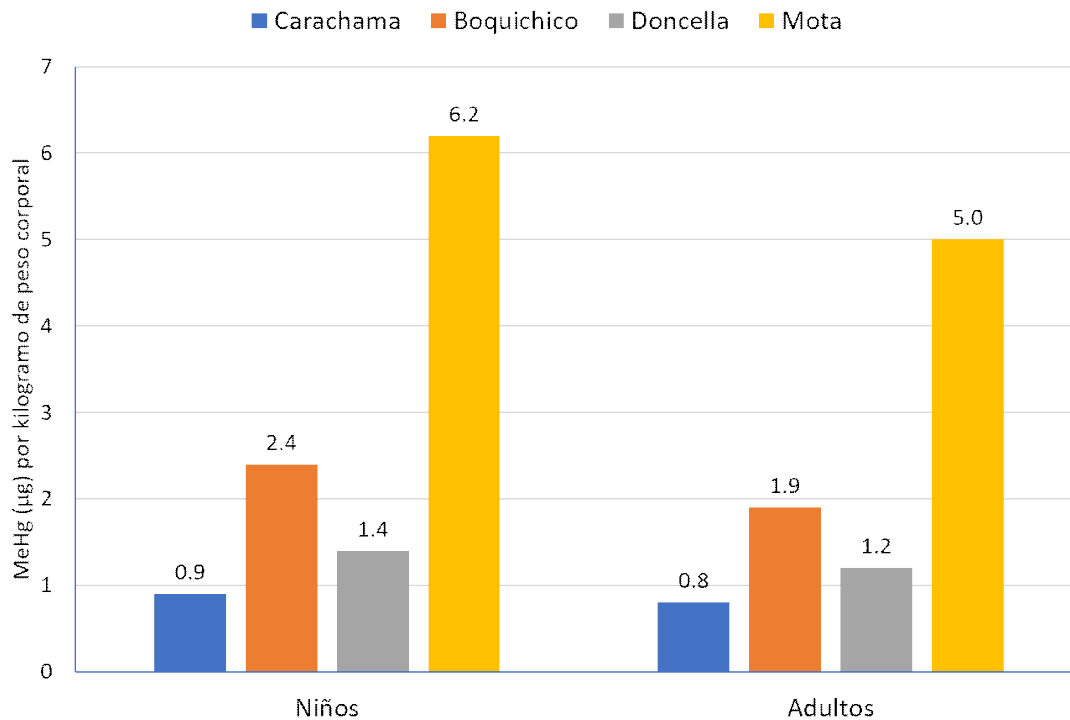


Figura 1. Consumo semanal de metilmercurio (MeHg) en la estación húmeda en la Comunidad Nativa Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, Ucayali, Perú. *Pterygoplichthys pardalis* = Carachama. *Prochilodus nigricans* = Boquichico. *Pseudoplatystoma punctifer* = Doncella. *Calophysus macropterus* = Mota
Nivel máximo de consumo permisible semanal de MeHg es de $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso corporal para niños y de $3.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso corporal para adultos

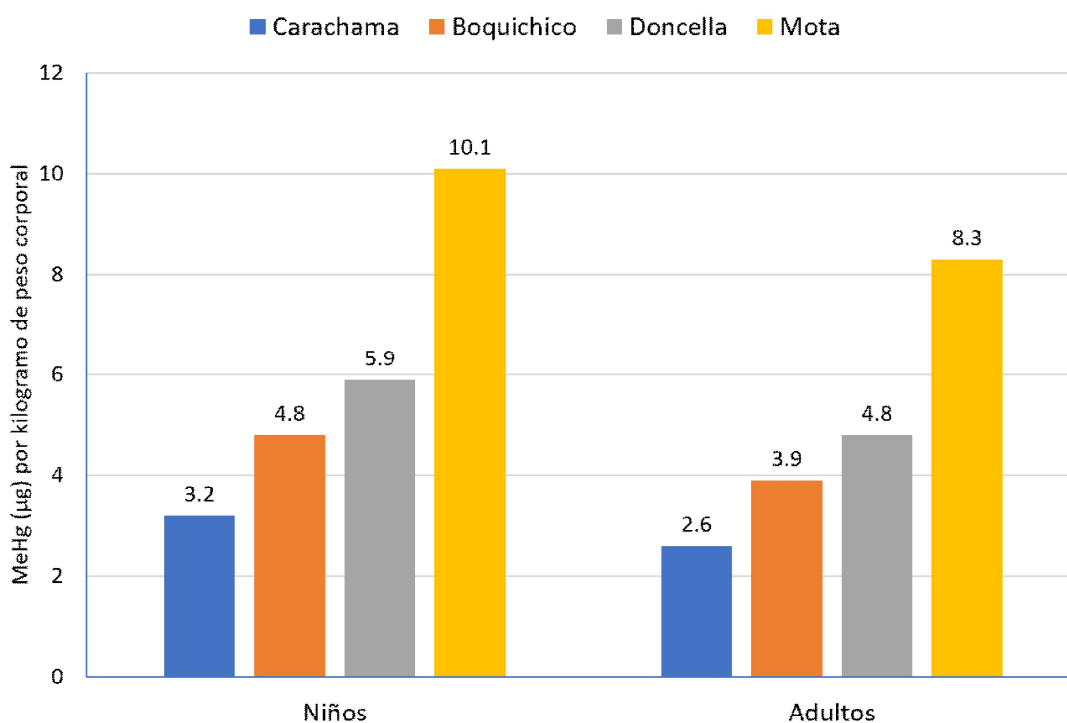


Figura 2. Consumo semanal de metilmercurio (MeHg) en la estación seca en la Comunidad Nativa Santa Rosa de Tamaya y Tipishca, Ucayali, Perú. *Pterygoplichthys pardalis* = Carachama. *Prochilodus nigricans* = Boquichico. *Pseudoplatystoma punctifer* = Doncella. *Calophysus macropterus* = Mota

DISCUSIÓN

Las familias de la CN Santa Rosa de Tamaya y Tipishca consumen mayormente *P. nigricans*, *P. punctifer* y *C. macropterus*, siendo *P. nigricans* la especie que en mayor abundancia se desembarca en Ucayali junto a *C. macropterus*, según los registros del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (Brack *et al.*, 2011) para los desembarques de estas dos especies en los últimos años. Debido a su disponibilidad o abundancia en los mercados locales de la Amazonía peruana, se podría estar afectando la salud de las poblaciones donde se realizan actividades extractivas de minería ilegal (Gracia *et al.*, 2010; Osoreo *et al.*, 2012). No obstante, Martínez *et al.* (2018) señalan que la con-

centración del Hg en los peces, por sí sola, no es el indicador ideal de contaminación por Hg para evaluar sitios específicos, al no encontrar correlación entre la concentración de Hg en sedimentos y el impacto en el río por la actividad minera aurífera artesanal.

Sobre el consumo de peces al año, se encontraron reportes de 16 kg/persona/año. También FAO/OMS (2018) señala un consumo de 20.2 kg/persona/año a nivel mundial. Asimismo, MINSA (2010) registra 22.2 kg/persona/año para la población peruana y 12.0 kg/persona/año solamente para la región Selva. Para la región Ucayali, CITE (2017) muestra que el consumo de productos hidrobiológicos por año es 42.1 kg/persona/año en las zonas rurales. Sin embargo, el nivel de consumo es mucho mayor en otras localida-

des amazónicas, alcanzando un consumo de 128 kg/año en adultos y 80 kg/año en niños (Zuloaga *et al.*, 2015).

Los resultados muestran que la concentración de Hg en el músculo de los peces amazónicos aumenta en la estación húmeda en comparación a la seca. Esto podría ser efecto de concentración de Hg en la estación seca en el río Abujao, aunque no se han determinado los valores de Hg en el agua del río, de allí que no sea posible corroborar esta afirmación. Martínez *et al.* (2018) señalan que las concentraciones de Hg fueron más altas en la estación húmeda, lo que indica una interacción mucho más compleja que conduce a concentraciones más altas de Hg en los peces en la temporada seca.

La estación húmeda está asociada al aumento de la inundación de los cuerpos de agua en la Amazonía, y se han identificado como áreas que incrementan la metilación del Hg. La presencia de condiciones anóxicas en estas áreas favorece los procesos de metilación y promueven la bioacumulación de Hg en fauna acuática (Beltran-Pedrerros *et al.*, 2011).

Los resultados indican que la fuente de contaminación por Hg en el río Abujao, probablemente sea mayor río arriba de la CN estudiada. Otros estudios en Madre de Dios indicaron un aumento en las concentraciones de Hg asociado a actividades de minería artesanal aurífera a pequeña escala en el río (Roach *et al.*, 2013; Diringer *et al.*, 2015). Los ríos adyacentes en Ucayali aún no muestran las perturbaciones extremas de la minería de oro que se han documentado en Madre de Dios, Perú (Martínez *et al.*, 2018). El río Abujao representa una alternativa para investigaciones futuras que examinen la geoquímica del Hg, sin la interferencia de actividades mineras a gran escala en la amazonia peruana (Roach *et al.*, 2013; Caballero-Espejo *et al.*, 2018).

En peces de los ríos amazónicos de Madre de Dios, Perú, sin altos impactos de minería aurífera, se ha incrementado los ni-

veles de Hg sin superar los límites máximos de concentración permisible (Martínez *et al.*, 2018). *Calophysus macropterus* es una especie depredadora piscívora y necrófaga en la cadena trófica. Diversos autores señalan que la alta posición trófica de esta especie está correlacionada con una alta concentración de Hg en estos peces (Pérez y Fabré, 2009; Beltran-Pedrerros *et al.*, 2011; Mosquera-Guerra *et al.*, 2015; Walczak y Reichert, 2016; Zamora-Arellano *et al.*, 2017; Martínez *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2019).

Fernández y González (2009) y Fernández (2013), muestran que *C. macropterus* mostró los mayores valores de Hg, sobrepasando los límites máximos establecidos por la WHO (2003), presentando valores entre 1.13 y 1.50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Estos resultados son coincidentes con la presente investigación debido a que esta especie acumula altas concentraciones de Hg (Salinas *et al.*, 2014). En Brasil, se analizaron 190 especímenes y en 54% de ellas se encontraron valores de Hg por encima de lo establecido por la normativa internacional (WHO, 2003).

Mosquera-Guerra *et al.* (2015) señalan que el consumo de *C. macropterus* podría ocasionar un riesgo para la salud de los pobladores que la consumen al ser peces concentradores de Hg en su músculo. Esta especie es, además, usada como carnada para vertebrados acuáticos como los delfines de río [*Inia geoffrensis* (Blainville, 1817)], manatíes y caimanes en Brasil y Perú. La pesquería de *C. macropterus* es considerada importante al reemplazar a varias especies de bagres amazónicos para la alimentación humana (Salinas *et al.*, 2014).

Si bien las evaluaciones realizadas por Fernández y González (2009) en ríos amazónicos, muestran que *P. punctifer* supera los límites de la USEPA de 0.32 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Hg, *P. nigricans* estuvo por debajo con 0.03 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Hg, valor menor a la concentración obtenida en el presente trabajo. El límite de la OMS para el Hg (0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) (Castilhos *et al.*, 2006), no fue superado en

los peces *P. punctifer*, *P. nigricans* y *P. pardalis* (Fernández y González, 2009).

Por otro lado, Brack *et al.* (2011) registraron en peces similares a los de estudio, como *C. macropterus*, *P. punctifer* y *P. nigricans* valores por debajo de los límites máximos permisibles para Hg indicados por la FAO/OMS (2015); mientras que Fernández (2013) encontró que los peces amazónicos *C. macropterus* y *P. punctifer* no sobrepasaron los valores límites de Hg en los ríos Tahuamanu – Iberia, Tambopata y Bajo Madre de Dios, Perú. La única especie con la que se coincidió en este estudio en no sobrepasar el límite de Hg fue *P. nigricans*.

En este trabajo se consideró que la eficiencia de conversión de Hg a MeHg por consumo de peces fue del 100%; sin embargo, Bradley *et al.* (2017) señalan que podrían ser porcentajes de conversión mucho menores.

Los registros de consumo por persona en la CN en estudio están sujetas a una exposición «extremadamente alta», debido al masivo uso y dependencia de pescado en las dietas alimenticias permanentes durante el año (Ashe, 2012; Zuloaga *et al.*, 2015). El consumo de pescado con altas concentraciones de metales pesados y metaloides tóxicos afecta la salud humana, generando un invaluable deterioro social ligado al nacimiento de niños con malformaciones y retardo mental o psicomotor (Osoreo *et al.*, 2012; Yard *et al.*, 2012; Zamora-Arellano *et al.*, 2017).

Gaioli *et al.* (2012) indican que el efecto en salud pública es un serio problema para las poblaciones establecidas cerca a explotaciones ilegales e informales de la minería debido a que el consumo de peces no es solo un riesgo constante (Díaz, 2014), sino también el consumo de agua contaminada, especialmente en poblaciones rurales y comunidades indígenas, así como en comunidades urbanas (Ramírez, 2008). En el peor de los casos, como sucede en Madre de Dios, Perú, en la población urbana y rural, el Hg utilizado por

la minería ilegal es un riesgo en la salud humana y ecosistémica, no solamente por el consumo de agua y de peces (Yard *et al.*, 2012; Martínez *et al.*, 2018); sino también por la destrucción del suelo frágil amazónico, por la tala del bosque, por la migración asociada al incremento de enfermedades infectocontagiosas, por violencia social, trata de personas, prostitución e inseguridad alimentaria (Castilhos *et al.*, 2006; Osoreo *et al.*, 2012; Caballero-Espejo *et al.*, 2018; Rojas-Jaimes *et al.*, 2019).

Agradecimientos

A la Empresa Negocios Amazónicos Sustentables EIRL – NEGASUS, por el financiamiento, apoyo logístico y técnico durante el desarrollo de la investigación. A la Universidad Nacional de Ucayali por el financiamiento otorgado a través del Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea – FOCAM. A los pobladores de la Comunidad Indígena Santa Rosa de Tipishca por su participación y aportes a la investigación.

LITERATURA CITADA

1. **Alegre A, Bonifacio E, Lee S, Alvariano L, Iannacone J. 2018.** Monitoreo ecotoxicológico de una cuenca en Huancavelica, Perú afectada por metales pesados. REDVET 19(5). [Internet]. Disponible en: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n050518.html>
2. **Ashe K. 2012.** Elevated mercury concentrations in humans of Madre de Dios Peru. Plos One 7: e33305. doi: 10.1371/journal.pone.0033305
3. **Bradley MA, Barst BD, Niladri Basu N. 2017.** A review of mercury bioavailability in humans and fish. Int J Environ Res Public Health 14: 169. doi:10.3390/ijerph14020169
4. **Beltran-Pedrerros S, Zuanon J, Galdino-Leite R, Pacheco-Peleja JR, Barros-Mendonça A, Rider-Forsberg B. 2011.** Mercury bioaccumulation in

- fish of commercial importance from different trophic categories in an Amazon floodplain lake. *Neotrop Ichthyol* 9: 901-908. doi: 10.1590/S1679-62252011000-400022
5. **Brack A, Ipenza C, Brack J, Sotero V. 2011.** Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio - Una bomba de tiempo. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. 54 p.
 6. **Buitrago-Suárez UA, Burr BM 2007.** Taxonomy of the catfish genus *Pseudoplatystoma* Bleeker (Siluriformes: Pimelodidae) with recognition of eight species. *Zootaxa* 1512: 1-38. doi: 10.11646/zootaxa.1512.1.1
 7. **Caballero-Espejo J, Messinger M, Román-Dañobeytia F, Ascorra C, Fernandez L, Silman M. 2018.** Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: A 34-year perspective. *Remote Sens (Basel)* 10: 1903. doi: 10.3390/rs10121903
 8. **Castaño A, Cutanda F, Esteban M, Pärt P, Navarro C, Gómez S, Rosado M, et al. 2015.** Fish consumption patterns and hair mercury levels in children and their mothers in 17 EU countries. *Environ Res* 141: 58-68. doi: 10.1016/j.envres.2014.10.029
 9. **Castilhos ZC, Rodrigues S, Rodrigues APC, Villas-Bôas RC, Siegel S, Veiga MM, Beinhoff C. 2006.** Mercury contamination in fish from gold mining areas in Indonesia and human health risk assessment. *Sci Total Environ* 368: 320-325. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.01.039
 10. **Chota W, Chu F, García C, Castro D, Isminio R, García R, Sánchez H, Arévalo L, Tello S. 2014.** Calidad ambiental de los ríos Curaray. *Folia Amaz* 23: 157-170. doi: 10.24841/fa.v23i2.21
 11. **[CITE] Centros de Innovación Tecnológicos. 2017.** Revisión de la situación actual de la Red Centros de Innovación Tecnológicos (CITE) en Perú. Lineamientos para su avance y fortalecimiento. UNIDO. [Internet]. Disponible en: https://www.unido.org/sites/default/files/files/2018-08/Revisio-%CC%81n_de_la-_Situacio%CC%81n_Actual_de_los_CITE_2017_0.pdf
 12. **Díaz F. 2014.** Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Rev Salud Pública* 16: 947-957. doi: 10.15446/rsap.v16n6.45406
 13. **Diringer S, Feingold B, Ortiz E, Gallis J, Araújo-Flores J, Berky A, Pan W, Hsu-Kim H. 2015.** River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environ Sci Process Impacts* 17: 478-487. doi: 10.1039/C4EM00567H
 14. **Dong Z, Jim, RC, Hatley, EL, Backus, ASN, Shine, JP, Spengler, JD Schaidler, LIA. 2015.** A longitudinal study of mercury exposure associated with consumption of freshwater fish from a reservoir in rural southcentral USA. *Environ Res* 136: 155-162. doi: 10.1016/j.envres.2014.09.029
 15. **[EPA] Environmental Protection Agency. 2007.** Method 7474. Mercury in sediment and tissue samples by atomic fluorescence spectrometry. 19 p. [Internet]. Available in: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/7474.pdf>
 16. **Faial K, Deus R, Deus S, Neves R, Jesus I, Santos E, Alves CN, Brasil D. 2015.** Mercury levels assessment in hair of riverside inhabitants of the Tapajós River, Pará State, Amazon, Brazil: Fish consumption as a possible route of exposure. *J Trace Elem Med Biol* 30: 66-76. doi: 10.1016/j.jtemb.2014.10.009
 17. **Faial KRF, Mendes RA, Medeiros AC, Faial KCF, Deus SCS, Miranda A, Silva M, et al. 2018.** Deposition flow of mercury and selenium in hair of riverine in habitants of the Amazon, Brazil. *JETIA* 4: 32-45. doi: 10.5935/2447-0228.20180030

18. [FAO] *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura 2008*. Estado mundial de la demanda de pescado y la acuicultura. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. Roma, Italia. [Internet]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/I9540ES/i9540es.pdf>
19. [FAO/WHO] *Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. 2015*. General standard for contaminants and toxins in food and feed (Codex Stan 193-1995) Adopted in 1995. Revised in 1997, 2006, 2008, 2009. Amended in 2010, 2012, 2013, 2014, 2015. [Internet]. Available in: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/1_CXS_193e.pdf
20. *Fernández E. 2013*. Mercurio en Madre de Dios. Concentraciones de mercurio en peces y seres humanos en Puerto Maldonado. Carnegie Institution for Science, Department of Global Ecology. 29 p. [Internet]. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/mineriailegal/wp-content/uploads/sites/43/2013/10/Carnegie-mercurio-Madre-de-Dios.pdf>
21. *Fernández EL, González VH. 2009*. Niveles de mercurio en peces en Madre de Dios. Carnegie Institution for Science, Department of Global Ecology. 24 p. [Internet]. Disponible en: <http://www.actualidadambiental.pe/wp-content/uploads/2013/09/Estudio-sobre-niveles-de-mercurio-en-poblacion-de-Madre-de-Dios1.pdf>
22. *Gaioli M, Amoedo D, González D. 2012*. Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. Arch Argent Pediatr 110: 259-264. doi: 10.5546/aap.2012.259
23. *García-de Sotero D, Alva-Astudillo M. 2013*. Contenido de metales pesados en pescados comercializados en Iquitos, Nauta y Requena. Ciencia Amazónica 3: 33-42.
24. *González M, Bodas A, Guillén J, Rubio M, Ordóñez J, Trasobares E, Martell N, et al. 2014*. Exposición al metilmercurio en la población general; toxicocinética; diferencias según el sexo, factores nutricionales y genéticos. Nutr Hosp 30: 969-988. doi: 10.3305/nh.-2014.30.5.7727
25. *Gracia L, Marrugo J, Alvis E. 2010*. Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. Rev Fac Nac Salud Pública 28: 118-124.
26. *Junaidi M, Krisnayanti BD, Juharfa, Anderson C. 2019*. Risk of mercury exposure from fish consumption at artisanal small-scale gold mining areas in West Nusa Tenggara, Indonesia. J Health Pollut 9: 190302.
27. *Manavi PN, Mazumder A. 2018*. Potential risk of mercury to human health in three species of fish from southern Caspian Sea. Marine Mar Pollut Bull 130: 1-5. doi: 10.1016/j.marpolbul.-2018.-03.004
28. *Martinez G, McCord S, Driscoll C, Todorova S, Wu S, Araújo-Flores J, Vega C Fernandez L. 2018*. Mercury contamination in riverine sediments and fish associated with artisanal and small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru. Int J Environ Res Public Health 15: 1584. doi: 10.3390/ijerph15081584
29. [MINAM] *Ministerio del Ambiente. 2014*. Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú. Lima, Perú: MINAM. 75 p.
30. [MINSAL] *Ministerio de Salud. 2010*. Niveles de exposición a mercurio en población de Huepetuhe – Madre de Dios, y factores de riesgo de exposición. Perú: MINSAL. 83 p.
31. *Mosquera-Guerra F, Trujillo F, Caicedo-Herrera D, Zoque-Cancelado J, Mantilla-Meluk H. 2015*. Impactos de las pesquerías de *Calophysus macropodus* un riesgo para salud pública y la conservación de los delfines de río en Colombia. En: III Congreso Latinoamericano de Mastozoología. Bogotá, Colombia.

32. **Ortega H, Hidalgo M. 2008.** Freshwater fishes and aquatic habitats in Peru: current knowledge and conservation. *Aquat Ecosyst Health Manag* 11: 257-271. doi: 10.1080/1463498080-2319135
33. **Ortega H, Hidalgo M, Trevejo G, Correa E, Cortijo AM, Meza V, Espino J. 2012.** Lista anotada de los peces de aguas continentales del Perú: estado actual del conocimiento, distribución, usos y aspectos de conservación. Lima, Perú: MINSA. 56 p.
34. **Osores F, Rojas J, Manrique C. 2012.** Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. *Acta Med Per* 29: 38-42.
35. **Pérez BA, Fabre NN. 2009.** Seasonal growth and life history of the catfish *Calophysus macropterus* (Lichtenstein, 1819) (Siluriformes: Pimelodidae) from the Amazon floodplain. *J Appl Ichthyol* 25: 343-349. doi: 10.1111/j.1439-0426.2008.01104.x
36. **Raimann X, Rodríguez L, Chávez P, Torrejón, C. 2014.** Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Rev Med Chil* 142: 1174-1180. doi: 10.4067/S0034-98872014000900012
37. **Ramírez A. 2008.** Intoxicación ocupacional por mercurio. *An Fac Med Montev* 69: 46-51.
38. **Reis PA, Ozório ROA, Rodriguez AFR, Faria FSEDV, Furtado CM, Ribeiro RA. 2019.** Mercury distribution in two commercial fish species (*Pimelodus maculatus* and *Calophysus macropterus*) – Case study of river Acre (Acre state, Brazilian Amazon). *Hum Ecol Risk Assess* 2019: 1-10. doi: 10.1080/1080-7039.2019.1599710
39. **Roach KA, NF. Jacobsen NF, Fiorello CV, Stronza AA, Winemiller KO. 2013.** Gold mining and mercury bioaccumulation in a floodplain lake and main channel of the Tambopata River, Peru. *J Environ Prot* 4: 51-60. doi: 10.4236/jep.2013.-41005.
40. **Rodríguez J, Piedra G. 2016.** Evaluación estadística de los niveles de mercurio detectados en peces de pico, en Costa Rica, en el periodo 2003-2013. *Uniciencia* 32: 19-29. doi: 10.15359/ru.30-2.2
41. **Rojas-Jaimes J, Corcuera-Ciudad R, Iannacone J. 2019.** Poisoning by inorganic mercury in minors in an urban area of illegal mining. *Biotempo* 16: 113-116.
42. **Salinas C, Cubillos JC, Gómez R, Trujillo F, Caballero S. 2014.** “Pig in a poke (gato por liebre)”: The “mota” (*Calophysus macropterus*) fishery, molecular evidence of commercialization in Colombia and Toxicological Analyses. *EcoHealth* 11: 197-206. doi: 10.1007/s10393-013-0893-8
43. **Sardiñas-Peña O, Trujillo, C, Garcia-Melian M, Fernandez-Novo M. 2001.** Evaluación de riesgos para la salud por exposición a residuos peligrosos. *Rev Cubana Hig Epidemiol* 39: 144-146.
44. **[EU] European Union. 2017.** Regulation (EU) 2017/852 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2017 on mercury, and repealing Regulation (EC) No 1102/2008. Official J European Union. [Internet]. Available in: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:-32017R0852&rid=2>
45. **[USEPA] United States Environmental Protection Agency, [USFDA] United States Food and Drug Administration. 2004.** Lo que usted necesita saber sobre el mercurio en los peces y mariscos. Consejos para mujeres que podrían quedar embarazadas, madres lactantes, niños pequeños. [Internet]. Disponible en: https://19january2017snapshot.epa.gov/choose-fish-and-shellfish-wisely/lo-que-usted-necesita-saber-sobre-el-mercurio-en-el-pescado-y-los_.html
46. **[UNEP Environment] United Nations Environment Programme. 2019.** Global mercury assessment 2018. Geneva, Switzerland: UNEP. [Internet]. Available

- in: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27579/GMA2018.-pdf?sequence=1&isAllowed=y>
47. **Vargas-Licono SP, Marrugo-Negrete JL. 2019.** Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta biol Colomb* 24: 232-242. doi: 10.15446/abc.v24n2.74128
 48. **Walczak M, Reichert, M. 2016.** Characteristics of selected bioaccumulative substances and their impact on fish health. *J Vet Res* 60: 473-480. doi: 10.1515/jvetres-2016-0070
 49. **[WHO] Organización Mundial de la Salud. 2003.** UN Committee recommends new dietary intake limits for mercury. [Internet]. Available in: <http://www.who.int/mediacentre/news/notes/2003/np20/en/>
 50. **Yard EE, Horton J, Schier JG, Caldwell K, Sanchez C, Lewis L, Gastañaga C. 2012.** Mercury exposure among artisanal gold miners in Madre de Dios, Peru: A cross-sectional study. *J Med Toxicol* 8: 441-448. doi: 10.1007/s13181-012-0252-0
 51. **Zamora-Arellano NY, Ruelas-Inzunza J, García-Hernández J, Ilizaliturri-Hernandez CA, Betancourt-Lozano M. 2017.** Linking fish consumption patterns and health risk assessment of mercury exposure in a coastal community of NW Mexico. *Hum Ecol Risk Assess* 23: 1505-1521. doi: 10.1080/10807039.2017.1329622
 52. **Zuloaga, J, Gallego, S, Ramírez C. 2015.** Contenido de Hg, Cd, Pb y As en especies de peces: revisión. *Vitae* 22: 148-159. doi: 10.17533/udea.vitae.v22n2a09