

**MERCURIO, METILMERCURIO Y OTROS METALES PESADOS EN PECES DE COLOMBIA: RIESGO POR INGESTA****Mercury, Methylmercury and other Heavy Metals in Fish in Colombia: Risk From Ingestion**Shirly Paola VARGAS LICONA<sup>1</sup>\*, José Luis MARRUGO NEGRETE<sup>1</sup><sup>1</sup>Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Grupo de Aguas, Química Ambiental y Aplicada, Universidad de Córdoba, Carrera 6 n°. 77- 305, Montería, Colombia.

\*For correspondence: shirlypaola.92@gmail.com

Received: 8<sup>th</sup> August 2018, Returned for revision: 29<sup>th</sup> December 2018, Accepted: 9<sup>th</sup> January 2019.

Associate Editor: Nubia E. Matta.

Citation/Citar este artículo como: Vargas-Licona SP, Marrugo-Negrete JL. Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. Acta biol. Colomb. 2019;24(2):232-242. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>**RESUMEN**

En 2013 el pescado proporcionó a más de 3100 millones de personas casi el 20 % de la ingesta promedio de proteínas de origen animal per cápita (FAO, 2016). De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en Colombia y, particularmente en las poblaciones ribereñas y costeras, el 90 % del consumo de proteína de origen animal proviene del pescado, como resultado de un acceso muy bajo a otro tipo de proteínas. Colombia enfrenta uno de los mayores problemas por contaminación ambiental a nivel mundial, generado en gran parte por el abuso de sustancias químicas para el aprovechamiento de minerales, mala disposición de aguas servidas y prácticas industriales y agrícolas inadecuadas, en cuerpos de aguas fundamentales para la dinámica poblacional de animales, vegetales y humanos. Como estrategia mundial para reducir los riesgos a la salud humana por consumo de pescado contaminado con metales pesados, se han considerado límites máximos permisibles, propuestos por diferentes entidades; sin embargo, el 31,5 % de los resultados de estudios publicados para Colombia, son superiores al límite permisible recomendado por la OMS (0,5 µg/g). Los resultados presentados en esta revisión evidencian la urgente necesidad de realizar estudios que evalúen el riesgo a la salud que enfrentan pobladores de zonas mineras y no mineras de Colombia, aportará también fundamentos científicos y bases para el establecimiento de ejes estratégicos que permitan la puesta en marcha de nuevos proyectos productivos que ofrezcan el acceso de la población a diversas fuentes de alimentación.

**Palabras clave:** Contaminación, minería, salud pública, toxicología.**ABSTRACT**

In 2013, fish provided to more of 3100 million people about 20 % of the average intake of animal protein per capita (FAO, 2016). According to the United Nations Development Program (UNDP), in Colombia and, particularly in the coastal populations, 90 % of the protein consumption of animal origin comes from fish, mainly as a result of very low access comparing it with another type of proteins. Colombia faces one of the biggest problems due to global environmental pollution, generated in largely part by the abuse of chemical substances for the exploitation of minerals, poor disposal of wastewater and inadequate industrial and agricultural practices, in bodies of natural water essential for population dynamics of animals, plants and humans. As a global strategy to reduce the risks to human health from the consumption of fish contaminated with heavy metals, maximum permissible limits have been considered, proposed by different entities. However, 31.5 % of the results of studies published for Colombia, register higher than the permissible limit recommended by the WHO (0.5 µg/g). The results presented in this review, evidence the urgent need to conduct studies that assess the health risk faced by residents of mining and non-mining areas of Colombia, will also provide scientific foundations and bases for the establishment of strategic axes that permit the start-up of new productive projects, which offer the population access to various sources of food.

**Keywords:** Mining, pollution, public health, toxicology.

## INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria se ha convertido en eje principal para la supervivencia del planeta, dada la aumentada expansión demográfica y la decreciente disponibilidad de recursos alimenticios (FAO, 2017). El pescado juega un papel esencial, dado que puede reducir los índices de malnutrición por su contenido de aminoácidos esenciales, proteína de alta calidad, lípidos con ácidos grasos esenciales (EPA y DHA), vitaminas y minerales (Kris *et al.*, 2002; FAO, 2016). Adicionalmente reduce el riesgo de enfermedades coronarias, diabetes e hipertensión y contribuye al desarrollo y crecimiento fetal (Fuentes *et al.*, 2018).

La mayoría de metales como Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Cadmio (Cd) e incluso el Arsénico (As); surgen de procesos de liberación al medio ambiente, producto de fenómenos naturales o actividades antrópicas (Nawab *et al.*, 2018). No obstante, genera gran preocupación el Hg, toda vez que casi todo el que se acumula en el músculo de los peces, se encuentra en su forma más tóxica, el Metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}$ ), logrando biomagnificarse en concentraciones miles de veces mayores a las encontradas en el agua y biodisponible a cualquier matriz (tejidos musculares y adiposos de los peces) (Nakamura *et al.*, 2014; Salazar *et al.*, 2017). La conversión del Hg a una forma orgánica como el  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , es el puente de entrada del metal a las cadenas alimentarias acuáticas que culminan en el consumo humano (Hsu *et al.*, 2013).

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en Colombia, y particularmente en las poblaciones ribereñas y costeras, el 90 % del consumo de proteína de origen animal proviene del pescado, principalmente como resultado de un acceso muy bajo a otro tipo de proteínas. Sin embargo, los niveles de contaminación que se reportan en ríos como el San Jorge, Cauca y Magdalena, han limitado el consumo de esta fuente alimenticia a la población (Fuentes *et al.*, 2018).

Atendiendo a lo anterior y partiendo de los múltiples estudios que confirman la presencia de estos contaminantes en peces de consumo, incluso en zonas no mineras, como la región de La Mojana, ubicada en el Norte de Colombia, se pretende realizar una revisión bibliográfica que permita entender la dinámica entre la afectación ambiental y el riesgo a la salud de los colombianos.

## METALES PESADOS

### Biocinética en peces

#### Mercurio y metilmercurio

En ambientes acuáticos, el Hg inorgánico se transforma principalmente a través de microorganismos en un compuesto orgánico lipofílico ( $\text{CH}_3\text{Hg}$ ), gracias al enlace C-Hg presente en las moléculas de  $\text{CH}_3\text{Hg}$  que se forman, esta característica lo hace más propenso a la biomagnificación

en las cadenas alimenticias (Hsu *et al.*, 2013); al tiempo que le confiere una alta facilidad para atravesar membranas y distribuirse en diferentes órganos de un ser vivo, entre estos los seres humanos que consumen alimentos contaminados, como el pescado. De Carvalho *et al.*, (2014), señalaron que el Hg orgánico, especialmente el  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , utiliza las enzimas y proteínas del pez, para mediante sus grupos sulfhidrido, ingresar y fijarse en el cuerpo de este.

En los peces se atribuye a la dieta o hábito alimenticio de la especie, un factor fundamental para el ingreso de contaminantes, toda vez que se reporta que más del 10 % del Hg orgánico, principalmente  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , se encuentra en el zooplancton, eslabón primario de la cadena alimenticia (De Carvalho *et al.*, 2014). Marrugo *et al.*, (2008) concluyeron, luego de analizar las concentraciones de Hg y  $\text{CH}_3\text{Hg}$  en *P. magdalenae* (Bocachico), *P. surinamensis* (Pacora) y *H. malabaricus* (Moncholo), especies consumidas por habitantes cercanos al municipio de Montecristo (Bolívar, Colombia), que estas guardan relación con el hábito alimenticio, señalando que las mayores concentraciones se encontraron en los peces carnívoros, con una alta proporción de Hg en forma de  $\text{CH}_3\text{Hg}$ .

### Biocinética en humanos

#### Mercurio y metilmercurio

Tanto el Hg como el  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , luego de ser generado por procesos naturales y/o antrópicos (Gusso-Choueri PK *et al.*, 2018), logran ingresar a la cadena trófica, a través de las bacterias, fito y zooplancton, peces con hábitos alimenticios que los poseen al inicio de la cadena trófica, seguidos por quienes los supera en el nivel trófico o directamente por el ser humano.

Una vez se encuentra disponible, el Hg ingresa al organismo a través del tracto gastrointestinal, el sistema respiratorio y/o por vía cutánea. Rice *et al.*, (2014), reportan que las especies orgánicas del Hg solo pueden ingresar a través de la ingesta de matrices contaminadas y su absorción podría superar el 90 %; posterior a esto, el tóxico comienza un proceso de metabolización intracelular que impide su fácil eliminación. Aunado a lo anterior, las especies orgánicas de Hg pueden atravesar las barreras hematoencefálicas produciendo encefalopatías graves (Aschner y Aschner, 1990). Budtz *et al.*, (2004), indicaron que el  $\text{CH}_3\text{Hg}$  se une a la hemoglobina y dada su alta afinidad por la hemoglobina fetal produce una mayor concentración de Hg en la sangre del cordón umbilical que en la sangre materna. Rice *et al.*, (2014), consideran que los procesos de eliminación de  $\text{CH}_3\text{Hg}$  a través de la orina son insuficientes; se estima que la vida biológica del  $\text{CH}_3\text{Hg}$  es de 39 a 70 días.

#### Otros metales y Arsénico

Dentro de las fuentes antrópicas del Cd, se incluyen las emisiones industriales, los agroquímicos, los lodos cloacales

y aguas residuales suministrados a cultivos destinados al consumo humano (Faroon *et al.*, 2012). La ingesta de pescado contaminado se considera una fuente fundamental en el ingreso y aumento de niveles de Cd en las poblaciones humanas, la mayor parte del metal se encuentra en su forma mayormente absorbible el cloruro de cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ), reportando eficacia de absorción gastrointestinal entre 3-8 % de la carga ingerida (Faroon *et al.*, 2012).

El Pb es producto de procesos erosivos de la superficie terrestre y la deposición atmosférica. Las fuentes antrópicas son las labores en refinerías de plomo, industrias de fundición, manipulación de plásticos y plantas de fabricación de baterías (Goyer y Clarkson, 2001; Järup, 2003). Cuando se encuentra disponible, el Pb ingresa al organismo a través de la ingesta, la inhalación, la absorción y por deglución; puede ser transportado a través del sistema circulatorio al resto de los órganos (Goyer y Clarkson, 2001; Castro y Méndez, 2008).

El As, es un constituyente natural de los diferentes compartimientos ambientales (suelo, rocas, agua, aire, alimentos). Químicamente, se puede encontrar en forma orgánica, formada cuando los iones se combinan con carbono e hidrógeno, esta forma se encuentra principalmente en peces y mariscos; el As inorgánico, se encuentra en aguas subterráneas, que muchas veces son consumidas por pobladores de países subdesarrollados (ATSDR, 2007).

## RIESGO A LA SALUD HUMANA

Los efectos adversos para la salud son el resultado de la especificación del metal acumulado en el cuerpo, el grado de exposición (cantidad, frecuencia y duración) y la edad del sujeto (Clarkson y Magos, 2006; Kim *et al.*, 2016). Järup, (2003), considera que las mujeres en edad fértil tienden a acumular mayor cantidad de contaminantes, a causa de los cambios hormonales, procesos de gestación, ciclos menstruales y cantidad de grasa corporal.

### Mercurio y metilmercurio

Von Stackelberg *et al.*, (2017), indican que contaminantes como el  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , podría incidir en la proliferación de células

carcinogénicas, enfatizando que estas consecuencias no siempre guardan proporción con la edad del organismo. Karri *et al.*, (2018), afirman que el  $\text{CH}_3\text{Hg}$  funciona como un potente agente neurotóxico, que ingresa a través de la dieta y logra ser absorbido por vía tracto gastrointestinal al mismo tiempo que los nutrientes esenciales, transportándose activamente a través de la barrera que separa el fluido sanguíneo del sistema nervioso central (barrera hematoencefálica). Budtz *et al.*, (2004), realizaron seguimiento a niños cuyas madres las sometieron a exposición prenatal durante su vida intrauterina. Luego de más de siete años de estudios, al analizar el coeficiente intelectual de los niños, a través de modelos de ecuaciones estructurales que estimaban la imprecisión analítica total y, las concentraciones de Hg en cabello y sangre (2,2 - 8,8 y 13,5 mg/L), encontraron una correlación inversa. Algunos otros efectos del Hg y  $\text{CH}_3\text{Hg}$  sobre los diferentes sistemas de un organismo, se detallan en la Tabla 1.

Recientemente la Unión Europea (UE, 2017), realizó una revisión de los niveles máximos permisibles (mg/kg peso fresco) de metales pesados en productos alimenticios; esta regulación es matriz para la normatividad nacional de los diferentes países sometidos al acuerdo o que pretendan emprender comercios transfronterizos. Se estableció que para el Hg, el contenido máximo permisible en carne de pescado debe ser de 0,5 mg/kg peso fresco. Similar límite consideró el Codex Alimentarius (UNEP y WHO, 2008). En cuanto a la ingesta semanal, la Joint FAO/World Health Organization (WHO) Expert Committee on Food Additives (JECFA) en 2006, estableció como valor sensible para mujeres en edad fértil y niños concentraciones de 1,6  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal, mientras que para el resto de la población tasas de ingestión semanal de 3,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal.

Van *et al.*, (2013), luego de monitorear el  $\text{CH}_3\text{Hg}$  acumulado naturalmente en peces (*Esox lucius*) de un lago canadiense y que posteriormente fueron trasladados a otro lago, estimaron que la vida media del Hg en el músculo de ese pez es de 3,3 años, corroborando de esta manera, lo paulatino del proceso de eliminación de este tóxico en

Tabla 1. Algunos efectos del Hg y  $\text{CH}_3\text{Hg}$  sobre los diferentes sistemas y tejidos de un organismo, reportados por diversos autores.

Sistema/Tejido	Efecto	Referencia
Sistema Nervioso	Neurotoxicidad, apoptosis, autismo, alteraciones neuropsicológicas, daño oxidativo, neuroblastomas y glioblastomas, pérdida de visión	Ceccatelli <i>et al.</i> , 2010; Bridges <i>et al.</i> , 2007; Geier y Geier., 2007.
Sistema Inmune	Inmunotoxicidad, daño de linfocitos, teratogénesis y carcinogénesis	Crespo <i>et al.</i> , 2009; Silbergeld <i>et al.</i> , 2005
Sistema Reproductivo	Deformidades y pérdida de motilidad de espermatozoides, disrupción endocrina	Choy <i>et al.</i> , 2002; Karagas <i>et al.</i> , 2012
Glándula tiroideas	Alteración de niveles hormonales	Ursinyoba <i>et al.</i> , 2012
Carditoxicidad	Susceptibilidad a enfermedades cardiovasculares	De Marco <i>et al.</i> , 2012
Sistema Renal	Citotoxicidad y genotoxicidad	Barcelos <i>et al.</i> , 2011

los peces. La conclusión de este estudio podría sugerir que no es conveniente el consumo de peces grandes y longevos cualquiera que sea su especie, mucho menos si la especie posee hábitos carnívoros, toda vez que la eliminación del metal es mucho más lenta que su acumulación.

### Otros metales y Arsénico

El Cd tiene una vida biológica de 17 a 30 años y su absorción aumenta con dietas bajas en hierro, calcio y proteínas (Castro y Méndez, 2008). Un estudio realizado en Pakistán muestra que las altas concentraciones de Cd, afectan la calidad seminal y fertilidad en los hombres (Zafar *et al.*, 2015; Alamdar *et al.*, 2016). El Cd en carne de pescado, solo es permitido para el consumo humano si su contenido máximo no supera los 0,050 mg/kg peso fresco (UE, 2017). La ingesta semanal aceptada por la JECFA, no debe superar los 420 µg de Cd para una persona con peso promedio de 60 kg (FAO y WHO, 2005).

El Pb en los seres humanos podría acumularse principalmente en las estructuras calcáreas (dientes y huesos), afectando asimismo diferentes sistemas (gastrointestinal, neuro-muscular, renal y sanguíneo) e incluso atravesando la barrera hematoencefálica y la placenta, de manera que su acción en el organismo fácilmente conlleva a la muerte (Alamdar *et al.*, 2017). Para el Pb tanto la Unión Europea como el Codex Alimentarios coinciden en afirmar que 0,30 mg/kg peso fresco en el músculo de los peces de consumo humano, es suficiente para representar algún tipo de riesgo a la salud (FAO y WHO, 2007; UE, 2017). La JECFA establece como valor de ingesta semanal tolerable provisional para el Pb 0,025 mg/kg por peso corporal.

Los contenidos de As en el agua de consumo, alimentos y/o aire, representan la posibilidad de afectaciones a la salud, tales como: formación de verrugas y callos (hiperqueratosis), melanosis manchada, pigmentación de la piel, cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares e incluso infertilidad (Mohmand *et al.*, 2015). Cuando la exposición es producto de la ingesta de alimentos contaminados (pescado), sus afectaciones se podrían expresar con lesiones en la piel, disfunción del sistema renal, pulmonar, esquelético y reproductivo (Ahmed *et al.*, 2015). De acuerdo con la JECFA la ingesta semanal tolerable provisional para el As inorgánico es de 0,015 mg/kg (FAO y WHO, 2005). No obstante, la European Food Safety Authority (EFSA) afirma que se han reportado efectos negativos en la salud humana, por concentraciones entre 0,002 - 0,007 mg/kg/día (Oliveira *et al.*, 2017).

Karri *et al.*, (2018) al evaluar la citotoxicidad de cuatro metales pesados: Plomo (Pb), Arsénico (As), Cadmio (Cd) y Metilmercurio (CH<sub>3</sub>Hg), durante diferentes tiempos de exposición; lograron concluir que la mayor potencia para generar una muerte celular programada, se encontraba en el CH<sub>3</sub>Hg > As > Cd > Pb, resaltando así, el efecto neurodegenerativo del contaminante.

### METALES EN PECES DE COLOMBIA

A nivel mundial la FAO, (2016) reportó un consumo aparente de pescado *per cápita* de 19,7 kg/año para 2013, con estimaciones que apuntan a un aumento de estas cifras para los próximos años. En este mismo informe la FAO afirma que el pescado proporcionó casi el 20 % de la ingestión *per cápita* promedio de proteína de origen animal a cerca de 3100 millones de personas. En Colombia, el consumo *per cápita* es de 4,73 kg/año, muy por debajo del promedio de América Latina (18 kg/año) pero superando por poco la ingesta de los Estadounidenses en 2010 (4,42 kg/año) (MADR y FAO, 2015). De acuerdo con la Encuesta Nacional de Situación Nutricional (ENSIN, 2010), solo el 26,9 % de los colombianos consume pescados o mariscos semanalmente.

Estos datos llevarían a pensar que el riesgo a la salud por consumo de pescado contaminado con metales pesados, de una población como la colombiana es bajo; sin embargo, el consumo de pescado en el país es regionalizado, presentando alto consumo en zonas donde la oferta o poder adquisitivo de otras fuentes proteicas es escaso, por ejemplo en zonas ribereñas y costaneras (MADR y FAO, 2015).

Actualmente, Colombia enfrenta uno de los mayores problemas por contaminación ambiental a nivel mundial, causado en gran parte por el abuso de sustancias químicas en la explotación de minerales, mala disposición de aguas servidas y prácticas industriales y agrícolas inadecuadas realizadas en cuerpos de aguas naturales (Pinedo *et al.*, 2015).

Se estima que en el país, la extracción de oro es la principal contribuyente de la contaminación por Hg en los cuerpos de agua (Marrugo *et al.*, 2015a). Cordy *et al.*, (2011), mostró que en Colombia cerca del 50 % del Hg utilizado en los pequeños molinos de bolas de la minería aurífera, se pierde; al igual que el 46 % en los lavados y el 4 % en la amalgamación. Ellos señalan que el país ha llegado a emitir hasta 150 toneladas anuales de Hg, lo que lo posiciona como el mayor contaminante *per cápita* de Hg en el mundo, producto solo de la extracción artesanal del oro.

Desde hace algún tiempo, la comunidad científica ha manifestado gran interés en demostrar el aumento de procesos bioacumulativos de sustancias tóxicas en los principales alimentos de la población. Los peces en particular han sido objeto de la mayoría de las investigaciones, para evidenciarlo se recopiló de manera resumida los resultados de los estudios desarrollados en Colombia, durante los últimos diez años y disponibles en las bases de datos estructuradas como SciVerse Scopus, SpringerLink, Web of Knowledge, Taylor & Francis, Pubmed y Google Académico, utilizando palabras claves como Hg, MeHg, Pb, Cd, As, Fish, Colombia. La Tabla 2, presenta las concentraciones medidas en µg/g de Hg, Pb, Cd y As, en diferentes especies de peces de cuerpos de agua naturales y centros de abastecimientos alimenticios de la población.

Tabla 2. Resumen de Concentraciones promedio de metales pesados ( $\mu\text{g/g}$ , peso húmedo) en músculo de peces de Colombia.

Departamento	Punto de muestreo	Especies	Hg	Pb	Cd	As	Referencia
Amazonas	Río Caquetá	<i>Tripottheus angulatus</i>	0,15				(Olivero <i>et al.</i> , 2016)
		<i>Mylossoma duriventre</i>	0,10				
		<i>Brycon amazonicus</i>	0,14				
		<i>Calophysus macropterus</i>	0,80				
		<i>Platynematiichthys notatus</i>	1,05				
		<i>Pseudoplatystoma punctifer</i>	0,65				
		<i>Pinirampus pirinampu</i>	0,10				
		<i>Leiarius marmoratus</i>	0,15				
		<i>Pseudoplatystoma tigrinum</i>	0,30				
		<i>Hoplias malabaricus</i>	0,72				
		<i>Cichla ocellaris</i>	1,60				
	Leticia	<i>Calophysus macropterus</i>	1,80				(Salinas <i>et al.</i> , 2014)
Antioquía	Golfo de Urabá	<i>Caranx hippos</i>	2,45	1,30	0,041		(Gallego <i>et al.</i> , 2018)
Atlántico	Mallorquín	<i>Mugil curema</i>	0,08	0,18	0,05		(Fuentes <i>et al.</i> , 2018)
		<i>Ariopsis bonillai</i>	0,12	0,15	0,04		
		<i>Centropomus undecimalis</i>	0,13	0,17	0,06		
		<i>Lutjanus griseus</i>	0,15	0,11	0,05		
		<i>Eugerres plumieri</i>	0,16	0,08	0,05		
Bolívar	La Raya	<i>Hoplias malabaricus</i>	0,82				(Marrugo <i>et al.</i> , 2018)
		<i>Sorubim cuspidatus</i>	0,84				
		<i>Leporinus muyscorum</i>	0,29				
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,15				
	Cartagena	Atún enlatado (marcas comerciales)	0,63				(Alcalá <i>et al.</i> , 2017)
Bolívar	San Martín de Loba	<i>Hemiancistrus wilsoni</i>	0,02				(Olivero <i>et al.</i> , 2015)
		<i>Loricaria filamentosa</i>	0,07				
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,03				
		<i>Leporinus muyscorum</i>	0,05				
		<i>Tripottheus magdalenae</i>	0,29				
		<i>Pimelodus clarias</i>	0,07				
		<i>Caquetaia kraussii</i>	0,45				
		<i>Ageneosus pardalis</i>	0,19				
		<i>Cyphocharax magdalenae</i>	0,40				
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	0,08						
Boyacá	Río Chicamocha	<i>Oreochromis niloticus</i>	0,13	0,3			(Vergara y Rodríguez, 2015)
	Bahía Cispatá	<i>Cetengraulis edentulus</i>	0,10	0,08	0,004		(Burgos <i>et al.</i> , 2017)
		<i>Eugerres plumieri</i>	0,14	0,04	< Ld*		
		<i>Centropomus undecimalis</i>	0,38	0,04	0,010		
		<i>Trichirus lepturus</i>	0,67	0,12	<Ld		
Córdoba	Embalse Urrá	<i>Hoplias malabaricus</i>	1,14				(Marrugo <i>et al.</i> , 2015a)
		<i>Caquetaia kraussii</i>	0,73				
		<i>Leporinus muyscorum</i>	0,36				
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,21				
		<i>Cyphocharax magdalenae</i>	0,18				
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,11				(Ruiz <i>et al.</i> , 2014)
		<i>Pimelodus blochii</i>	0,80				
		<i>Ageneosus pardalis</i>	1,68				
		<i>Hoplias malabaricus</i>	1,75				

(Continúa)

Tabla 2. Resumen de Concentraciones promedio de metales pesados ( $\mu\text{g/g}$ , peso húmedo) en músculo de peces de Colombia. (continuación)

Departamento	Punto de muestreo	Especies	Hg	Pb	Cd	As	Referencia		
Córdoba	Ciénega de Ayapel	<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	0,43				(Marrugo <i>et al.</i> , 2010)		
		<i>Caquetaia kraussi</i>	0,40						
		<i>Hoplias malabaricus</i>	0,33						
		<i>Plagioscion surinamensis</i>	0,32						
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,14						
		<i>Leporinus muyscorum</i>	0,26						
				<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	0,51				(Gracia <i>et al.</i> , 2010)
				<i>Sorubim cuspidatus</i>	0,74				
				<i>Caquetaia kraussi</i>	0,28				
				<i>Hoplias malabaricus</i>	0,46				
				<i>Plagioscion surinamensis</i>	0,68				
				<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,15				
				<i>Leporinus muyscorum</i>	0,22				
				<i>Hoplias malabaricus</i>	0,51				(Marrugo <i>et al.</i> , 2018)
				<i>Sorubim cuspidatus</i>	0,55				
		<i>Leporinus muyscorum</i>	0,20						
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,11						
Cundinamarca	Bogotá D,C	<i>Oreochromis sp.</i>	0,03	0,03	0,004	0,03	(López y Barragán, 2016)		
		<i>Pimelodus sp.</i>	0,06	0,02	0,007	0,03			
		<i>Pangasius sp.</i>	0,02	0,03	0,0004	0,04			
		<i>Pseudoplatystoma sp.</i>	0,05	0,03	0,003	0,05			
		<i>Centropomus sp.</i>	0,04	0,03	0,003	0,05			
		<i>Scomberomorus sp.</i>	0,04	0,03	0,004	0,05			
		<i>Oncorhynchus sp.</i>	0,02	0,06	0,0003	0,02			
		<i>Prochilodus magdalenae</i>	0,04	0,02	0,005	0,03			
		<i>Calophysus macropterus</i>	1,73			(Salinas <i>et al.</i> , 2014)			
Chocó	Río Atrato	<i>Hoplias malabaricus</i>	0,62				(Palacios <i>et al.</i> , 2018)		
		<i>Cathorops melanopus</i>	0,47						
		<i>Centropomus undecimalis</i>	0,40						
		<i>Rhamdia quelen</i>	0,68						
		<i>Ageneosus pardalis</i>	0,95						
		<i>Caquetaia umbrifera</i>	0,29						
		<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	2,01						
		<i>Caquetaia kraussii</i>	0,24						
		<i>Pimelodus punctatus</i>	0,20						
		<i>Pimelodus sp.</i>	0,21						
		<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	0,87						
Guainía	Puerto Inírida	<i>Calophysus macropterus</i>	1,90				(Salinas <i>et al.</i> , 2014)		
Guajira	Zonas	<i>Lutjanus synagris</i>	0,05	0,06	0,005		(Barros <i>et al.</i> , 2016)		
	Costeras	<i>Lutjanus vivanus</i>	0,04	0,07	0,005				
Huila	Yaguara		0,04				(García <i>et al.</i> , 2015)		
	Puerto Seco		0,08						
		<i>Pimelodus grosskopfii</i>							
	Neiva		0,06						
	Hobo		0,08						
Putumayo		<i>Calophysus macropterus</i>	2,35				(Salinas <i>et al.</i> , 2014)		

\* Ld = Límite de detección ( $\mu\text{g/g}$ ) Cd: < 0,004.

En Colombia, la legislación que regula los metales pesados tiene su eje central en las afectaciones que estos causan a la salud humana a través de procesos de bioacumulación. A partir de aquí, se establecen normas entre el Ministerio de Ambiente y Salud y Protección Social, como la Ley 1658 de 2013 por la cual se establecen disposiciones para el comercio y uso de Hg, la Resolución 122 de 2012 por medio del cual se reglamentan los límites máximos de metales pesados, excepto el As, en el pescado de consumo humano (Pb: 0,3 mg/kg; Cd: 0,05 mg/kg; Hg: 0,5 mg/kg) y la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1443 que promulga los límites para consumo humano (Pb: 0,4 mg/kg; Cd: 0,1 mg/kg; Hg: 0,5 mg/kg). La técnica más utilizada para la determinación de metales como el Hg en Colombia y el mundo, es la espectroscopia de absorción atómica con la técnica de vapor frío (Marrugo *et al.*, 2018), aunque se reportan la espectrometría de masas con plasma acoplado (González, 2015). Los métodos por los cuales se determinan los metales, también se encuentran regulados en el país, bajo la NTC 1322 (Pb: AOAC 972,23.; Cd: AOAC 945,58 y AOAC 973,34.; Hg: AOAC 977,15.); no obstante, resulta curioso que en ninguno de estos documentos se reporte el límite para el As, ni se establezca límites diferentes para poblaciones con mayor grado de vulnerabilidad (niños, mujeres en edad fértil, embarazadas y consumidores frecuentes).

En consecuencia, las conclusiones de aquellos estudios que han determinado las concentraciones de metales pesados en peces de consumo en Colombia, resaltan frecuentemente la vulnerabilidad de niños y mujeres en edad fértil y recomiendan a grupos sensibles como mujeres embarazadas, evitar el consumo de especies carnívoras como *H. malabaricus* (Moncholo) y *A. pardalis* (Doncella) (Ruiz *et al.*, 2014). En un estudio desarrollado en el Río Caquetá, la conclusión para disminuir el riesgo de exposición al Hg de las poblaciones indígenas de la Amazonía, fue reducir la ingesta de peces y restringir la lactancia materna, además de controlar la extracción de oro en estas zonas (Olivero *et al.*, 2016). Alcalá *et al.*, (2017) luego de determinar las concentraciones de Hg en latas de atún de diferentes marcas comercializadas en la ciudad de Cartagena (Colombia), resaltó que el 15,5 % de las muestras excedió el límite de la regulación colombiana para enlatados (1,0 µg/g) y el 18,3 % cuando se evaluó con el límite FAO y WHO (0,5 µg/g), con esto concluyó que el consumo de Atún enlatado podría representar un alto riesgo para poblaciones vulnerables. Fuentes *et al.*, (2018) al evaluar el riesgo por consumo de pescado importado en mercados de Barranquilla (Colombia) concluyó luego de determinar la cantidad máxima de Atún enlatado que debería consumir una persona, que no se debería ofrecer en la dieta de niños atún enlatado, las embarazadas no deberían consumir más de una lata por semana y el resto de la población debería consumir máximo tres latas semanales.

Sin embargo, el riesgo no solo ha sido reportado por consumo directo de peces u otros alimentos contaminados, Gallego *et al.*, (2018) concluyeron que la contaminación puede ser el reflejo de la transferencia de altas concentraciones de metales (hasta 77 %) que provienen de material de desecho combinado de especies como *Caranx hippos* (Jurel), en el ensilado o las harinas a base de materia prima contaminada (pescado) y que terminan alimentando otros peces, otros animales e incluso a los humanos.

De acuerdo con el Registro Minero Nacional (RNM), en Colombia hasta el año 2015 se habían otorgado 1058 títulos solo para explotación de oro, distribuidos entre 21 departamentos, liderados por Antioquía (435), Bolívar (183), Caldas (142), Tolima (59) Santander (50), Nariño (41) y Chocó (40) (UPME, 2015). Ahora bien, si se considerara cada punto de muestreo de los estudios referenciados (28, ver Tabla 2) como una unidad porcentual del total de los estudios citados en Colombia durante los últimos años y se comparara con el reporte que realiza la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2015), del histórico de producción aurífera y específicamente los títulos mineros por departamento que se otorgan, se podría afirmar que más del 90 % de los estudios reportados y disponibles, se ejecutaron en zonas No productoras de oro, que se estima es la principal forma de minería donde se utiliza Hg como insumo principal. El valor de referencia utilizado para discernir el grado de afectación de las poblaciones ubicadas, en su mayoría, en zonas no mineras, fue el establecido por la Organización Mundial de la Salud 0,5 µg/g. El 31,5 % de los resultados publicados registran valores por encima del límite permisible recomendado por la OMS.

A nivel nacional un eje referencial para determinar los efectos colaterales del uso de metales pesados en las actividades mineras e industriales, es la región de la Mojana, con jurisdicción en los departamentos de Córdoba, Sucre, Antioquia y Bolívar; esta zona está sujeta a una fuerte presión antrópica que incluye la descarga en su interior de grandes cantidades de aguas residuales, domésticas y sustancias contaminadas con Hg y CH<sub>3</sub>Hg, que podrían provenir de procesos de extracción artesanal de oro en las zonas mineras del sur de Bolívar, norte de Antioquia y parte alta del río San Jorge, teniendo en cuenta que esta no es una zona de explotación minera intensiva (Marrugo *et al.*, 2018).

Marrugo *et al.*, (2010), registraron en el 13,5 % de las muestras de músculo de peces con diferentes hábitos alimenticios de la Región de la Mojana, presencia de Hg en concentraciones que excedían el límite máximo permisible para el consumo humano, recomendado por la OMS (0,5 mg/g de peso fresco). Otra señal de alerta para esta población fue emitida por Calao y Marrugo, (2015), quienes evaluaron la genotoxicidad de moradores de una zona de la región de la Mojana, expuestos a residuos de metales pesados, encontrando asociaciones significativas entre la presencia de Hg y daño en el ADN.

## CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este manuscrito evidencian la urgente necesidad de realizar estudios que evalúen el riesgo a la salud que enfrentan los pobladores de zonas mineras y no mineras de Colombia, teniendo en cuenta que podrían ser herramientas fundamentales para evaluar aspectos de toxicología ambiental y riesgo a la salud humana, al tiempo que permite inferir el efecto que puede llegar a tener una actividad minera en la alimentación adecuada de las poblaciones.

Asimismo, esta revisión permite dilucidar que parte del problema de las regiones mineras y no mineras afectadas, surge de una dicotomía socio-espacial, al colocar en un mismo plano, las grandes poblaciones que dependen del recurso íctico y la población asociada a fuentes de contaminación con metales pesados, como la agricultura y la minería; interviniendo ambas en la inocuidad y seguridad alimentaria en la región, inhibiendo cualquier acción que contribuya al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (1: Fin de la pobreza, 2: Hambre cero y 3: Salud y Bienestar) planteados en la Agenda 2030.

Las concentraciones de los metales pesados analizados en el músculo de los peces de consumo, permite evidenciar el riesgo de la población colombiana, al tiempo que aporta fundamentos científicos y bases para el establecimiento de ejes estratégicos para la puesta en marcha de nuevos proyectos productivos, que ofrezcan el acceso de la población a diversas fuentes de alimentación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS, Bogotá, Colombia, por su financiación a través de la Convocatoria N° 775 - 2017 - Jóvenes Investigadores por la Paz.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## REFERENCIAS

- Ahmed M, Shaheen N, Islam M, Habibullah M, Islam S, Mohiduzzaman M. 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*. 2015;128:284–292. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.016>
- Alamdar A, Ali S, Waqar S, Sohail M, Bhowmik A, Cincinelli A. Human Arsenic exposure via dust across the different ecological zones of Pakistan. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2016;126:219–227. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.044>
- Alamdar A, Eqani S, Hanif N, Ali S, Fasola M, Bokhari H. Human exposure to trace metals and arsenic via consumption of fish from river Chenab, Pakistan and associated health risks. *Chemosphere*. 2017;168:1004–1012. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.110>
- Alcalá M, Morillo Y, Caballero K, Olivero J. Mercury in canned tuna marketed in Cartagena, Colombia, and estimation of human exposure. *Food Addit Contam Part B Surveill*. 2017;10(4):241–247. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/19393210.2017.1323803>
- Aschner M, Aschner J. Mercury neurotoxicity: Mechanisms of blood-brain barrier transport. *Neurosci Biobehav Rev*. 1990;14(2):169–176. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(05\)80217-9](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(05)80217-9)
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Resumen de Salud Pública Arsénico. 2007;11. Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_ph2.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_ph2.pdf)
- Barcelos G, Angeli J, Serpeloni J, Grotto D, Rocha B, Bastos J. Quercetin protects human-derived liver cells against mercury-induced DNA-damage and alterations of the redox status. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2011;726(2):109–115. Doi: [10.1016/j.mrgentox.2011.05.011](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2011.05.011)
- Barros O, Doria C, Marrugo J. Metales pesados (Pb, Cd, Ni, Zn, Hg) en tejidos de *Lutjanus synagris* y *Lutjanus vivanus* de la Costa de La Guajira, Norte de Colombia. *Vet y Zootec*. 2016;10(2):27–41. Doi: <https://doi.org/10.17151/vetzo.2016.10.2.3>
- Bridges C, Battle J, Zalups R. Transport of thiol-conjugates of inorganic mercury in human retinal pigment epithelial cells. *Toxicol. Appl. Pharmacol*. 2007;221(2):251–260. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2007.03.004>
- Budtz E, Grandjean P, Jørgensen P, Weihe P, Keiding N. Association between mercury concentrations in blood and hair in methylmercury-exposed subjects at different ages. *Environ Res*. 2004;95(3):385–393. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2003.11.001>
- Burgos S, Navarro A, Marrugo J, Enamorado G, Urango I. Polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the Cispata Bay, Colombia: A marine tropical ecosystem. *Mar Pollut Bull*. 2017;120(1–2):379–386. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.016>
- Calao CR, Marrugo JL. Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Biomédica*. 2015;35(Supl2):139–151. Doi: <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2392>
- Castro M, Méndez M. Heavy metals: Implications associated to fish consumption. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2008;26(3):263–271. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2008.06.001>
- Ceccatelli S, Daré E, Moors M. Methylmercury-induced neurotoxicity and apoptosis. *Chem. Biol. Interact*. 2010;188(2):301–308. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.04.007>

- Choy C, Yeung Q, Briton C, Cheung C, Lam C, Haines C. Relationship between semen parameters and mercury concentrations in blood and in seminal fluid from subfertile males in Hong Kong. *Fertil. Steril.* 2002;78(2):426-428. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0015-0282\(02\)03232-6](https://doi.org/10.1016/S0015-0282(02)03232-6).
- Clarkson T, Magos L. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Crit Rev Toxicol.* 2006;36(8):609-62. Doi: <https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
- Cordy P, Veiga M, Salih I, Al-Saadi S, Console S, Garcia O. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Total Environ.* 2011;410-411:154-160. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>
- Crespo M, Macêdo G, Pereira S, Arrifano G, Picanço D, Nascimento J. Mercury and human genotoxicity: Critical considerations and possible molecular mechanisms. *Pharmacol. Res.* 2009;60(4):212-220. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2009.02.011>
- De Carvalho G, Degaspari I, Branco V, Canário J, De Amorim A, Kennedy V. Assessment of total and organic mercury levels in blue sharks (*Prionace glauca*) from the south and southeastern Brazilian coast. *Biol Trace Elem Res.* 2014;159(1-3):128-134. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12011-014-9995-6>
- DeMarco K, Antunes L, Tanus J, Barbosa Jr. Intron 4 polymorphism of the endothelial nitric oxide synthase (eNOS) gene is associated with decreased NO production in a mercury-exposed population. *Sci. Total Environ.* 2012;414:708-712. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.010>
- ENSIN (Encuesta Nacional de Situación Nutricional). 2010; Recuperado de: <http://www.icbf.gov.co/portal/page/portal/PortalICBF/bienestar/nutricion/ensin>
- FAO/WHO (Food and Agricultural Organization / World Health Organization). Dietary Exposure Assessment of Chemicals in Food; World Health Organization. 2005. Recuperado de: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44027/1/9789241597470\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44027/1/9789241597470_eng.pdf).
- FAO/WHO (Food and Agricultural Organization / World Health Organization). Evaluation of certain food additives and contaminants. Sixty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO Technical Report Series 940. 2007; Recuperado de: <http://www.who.int/ipcs/publications/jecfa/reports/trs940.pdf>
- FAO (Food and Agricultural Organization). Resumen El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. 2016;34(7):23. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i5798s.pdf>
- FAO (Food and Agricultural Organization). El Estado de la Seguridad Alimentaria y la Nutrición en el mundo 2017. 2017. 144 p. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-17695s.pdf>
- Faroon O, Ashizawa A, Wright S, Tucker P, Jenkins K, Ingerman L. Toxicological Profile for Cadmium. US Dep Heal Hum Serv. 2012:487. Recuperado de: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf>
- Fuentes F, Pinedo J, Marrugo J, Díez S. Human health impacts of exposure to metals through extreme consumption of fish from the Colombian Caribbean Sea. *Environ Geochem Health.* 2018;40(1):229-242. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9896-z>
- Gallego S, Ramírez C, López B, Velásquez C. Evaluation of mercury, lead, and cadmium in the waste material of *crevalle jack* fish from the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean, as a possible raw material in the production of sub-products. *Environ Monit Assess.* 2018;190(3):115. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6480-2>
- García, Á., Parejo, A., Vela, L., Coronado, L. Presencia de mercurio en la especie *Pimelodus grosskopfii* "Capaz" en el departamento del Huila. *Ingeniería y Región.* 2015;13(1): 47-56. Doi: <https://doi.org/10.25054/22161325.708>
- Geier D, Geier M. A Prospective Study of Mercury Toxicity Biomarkers in Autistic Spectrum Disorders. *J. Toxicol. Environ. Health Part A.* 2007;70(20):1723-1730. Doi: <https://doi.org/10.1080/15287390701457712>
- González M, Bodas A, Martínez M, Trasobares E, Bermejo P, Ordoñez J. Metilmercurio: Recomendaciones existentes; métodos de análisis e interpretación de resultados; evaluación económica. *Nutr Hosp.* 2015;31(1):1-15. Doi: <https://doi.org/10.3305/nh.2015.31.1.8316>
- Goyer R, Clarkson T. Toxic Effects of Metals. In: Klaasen, C.D., Ed., Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons, 6th Edition, McGraw-Hill, New York; 2001. p. 811-853. Disponible en: [http://www.biologicaldiversity.org/campaigns/get\\_the\\_lead\\_out/pdfs/health/Goyer\\_1996.pdf](http://www.biologicaldiversity.org/campaigns/get_the_lead_out/pdfs/health/Goyer_1996.pdf)
- Gracia H, Marrugo J, Alvis E. Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia. 2009. *Rev Fac Nac Salud Pública.* 2010;28(2):118-124. Doi: <https://doi.org/10.12016346003>
- Gusso-Choueri PK, Araújo G, Cruz A, Stremel T, Campos S, Abessa D. Metals and arsenic in fish from a Ramsar site under past and present human pressures: Consumption risk factors to the local population. *Sci Total Environ.* 2018;628-629:621-630. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.005>
- Hsu H, Kucharzyk K, Zhang T, Deshusses M. Mechanisms regulating mercury bioavailability for methylating microorganisms in the aquatic environment: A critical review. *Environ Sci Technol.* 2013;47(6):2441-2456 Doi: <https://doi.org/10.1021/es304370g>
- Järup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.* 2003;68(1):167-182. Doi: <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). Summary and Conclusions. Rome; 2006.
- Karagas M, Choi A, Oken E, Horvat M, Schoeny R, Kamai

- E, *et al.* Evidence on the Human Health Effects of Low Level Methylmercury Exposure. *Environ Health Perspect.* 2012; 120(6): 799-806. Doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.1104494>.
- Karri V, Kumar V, Ramos D, Oliveira E, Schuhmacher M. Comparative in vitro toxicity evaluation of heavy metals (Lead, Cadmium, Arsenic, and Methylmercury) on HT-22 Hippocampal Cell Line. *Biol Trace Elem Res.* 2018;184(1):226-239. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12011-017-1177-x>
- Kim K, Kabir E, Jahan S. A review on the distribution of Hg in the environment and its human health impacts. *J Hazard Mater.* 2016;306:376-385. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.031>
- Kris P, Harris W, Appel L. Fish consumption, fish oil, omega-3 fatty acids, and cardiovascular disease. *Circulation.* 2002;106(21):2747-2757. Doi: <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000038493.65177.94>
- López E, Barragán R. Metals and metalloids in eight fish species consumed by citizens of Bogotá D.C., Colombia, and potential risk to humans. *J Toxicol Environ Heal - Part A Curr Issues.* 2016;79(5):232-243. Doi: <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1149130>.
- MADR/FAO (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). Política Integral para el desarrollo de la pesca sostenible en Colombia. 2015;118. Disponible en: [http://www.aunap.gov.co/wp-content/uploads/2017/06/Politica\\_Integral\\_de\\_Pesca\\_MADR\\_FAO\\_julio\\_de\\_2015.pdf](http://www.aunap.gov.co/wp-content/uploads/2017/06/Politica_Integral_de_Pesca_MADR_FAO_julio_de_2015.pdf)
- Marrugo, Benitez L, Olivero J. Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining in northern Colombia. *Arch Environ Contam Toxicol.* 2008;55(2):305-316. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00244-007-9129-7>.
- Marrugo J, Benitez L, Olivero J, Lans E, Gutierrez F. Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. *Int J Environ Health Res.* 2010;20(6):451-459. Doi: <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.499451>
- Marrugo, Ruiz J, Ruiz A. Biomagnification of Mercury in Fish from Two Gold Mining-Impacted Tropical Marshes in Northern Colombia. *Arch Environ Contam Toxicol.* 2018;74(1):121-130. Doi: <http://link.springer.com/10.1007/s00244-017-0459-9>
- Marrugo J, Navarro A, Ruiz J. Total mercury concentrations in fish from Urrá reservoir (Sinú river, Colombia). Six years of monitoring. *Rev MVZ Cordoba.* 2015a;20(3):4754-4765.
- Marrugo J, Pinedo J, Díez S. Geochemistry of mercury in tropical swamps impacted by gold mining. *Chemosphere.* 2015b;134:44-51. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.012>.
- Marrugo, Verbel J, Lans E, Benitez L. Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environ Geochem Health.* 2008;30(1):21-30. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9104-2>
- Mohmand J, Eqani S, Fasola M, Alamdar A, Ali N, Mustafa I, *et al.* Human exposures to toxic metals via contaminated dust: bioaccumulation trends and risk assessment. *Chemosphere.* 2015;132, 142-151. Doi: [10.1016/j.chemosphere.2015.03.004](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.004).
- Nakamura M, Hachiya N, Murata K, Nakanishi I, Kondo T, Yasutake A. Methylmercury exposure and neurological outcomes in Taiji residents accustomed to consuming whale meat. *Environ Int.* 2014;68:25-32. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.005>
- Nawab J, Khan S, Xiaoping W. Ecological and health risk assessment of potentially toxic elements in the major rivers of Pakistan: General population vs. Fishermen. *Chemosphere.* 2018;202:154-164. Doi: [10.1016/j.chemosphere.2018.03.082](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.082).
- Oliveira L, Ferreira N, Oliveira A, Nogueira A, Gonzalez M. Evaluation of distribution and bioaccumulation of arsenic by ICP-MS in tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivated in different environments. *J Braz Chem Soc.* 2017;28(12):2455-2463. Doi: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170101>
- Olivero J, Caballero K, Turizo A. Mercury in the gold mining district of San Martín de Loba, South of Bolívar (Colombia). *Environ Sci Pollut Res.* 2015;22(8):5895-5907. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3724-8>.
- Olivero J, Carranza L, Caballero K, Ripoll A, Muñoz D. Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon. *Environ Sci Pollut Res.* 2016;23(20):2061-2071. Doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7255-3>
- Palacios Y, Caballero K, Olivero J. Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere.* 2018;193:421-430. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.160>
- Pinedo J, Marrugo J, Díez S. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere.* 2015;119:1289-1295. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.044>
- Rice K, Walker E, Wu M, Gillette C, Blough E. Environmental mercury and its toxic effects. *J Prev Med Public Heal.* 2014;47(2):74-83.
- Ruiz J, Marrugo J, Díez S. Human Exposure to Mercury Through Fish Consumption: Risk Assessment of Riverside Inhabitants of the Urrá Reservoir, Colombia. *Hum Ecol Risk Assess An Int J.* 2014;20(5):1151-63. Doi: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10807039.2013.862068>
- Salazar C, Salas M, Marrugo S, Marrugo J, Díez S. Dietary human exposure to mercury in two artisanal small-scale gold mining communities of northwestern Colombia. *Environ Int.* 2017;107:47-54. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.011>
- Salinas C, Cubillos J, Gómez R, Trujillo F, Caballero S. "Pig in a poke (gato por liebre)": The "mota" (*Calophrysus macropterus*) fishery, molecular evidence of commercialization in Colombia and toxicological analyses. *Ecohealth.* 2014;11(2):197-206. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10393-013-0893-8>.

- Silbergeld EK, Silva IA, Nyland JF. Mercury and autoimmunity: implications for occupational and environmental health. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2005;207(Supl 2):282-292.
- UE (Unión Europea). Metales Pesados. 2017. p. 25. Disponible en: <http://plaguicidas.comercio.es/MetalPesa.pdf>
- UNEP Y WHO (United National Environment Programme). Guidance for Identifying Populations At Risk From Mercury Exposure. *Exposure*. 2008:176. Disponible en: [https://wedocs.unep.org/.../IdentifyingPopnatRiskExposuretoMercury\\_2008Web.pdf](https://wedocs.unep.org/.../IdentifyingPopnatRiskExposuretoMercury_2008Web.pdf)
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - Diseño de herramientas para la planeación sectorial. 2015. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/SeccionMineria\\_sp/Incidencia\\_real\\_de\\_la\\_mineria\\_sobre\\_recurso\\_hidrico.pdf](http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/Incidencia_real_de_la_mineria_sobre_recurso_hidrico.pdf)
- Ursinyova M, Uhnakova I, Serbin R, Masanova V, Husekova Z, Wsolova L. The Relation Between Human Exposure to Mercury and Thyroid Hormone Status. *Biol Trace Elem Res.* 2012;148(3):281-291. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9382-0>.
- Van J, Blanchfield P, Hrenchuk L, Hintelmann H. Mercury elimination by a top predator, *Esox lucius*. *Environ Sci Technol.* 2013;47(9):4147-4154. Doi: <https://doi.org/10.1021/es304332v>
- Vergara E, Rodríguez P. Presencia de mercurio, plomo y cobre en tejidos de *Oreochromis niloticus*: sector de la cuenca alta del Río Chicamocha, vereda Volcán, Paipa, Colombia. *Prod + Limpia.* 2015;10:114-126.
- Von Stackelberg K, Li M, Sunderland E. Results of a national survey of high-frequency fish consumers in the United States. *Environ Res.* 2017;158:126-136. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.042>
- Zafar A, Eqani S, Bostan N, Cincinelli A, Tahir F, Shah S. Toxic metals signature in the human seminal plasma of Pakistani population and their potential role in male infertility. *Environ Geochem Health.* 2015;37(3):515-527. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9666-8>.