

**EVALUACIÓN DE MERCURIO, ARSÉNICO, PLOMO Y CADMIO EN ALIMENTOS DE  
MAYOR CONSUMO DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO ATRATO, CHOCÓ-  
COLOMBIA.**



**GABRIEL ANTONIO CAICEDO RIVAS**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA – MONTERÍA, 2022  
FACULTAD DE INGENIERIAS**

**EVALUACIÓN DE MERCURIO, ARSÉNICO, PLOMO Y CADMIO EN ALIMENTOS DE  
MAYOR CONSUMO DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO ATRATO, CHOCÓ-  
COLOMBIA.**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN TOXICOLOGÍA**

**GABRIEL ANTONIO CAICEDO RIVAS**  
Grupo de investigación en Biosistemática

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL  
TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**DIRECTOR:**

**JOSÉ LUIS MARRUGO NEGRETE. D.Sc.**

Profesor titular Universidad de Córdoba

Grupo de Investigación Aguas, Química Aplicada y Ambiental

**CO-DIRECTOR**

**MANUEL HAMINTON SALAS MORENO. D.Sc**

Profesor asociado de la Universidad de Tecnológica del Chocó

Grupo de Investigación en Biosistemática

**MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES**  
**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA – MONTERÍA, 2022**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Evaluador 1**

---

**Evaluador 2**

---

**Director Montería, 2022**

---

**Co-Director Montería, 2022**

## **DEDICATORIA**

Existe un mundo donde biológicamente tenemos similitudes, aunque presentamos condiciones específicas totalmente diferentes, quiero dedicarle mi trabajo a todas las personas que respetan, valoran, cuidan y coexisten con estas diferencias sin miedo; a toda la comunidad científica, que con sus esfuerzos nos informan día a día de nuevos hallazgos, a todos los que ponen su conocimiento al servicio social, a todas las personas que con sus esfuerzos nos inspiran, quiero dedicar mi investigación a los que esperan en silencio y se esfuerzan día a día , a todos los héroes sin capa de las distintas ramas que acoge la ciencia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primeramente a Dios, por permitirme día a día tener vida y poder continuar en medio de mis dificultades, quiero agradecerle infinitamente por la oportunidad que me brinda en crecer y tener herramientas para ayudar a construir un mundo mejor.

A mi madre Clara Rosa Rivas Palacios, por todo el apoyo y amor incondicional, a mi hermano Luis fernando Caicedo Rivas por su cariño, a la madre de mi hijo Angel Johana Caicedo Arriaga, por estar ahí en el apoyo que se necesita para continuar, a mi hijo Mathias Caicedo Arriaga, por llenarme el corazón de fé, amor y tranquilidad.

A mi director, Jose Luis Marrugo Negrete, por su disposición, permanente asesoría, y la amplitud de sus conocimientos que fueron guía en todo este proceso.

A mi co.director Haminton Salas Moreno, por su asesoría, paciencia y apoyo en todo este camino, por todos los consejos brindados y constante ánimos en este proceso.

Al cuerpo de profesores y mis compañeros de la maestría en ciencias ambientales, por ayudarme a consolidar de a poco un criterio explorativo, crítico e investigativo, por todos sus consejos que ayudan a convertirme en un aportante de la ciencia, por el respeto y la responsabilidad de asistir en estos momentos críticos que vivimos como humanidad.

A la universidad de Córdoba y su laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental; a la Universidad tecnológica del Chocó, especialmente al grupo de investigación en biosistemática, ambos con personal profesional y técnico con un don de servicio, amabilidad y disposición, siempre atentos de brindarme un espacio cuando lo necesité.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ASBTRAC .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	14
2. OBJETIVOS .....	17
3. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES .....	18
Antecedentes.....	18
. En la región caribe .....	20
En la región amazonica .....	21
En la región andina .....	22
En la región pacífica .....	22
Contaminación ambiental y su origen antropogénico .....	23
Minería .....	26
Metales pesados .....	27
Bioacumulación y biomagnificación de los metales pesados en peces y vegetales .....	30
Toxicidad de metales pesados (Hg, As, Pb y Cd) en la salud humana producto del consumo de peces y vegetales .....	31
Seguridad alimentaria .....	32
Toxicología analítica .....	33
4. METODOLOGÍA.....	34
Area de estudio .....	34

Cuenca media del atrato .....	34
Recoleccion de los datos .....	36
Peces .....	36
Vegetales .....	36
Análisis de metales pesados y MeHg .....	37
Evaluación de riesgo para la salud humana .....	38
Calculo de la ingesta diaria estimada .....	38
Evaluación del riesgo no cancerígeno .....	39
Evaluación del riesgo cancerígeno para (As y Pb) .....	40
Riesgo estimado para metilmercurio .....	41
Índice de contaminación por metil mercurio .....	42
Tratamiento estadístico .....	42
5. RESULTADOS.....	43
Concentración de metales pesados, As, MeHg en peces, frutas y verduras .....	43
Especies de peces, frutas y verduras mas consumidas en la cuenca media del rio atrato .....	51
Determinación de riesgo a la salud por el consumo de peces, frutas y verduras ..	51
Exposición humana y evaluación en la salud, asociada al consumo de peces y vegetales .....	52
Riesgo no carcinogenico .....	53
Riesgo carcinogénico .....	54
Evaluacion de riesgo por MeHg en las especies de peces mas consumidas .....	55
Índice por contaminación (diagnostico poblacional).....	58
6. DISCUSIÓN .....	68
7. CONCLUSIONES.....	74
8. REFERENCIAS.....	76

9. ANEXOS ..... 89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	35
Figura 2. Límites de consumo de Mercurio en peces, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	46
Figura 3. Límites de consumo de Metilmercurio en peces, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	46
Figura 4. Límites de consumo de Arsénico en peces, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	47
Figura 5. Límites de consumo de Plomo en peces, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	47
Figura 5. Límites de consumo de Cadmio en peces, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	48
Figura 7. Límites de consumo de mercurio en vegetales, Organización Mundial de la Salud (OMS) .....	48
Figura 8. Límites de consumo de Arsenico en vegetales, Organización Mundial de la Salud (OMS) .....	49
Figura 9. Límites de consumo de Cadmio en vegetales, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	49
Figura 10. Límites de consumo de Plomo en vegetales, Organización Mundial de la Salud (OMS).....	50

## LISTA DE TABLAS

Table 1. Hábitos y/o preferencia del consumo de los peces, concentraciones medias de los metales pesados en la cuenca media del río Atrato..... 59

Tabla 2. Estimación del riesgo potencial para la población por el consumo de pescado en la cuenca media del río Atrato.....61

Table 3. Concentraciones mg/kg y Consumo (días x semana) de vegetales (frutas y verduras) en la cuenca media del río Atrato.....62

Tabla 4. Ingesta diaria estimada (IDE), cociente de peligrosidad estimado (THQ), cociente de peligrosidad total estimado (TTHQ) y riesgo carcinogénico de los pescados más consumidos, para los metales pesados del consumo de pescado.....64

Tabla 5. Ingesta diaria estimada (IDE), cociente de peligrosidad estimado (THQ), cociente de peligrosidad total estimado (TTHQ) y riesgo carcinogénico de los vegetales más consumidos, para los metales pesados del consumo de vegetales.....65

Tabla 6. Investigaciones de la última década con respecto a la evaluación o cuantificación de los metales pesados Hg, Cd, Pb y As en peces y/o vegetales.....66

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1. Características generales de la población

## RESUMEN

La cuenca del río Atrato-Colombia es una de las zonas de mayor producción aurífera del país, la minería aurífera presente en los ríos y suelos a causado contaminación con elementos tóxicos. Se evaluó las concentraciones de los metales pesados mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) en peces y vegetales más consumidas por los habitantes ribereños de la cuenca media del río Atrato; estos contaminantes persistentes representan un peligro para diversas especies de animales y plantas, debido a su capacidad bioacumulable y biomagnificable, lo cual se convierte en riesgo para la salud pública.

Se analizaron 154 muestras de diferentes vegetales y 440 muestras de pescado; las concentraciones en peces se presentaron en el siguiente orden Hg, As, Pb y Cd, en vegetales estuvo As, Hg, Cd y Pb. Los resultados mostraron altas concentraciones de Hg en peces especialmente carnívoros ( $1008.0 \pm 552.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), en vegetales se observaron mayores concentraciones de As ( $60.84 \pm 107.8 \text{ mg kg}$ ). La evaluación de riesgo permitió determinar elevadas concentraciones de THg, MeHg y As. Existe riesgo carcinogénico debido a largas exposiciones de As por el consumo de peces en *Ageniosus pardalis* (Doncella), *Rhamdia quelen* (Barbudo), *Leporinus muyscorum* (liseta), *Hypostomus hondae* (guacuco), *Prochilodus magdalenae* (Bocachico), *Ctenolucius beani* (Agujeta), *Hoplias malabaricus* (Quicharo), *Trachelyopterus fisheri* (Caga), *Sternopygus aequilabiatus* (Beringo), *Caquetaia umbrifera* (Mojarra negra), *Astyanax fasciatus* (Sardina), *Caquetaia kraussii* (Mojarra amarilla), *Geophagus Pellegrini* (Mojarra copetona); Aunque, para As y Pb en los vegetales este riesgo estuvo ausente. Las concentraciones medias en peces y vegetales excedieron el límite máximo permisible del (Codex, 1995; U.E, 2016).

Las elevadas concentraciones de THg, MeHg y As en algunas especies alimenticias de la cuenca media del río Atrato, permite al presente estudio hacer un llamado para la construcción de posibles alternativas de consumo, por posibles riesgos a la salud pública de la zona.

**Palabras claves:** concentraciones, metales pesados, salud pública, seguridad alimentaria y tóxica.

## ABSTRACT

The Atrato-Colombia river basin is one of the areas of greatest gold production in the country; gold mining in the rivers and soils has caused contamination with toxic elements. The concentrations of the heavy metals mercury (Hg), lead (Pb), cadmium (Cd) and arsenic (As) were evaluated in fish and vegetables most consumed by the riverside inhabitants of the middle basin of the Atrato river; these persistent contaminants represent a danger for various species of animals and plants, due to their bioaccumulative and biomagnifiable capacity, which becomes a risk for public health.

A total of 154 samples of different vegetables and 440 fish samples were analyzed; the concentrations in fish were in the following order: Hg, As, Pb and Cd; in vegetables there were As, Hg, Cd and Pb. The results showed high concentrations of Hg in fish especially carnivorous fish ( $1008.0 \pm 552.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), in vegetables higher concentrations of As were observed ( $60.84 \pm 107.8 \text{ mg kg}$ ). The risk assessment determined elevated concentrations of THg, MeHg and As. There is carcinogenic risk due to long As exposures from fish consumption in *Ageniosus pardalis* (Doncella), *Rhamdia quelen* (Barbudo), *Leporinus muyscorum* (Liseta), *Hypostomus hondae* (Guacuco), *Prochilodus magdalenae* (bocachico), *Ctenolucius beani* (Agujeta), *Hoplias malabaricus* (Quicharo), *Trachelyopterus fisheri* (Caga), *Sternopygus aequilabiatus* (Beringo), *Caquetaia umbrifera* (Mojarra negra), *Astyanax fasciatus* (Sardina), *Caquetaia kraussii* (Mojarra amarilla), *Geophagus Pellegrini* (Mojarra copetona); However, for As and Pb in vegetables this risk was absent. The average concentrations in fish and vegetables exceeded the maximum permissible limit of (Codex, 1995; E.U., 2016).

The high concentrations of THg, MeHg and As in some food species of the middle basin of the Atrato river, allows the present study to make a call for the construction of possible consumption alternatives, due to possible risks to public health in the area.

**Key words:** concentrations, heavy metals, public health, food safety and toxicity.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados y metaloides es uno de los problemas que más preocupa a nivel mundial, causas antropogénicas como el aumento en la densidad poblacional, los desechos industriales, agricultura extensiva, mala disposición de residuos sólidos, aguas residuales y la actividad de minería del oro y otros metales; han generado contaminación con elementos tóxicos del agua, suelo y el aire (Zazouli et al., 2013; Rahman et al., 2019).

Los metales pesados como el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y el metaloide arsénico (As), representan algunos de los contaminantes que más preocupa a nivel mundial, debido a las características físicas y químicas que adoptan en el ambiente (Reyes et al., 2016), la contaminación en ecosistemas por metales pesados representa un inmenso riesgo sobre la salud poblacional existente (Chen et al., 2013). Estos tóxicos persisten durante cientos de años y poseen una gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación, esto significa que, las especies de peces y vegetales son incapaces de metabolizarlos, generándose un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones, con una contaminación por bioacumulación y un efecto multiplicador en la concentración del contaminante en la cadena trófica. (Salazar-Camacho et al., 2017).

Se le considera al Hg, Pb, Cd y As, algunos de los contaminantes de mayor cuidado en la salud, por su alta actividad tóxica en los organismos (Tagne-Fotso et al., 2016). Cada uno de ellos ha sido responsable de incidentes de envenenamiento a gran escala, la exposición crónica a estos metales, causan efectos tóxicos en niveles aun relativamente bajos (Salazar et al., 2017). El Hg liberado en el medio acuático es incorporado en los sedimentos, y allí es convertido por la acción de bacterias en una forma orgánica llamada metilmercurio (MeHg) (Gutiérrez et al., 2020). Este compuesto es altamente neurotóxico, capaz de causar daños al sistema nervioso central, el Hg alcanza efectos tóxicos en órganos como el cerebro, hígado, riñones y la placenta (Al-Saleh et al., 2017). En humanos la exposición a Cd ocasiona lecciones renales, insuficiencia pulmonar, lesiones óseas, afecta la fertilidad en hombres y a los sistemas nerviosos central y periférico (Wang et al., 2013; Alamdar et al., 2016). La exposición a un nivel bajo de plomo se ha

asociado con efectos neurológicos, inmunológicos, cardiovasculares, reproductivos, cáncer e incluso la muerte (Amiri y Mohamadi 2016; Alamdar et al., 2017). En el caso del As, se conocen algunas complicaciones en los sistemas respiratorio, cardiovascular, inmunológico, endocrino, hepático, puede provocar mutaciones e incluso el cáncer (Mohmand et al., 2015).

En Colombia la minería produjo 47. 6 toneladas del oro en el año 2020, 30% más de extracción en referencia del año anterior, Agencia Nacional de Minería (ANM); siendo una de las actividades antropogénica que genera con frecuencia grandes alteraciones a los diferentes paisajes que conforman el territorio, esto se ve reflejado en la alta devastación y contaminación del hábitat (Pinedo et al., 2015).

En el departamento del Chocó la situación es similar, la minería del oro y platino emite aproximadamente 150 ton de Hg al ambiente (UPME, 2014); esta cadena indiscriminada de explotación minera se constituye en una de las prácticas extractivas que más impacto causan en el ambiente de esta región (Andrade, 2011). Una de las zonas más impactada por la practica minera es la cuenca del río Atrato, la cual está ubicada dentro de una región que alberga una gran biodiversidad y, es considerada como una bóveda de minerales preciosos, lo cual la hace atractiva al desarrollo de actividades mineras de pequeña escala (Mojica et al., 2004; Palacios-Torres et al., 2018).

En la actividad minera del oro se utiliza el proceso de amalgamación con Hg, lo cual genera la contaminación con este metal del suelo, el agua y el aire; además el proceso de excavación y remoción de tierra libera otros metales como el Cd, Pb y As; los cuales están presentes en los minerales asociados al oro (Heredia, 2017). Se ha evidenciado la presencia de estos metales en los suelos y el agua del río Atrato, lo que ha provocado que estos elementos tóxicos ingresen en la cadena trófica, constituyendose en un riesgo para la salud humana (Palacios-Torres et al., 2018; Salazar-Camacho et al., 2022).

La transferencia de estos contaminantes en las cadenas alimentarias hasta los seres humanos se constituye en un tema de interés actual por los daños ya mencionados (Efsa, 2015); siendo la ingesta una de las principales vías de exposición a estos metales (Rahman et al., 2019). Claramente, las concentraciones de metales pesados existentes en la diversidad de alimentos, a ciertos niveles son aceptados como constituyentes de

los mismos (Olivero-Verbel, 2002), los niveles excesivos y aún en concentraciones bajas causan enfermedades, donde anualmente mueren en el planeta alrededor de 500.000 personas por consumo de alimentos contaminados, en Colombia cerca de 80.000, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020). Con el fin de proteger a la población humana, en el área de salud y alimentación, cada país y cada región, se apoyan en diferentes estudios científicos o estándares internacionales, que regulan la tolerancia y/o aceptan los niveles de estos metales pesados presentes en sus alimentos (Barraza y Martín, 2018).

La cuenca media del río Atrato posee una elevada vulnerabilidad social (Lara et al., 2020), es la principal fuente de obtención y comercialización de fuentes alimenticias para sus habitantes (Palacios-Torres et al., 2018). La mayor parte de los alimentos utilizados en el autoconsumo por cada familia provienen de productos de cultivos y pesca en sus territorios. Se conoce por diversas investigaciones que los metales pesados presentes en ciertos alimentos, especialmente en pescados, frutas y verduras, están directamente relacionados con la contaminación de aguas, ríos y suelos (Vives De Andrés, 2009) y se considera al consumo de pescados, frutas y verduras contaminados la principal fuente de exposición humana a metales pesados (Rice et al., 2014). Por tal motivo, su concentración en alimentos debe ser cuidadosamente evaluada y monitoreada (Kim et al., 2016).

Por lo anterior, el objetivo central de esta investigación fue: 1) determinar las concentraciones de Hg, Cd, Pb y As en músculo de peces, frutas-bulbos y verduras-tallos de consumo común en los municipios de municipios de Medio Atrato, Bojayá, Vigía del Fuerte y Murindó, perteneciente a la cuenca media del río Atrato; 2) evaluar el riesgo a la salud humana por ingesta de pescado, frutas-bulbos y verduras-tallos en los municipios de la cuenca media del río Atrato. Es prioritario mantener, la seguridad, disponibilidad y la nutrición de los alimentos entre las necesidades fundamentales para la vida humana. Sea el caso particular en la cuenca media del río Atrato, donde sus características demográficas, hacen dependientes a sus pobladores de las actividades desarrolladas en su territorio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el riesgo a la salud por consumo de alimentos contaminados con Hg, As, Pb y Cd en los habitantes de los municipios de la cuenca media del río Atrato, Chocó-Colombia.

### **2.2 Objetivos específicos**

Determinar las concentraciones de Hg, As, Pb y Cd, en alimentos de mayor consumo (pescado, frutas-bulbos y verduras-tallos) por los habitantes de la cuenca media del río Atrato.

Evaluar el riesgo carcinogénico y no carcinogénico por el consumo de alimentos contaminados con Hg, As, Pb y Cd, en habitantes de la cuenca media del río Atrato.

Evaluar el riesgo potencial a la salud asociado con el consumo de peces contaminados con MeHg y proveer información para el consumo seguro de peces en los habitantes de la cuenca media del río Atrato.

### 3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

#### 3.1 Antecedentes

La contaminación metalífera a causa de explotaciones mineras hace presencia en todos los continentes del mundo, en el viejo mundo asiático, europeo y africano, el agotamiento incontrolado de sus recursos por parte de explotaciones mineras, ha contaminado distintas matrices del ambiente fundamentales para el desarrollo social (Fasinu y Orisakwe, 2013; Orisakwe, 2020; Nag y Cummins, 2022). La exposición constante a metales tóxicos y el riesgo a la salud humana, están reflejadas en distintas investigaciones y/o evaluaciones donde determinaron la presencia de Hg, As, Pb y Cd, o algunos de estos elementos tóxicos, en productos de alto consumo en la canasta familiar como son pescados y vegetales. Estas investigaciones fueron realizadas en países como Polonia (Kuras et al., 2017; Mielcarek, et al., 2022); Arabia Saudita (Al-Saleh y Abduljabbar, 2017); Iran (Miri et al., 2017; Roya y Ali, 2017; Solgi y Beigzadeh, 2019); India (Jose y Ray, 2018); España (Puerto-Parejo et al., 2017); China (Wai et al., 2017; Wei et al., 2019; Zhang et al., 2019; Guo et al., 2022); Sudáfrica (Erasmus et al., 2002); Sudafrica y Mozambique (Genthe et al., 2018); Bosnia y Herzegovina (Hajrić et al., 2022); Irlanda (Nag y Cummins, 2022); Irak (Tariq, 2021); Gana (Nyantakyi et al., 2021); Nigeria (Okoye et al., 2021; Edogbo et al., 2020); Etiopía (Guadie et al., 2021); Dinamarca (Marini et al., 2019); Pakistán (Mehmood et al., 2020); Tanzania (Mwakalapa et al., 2019); Vietnam (Tran et al., 2018) y Bangladesh (Real et al., 2017).

La contaminación metalífera en el nuevo mundo a causa de la extracción minera destaca el trabajo de investigación de Lescord et al. (2021), en Canadá (Norte América), allí fueron analizadas alrededor de 388 peces de 25 lagos y ríos; en estos ejemplares se encontraron material traza de Hg, As, Pb y Cd y otros elementos tóxicos. Si bien, la mayoría de las concentraciones encontradas de estos elementos fueron bajas, se plantea la restricción del consumo de algunas especies de peces por superación del

punto de referencia de asesoramiento (AB) para los elementos Hg y As, establecidos por el ministerio del ambiente de este país.

El trabajo de revisión de Canham et al. (2021), para 12 países ubicados en centro y sur america como: Nicaragua, Costarica, Mexico, Brasil, Argentina, Colombia, Bolivia, Guyana Francesa, Surinam, Ecuador, Perú y Paraguay; donde se evaluaron 10.391 individuos en 192 especies, la recopilación y analisis de los datos, posesiona a Colombia dentro de los umbrales superiores en concentraciones de Hg ( $1.60 - 4.50 \mu\text{g g}^{-1}$ ), si bien, fueron pocos los registros revisados en comparación con otros países como Brasil, el cuál recopiló un número superior de investigaciones; y los umbrales de concentraciones de Hg estuvieron por debajo ( $1.04 - 2.84 \mu\text{g g}^{-1}$ ). La investigacion, recomienda la necesidad del biomonitoreo y control de las emiciones de Hg a causa de explotación minera, por el riesgo de acumulación en peces y otras vidas silvestres, especialmente en países de suramerica, por la dispariedad de los datos obtenidos con respecto a america del norte.

En un estudio realizado por Román-Ochoa et al., (2021) en Perú del continente sur americano, se evalua el riesgo para la salud, y centra su preocupación en la acumulación de estos elementos contaminates en alimentos vegetativos de la canasta familiar, provenientes de cultivos, determinaron concentraciones de mayor a menor de metales pesados Cd, Pb, Hg y As; este ultimo obtuvo la concentración promedio más alta con ( $0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ ) encontradas en el arroz; sin embargo, el nivel de las concentraciones estudiadas no sobrepasaron los limites máximos establecidos por (OMS/FAO, 2015).

En Colombia, la contaminación metalífera de los ecosistemas a causa de la explotación minera, ha obtenido una creciente preocupación en la comunidad científica por el impacto evidente en sus ecosistemas y las especies que viven en ellas; sin embargo, son pocos las investigaciones de evaluaciones de riesgo a salud humana, donde se cuantifiquen el riesgo de exposicion directa, por la presencia de metales pesados en los alimentos peces, frutas y vegetales propios de las regiones e incluidos en la canasta familiar. En este sentido, en las distintas regiones del país, la mayoría de las investigaciones realizadas mantuvieron su enfoque en establecer la presencia de Hg, As,

Pb y Cd en una matriz del ecosistema o especie. Por lo tanto, consideramos anexar en nuestro trabajo, algunas investigaciones de estos metales pesados y/o metaloide en poblaciones ecosistemicas de importancia gastronómica para las comunidades.

En Colombia los investigadores Vargas y Marrugo (2019), evaluaron riesgo por ingesta, analizaron la biacumulacion de algunos metales como Hg, MeHg, As, Pb y Cd en la ictiofauna de importancias gastronómica en las diferentes comunidades del territorio, lo que permitió encontrar registros para 12 municipios del pais como: Amazonas, Antioquia, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Córdoba, Cundinamarca, Chocó, Guainía, Guajira, Putumayo y Huila. En este sentido, se reportaron los niveles de Hg mas elevados en las especies *Caranx hippos* ( $2.35 \mu\text{g g}^{-1}$ , peso húmedo) y *Calophysus macropterus* ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , peso húmedo), correspondientes a los municipios de Antioquía y putumayo; además, se establece la necesidad de realizar estudios que evalúen el riesgo a la salud que enfrentan pobladores de zonas mineras del territorio nacional por la exposicion directa que se tiene a estos contaminantes registrados.

**3.1.1. Región caribe:** Un estudio realizado por la concentración de mercurio en peces de Marrugo-Negrete et al., (2018), mediante espectrofotometría de absorción atómica de vapor frío (Thermo Electron AAS serie S) determinaron concentraciones de mercurio en peces encontradas en dos marismas tropicales del municipio de ayapel, las especies *Sorubim cuspicaudus*, *Leporinus muyscorum*, *Prochilodus Magdalenae* y *Hoplias Malabaricus*; sostuvieron diferencias significativas en la concentración de THg con respecto al lugar trofico de la cadena alimenticia de cada pez, siendo constatable la biomaginficacion de Thg en la zona estudiada.

Fuentes-Gandara et al. (2018), determinaron las concentraciones de Cd, Hg, y Pb en los tejidos adiposos de los peces; en esta investigación evaluaron los riesgos para la salud por la exposicion directa del consumo de pescado en el Pantano Mallorca ubicado en el noroeste de Colombia, la población ribereña presento valores de consumo altos de (n=95); aunque fueron ausente de riesgo a la salud, debido a que los niveles de ellos en los peces no fueron elevedados Hg y Pb ( $0.21 \text{ g g}$ ), existen posibles efecos en grupos vulnerables y es preocupante a causa de la ingesta elevada de los habitantes.

En la ciudad grande de Santa Marta - Colombia Pinzón-Bedoya et al., (2020) realizan un estudio de evaluación de riesgos potenciales para la salud humana, asociados a la ingesta de peces en la población ribereña (n=215), los datos de la encuesta describen un consumo excesivo de siete veces por semana, siendo los peces más consumidos *Euguerres plumieri*, *Mugil incilis*, *Elop smithi*, *Cathorops mapale*, y *Centropomus undecimalis*; en ellos se cuantifican ciertos metales como Hg, As, Pb y Cd, presentando niveles de concentraciones bajas, los datos obtenidos con el cálculo de la ingesta semanal estimada (EWI) y la cantidad máxima estimada de pescado que puede consumirse (MFW), determinaron que no existe riesgo potencial en la salud para MeHg, sin embargo recomienda un continuo monitoreo de los otros metales

Doria-Argumedo C, (2021) este estudio aborda la problemática de bioconcentración de tres metales mercurio, zinc y plomo, los peces analizados fueron dos especies *Ariopsis felix* y *Diplodus anularis*, nativas del río ranchería en el noroeste de Colombia, se colectaron 40 ejemplares en total, una vez cuantificadas las concentraciones se evidenció que la bioacumulación del mercurio fue mayor en las dos especies; sin embargo, las concentraciones no superaron los límites permitidos en la norma internacional, de igual manera, no existe riesgo alguno por dichas concentraciones cuantificadas en los sedimentos del río.

Un estudio realizado en la región de la Mojana-Colombia por Enamorado-Montes et al., (2021) determinaron la acumulación del mercurio en siete variedades de *Oriza sativa L* (arroz) cultivadas, con un suelo enriquecido a diferentes niveles de Hg (130, 800 y 1500  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) se observó que, las variedades de la especie acumularon más contenido del metal en raíces, seguido de las cáscaras y por último el grano, los niveles de Hg en los granos de arroz de las variedades evaluadas presentaron niveles cercanos al límite permisible de la norma china (20  $\mu\text{g Hg kg}^{-1}$ ). El excesivo consumo de las diferentes variedades de arroz pueden en un futuro poner en riesgo la salud de las poblaciones.

**3.1.2 Región amazónica:** Específicamente en el municipio de Puerto Nariño Alcalá-Orozco et al., (2020) realizaron biomonitoreo de Hg y Cd, en peces, con 102 individuos capturados, pertenecientes a 24 especies; las concentraciones de Hg se hizo mediante

el analizador de mercurio RA-915M Zeeman con una unidad de pirólisis (RP-91c) y software RP-915P (Lumex, San Petersburgo, Rusia), el Cd se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (AA240 FS, Agilent Technologies) en un horno de grafito GTA-120. Las concentraciones superiores se encontraron en especies con hábitos en la cadena trófica elevados, El contenido de Hg encontrado en estas especies de peces excedió la concentración máxima permitida de 500 µg kg; para el Cd las concentraciones medias fueron bajas. la evaluación de riesgo determino prioritario suspender el exceso consumo de pescado de un nivel trófico elevado.

**3.1.3 Región andina:** La investigación realizada por Lizarazo et al., (2020) en el municipio de Sibate-Cundinamarca, obtuvieron concentraciones de As, Pb y Cd, mediante instrumentos de espectrofotometría de absorción atómica (Varian AA-140 y Shimadzu AA-7000), los vegetales básicos de la canasta familiar colectados fueron *Cynara scolymus* (Alcachofa), *Daucus carota* (zanahoria) y *Petroselinum crispum* (Perejil). Las concentraciones promedio de As (2.36 mg kg), Pb (7.07 mg kg) y Cr (12.1 mg kg) en vegetales fueron superiores a los estándares máximos establecidos internacionalmente 0.5 mg kg, 0.1 mg kg y 0.5 mg kg, respectivamente; la transferencia del metal al vegetal fue variable, las hortalizas de hojas obtuvieron mayor concentración de metales en toda su unidad vegetativa, mientras que las de partes subterráneas concentraron la mayor parte en el bulbo bajo tierra, en general la concentración media de los elementos como As y Pb de ocho metales pesados superó los límites permitidos según las normas internacionales.

**3.1.4 Región pacífica:** En el trabajo investigativo de Palacios-Torres et al. (2018), determinaron la contaminación producto de la minería del oro en la región del Chocó biogeográfico, determinaron las concentraciones del Hg y THg en cabello, aire, sedimentos y pescado. Se capturaron un total de 258 peces, pertenecientes a 16 especies y diferentes niveles tróficos, la cuantificación del metal fue RA915+Analizador de mercurio Zeeman con software RP-915P (Lumex, St. Petersburg, Rusia). Las concentraciones estuvieron por encima del límite de la OMS (0.5 µg kg), los niveles más altos se encontraron en las especies en *Pseudopimelodus schultzi*, *Ageneiosus pardalis*, *Sternopygus aequilabiatus*, *Rhamdia quelen* y *Hoplias malabaricus*; finalmente, hacen

un llamado a las instituciones gubernamentales a proteger la biodiversidad por la alta contaminación de Hg en el territorio.

Rivera, et al., (2018) cuantificaron las concentraciones de Cd, Hg y Pb en peces *Prochilodus magdalenae* (Bocachico) y *Chaetostoma* spp (Corroncho) que habitan el río auca, capturados 21 ejemplares de manera aleatoria en los puntos de nuestros ubicados en el corregimiento hormiguero, las concentraciones promedio de metales: Cd = 46  $\mu\text{g kg}^{-1}$ , Hg = 235  $\mu\text{g kg}^{-1}$  y Pb = 35  $\mu\text{g kg}^{-1}$ . Con cálculos de riesgo carcinogénicos y no carcinogénicos, ruta de exposición por ingestión, ingesta semanal tolerable y evaluación de riesgo; el riesgo no carcinogénico presentó en varios puntos niveles intolerables, mientras que el consumo semanal de mercurio asociado a la ingesta de pescado supera los valores establecidos (< 0.5  $\mu\text{g kg}^{-1}$  de peso corporal) establecido por el Comité mixto (FAO/OMS) de expertos en aditivos alimentarios.

En la cuenca del río Atrato-Colombia Salazar-Camacho et al., (2020) muestran el deterioro a causa de la minería del oro, las especies icticas estudiadas fueron las comúnmente consumidas por los pobladores; las concentraciones estuvieron determinadas con un analizador directo de mercurio (DMA-80 TRICELL, Milestone Inc., Italia). Fueron realizadas 520 mediciones, con alta relación de bioacumulación de MeHg y THg; las elevadas concentraciones estuvieron en especies como *Ageniosus pardalis* y *Hoplias malabaricus*. La alta contaminación de la cuenca se encontró en las zonas aguas arriba, el 38% de las muestras superaron el límite de la OMS y el 15% superó el límite máximo de la OMS de THg en peces establecidos para consumo humano.

La investigación de Palacios-Torres et al., (2020) en el río Atrato, donde caracterizaron los niveles de varios elementos traza en sedimentos y peces, Se obtuvieron 135 especímenes de 9 especies de peces para un total de 104 muestras; los oligoelementos se cuantificaron con espectrometría de Masas (ICP-MS, AGILENT 1497700), Entre los elementos toxicológicamente relevantes bien conocidos están As, Cd y Pb. Las concentraciones de los elementos traza aumentaron según avanza en el curso del río, para el cociente de riesgo, el As en el músculo de pescado generó valores de HQ superiores a 1. Algunas especies de peces del río en particular *Cathorops melanopus*,

*Ageneiosus pardalis* y *Hemiancistrus Wilsoni*, representaron un riesgo de consumo para la población.

Salazar-Camacho et al., (2021) mediante la recopilación de datos de Hg y MeHg en peces del río Atrato a causa del impacto minero, obtuvieron 842 muestras en 16 especies de peces en cinco áreas del río donde se destacan municipios altamente impactados como Rio quito, Medio atrato, Vigía del fuerte, Murindó, Riosucio, Unguia y otros. Allí se determinaron las concentraciones de THg y MeHg. Las concentraciones fueron obtenidas mediante un analizador directo de mercurio (DMA-80 TRI-CELL, Milestone Inc., Italia). Estas concentraciones de THg y MeHg se relacionaron con el nivel trófico de la especie, para mostrar biomagnificación, y con la longitud total para mostrar bioacumulación, factores importantes para establecer el riesgo potencial para el medio ambiente y también para la salud de los habitantes que viven a lo largo de la cuenca por el consumo de pescado.

El trabajo investigativo realizado por Salazar-Camacho et al., (2022) en la cuenca del río Atrato realizan una evaluación de riesgo a la salud humana del metilmercurio, arsénico y otros metales. Según los datos encontrados en concentraciones de Hg, As, Pb y Cd en 47 especies de peces (n = 1372) el riesgo acumulado para la salud humana en habitantes (n = 2325) de 13 municipios ubicados a lo largo de la cuenca del río Atrato, Revelaron que el Hg y el As en el pescado presentan un alto riesgo potencial para la salud humana en función de sus concentraciones medias. Los cálculos de la ingesta diaria estimada (EDI) mostraron que los humanos podrían presentar efectos perjudiciales para la salud, mientras que el cociente de riesgo objetivo (THQ) estuvo por encima de 1, la población expuesta podría experimentar riesgos para la salud no cancerígenos, la evaluación de riesgo carcinogénico fue contraproducente para la salud, principalmente por As, en 8 de las 13 localidades evaluadas.

Los antecedentes en el pacífico – colombiano, evidencian la creciente preocupación por estimar concentraciones de metales trazas en este ecosistema de gran biodiversidad, debido a la explotación intensiva de minería urifera del oro desarrollada en el territorio y por el riesgo que estos tienen a la salud de los diferentes organismos y el ambiente.

### **3.2 Contaminación ambiental y su origen antropogénico.**

La contaminación es causada por el ingreso de sustancias nocivas en un entorno determinado, las cuales pueden ser de carácter biológico, físico o químico; dichas sustancias afectan el equilibrio del ecosistema y lo convierte en un ambiente inseguro (Waisberg et al., 2003), si la polución es progresiva, y causa deterioro a las matrices del ambiente e impiden su uso, se les considera procesos de degradación ambiental, lo que a menudo se observa por la pérdida de calidad del aire, de suelos y del recurso hídrico (Caley et al., 2001). Sus causas, Dependen de varios agentes y varían según el ecosistema al que afecten. Existen actividades sobre los recursos que causan el ingreso de agentes contaminates y condicionan el uso del mismo, esto se conoce como actividades de explotación o extractivas. (Ramos y García, 2012; Muños et al., 2012).

La contaminación es de origen antropogénico cuando es causada por acción humana, y obedece a algunas dinámicas sociales como: ganadería intensiva, aumento poblacional, industrialización, usos de pesticidas, vertios de aguas residuales y actividades mineras; la contaminación por minería realiza el depósito directo sobre las diferentes matrices del ambiente de elementos tóxicos que ayudan en la separación de los minerales explotados, como es el caso del Hg, esta actividad además, altera y acelera procesos naturales del ecosistema, como son algunos ciclos biogeoquímicos encargados de sostener la vida en la corteza terrestre, con la remoción de grandes cantidades de suelo, estos elementos tóxicos que se encuentran asociados en diferentes compuestos son liberados a la principales capas de la corteza terrestre, agua y aire (Marrugo-Negrete et al, 2018).

La contaminación excesiva en los ríos, se produce con la presencia de compuestos o elementos que habitualmente no estarían sin la acción del hombre, en la actualidad se estima que, más de un millón de sustancias diferentes son frecuentemente introducidas en las aguas naturales a través de los vertidos antropogénicos, algunos de estos componentes químicos altamente tóxicos son Hg, Cd, Pb y As (Vargas y Marrugo, 2019), son capaces de alterar las características físicas, químicas del agua y perturbar severamente las distintas dinámicas del ecosistema (Reyes et al., 2016).

### **3.3 Minería**

En Colombia gran parte de actividades extractivas de minerales se realiza de manera artesanal y con poco nivel tecnificado, el país se ha convertido en el segundo productor de oro en América Latina, con una producción anual aproximada de 47.838 toneladas (UPME, 2010); en la extracción del oro en el pacífico colombiano, incluyen grandes cantidades de químicos contaminantes como el Hg, generando un alto riesgo de afectación a la vida silvestre y a la salud humana (Burger et al., 2002)

La explotación de oro, puede ser aluvial, la cuál se da por el material de arrastre como depósitos fluviales superficiales; o depósitos de filón, que son vetas ya conformadas en las capas geológicas de la tierra. La extracción aluvial se ejecuta de diversas formas, en la práctica ancestral, se remueve el material del lecho para luego ser separado por medio de bateas, otras alternativas incluyen herramientas conocidas como motobombas de succión, en algunas ocasiones incluso se llega al uso de motores a chorro, que se encarga de hacer erosión en las márgenes del río para desprender el aluvión y liberar el oro (Castellanos et al., 2016).

Las actividades mineras en ríos se ejecutan con otras alternativas de maquinarias como las retroexcavadoras para el tipo de desopistos de filón, que generan grandes piscinas en las márgenes de los cauces; los desechos de la minería han dejado un legado de mercurio y otras sustancias en ríos y suelos (salzar-camacho et al., 2020). También se encuentra la utilización de dragas de succión, que flotan en el cauce y extraen los sedimentos del fondo del río; Posteriormente se realizan procesos de trituración y molienda mecánica, y una posterior cianuración o amalgamación para extraer el oro (Rosero-Chaves, 2019). Las actividades mineras, generan gran contaminación sobre el recurso de los ríos y suelos (Cordy et al., 2011), esto repercute directamente sobre las poblaciones ribereñas que se surten de los cuerpos hídricos el consumo de agua, riego, mantenimiento de animales y alimentación (Frías et al., 2010).

En la zona media de la cuenca del Atrato, la minería es el principal causante de liberaciones y derrames indiscriminado de contaminantes tóxicos en el cauce de los ríos,

lagunas y suelos (salzar-camacho, et al 2020); de forma permanente, la escorrentía superficial de los terrenos contaminados, la utilización de lodos como abono en cultivos, llegan a los suelos y rios donde conviven muchos organismos (Nawab et al., 2018).

### **3.4 Metales pesados**

La geología describe que muchos metales conforman la corteza de la tierra y están presentes de forma natural en el aire, los suelos y las aguas, (Perelló et al., 2014) los metales pesados según la tabla periódica, son elementos químicos con alta densidad (mayor a 4 o 5 g/cm<sup>3</sup>), masa y peso atómico por encima de 20, la ciencia describe que la presencia de estos elementos en la corteza terrestre no sobrepasa el 0,1% y se convierten en tóxicos aun en concentraciones bajas (Londoño - Franco et al., 2016),.

Los metales pesados Hg, Pb y Cd están fijados de gran preocupación para la salud pública (Amador et al., 2015) son contaminantes tóxicos para los seres vivos (Beltrán y Gómez, 2015; Caviedes et al., 2015) al no poseer una función específica en el organismo. En la actualidad se considera uno de los principales problemas en áreas ambientales, la contaminación de fuentes hídricas y suelos por metales pesados (Pabón et al., 2020).

Otros metales se han agrupado en oligoelementos o micronutrientes, también denominados elementos traza, los cuales son necesarios en pequeñas cantidades para el organismo, ya que intervienen en algunas funciones bioquímicas; normalmente estos se liberan a la atmósfera desde la tierra a partir de acciones de la corteza en su estado natural (Goldman y Shannon, 2001). El grupo de micronutrientes, pasado cierto umbral se comportan como tóxicos; aquí se encuentran: Arsénico (As), Boro (B), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Magnesio (Mn), Níquel (Ni), Selenio (Se) y Zinc (Zn).

El mercurio, en la corteza terrestre se encuentra en una concentración aproximada de 50 ng/g, principalmente como sulfuro, su densidad es de 13.456 g/mL, esta presente en todo tipo de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Arostegui, 2017), habitualmente no se encuentra en el medio natural y su presencia significa una contaminación de carácter antropogénico. El mercurio al exponerse a temperatura ambiente se manifiesta de forma líquida, posee la particularidad de conformarse en

compuestos altamente tóxicos, siendo uno de los metales de mayor concentración en los organismos acuáticos (Xie et al., 2020) capaz de ingresar a los diferentes organismos en una de sus formas más tóxicas MeHg; existe gran variedad de fuentes ambientales a las cuales se puede estar expuesto de coincidir con este metal, como lo es la dieta de peces contaminados con Hg o MeHg (Amador et al., 2015).

Este metal es considerado como el más tóxico de todos los metales pesados que aquí se tratan. La amalgamación del oro, es una de las principales causas de liberación de este metal a los ríos que confluyen en el Atrato (Ovayolu et al., 2019), ciertas enfermedades están relacionadas por la exposición indiscriminada a este metal, este metal tóxico es el causante de la enfermedad de Minamata en Japón; ocasiona daños al sistema nervioso, cardiovascular, a órganos como el cerebro, es una amenaza para las mujeres en gestación por causar abortos y puede ser cancerígeno (Villalba Kong, 2019).

El plomo, es un elemento frecuente en la litosfera no esencial, su contenido en la corteza terrestre es aproximadamente de 15 ng g, su densidad es de 11,3 g/cm<sup>3</sup>, puede encontrarse en forma de sulfuro de plomo Pb, carbonato de plomo PbCO<sub>3</sub> y sulfato de plomo PbSO<sub>4</sub> (Rodríguez, 2017). Es un metal muy poco móvil y que tiende a adsorberse en la zona no saturada de los ríos y, por el material arcilloso de los suelos. La presencia de plomo en nuestro organismo se relaciona con contaminación ambiental, lo cual es un peligro permanente, debido a que el plomo en el suelo no se degrada ni se puede retirar fácilmente; el ingreso de plomo a nuestro organismo se puede dar por vía por vía oral, lo que ocasiona que se introduzca un gran porcentaje de este metal por ingesta y pueda viajar por el tracto gastrointestinal (Amador et al., 2015).

Es un metal tóxico capaz de bioacumularse en plantas y animales, a un nivel considerable de exposición humana genera graves problemas de salud pública (OMS, 2013), este elemento al ingresar al organismo ataca el sistema nervioso, se acumula en la sangre, los huesos y afecta usualmente órganos como el hígado, los riñones; se encuentra involucrado en enfermedades tales como anemia, hipertensión, disfunción renal, puede inducir a estado de coma, retraso mental, discapacidad cognitiva e incluso la muerte (OMS, 2013/2018).

El cadmio, es un metal que se encuentra en la tierra en una cantidad aproximada a 0,1 ppm y no se encuentra aislado de manera natural, ya que su disposición química como catión divalente hace que se encuentre asociado a otros compuestos, las concentraciones en el ambiente pueden ser incrementadas considerablemente debido a acciones antrópicas (Reyes et al., 2016), este elemento no cumple ninguna función metabólica dentro de los seres vivos y este al acumularse tiende a ser un metal tóxico (Nieves et al., 2019); la solubilidad de sus compuestos en el agua depende fundamentalmente de la acidez de ésta, durante la erosión penetra en el medio ambiente sobre todo en forma soluble  $Cd^{2+}$  (Rodríguez, 2017).

Las fuentes antropogénicas de Cd, generalmente resultan de la producción industrial de baterías, plásticos, materiales sintéticos y minería, esto conduce a establecer contacto de forma directa por ingesta de alimentos (Pan et al., 2009; Rodríguez, 2017). Este metal puede ser tóxico para las células del organismo; viaja en el torrente sanguíneo y, puede llegar a acumularse en los tejidos, huesos y dientes, donde se almacena su 75%; con posibilidades de eliminación muy escasas, posee una vida media superior a 25 años; directamente afecta el hígado, riñones, testículos, pulmones, conlleva a problemas renales, de anemia, osteoporosis, anosmia y algunos tipos de cáncer como leucemia (Pernia et al., 2018).

El arsénico se clasifica como un metaloide o elemento de transición que se encuentra en una proporción de 5 gramos por tonelada de tierra, es un elemento cristalino de color gris, cuyo peso atómico es 74.92, se caracteriza por poseer una baja conductividad (Ramírez, 2013) su presencia ambiental deriva de fuentes naturales y antropogénicas (Cheng, 2016). Este metaloide tóxico se encuentra ampliamente distribuido en la hidrosfera y la biosfera; se utiliza en una amplia variedad de procesos industriales como, procesamiento de vidrio, pigmentos, textiles, papel y adhesivos metálicos (Alonso et al., 2013).

Este metal en aguas superficiales predomina en su estado más tóxico As (V), el escurrimiento de As proveniente de sitios contaminados y podría afectar las reservas de agua dulce; Muchas de las concentraciones de este elemento encontrados en la

atmósfera, son producto de las industrias minera (Barraza-Martín, 2018), La exposición a altos niveles de arsénico inorgánico puede deberse a diversas causas, como el consumo de alimentos contaminados (Barragán, 2008), esta última puede ser la causa de mayor impacto para la salud pública; altera los procesos de atención, propicia enfermedades como diabetes, aterosclerosis, pulmonares, anemias, Arritmias e incluso cáncer (reyes et al., 2016).

### **3.5 Bioacumulación y biomagnificación de los metales pesados en peces y vegetales.**

El Hg, Pb, Cd y As, son cuatro elementos tóxicos que contaminan el aire, las aguas superficiales y el suelo, al ser persistentes y no poder degradarse ni destruirse (Tagne-Fotso et al., 2016); se encuentran entre los diez principales productos químicos de mayor preocupación mundial para la salud pública, su preocupación existe por su alta toxicidad incluso cuando estas exposiciones se dan en concentraciones relativamente bajas (Martorell et al., 2011). Sus características más comunes son la persistencia, la bioacumulación, la biotransformación (Newman, 2014).

La bioacumulación se centra en los procesos de absorción de contaminantes en los organismos (Blasco et al., 2016). El nivel trófico es un factor importante que influye en los niveles de contaminantes en organismos acuáticos, Se refiere a la acumulación neta con el paso del tiempo en un organismo a partir de fuentes tanto bióticas (otros organismos) como abióticas (suelo, aire y agua). En el caso de organismos acuáticos, hay diferentes fuentes de absorción tales como agua y/o partículas de alimentos, cuando nos referimos a metales pesados, analizamos que su composición química posibilita una habilidad para instalarse en los organismos vegetales y animales, lo que se conoce como acción bioacumulativas (Dhanakumar et al., 2015).

Un contaminante puede biomagnificarse, cuando existe un aumento sucesivo de los niveles de contaminantes químicos persistentes según se sube de nivel trófico, en otras palabras, se trata de una transferencia trófica de la contaminación (Naeem et al., 2011). Los peces pueden ingerir metales a través de su dieta y los van acumulando a lo largo

de su vida, y llegan al consumidor cuando lo utiliza en su dieta alimenticia (Pereira P, et al., 2010). La concentración de Hg, Cd, Pb y As en los peces depende fundamentalmente de su posición en la cadena trófica, generalmente los peces carnívoros almacenan niveles a rangos superiores que los omnívoros y detritívoros. (Salazar-Camacho et al., 2017). La alta actividad humana deja grandes cantidades de metales en el suelo, una vez disponibles en el material arcilloso son absorbidos por las plantas, instalándose en diferentes partes vegetativas y por supuesto en la cadena trófica, hasta llegar a los seres humanos (pabon et al., 2018).

### **3.6 Toxicidad de metales pesados Hg, As, Pb y Cd en la salud humana producto del consumo de peces y vegetales.**

En la comunidad científica, se habla de una exposición a elementos metálicos a través de los alimentos, su presencia a aumentado por la presión sobre los distintos recursos (Efsa, 2015), se conoce como contaminante alimentario, a una sustancia capaz de acumularse y causar daños a los organismos, una vez excediendo los límites permitidos (WHO, 1985).

Los alimentos que ingerimos contienen una amplia variedad de metales (WHO, 1985), la contaminación de metales pesados, se produce tanto en productos de origen vegetal como frutas y verduras, así también, en alimentos de origen animal, como el pescados (Chen et al., 2013; Nava-Ruíz et al., 2011).

El consumo de pescado ha aumentado en todo el planeta en las últimas cinco décadas, el intercambio monetario de este producto representa una fuente importante de ingresos económicos, a su vez se constituye en una fuente de empleo y proveedor de seguridad alimentaria y nutrición (Bogard et al., 2015) el consumo de pescado en Colombia aumenta de manera significativa de acuerdo con la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (Aunap), el consumo per cápita oscila alrededor 8,8 kilos anuales, siendo una fuente de alimento importante para los hogares; en el pacífico colombiano la pesca es la alternativa principal económica y gastronómica en sus habitantes (Aunap, 2022). La ingesta de peces se posiciona como una de las fuentes que alertan más a este tipo de

exposición; los efectos tóxicos dependen del tipo de metal, de la concentración y en algunos casos de la edad de la población expuesta. (WHO, 1985).

La toxicidad es cualquier efecto adverso en la estructura o función de un sistema biológico y es causado por un agente físico o químico (Goldman y Shannon, 2001), cuando ingresan al cuerpo humano de forma individual o sujetos a compuestos, estos metales persistentes, ejercen algunos mecanismos comunes de toxicidad como la producción de estrés oxidativo, las especies del oxígeno se incrementan en la célula a tal manera que no puede regular el incremento y ocurre el daño en la célula (Jomova Valko, 2011). Todos ellos han sido protagonistas de grandes eventos de intoxicaciones alimentarias a nivel mundial, entre ellas la contaminación de especies marinas de la Bahía de Minamata en Japón en 1956; al igual que China, afectada por una severa contaminación por metales pesados (Rodríguez-Lado et al, 2013) y, Grecia a causa de ingerir vegetales (Fytianos et al., 2001).

Los efectos tóxicos de los metales se ejercen, salvo pocas excepciones, por interacción entre el ión metálico libre y la diana. (Ferrer, 2003). La toxicidad de los compuestos metálicos en los seres humanos los encontramos en lesiones a sistemas, órganos y afectando funciones fisiológicas o provocando nuevos daños en el organismo (PNUMA, 2002; Pabon et al., 2020).

### **3.7 Seguridad alimentaria y riesgos por ingesta**

La humanidad, ha sostenido una relación con los metales y los alimentos en su historia, el contenido de metales tóxicos en los alimentos va a depender de algunos factores: las condiciones del medio ambiente, lugar de origen del alimento, las desigualdades socioeconómicas y la distribución inequitativa de los riesgos ambientales.

La seguridad alimentaria existe cuando todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades energéticas diarias; esta se convierte en una de las principales preocupaciones para la supervivencia del planeta, dada la expansión

demográfica y la decreciente disponibilidad de recursos alimenticios (Vargas y Marrugo, 2019).

Se considera como consecuencia de la contaminación de los ecosistemas, el riesgo por ingesta de alimentos contaminados (Rahman et al., 2019), este se convierte en un peligro de la salud humana y seguridad alimentaria (Londoño et al., 2016), las concentraciones de metales deben ser cuidadosamente evaluadas y monitoreadas (Kim et al., 2016).

Las evaluaciones de riesgo minimizan el acceso a muchas enfermedades transmitidas por los alimentos, gracias a el contro ejercido sobre estos, las enfermedades trasnmitidas por alimentos se convierte en un tema de salud pública; la organización mundial de la salud (OMS) y algunas autoridades ambientales, han establecido niveles de riesgo en función de la concentración de metales en alimentos, el control de estos contaminantes ayuda a mejorar las condiciones de la salud humana, permitiendo mejora a la calidad de vida (Lehotay, 2018); su monitoreo continuo busca salvaguardar la salud publica y minimizar el riesgo en todos los grupos sociales, donde encontramos algunos de condiciones altamente vulnerables como niños, ancianos y mujeres embarazadas (Figueroa et al., 2017).

### **3.8 Toxicología analítica**

Múltiples organizaciones científicas integradas por expertos orientan sobre el límite permitido de contaminantes en alimentos (FAO, 2010). Con el apoyo de herramientas como la toxicología, considerada una disciplina científica que ha tenido un progreso relativamente reciente, se permite estudiar, evaluar y diagnosticar los tóxicos y las intoxicaciones; esta disciplina analítica, usa instrumentos de la química analítica, para la estimación cualitativa o cuantitativa de sustancias químicas que pueden ejercer efectos adversos sobre organismos vivos (Wennig, 2000). La aplicación métodos toxicológicos sin duda se convierte en una herramienta de evaluación y monitoreo de los diferentes metales en las matrices requeridas para el estudio, los métodos utilizados deben producir resultados precisos y válidos. Estos análisis se constituyen en argumentos sólidos que nos ayudan a proteger la salud humana (Lehotay, 2018).

## 4. METODOLOGÍA

### **4.1 Área de estudio**

El río Atrato, se encuentra ubicado dentro de una región considerada un hotspots que alberga una gran biodiversidad, conocida como la región del pacífico colombiano. Ubicado entre los departamentos del Chocó y Antioquía, se sitúa en el tercer sistema hídrico más grande de Colombia y se posiciona como la fuente hídrica más grande dentro de esta región pacífica. Este río nace en la región occidental de la cordillera de los Andes, en el municipio del Carmen de Atrato a unos 3.800 m sobre el nivel del mar y desemboca en el Golfo de Urabá, cuenta con una superficie entre unos 35.700-36.400 km<sup>2</sup>, y una longitud de 750 km, su amplitud se encuentra entre 150 a 500 m, sus sedimentos pueden alcanzar unos 31 a 38 metros de profundidad (Palomino et al., 2019).

Recibe anualmente unos 12.000 mm en precipitación aproximados, por esta razón, es considerada una de las zonas más lluviosas y caudalosas del mundo con 4.137 m<sup>3</sup>/s, (Palomino et al., 2019). Su vegetación la integran generalmente bosques, pantanos y humedales, su temperatura alcanza cerca de 30 grados centígrados; es el principal medio de transporte de la región, conecta con alrededor de unos cien afluentes; Posee varios perfiles económicos o de sustento, principalmente la ganadería, agricultura, pesca y minería; este último deja toneladas de desechos tóxicos, que ocasiona daños irreparables a la vida que se desarrolla y depende de ella (Salzar-camacho et al., 2022).

#### **4.1.1 Cuenca media del río Atrato.**

Esta investigación se realizó específicamente entre dos Departamentos, ambos con dos municipios; en el Chocó, encontramos a los municipios de Bojayá (BO) a 6° 31' 25" de latitud norte y 76° 58' 28" de longitud oeste y, Medio Atrato (MA) 5° 59' 42" de latitud norte y 76° 46' 57" de longitud oeste; en el departamento de Antioquía el municipio de Murindó (MU) a 6° 58' 59" de latitud norte y 76° 45' 0" de longitud oeste y, Vigía del Fuerte (VF) 06° 35' 20" de latitud norte y 76° 53' 42" de longitud oeste. La cuenca media Atrateña, posee algunos afluentes como: río Bojayá, Uva, Cuia, Chicue, Bebará, Murindó, Bebaramá, Buey, Baudocito, Murri y Agua Clara, de trascendencia altamente minera; se

encuentra integrada por población negra, mestiza e indígenas, cuenta con una extensión aproximada de 7405 km, albergando aproximadamente 34.854 habitantes (DANE), ver (Figura 1).

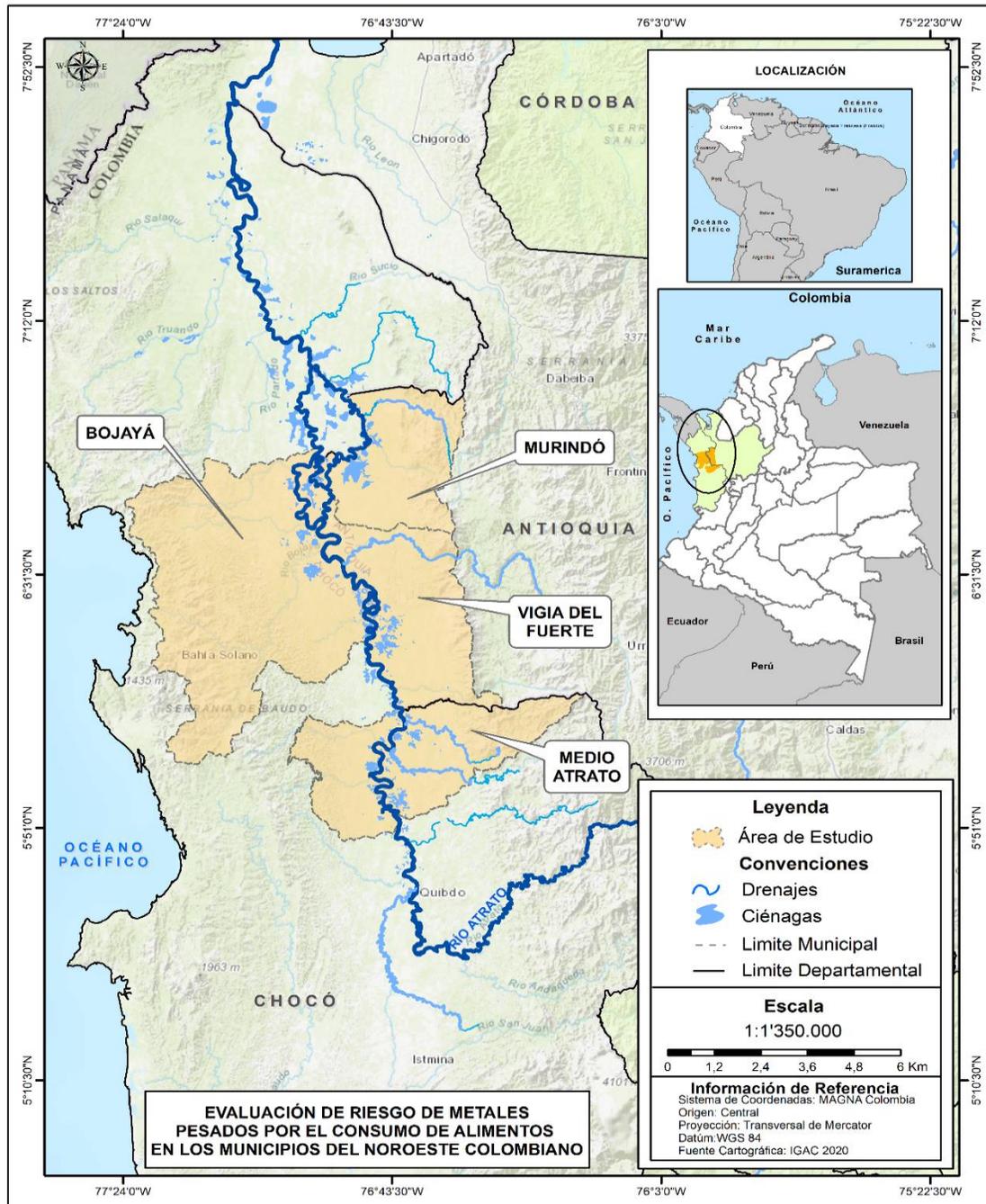


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca media del río Atrato y sus municipios

## **4.2 Recolección de los datos**

**4.2.1 Peces:** La captura del material ictiológico, estuvo acompañada de los guías de cada punto de muestreo, utilizando equipos artesanales de pesca como: mallas de pesca, redes de lanzamiento, galandros, catangas, copones, y cañas de pescar, en total se colectaron 440 individuos, de 19 especies, siendo las especies carnívoras (330-individuos), *Ageneiosus pardalis*, *Pimelodella chagresi*, *Rhamdia quelen*, *Trachelyopterus fisheri*, *Pimelodus punctatus*, *Andinoacara pulcher*, *Leporinus muyscorum*, *Caquetaia kraussii*, *Ctenolucius beani*, *Pseudopimelodus schultzi*, *Sternopygus aequilabiatus*, *Hoplias malabaricus*, *Astyanax fasciatus*, *Caquetaia umbrifera*, *Cynopotamus atratoensis*, *Geophagus Pellegrini* y *Pimelodus sp*, y las no carnívoras (110-individuos), *Prochilodus magdalenae* y *hypostomus hondae*. Las colectas fueron georreferenciadas insitu, medidas (longitud) y pesadas, las muestras de peces se depositaron en bolsas de polietileno, previamente rotuladas fueron introducidas a una nevera de poliesterol para mantener su conservación y, transportadas al laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba (Colombia). Posterior se midió la longitud total de cada pez y se realizó mediante una incisión en el musculo dorsal, la extracción de 10 gramos del tejido adiposo de cada pez y, nuevamente conservados en frío (4<sup>o</sup>) hasta que se determinó las concentraciones de los metales en estudio y los porcentajes de MeHg.

Las especies fueron identificadas mediante claves taxonómicas especializadas (fishbase, 2020; Ortega-Lara et al., 2011), la ayuda del equipo de ictiología de la universidad tecnológica del Chocó y los guías de campo.

**4.2.2 Vegetales:** La colecta del material florístico, se realizó con la ayuda de los guías de campo en cada punto de muestreo, utilizando equipo cortopuzantes (tijeras cortadoras, trimmer, machete), de excavaciones (palas y palines), también se recurrió a la compra en el mercado local; se colectaron 154 individuos que se clasificaron en dos grupos: 15 especies de frutas-bulbos: *Alibertia patinoi*, *Cocos nucifera*, *Zingiber officinale*, *Citrus aurantifolia*, *Colocasia esculenta*, *Solanum sessiliflorum Dunal*, *Zea mays*, *Carica papaya*, *Musa balbisiana*, *Musa x paradisiac*, *Manihot esculenta*, *Oryza sativa*, *Musa sapientum*, *Musa sp*, *Dioscorea trifida*, y 9, especies de verduras-tallos: *Eryngium*

*foetidum*, *Ocimum basilicum* L, *Ocimum tenuiflorum*, *Allium fistulosum* L, *Ocimum campechianum*, *Basella rubra* var, *Saccharum officinalis*, *Origanum vulgare*, *Minthostachys mollis*; las colectas fueron georreferenciadas insitu, depositadas en bolsas de polietileno y, transportadas al laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba (Colombia), donde se realizó la maceración, post conservación en frío hasta que se determinó las concentraciones de los metales en estudio.

Las especies fueron identificadas mediante claves taxonómicas especializadas (Missouri, 2011; ICN, 2011), con el apoyo del equipo de biosistemática de la Universidad Tecnológica del Chocó, el herbario Chocó y las libretas de descripción de campo.

### **4.3 Análisis de metales pesados y MeHg**

Se introdujeron 0,02 g de muestra liofilizada de musculo de pescado y material vegetal, en el analizador directo de mercurio Tricell Milestone DMA 80 para el análisis de THg (EPA, 1998). Para el control de calidad se determinó la exactitud utilizando un material certificado DORM-2 ( $4,64 \pm 0,26 \text{ g g}^{-1}$ ) de NRCC. El porcentaje de recuperación fue del  $99,6 \pm 0,2\%$  ( $n = 3$ ), el límite de detección fue de  $0,003 \mu\text{g g}^{-1}$  y el límite de cuantificación de  $0,01 \text{ g g}^{-1}$  (Marrugo-Negrete et al., 2020). Para el análisis de Cd y Pb se utilizó un horno de grafito con un corrector de Zeeman integrado GFS35Z (Waltham, MA, USA) (GFAAS; Standard Methods SM 3114, 2017). El análisis de As, se llevó a cabo mediante la calcinación de una mezcla de 1 g de muestra de pescado o material vegetal con  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  a  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  en un horno, luego se añadió 1 mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado y se calentó hasta sequedad, posteriormente se disolvió con HCl 4.5 N, se filtró con un filtro de  $0.45 \mu\text{m}$ , luego se recargó a 25 mL con agua destilada (szoda et al., 2006). Un espectrómetro de absorción atómica Thermo Scientific iCE <sup>TM</sup>3500 AAS acoplado a un generador VP100 (Waltham, MA, USA) (HGAAS; estándar Methods SM 3114, 2017). Los métodos estuvieron validados con (CRM) IAEA 405 y DORM-2, el porcentaje de recuperación estuvo entre el 92 y el 96%, y los límites de detección para los diferentes metales fueron de  $0,014 \text{ gg/kg}$  para el Hg,  $0,006 \text{ g/g}$  para el Cd,  $0,010 \text{ g/g}$  para el Pb, y  $0,016 \text{ g/g}$  para el As.

Para la cuantificación del MeHg, se digirieron aproximadamente 0,2 - 0,3 g de pescado y material vegetal en estado fresco con ácido bromhídrico y tolueno. La mezcla resultante se centrifugó y se extrajo varias veces con L-cisteína. Finalmente, se inyectó una alícuota de 100 µL de la fase acuosa en el DMA(Cordeiro et al., 2013). El método estuvo validado con CRM DORM-2 ( $4,47 \pm 0,32 \text{ g g}^{-1}$ ). El porcentaje de recuperación para el MeHg fue del 99%. El límite de detección fue de  $0,007 \text{ g g}^{-1}$ , mientras que el límite de cuantificación fue de  $0,023 \text{ g g}^{-1}$ .

#### **4.4 Evaluación de riesgo para la salud humana**

La evaluación del riesgo se hizo con el protocolo para la seguridad alimentaria de las organizaciones PNUMA/OMS (2008), ingesta de alimentos por los habitantes de los cuatro municipios que integran la cuenca media del río Atrato. Incluyendo la solicitud de la Unidad de Evaluación de Riesgos en Seguridad Alimentaria (ERIA) (Duque et al., 2015). Con un total de 769 encuestado voluntariamente, especificando el nivel educativo, peso corporal promedio, género, frecuencia de consumo de pescado a la semana, número de veces que comen pescado al día en una semana y el tipo de pescado. Los encuestados correspondían a los diferentes sexos poblacionales con un límite de edad  $\geq 15$  años, compilando a hombres (323) y mujeres (446). (Anexo 1), característica general de la población.

#### **4.5 Cálculo de la ingesta diaria estimada**

La evaluación de riesgo de la ingesta diaria estimada del consumo de peces, frutas-bulbos y verduras-tallos de los municipios de la cuenca media del Atrato, estuvo calculada con algunos factores como el consumo de alimentos ( $\mu\text{g kg}^{-1} (\text{bw}) \text{ semana}^{-1}$ ), la concentración del metal y el peso corporal (bw), necesarios para la determinación de la ingesta diaria estimada (EDI); el promedio del peso corporal en adultos que habitan la cuenca media del río atrato es  $69.2 \pm 3.3 \text{ kg}$ , los habitantes de la cuenca media del atrato en promedio realizan un consumo de pescado  $256 \text{ g/día}$ , (Salazar–camacho et al., 2022). El consumo promedio de frutas-bulbos y verduras-tallos, fue establecido a

manera individual de cada alimento; las mediciones fueron realizadas con el pesaje de las porciones alimenticias a partir de la información suministrada en las encuestas. Los resultados obtenidos del análisis de las concentraciones de Hg, As, Cd, Pb, y MeHg, en (mg/kg de peso húmedo) y de las encuestas, permitieron calcular los parámetros necesarios para evaluar el riesgo de exposición humana a estos contaminantes por consumo de pescado, frutas-bulbos y verduras-tallos, en este cálculo se utilizó la ecuación descrita por (Chien et al., 2002).

$$EDI = \frac{C \times C_{conc}}{BW} \quad (1)$$

Donde C es la concentración de Hg, As, Pb, Cd y MeHg en alimentos; Ccons es el promedio diario de consume de los alimentos y Bw representa el peso corporal

#### **4.6 Evaluación del riesgo no cancerígeno**

La evaluación del riesgo no cancerígeno se realizó con la información individualizada que suministra cada usuario, se compara la exposición estimada con las dosis de referencia oral RfD (mg/kg-día). Una RfD es una cantidad aproximada de un contaminante al que puede exponerse un individuo diariamente por diferentes vías de exposición. Si la exposición es inferior al factor  $10^{-4}$ , no se considera que pueda tener efectos adversos sobre la salud de ese individuo durante toda su vida por el consumo de peces, o superior a  $10^{-6}$  para vegetales.

El cálculo del cociente de peligro objetivo (THQ) se realizó utilizando los supuestos del análisis de riesgo integrado de la USEPA (USEPA, 2000). El modelo para estimar la THQ se determinó mediante la siguiente ecuación (Chien et al., 2002).

$$THQ = \frac{EFr \times ED_{tot} \times FIR \times C}{RfDo \times B_w \times ATn} \times 10^{-3} \quad (2)$$

Donde EFr es la frecuencia de exposición (350 días/año);  $ED_{tot}$  es la duración de la exposición (30 años); FIR es la tasa de ingestión de alimentos (g/día), y  $10^{-3}$  es el factor

de conversión de unidades; C es la concentración de metales pesados en los peces, frutas-bulbos y verduras-tallos (mg/kg de peso húmedo); RfDo es la dosis de referencia (mg/kg-día); B<sub>w</sub> es el peso corporal promedio de los adultos para cada municipio (Medio Atrato=69.75, Murindó=68.14, Vigía Del fuerte= 71.25 y Bojayá=72.56); y AT<sub>n</sub> es el tiempo medio de exposición a los no cancerígenos (365 días/año x número de años de exposición, suponiendo 30 años). No hay riesgo si THQ < 1; sin embargo, si THQ > 1, entonces hay un riesgo potencial asociado al metal pesado considerado y es probable que tenga efectos nocivos durante la vida de una persona. El cociente de peligro objetivo total (THQ), se calcula con la ecuación 3, describe la sumatoria del riesgo de cada uno de los metales pesados estudiados (Chien et al., 2002).

$$\text{Total TQH (TTHQ)} = \text{TQH (Tóxico1)} + \text{TQH (Tóxico 2)} + \text{TQH (Tóxico 3)} \dots (3)$$

#### **4.7 Evaluación del riesgo cancerígeno para (As y Pb)**

El riesgo cancerígeno describe la probabilidad de desarrollar cáncer tras un tiempo de exposición determinado, 6 años para los niños y 70 años para los adultos. Se calcula la exposición estimada y se tiene en cuenta la potencia cancerígena de cada metal; se establece el calculo de este riesgo por el consumo de peces, frutas-bulbos y verduras-tallos contaminados con As y Pb así: si el índice de riesgo cancerígeno de cada metal es inferior a 10<sup>-6</sup>, la exposición no supone ningún riesgo cancerígeno adicional para la población, cuando se sitúa entre 10<sup>-6</sup> y 10<sup>-4</sup>, los valores se consideran como asumibles para la población, de acuerdo con los estándares internacionales, mientras que cuando los valores superan el 10<sup>-4</sup>, entonces existe un probable riesgo cancerígeno adicional para la población (USEPA 1989, 2002).

Para establecer los riesgos cancerígenos para la salud del Pb y el As a lo largo de la vida se determinaron las siguientes ecuaciones (USEPA 1989, 2002):

$$CR = HQ \times SF$$

$$= \left[ \frac{EFr \times ED_{tot} \times FIR \times C}{Bw \times ATn} \times 10^{-3} \right] (4)$$

$$TCR = \sum CR (5)$$

CR es la posibilidad de que un individuo desarrolle cualquier tipo de cáncer en su vida debido a la exposición a peligros cancerígenos (Adimalla, 2019); HQ (mg/kg/día) es la dosis diaria crónica de elementos tóxicos recibida a través de la ingesta de pescado, frutas-bulbos y verduras-tallos; C es el contenido de metales pesados en el pescado ( $\mu\text{g/g}$ ) y vegetales (mg/kg); FIR es la tasa de ingestión, 256 mg/día para mujeres y hombres adultos que vivían en la zona media de la cuenca del río Atrato (Salazar-Camacho et al., 2022);  $ED_{\text{tot}}$ , duración de la exposición, 6 años para los niños y 30 años para los adultos;  $EF_r$  es la frecuencia de exposición, en este estudio, 350 días/año; BW es el peso corporal medio de cada municipio;  $AT_n$  es el tiempo medio para los carcinógenos (As y Pb)  $70 \times 365$  días (USEPA, 2002).

TCR es el riesgo carcinogénico total, y SF es el factor dependiente (mg/kg/día), 1.5 para el As y 0.0085 para el Pb. Según la USEPA (1989).

#### **4.8 Riesgo estimado para metilmercurio**

El riesgo potencial humano a la exposición de MeHg, estuvo calculada con la ingesta semanal estimada (EWI  $\mu\text{g/bw/semana}$ ) utilizando la ecuación descrita por la UNEP (2010).

$$EWI = \frac{IR \times C}{BW} \quad (6)$$

Donde IR es la ingesta semanal (g/semana) de peces, C es la concentración media de MeHg ( $\mu\text{g/kg}$ ) y Bw es el peso promedio de la persona. El IRs fue obtenido teniendo en cuenta la porción de consumo de pescado (g/día) y la frecuencia de consumo (días/semana) en los cuatro municipios de la cuenca media del Atrato (Salazar-Camacho et al., 2022).

La concentración de MeHg permisible acumulada en las especies consumidas se calculó bajo los parámetros establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017). Esta concentración se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$[\text{MeHg}] \text{ permisible} = \frac{C \times \text{PTWI}}{\text{EWI}} \quad (7)$$

Donde C es la concentración de MeHg ( $\text{g kg}^{-1}$ ) en el pescado y PTWI es un valor de referencia estimado de  $1.6 \text{ g kg}^{-1} \text{ bw semana}^{-1}$  para mujeres en edad fértil y niños;  $3.2 \text{ g kg}^{-1} \text{ bw semana}^{-1}$  para el resto de la población adulta (JECFA, 2006). Considerando la concentración de metilmercurio en peces consumidos habitualmente por los pobladores de la cuenca media del río Atrato, realizamos en calculo correspondiente a la cantidad máxima de pescados que una persona puede consumir semanalmente (MFW).

$$\text{MFW} = \frac{\text{PTWI} \times \text{IR}}{\text{EWI}} \quad (8)$$

La IR es la ingesta semanal ( $\text{g semana}^{-1}$ ) de pescado, estos valores se calcularon considerando la porción de pescado consumida (g), el número de porciones (día) y la frecuencia de consumo ( $\text{días semana}^{-1}$ ) en cada municipio estudiado de la cuenca media del río Atrato.

#### **4.9 Índice de contaminación por MeHg**

Para conocer el grado de contaminación por MeHg en las especies de pescado más consumidas en la cuenca media del Atrato, se utilizó la expresión matemática propuesta por (Zhang et al., 2019):

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (9)$$

Donde  $P_i$  es el índice de contaminación;  $C_i$  es la concentración de MeHg en el músculo del pescado y  $S_i$  es un valor para el criterio de evaluación. Dos criterios se usaron para  $S_i$ :  $500 \text{ g kg de}^{-1}$  peso para la población adulta y,  $200 \text{ g kg de}^{-1}$  peso para la población vulnerable, niños y madres gestantes (Salazar-Camacho et al., 2022)

#### **4.10 Tratamiento estadístico**

Los datos obtenidos de las concentraciones de los metales pesados de cada especie están representados con la media  $\pm$ , y la desviación estándar de las muestras analizadas. Se procedió a realizar prueba de evaluación para establecer si los datos seguían o no un patrón de distribución de normalidad, en la valoración se ejecutaron las pruebas de Kolmogorov- Smirnov ( $n \geq 50$ ) y Shapiro-Wilk ( $n < 50$ ). Se utilizó la prueba de ANOVA para estudiar las diferencias entre las concentraciones de peces en las distintas zonas. Para determinar se existía diferencia en los contenidos de MeHg entre las especies se utilizó la prueba de TUKEY. Se eligió un valor  $p < 0,05$  para indicar la significación estadística. Para todos los análisis se utilizó el software estadístico Statgraphics Centurion XV (StatPoint Inc., EE. UU).

### **5. RESULTADOS**

#### **5.1 Concentraciones de metales pesados, As, y MeHg en peces y vegetales**

Las concentraciones de Hg, As, Pb, y Cd los hábitos alimenticios y el nivel trófico de las especies de peces recolectadas en la cuenca media del río Atrato se muestran en la (tabla 1), basados en la identificación taxonómica se obtuvieron 19 especies de peces, para un total de 440 individuos. De estas, 5 fueron carnívoras (59 individuos o 13,4%), 2 detritívoras (110 individuos o 25,0%), una omnívora (14 individuos o 3,2%), 6 especies omnívoras con tendencia a carnívoras (120 individuos o 27,3%), una especie omnívoro con preferencia por peces y material vegetal (26 individuos 5,9%) y cuatro especies piscívoras (111 individuos o 25,2%). Las especies con más comunes fueron, *P. magdalenae* (15,9%), *H. malabaricus* (11,1%), *R. quelen* (10,0%), *H. hondae* (8,9%) y *A. fasciatus* (8,6%). Las concentraciones de Hg se encontraron en niveles más altos, seguidas de As, Pb y Cd; a su vez, excedieron los niveles máximos permisibles de concentraciones establecidos por el Codex, (1995) de Hg:  $0.5 \mu\text{g kg}^{-1}$ , Pb:  $0.05 \mu\text{g kg}^{-1}$ , Cd:  $0.2 \mu\text{g kg}^{-1}$  y As:  $2 \mu\text{g kg}^{-1}$ ; y U.E, (2016) Hg:  $0.5 \mu\text{g kg}^{-1}$ , Pb:  $0.2 \mu\text{g kg}^{-1}$ , Cd:  $0.05 \mu\text{g kg}^{-1}$  y As:  $2 \mu\text{g kg}^{-1}$  (tabla 1).

Las concentraciones medias de THg, MeHg ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) y los porcentajes de MeHg (%MeHg), las especies de peces consumidas por los habitantes de la cuenca media del río Atrato se describen en la (tabla 2). Para Las muestras de peces evaluadas, los valores mínimos de Hg se encontraron entre dos municipios, Vigía del Fuerte, *L. muyscorum* con ( $44.5 \pm 22.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ ); y Murindó, *H. hondae* con ( $41.5 \pm 32.5 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) y *A. pulcher* con ( $32.9 \pm 4.3 \mu\text{g kg}^{-1}$ ). El municipio de Vigía del Fuerte reportó en As la mayor concentración en la especies de *C. beani* con ( $1008.0 \pm 552.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) (tabla 1). Del total de las muestras de peces para Hg y MeHg, 221 individuos, (piscívoros 111, omnívoros con tendencia a carnívoros 74 y carnívoros 36), superaron el límite para poblaciones de riesgo, el cual esta establecido en  $200 \mu\text{g kg}^{-1}$  (OMS, 2008); y entre estos 102 individuos (53 piscívoros, 26 omnívoros con tendencia a carnívoros y 25 carnívoros) superaron el límite máximo recomendado para el consumo humano establecido en  $500 \mu\text{g kg}^{-1}$  (OMS, 1990) (tabla -2). Las especies con mayores concentraciones Hg fueron *C. beani* y *A. pardalis*, las cuales superaron los límites máximos permisibles para THg  $500 \mu\text{g kg}^{-1}$  (OMS, 1990). Algunas especies también superaron los límites máximos permisibles, *A. pardalis* (Murindó y vigía del fuerte), *T. fisheri* (Murindó y vigía del fuerte), *H. malabaricus* (Murindó), *C. atratoensis* (vigía del fuerte), *C. beani* (Murindó y Bojayá), *S. aequilabiatus* (Murindó y vigía del fuerte), *C. kraussii* y *R. quelen* (Murindó) (tabla 1 y 2). Cinco especies sobrepasaron el umbral de MeHg  $500 \mu\text{g kg}^{-1}$  (OMS, 1990), estas fueron *A. pardalis* (murindó y vigía del fuerte), *T. fisheri* (Murindó y vigía del fuerte), *C. beani* (Murindó y Bojayá), *C. atratoensis* (vigía del fuerte), *S. aequilabiatus* (vigía del fuerte); *C. kraussii* y *G. pellegrini*, estuvieron cerca de alcanzar este umbral, con concentraciones de 473.05 y  $262.5 \mu\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente (figura 3). La especie *P. magdalena* que presenta uno de los mayores consumos en la cuenca media del río Atrato, sus concentraciones de THg y MeHg no sobrepasaron los umbrales establecidos por la OMS (2008) de  $200 \mu\text{g kg}^{-1}$  y OMS (1990) de  $500 \mu\text{g kg}^{-1}$ , (tabla 2).

Ninguna de las concentraciones medias de las 19 especies de peces reportadas en este estudio fueron superiores a los niveles máximos permisibles de Cd, Pb y As en el músculo de los peces, los cuales están establecidos en 300, 100 y  $1000 \mu\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente (FAO/OMS, 2002; FAO/OMS, 2009). Para el As dos especies *G.*

*Pellegrini* y *H. hondae* presentaron concentraciones  $>100 \mu\text{g kg}^{-1} < 300 \mu\text{g kg}^{-1}$  (figura 4).

Los cuatro metales estudiados fueron cuantificados en vegetales para dos grupos: frutas-bulbos y verduras-tallos, las especies de vegetales se observan en la (tabla 2). Con un total de 24 especies subdivididos en 15 frutas-bulbos y 9 verduras-tallos, en 154 individuos, sus concentraciones medias de mayor a menor se establece para  $\text{As} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb}$ , los valores mínimos en concentraciones de As estuvieron en especies como: *M. paradisiaca* y *A. patinoi* (3.18 – 6.61 mg kg); las concentraciones medias máximas de As encontradas por municipios, se encontraron en Murindó ( $60.84 \pm 107.8$  mg kg), y Bojayá ( $57.1 \pm 99.6$  mg kg), las especies de mayor concentración para As fueron, *M. mollis* y *O. campechianum*; el comportamiento de las concentraciones para el As en alimentos revela que ninguna de las especies estudiadas excedieron el límite permisible de la (OMS, 2002/2009) de 1000 mg kg (figura 8). Mientras que el Pb arrojó los niveles de concentraciones medias más bajos por municipios, en Murindó, ( $4.3 \pm 0.0$  mg kg), y Bojayá ( $4.7 \pm 1.5$  mg kg). El Hg presentó la menor concentración en la especie *C. aurantifolia* para los municipios de Murindó, Bojayá y Vigía del fuerte, siendo *O. vulgare* la especie de mayor concentración en su valor medio (figura 5). En Cd ninguna de sus concentraciones presentó niveles por encima de lo recomendado por la (OMS, 2002/2009) de 300 mg kg (figura 9). Sin embargo, Las concentraciones medias de Hg, Pb, Cd y As en frutas-bulbos y verduras-tallos en cada municipio excedieron los niveles máximos permisibles de concentraciones establecidos por el Codex, (1995) de Hg: 0.1 mg kg, Pb: 0.1 mg kg, Cd: 0.05 mg kg y As: 0.1 mg kg; y U.E, (2016) Hg: 0.1 mg kg, Pb: 0.2 mg kg, Cd: 0.05 mg kg y As: 0.2 mg kg (tabla 3).

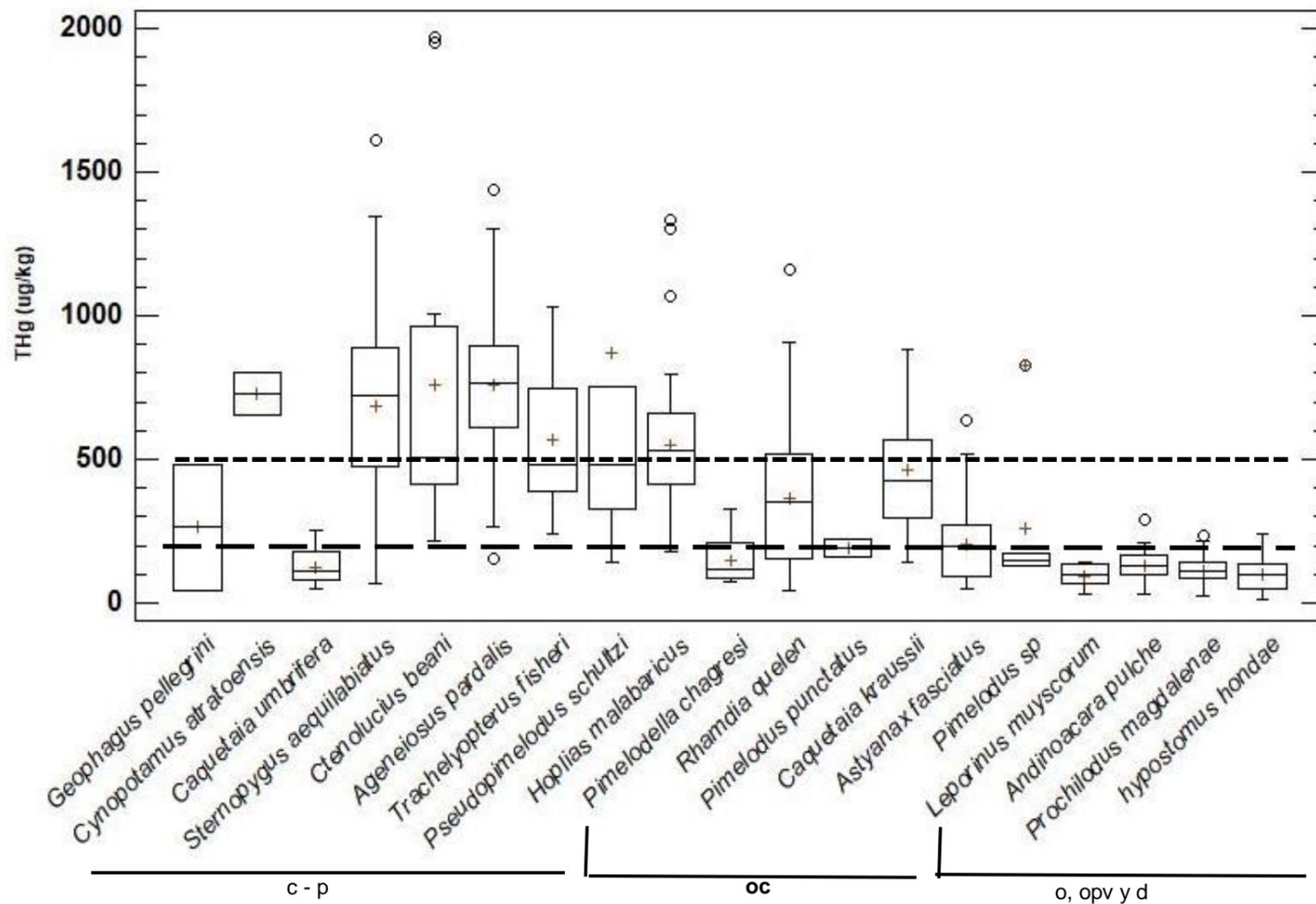


Figura 2. Concentración de Mercurio total en peces, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de  $500 \text{ ug kg}^{-1}$  de peso corporal para la población adulta, El valor umbral de  $200 \text{ ug kg}^{-1}$  de peso corporal para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Habitos alimenticios: c-carnivoro, p-piscivoro, o-ornivoro, d-detrivoro, oc-ornivoro/carnívora y opv-ornivora/vegetal. Concentraciones dispersas ( $^{\circ}$ ), concentraciones medias ( $\dagger$ )

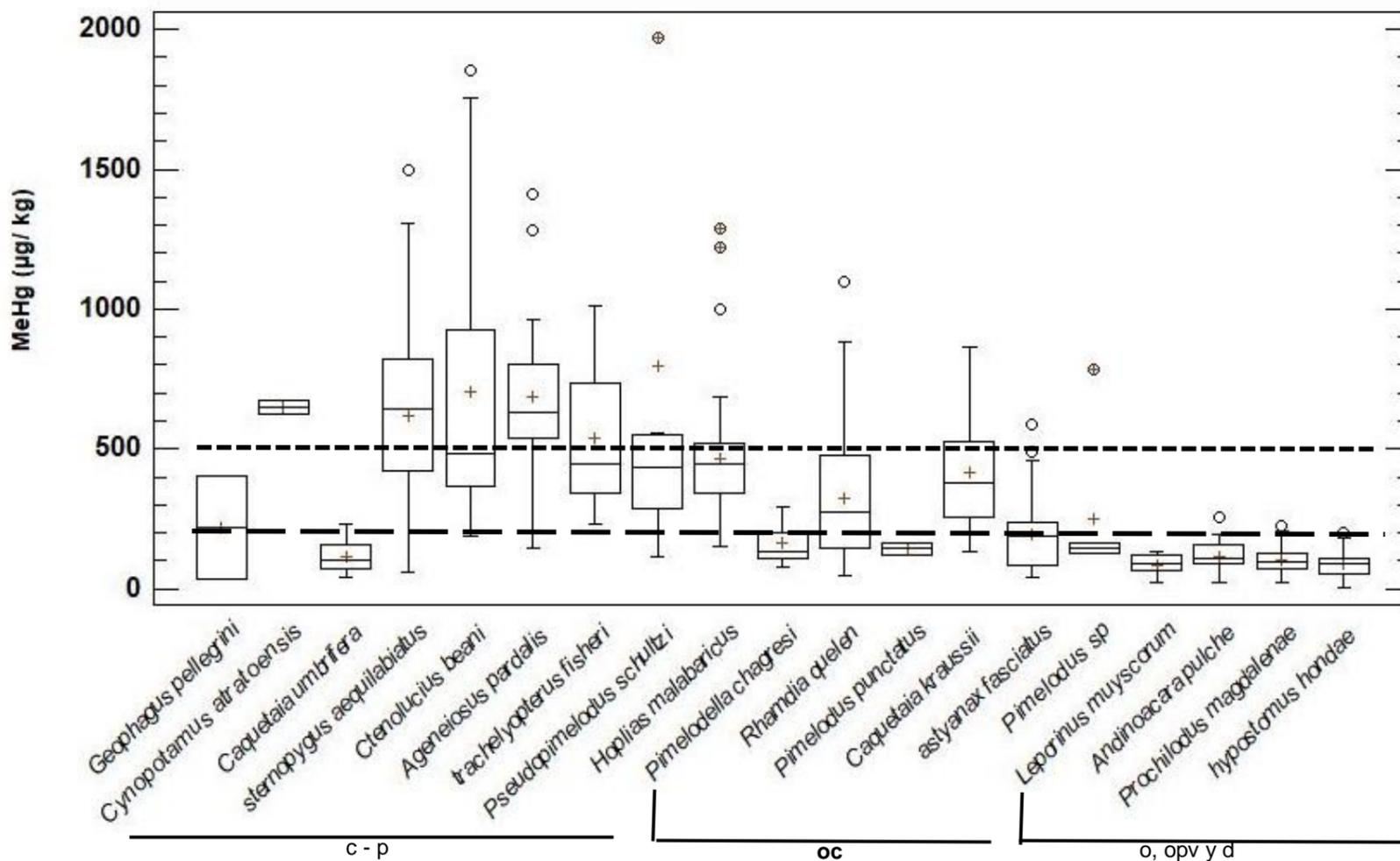


Figura 3. Concentración de Metilmercurio en peces, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de  $500 \text{ ug kg}^{-1}$  de peso corporal para la población adulta, El valor umbral de  $200 \text{ ug kg}^{-1}$  de peso corporal para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Habitos alimenticios: c-carnivoro, p-piscivoro, o-ornivoro, d-detrivoro, oc-ornivoro/carnívora y opv-ornivora/vegetal. Concentraciones dispersas ( $^{\circ}$ ), concentraciones medias ( $\dagger$ ).

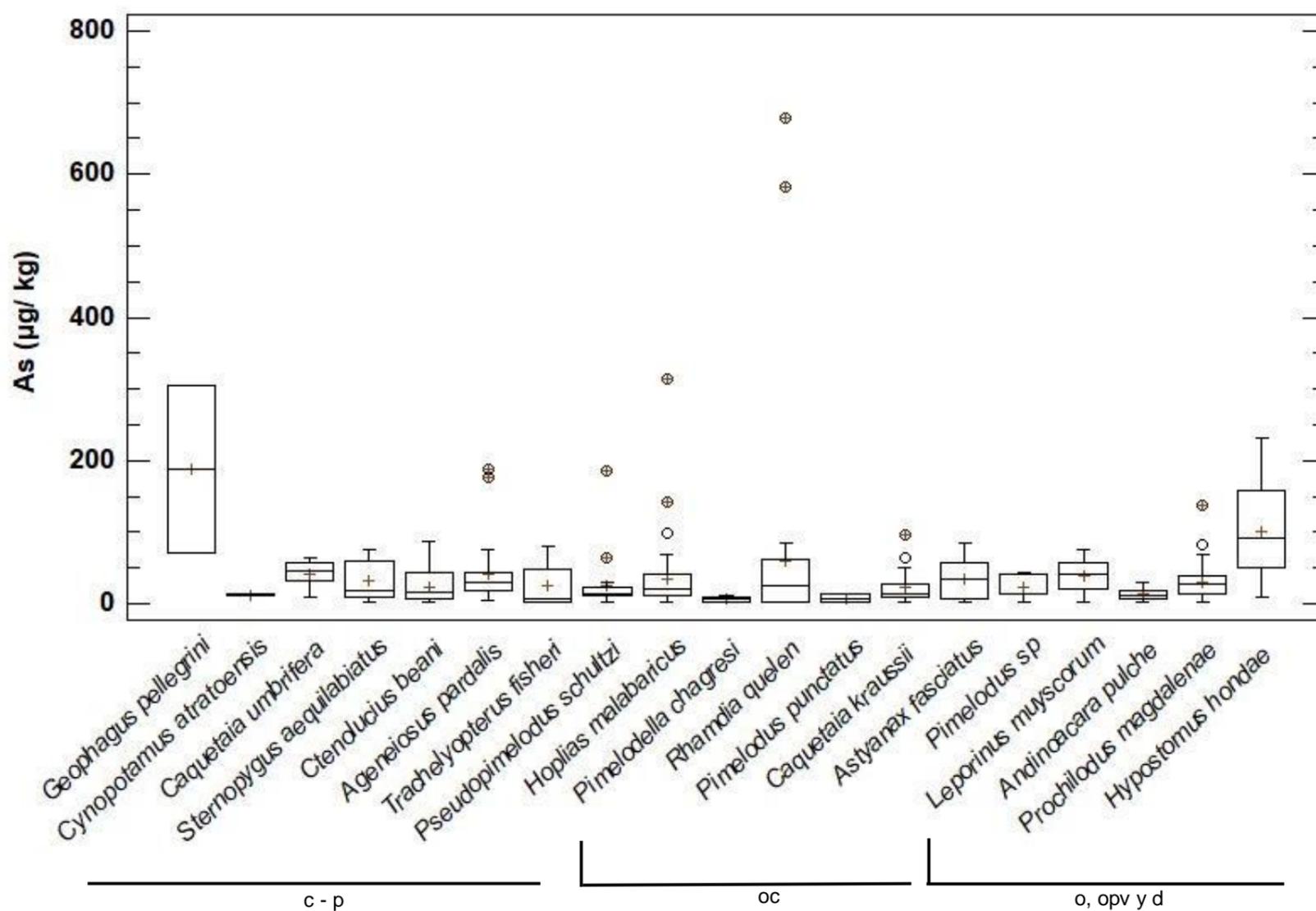


Figura 4. Concentración de Arsénico en peces, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de  $1000 \mu\text{g kg}^{-1}$  de peso corporal para la población adulta, y para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Hábitos alimenticios: c-carnívoro, p-piscívoro, o-ornívoro, d-detrítivo, oc-ornívoro/carnívoro y opv-ornívoro/vegetal. Concentraciones dispersas ( $^{\circ}$ ), concentraciones medias ( $\dagger$ ).

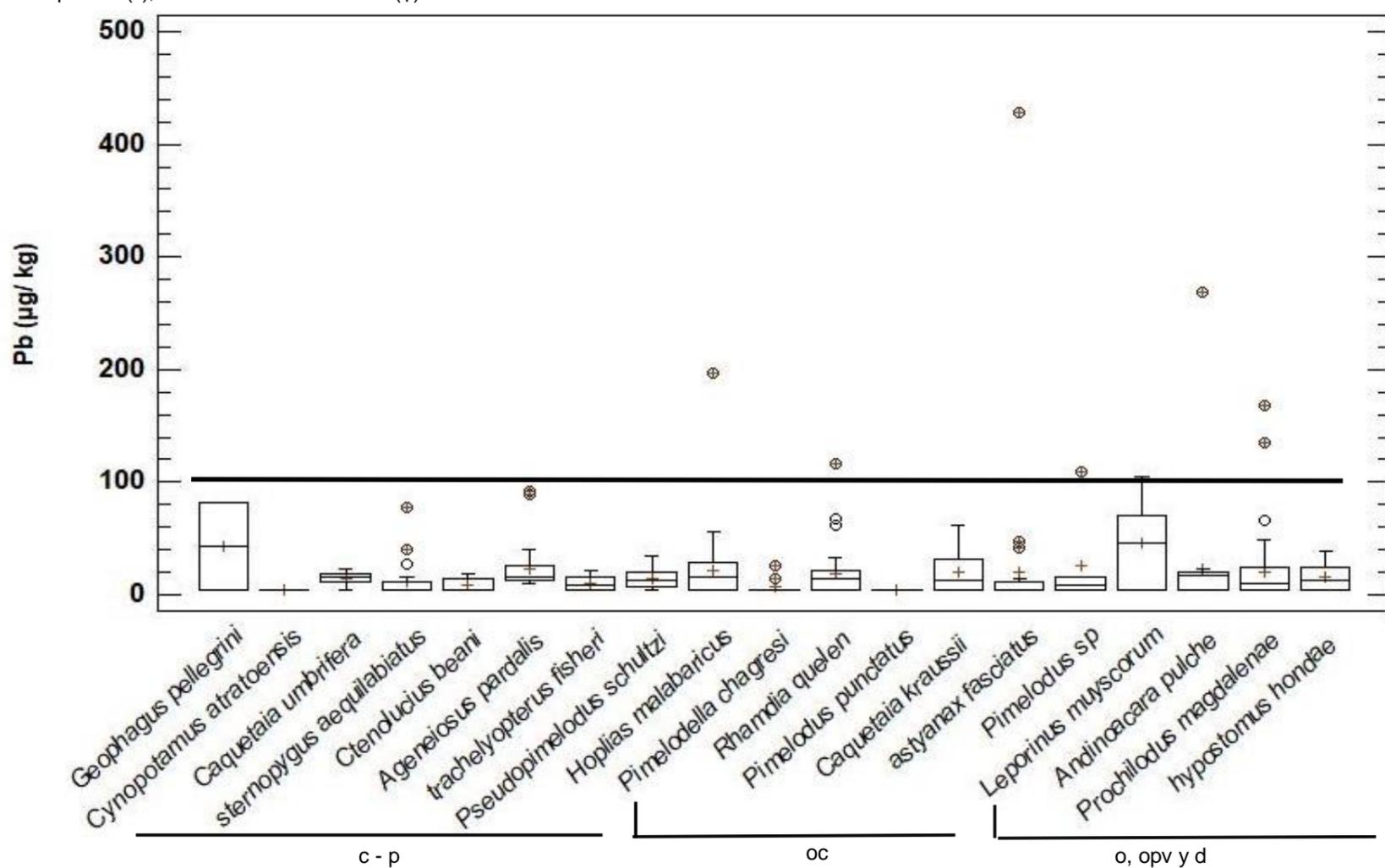


Figura 5. Concentración de Plomo en peces, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de  $100 \mu\text{g kg}^{-1}$  de peso corporal para la población adulta y, para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Hábitos alimenticios: c-carnívoro, p-piscívoro, o-ornívoro, d-detrítivo, oc-ornívoro/carnívoro y opv-ornívoro/vegetal. Concentraciones dispersas ( $^{\circ}$ ), concentraciones medias ( $\dagger$ ).

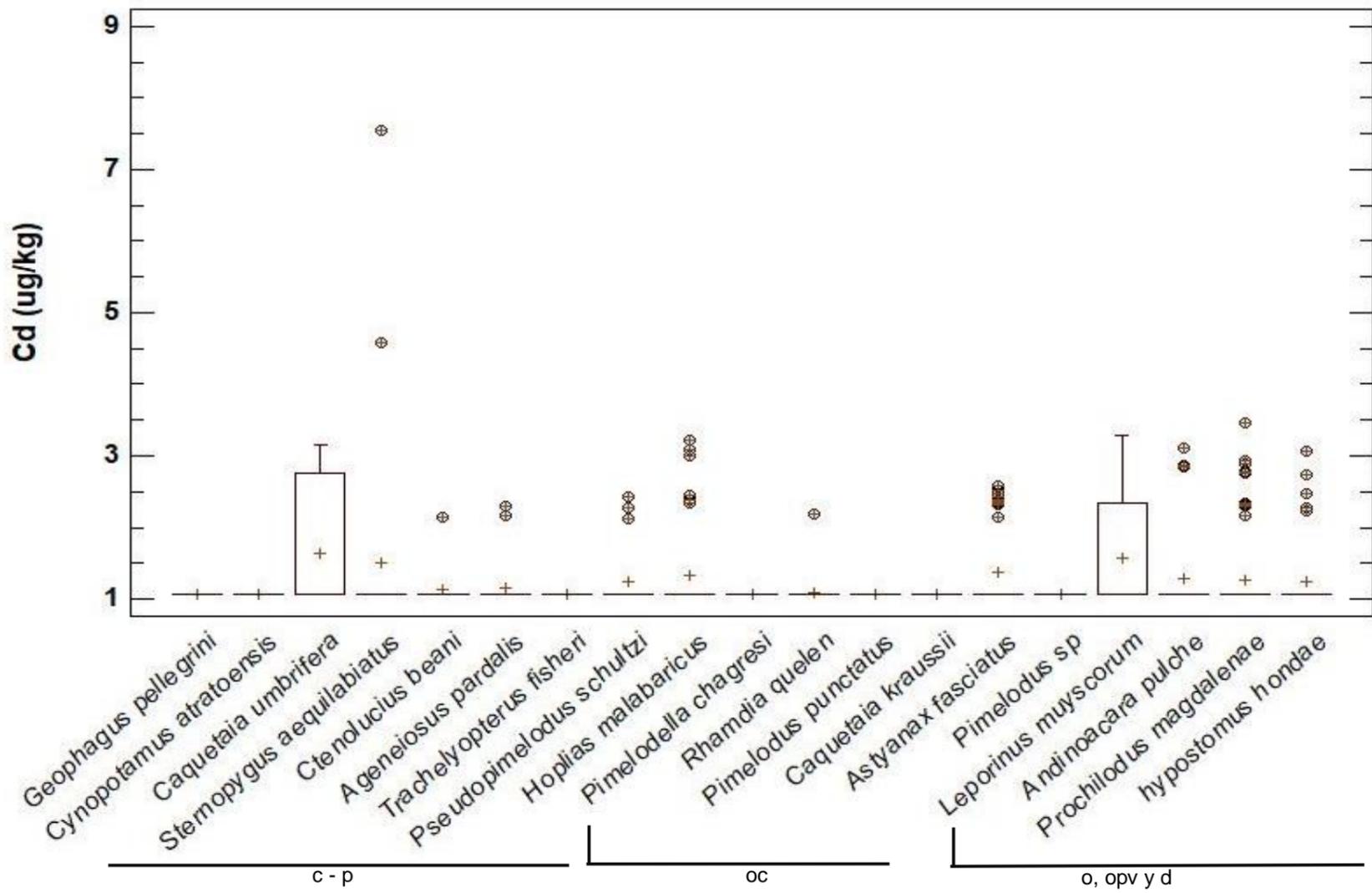


Figura 6. Concentración de Cadmio en peces, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de  $300 \text{ g kg}^{-1}$  de peso corporal para la población adulta y, para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Hábitos alimenticios: c-carnívoro, p-piscívoro, o-ornívoro, d-detritívoro, oc-ornívoro/carnívoro y opv-ornívoro/vegetal. Concentraciones dispersas ( $^{\circ}$ ), concentraciones medias ( $\dagger$ ).

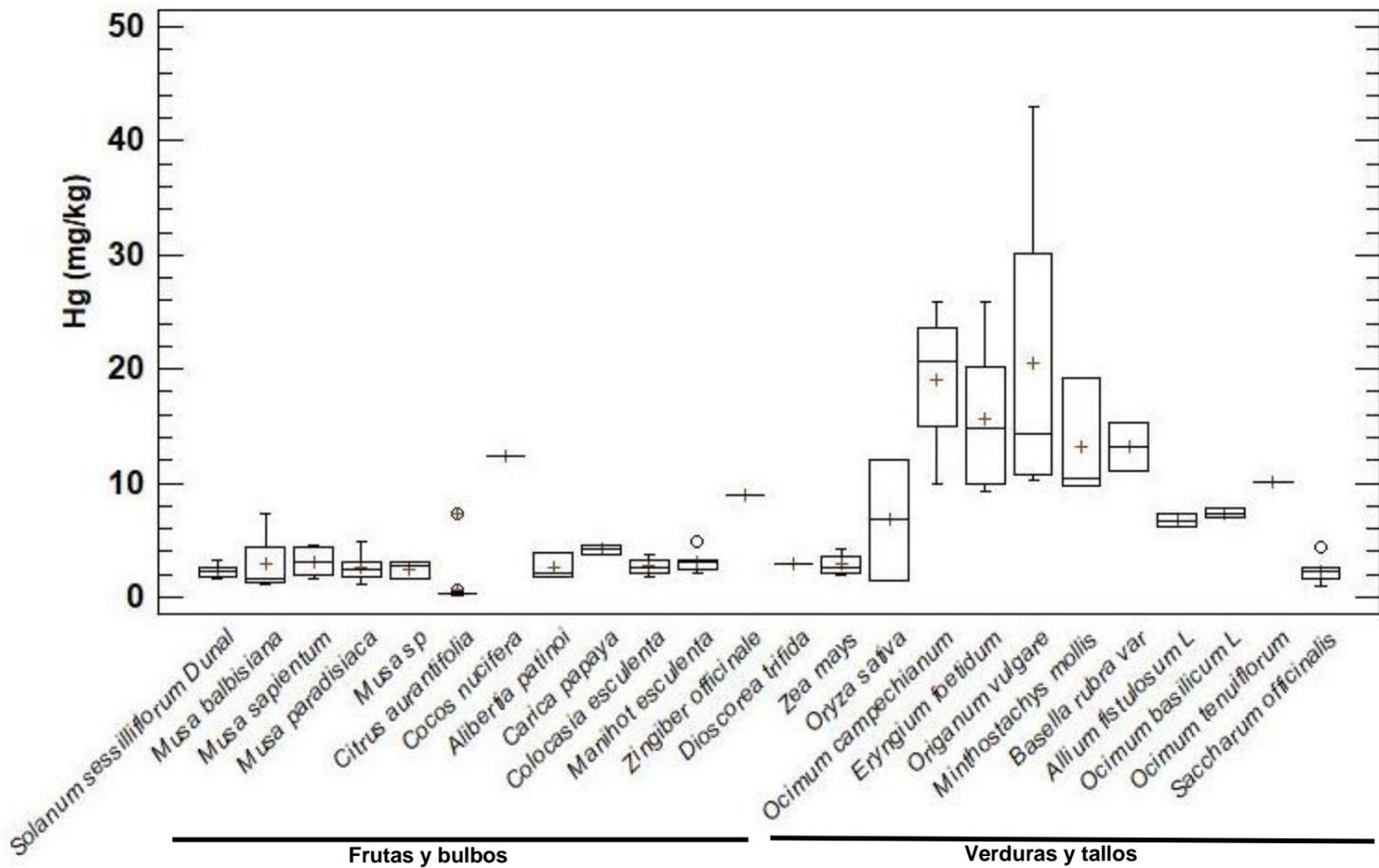


Figura 7. Concentración de mercurio en frutas - bulbos y verduras- tallos, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de  $500 \text{ mg kg}$  de peso corporal para la población adulta, El valor umbral de  $200 \text{ mg kg}$  de peso corporal para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Concentraciones dispersas ( $^{\circ}$ ), concentraciones medias ( $\dagger$ ).

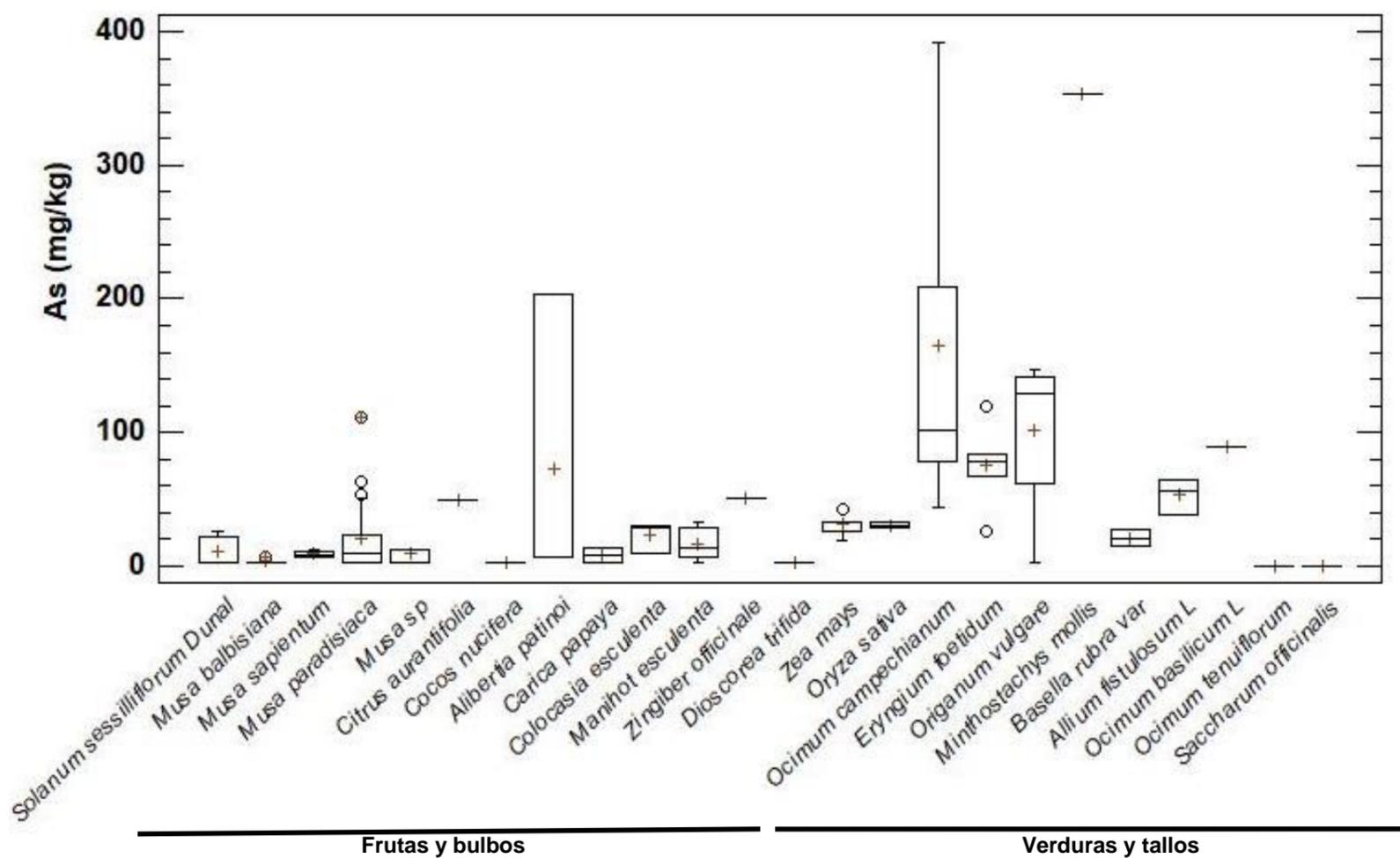


Figura 8. Concentración de arsénico en frutas - bulbos y verduras – tallos, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de 1000 mg kg de peso corporal para la población adulta, y para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Concentraciones dispersas (°), concentraciones medias (†).

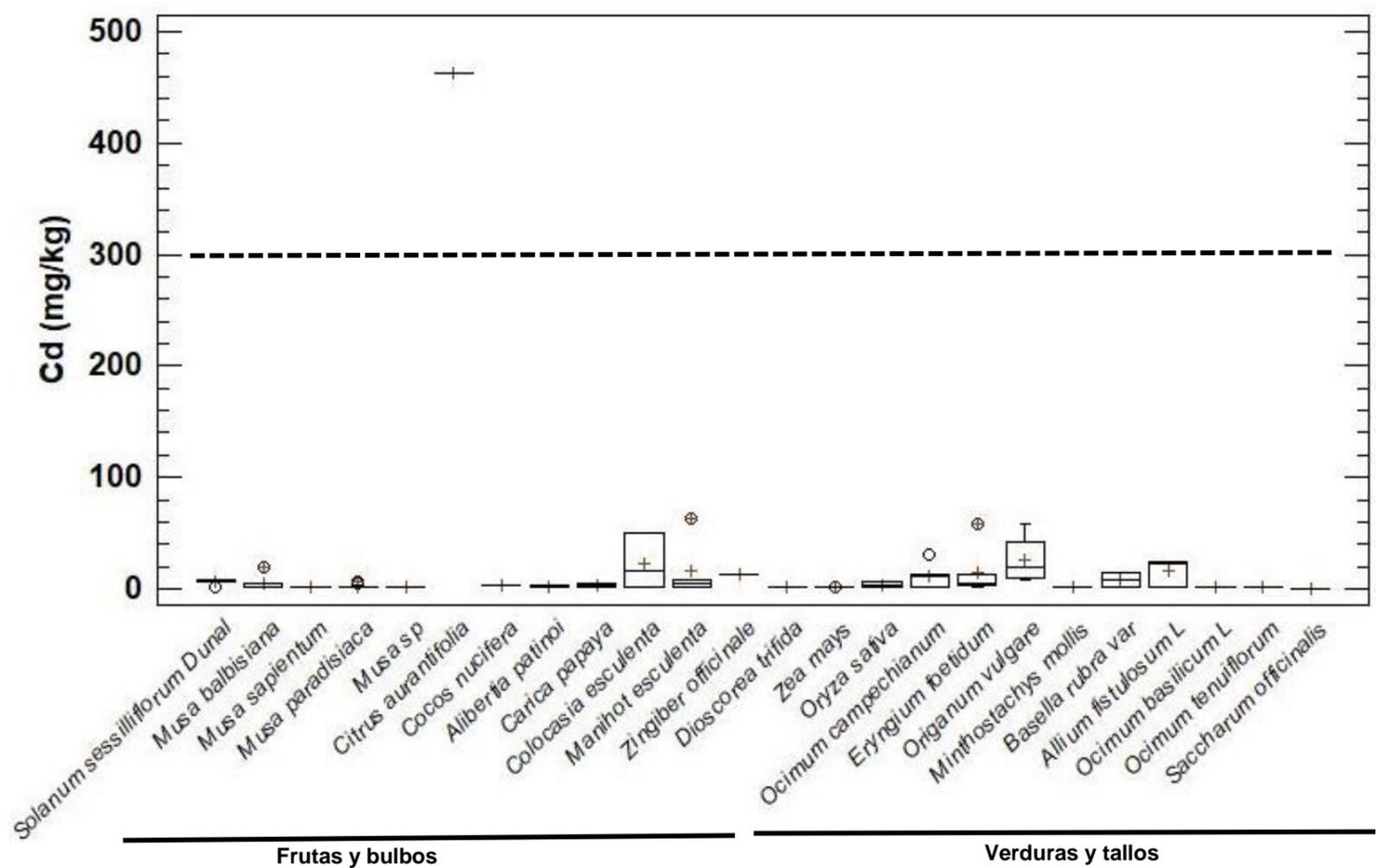


Figura 9. Concentración de cadmio en frutas - bulbos y verduras – tallos, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de 300 mg kg de peso corporal para la población adulta, y para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Concentraciones dispersas (°), concentraciones medias (†).

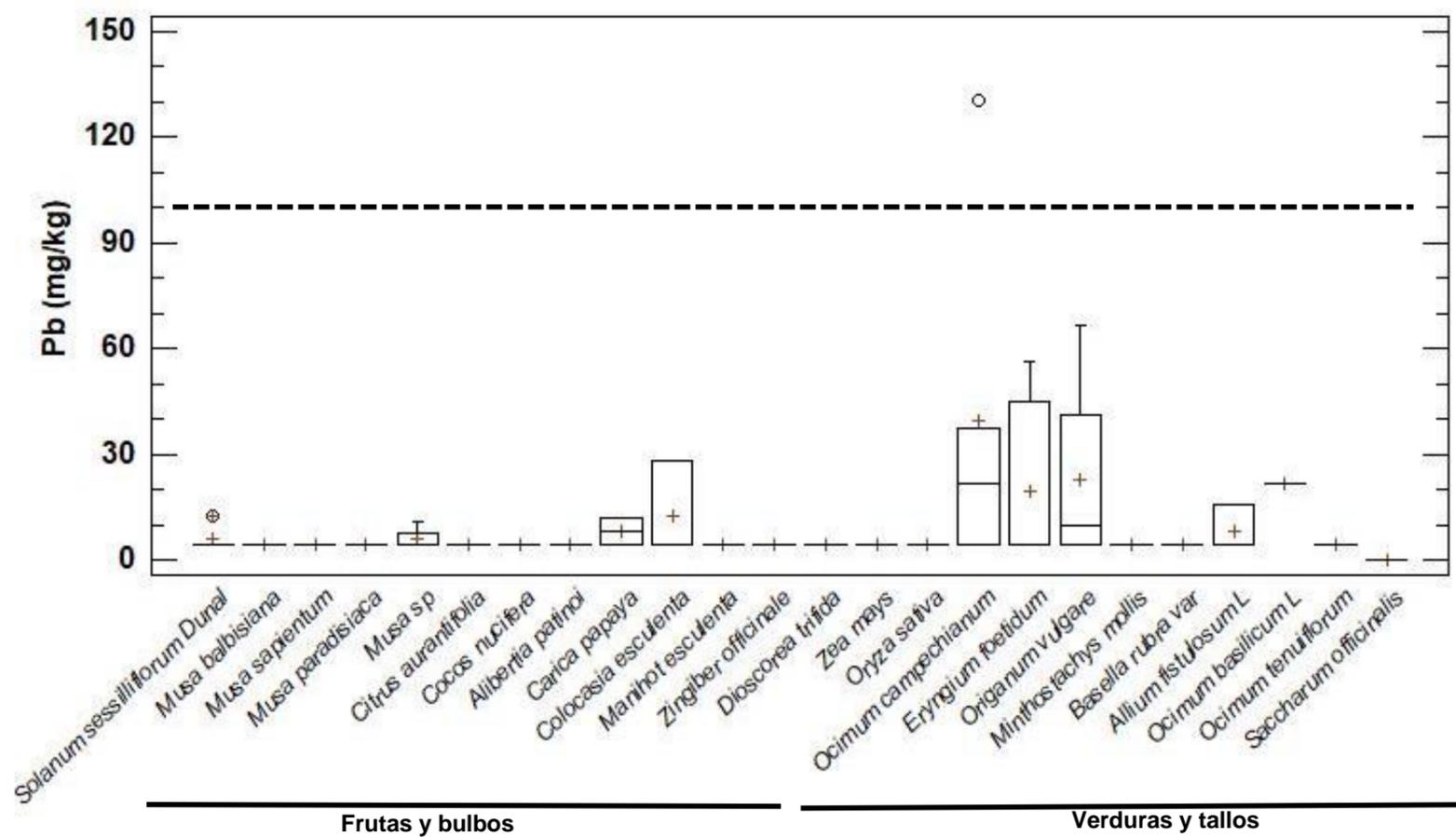


Figura 10. Concentración de Plomo en frutas – bulbos y verduras – tallos, en la cuenca media del río Atrato. Límites de consumo propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS): El valor umbral de 100 mg kg de peso corporal para la población adulta, y para las poblaciones vulnerables (niños, abuelos y mujeres embarazadas). Concentraciones dispersas (°), concentraciones medias (†).

## **5.2 Especies de peces y vegetales más consumidas en la cuenca media del río**

### **Atrato**

Los datos obtenidos en los promedios de consumo en peces, frutas-bulbos y verduras-tallos en los habitantes de los municipios Medio Atrato, Bojayá, Vigía del Fuerte y Murindó, pertenecientes a la cuenca media del río Atrato indican qué: De las diecinueve especies de peces capturadas, nueve presentaron preferencias altas de consumo por los habitantes ribereños de esta zona media de la cuenca (tabla 2). Entre ellas, destacan dos de hábitos no carnívoros: *P. magdalенаe*, *H. hondae*. Resultando, seis especies con elevados índices de ingesta poblacional como son: *P. magdalенаe*, *H. malabaricus*, *L. muyscorum*, *R. quelen*, *A. pardalis* y *P. schultzi* con el 4.3, 4.3, 4.2, 3.5, 3.6 y 3.7 % respectivamente.

Entre las veinticuatro especies de vegetales colectadas en los diferentes municipios de la cuenca media del río Atrato, siete presentaron un alto índice de preferencia de consumo poblacional. Entre las frutas-bulbos, cinco se destacan de menor a mayor: *M. balbisiana*, *M. sapientum*, *C. aurantifolia*, *M. paradisiaca* y *O. sativa*; para las verduras-tallos, los datos muestran qué, dos especies obtuvieron frecuencia alta de preferencia en consumo poblacional, de menor a mayor: *E. foetidum* y *O.campechianum* (tabla 3).

## **5.3 Determinación de riesgo a la salud por el consumo de peces, y vegetales**

Las características generales de la población de la cuenca media del río Atrato se muestran en la tabla complementaria (Anexo 1), en ella se observa que el 57,9% (n=446) de los encuestados son mujeres y el 42.1(n=323) son hombres. También se observa que la edad media se encuentra entre 39 a 46 años (rango: 15,2-88,8), el peso promedio entre 68 y 72 Kg. Con base a la información de esta encuesta, la cantidad de pescado consumido en la cuenca media del río Atrato es de 256 g/día (Salazar-Camacho et al., 2022); y teniendo en cuenta la frecuencia media del consumo por parte de sus habitantes (3.4 días/semana), el peso total de pescado consumido por año fue superior a 30 kg anuales-1, en los más consumidos

estuvieron *H. malabaricus*, *P. schultzi*, *P. magdalenae*, *h. hondae*, *A. pulcher*, *C. beani* y (3 a 6.2 días/semana).

En las frutas-bulbos y verduras-tallos la cantidad consumida varía según el alimento, representan los más consumidos en el orden *Allium fistulosum L*, *Citrus aurantifolia*, *Ocimum campechianum*, *Musa x paradisiaca*, *Musa balbisiana* y *Zea mays* (4.0 a 7.0 días/semana) (tabla 2). El consumo de peces, frutas-bulbos y verduras-tallos para la cuenca media del río Atrato en general tuvo un promedio de 3.4 días/semana (Anexo 1).

El riesgo por el consumo de pescado, frutas y verduras se calculó utilizando los índices de contaminación por metales EDI, THQ, TTHQ y CR para estimar la acumulación y los niveles de riesgo de los metales en las especies más consumidas (tabla 4 y 5).

#### **5.4 Exposición humana y evaluación en la salud, asociada al consumo de pescado y vegetales**

Se obtuvo la ingesta diaria estimada (IDE) para cada metal, para así evaluar los riesgos en la salud humana en función a la frecuente exposición de un individuo por el consumo de diferentes especies de pescado que acumulan distintos niveles de contaminación. En vegetales se presenta valores medios correspondientes al IDE; Hg su valor medio 0.0135 µg/kg/día (rango: 7.882<sup>-5</sup>- 0.068), en As 0.0595 g/kg/día (rango: 0.001 – 0.755), en Pb 0.0235 g/kg/día (rango: 5.401<sup>-5</sup>– 0.232) y Cd 0.009 g/kg/día (rango: 1.322<sup>-5</sup>– 0.860) ; la especie *M. paradisiaca* corresponde a todos los valores inferiores del IDE en Hg, Pb, Cd y Pb (MA); valores que sobrepasaron el límite del valor RfDo Hg = 0.16 g/kg/día y As 0.30 g/kg/día se muestran en la (Tabla 3). Para peces, Se presenta valores medios correspondientes al IDE; Hg su valor medio 1.374 µg/kg/día (rango: 0.122-3.556), para As su valor medio 0.119 g/kg/día (rango: 0.016 – 0.672), en Pb su valor medio 0.067 µg/kg/día (rango: 0.015 – 0.067) y Cd este presentó valores estándares de 0.003 g/kg/día para todos los municipios (tabla 4). La especie *C. beani* arrojó los valores superiores del IDE de Hg en los

municipios de Murindò con 3.612 µg/kg/día, Bojayá 3.556 µg/kg/día, Medio Atrato 1.370 µg/kg/día y Vigía del Fuerte 1.655 µg/kg/día, seguido de *H. malabaricus* en Murindò presentó 2,589 µg/kg/día, Bojayá 1.579 µg/kg/día, Medio Atrato 1.719 µg/kg/día, Vigía del Fuerte 1,694 µg/kg/día y *T. fisheri* en Vigía del Fuerte 3.028 µg/kg/día, Murindó 2.673 µg/kg/día y Medio Atrato 1.513 µg/kg/día. Los datos obtenidos reflejaron que *A. pulcher* en Murindò y Vigía del Fuerte, *L. muyscorum* en Murindò, *H. hondae* en Vigía del Fuerte, quedaron por debajo del valor RfDo para el Hg (0.16 µg/kg/día). Los demás valores de EDI quedaron iguales o por encima del límite; no obstante los valores del IDE en Murindó de *H. hondae*, *G. Pellegrini* en Vigía del Fuerte se manifestaron por encima del umbral para As 0.30 µg/kg/día. La especie *L. muyscorum* en Murindó, presentó límites por encima del RfDo (0.35 µg/kg/día). En Pb los valores se mantuvieron por debajo de dicho límite (ver tabla 4)

### **5.5 Riesgo no carcinogénico**

Las variantes de peligro expresadas en el (TQH Y TTQH), se calculan para establecer el riesgo cancerígeno en la población expuesta por el consumo de pescado, frutas-bulbos y verduras-tallos, si estos toman un valor de 1, quiere decir que el nivel de dicha exposición es inferior a la RfDo; siendo así, la exposición diaria a este nivel no es determinante en causar efectos adversos sobre la salud del individuo a lo largo de su periodo vital (USEPA, 2000; Chien et al., 2002).

Para la presente evaluación los valores medios de TQH de peces estuvieron en Hg 3.700 (rango: 0.643- 21.668) para Cd 0.023 (rango: 0.022- 0.023), en As 0.228 (rango: 0.053 – 1.398) y Pb 0,012 (rango: 0. 004 – 0.140), El THQ del consumo de pescado, en los metales Cd, Pb y As, fueron inferior a 1 para todas las especies de peces del municipio de Bojayá. La concentración de Hg estuvo inferior a 1 en *A. pulcher* en los municipios de Murindó y Vigía del fuerte, *L. muyscorum* en Murindó y vigía del fuerte y *H. hondae* Murindó; Para As, el índice de TQH fue superior a 1, para *H. hondae* y *T. fisheri* en Medio Atrato; Para el Cd y el Pb todos los valores de

THQ fueron inferiores a 1. Las contribuciones relativas al THQ total mostraron que el Hg fue el elemento principal en la contribución del riesgo.

En este sentido, aunque los valores medios de THQ para Cd y Pb fueron inferiores a 1, el promedio de THQ para Hg superó ampliamente el 1 (6.768). En términos generales, las especies con los valores más altos de EDI, THQ y TTHQ, para el Hg, fueron las de hábito carnívoro, piscívoro y omnívoro con tendencia a carnívoro, *H. malabaricus*, *A. pardalis*, *R. quelen*, *T. fisheri*, *S. aequilabiatus*, *C. kraussii*, *C. atratoensis*, *C. beani* y *P. schultzi* (tabla 4).

En frutas-bulbos y verduras-tallos los valores medios del TQH estuvieron en Hg 0.074 (rango: 0.001-0.412), para Cd 0.054 (rango: 7.924<sup>-5</sup>-5.159) en As 0.017 (rango: 0.001 – 0.207) y Pb 0.006 (rango: 1.479<sup>-5</sup>-0.063), el TQH del consumo de vegetales, basados en las concentraciones medias el Hg, Pb y As para todas las especies de vegetales fueron inferiores a 1 en los cuatro municipios. Los valores del TQH en Cd fueron superior a 1 en *M. esculenta* en Murindó, *C. esculenta* y *C. aurantifolia* en Bojayá. Los valores de Hg, Cd, Pb y As fueron inferiores a 1 en los municipios de Medio Atrato y Vigía del Fuerte. Las contribuciones relativas al THQ total mostraron que el Cd fue el elemento principal en la contribución del riesgo para los vegetales (tabla 3).

## **5.6 Riesgo carcinogénico**

En nuestra evaluación de riesgo por el consumo de alimentos contaminados con Hg, Pb, Cd y As, el cálculo del riesgo carcinogénico se aplicó solo para los metales As y Pb debido a su efecto carcinogénico en humanos, este se le aplicó a las especies de peces y vegetales consumidas en la cuenca media del río Atrato, Para ello, la USEPA recomendó utilizar los índices de riesgo carcinogénico. De este modo, se estima el riesgo carcinogénico, cuando se presentan valores superiores a 1,0E-04, donde se es susceptible de tener efectos adversos en los seres humanos (USEPA 1989, 2002). Los datos obtenidos para vegetales contaminadas con As y Pb en los grupos de frutas-bulbos y verduras-tallos colectados en los municipios

Medio Atrato, Bojayá, Vigía del Fuerte y Murindó, manifestaron cifras inferiores a  $1,0E^{-06}$  (tabla 4), por lo tanto, no existe un riesgo en la salud poblacional. Del mismo modo, los resultados obtenidos de peces contaminados con Pb muestran para todas las especies capturadas en la cuenca media del río Atrato, muestran datos inferiores a  $1,0E^{-06}$ , estando el municipio de Bojayá exento del riesgo para el caso de As y Pb. Sin embargo, Para el pescado contaminado con As, las especies *A. pardalis*, *R. quelen*, *L. muyscorum*, *H. hondae*, *P.s magdalanae*, *C. beani*, *H. malabaricus*, *T. fisheri*, *S. aequilabiatus*, *C. umbrifera*, *A. fasciatus*, *C. kraussii*, *G. Pellegrini*, manifestaron cifras por encima del límite del límite  $1,0E^{-04}$  (tabla 5). En este contexto, los resultados de EDI, THQ Hg y As, TTHQ y riesgo carcinogénico muestran que los habitantes de la cuenca media del río Atrato en algunos de sus municipios podrían desarrollar quebrantos de salud por el consumo excesivo de pescado por exposiciones directas extensivas.

### **5.7 Evaluación del riesgo por MeHg en las especies de peces más consumidas**

Las concentraciones medias de MeHg ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) y los porcentajes de MeHg (%MeHg) de las especies de peces consumidas por los habitantes de la cuenca media del río Atrato se describen en la (tabla 2). Del total de las muestras de peces para MeHg, 221 individuos superaron el límite para poblaciones en riesgo, el cual está establecido en  $200 \text{ g kg}^{-1}$  (OMS, 2008); y entre estos 102 individuos superaron el límite máximo recomendado para el consumo humano establecido en  $500 \text{ g kg}^{-1}$  (OMS, 1990) (tabla 2).

Todos los municipios estudiados excepto Medio Atrato, reportaron concentraciones que superan los límites permisibles ( $500 \text{ g kg}^{-1}$ ), las especies con mayores concentraciones en Murindó fueron *C. beani*, *A. pardalis*, *T. fisheri*, *H. malabaricus*, *S. aequilabiatus*, *R. quelen*, *C. kraussii*; en Bojaya *C. beani*, *A. pardalis*, *T. fisheri* *C. atratoensis* y *P. schultzi* en Vigía del Fuerte (tabla 2).

Otras especies como *P. schultzi* (Murindó y Medio Atrato), *C. kraussii* (Vigia del Fuerte), *H. malabaricus* (Bojayá, Medio Atrato y Vigía del Fuerte), *T. fisheri* (Medio

Atrato), *C. beani* (Meio Atrato y Vigía del Fuerte), *A. fasciatus* (Medio Atrato) y *G. Pellegrini* (Medio Atrato); superaron el límite para poblaciones en riesgo (OMS, 2008); de  $200 \text{ g kg}^{-1}$  (figura 3). La especie *P. magdalенаe* que presenta uno de los mayores consumos en la cuenca media del río Atrato, sus concentraciones de MeHg no sobrepasaron ninguno de los umbrales establecidos por la OMS ( $200 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$  y  $500 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) (tabla 2).

Cuando se estimó la tasa de ingesta diaria (IR) en las especies de pescado de consumo común en los sitios estudiados, seis especies presentaron valores superiores a  $500 \text{ g/semána}$  e inferiores a  $700 \text{ g/semána}$ , *C. atratoensis* (vigía del fuerte), *S. aequilabiatus*, *C. umbrifera* (Medio Atrato), *T. fisheri* (Medio Atrato y Murindó), *P. punctatus* (Murindó) y *C. beani* (Murindó y Bojayá). En el municipio de Murindó las especies *R. quelen*, *L. muyscorum* y *P. schultzi*, presentaron los niveles más altos de IR, reportando consumo de  $1254.4 \text{ g/semána}$ ;  $1433.6 \text{ g/semána}$  y  $1587.2 \text{ g/semána}$ , respectivamente, (tabla 2). En cuanto a la frecuencia de consumo (FIR) las especies *P. magdalенаe* presenta datos  $\geq 4$  en el consumo por semana de todos los municipios estudiados; el municipio de Murindó presentó los valores más altos de FIR en *P. schultzi* (6.2 días/semána), *L. muyscorum* de (5.6 días/semána) y *R. quelen* (4.9 días/semána). Se observaron valores cercanos a este límite en *R. quelen* (2.7 días/semána) y *T. fisheri* (2.7 días/semána), ambas en el municipio de vigía del fuerte (tabla 2).

La ingesta semanal estimada (EWI), obtenida mediante la operación de los datos de la tasa de ingesta diaria y la concentración del metal, dividido el peso corporal; resultante de esta investigación determinó que 10 especies de peces superaron el umbral de ingesta semanal potencial (PTWI) para poblaciones adultas ( $3.2 \text{ } \mu\text{g kg pc/semána}$ ), además se evidencia que las especies con hábitos piscívoros, carnívoros y omnívoros con tendencia carnívoros, tienen los valores de EWI más elevados, estas especies fueron *A. pardalis*, *C. beani* y *R. quelen* en los municipios de (Murindó y Medio Atrato), con valores entre 8.67 y 10.65 (g/kg de peso corporal/semána). La especie *P. magdalенаe*, muestra los valores más bajos en el

(EWI) en los cuatro municipios estudiados de la cuenca media del Atrato, con límites que no superan o igualan el umbral establecido de (1.14 – 2.04 g/kg de peso corporal/semana). Finalmente *H. hondae* presenta el mínimo valor del EWI en la cuenca de (0.30 g/kg de peso corporal/semana) en el municipio de Vigía del Fuerte (tabla 2).

Los resultados demuestran que en todos los municipios estudiados, se obtuvieron límites de consumos de pescado superiores a los recomendados (MFW). En Medio Atrato las especies *C. beani* se consume 1.5 veces mas de lo recomendado, *P. schultzi* 1.4 veces mas, *H. malabaricus* 1.4 y, *T. fisheri* 1.0 veces. En Bojayá, *C. beani* (2.1 veces). Vigía del Fuerte, *A. pardalis* (3.3 veces), *T. fisheri* (2.4 veces), *S. aequilabiatus* (2.3 veces), *P. schultzi* (1.8 veces), *Rhamdia quelen* (1.5 veces), *C. beani* (1.4 veces), *Cynopotamus atratoensis* (1.4 veces), *H. malabaricus* (1.3 veces) *Caquetaia kraussii* (1.2 veces). En el municipio de Murindó *A. pardalis* presentó valores de consumo 2.9 veces por encima de lo recomendado, de igual forma las especies *C. beani* (2.7 veces), *H. malabaricus* (2.5 veces), *C. kraussii* (1.9 veces), *P. schultzi* (1.8 veces), y *T. fisheri* (1.5 veces). Especies de alto consumo como *A. pardalis*, *H. malabaricus*, *C. beani* y *P. schultzi* representan un riesgo serio a la salud de los pobladores en las zonas estudiadas, debido a las elevadas concentraciones de MeHg en sus tejidos, de tal forma que es recomendable para las poblaciones ribereñas en este estudio disminuir o eliminar el consumo de estos peces.

De igual manera, especies de alta preferencia de consumo como *P. magdalenae* presentaron valores 2.7 veces por debajo del consumo recomendado en el municipio de Medio Atrato, 2.6 veces en Vigía del fuerte, 1.7 veces en Bojayá y 1.5 veces en Murindó; *L. muyscorum*, 5.4 en el municipio de Medio Atrato. Estos resultados demuestran que estas especies pueden consumirse con frecuencia por los pobladores de las zonas estudiadas, al no presentar límites de consumos superiores a los recomendados (MFW). Además, podrían ser importantes en el reemplazo en la dieta de las especies que presentan elevadas concentraciones.

## **5.6 Índice por contaminación (diagnostico poblacional)**

Se utilizó el índice de contaminación (Pi) (Zhang et al., 2019) para evidenciar el grado de contaminación con Hg de para cada especie de pez en cada municipio, se toma como referencia los límites permisibles establecidos por la OMS (1990) (500 g kg<sup>-1</sup>) y la OMS (2008) (200 g kg<sup>-1</sup>). La (tabla 2) muestra que cuando se calcularon los valores de Pi según el límite de la OMS (1990), las especies de peces *A.pardalis* en los municipios de Murindó y Vigía del Fuerte, *T. fisheri* en Vigía del Fuerte y Murindó, *C. beani* en Bojayá, y *C. atratoensis* en Vigía del Fuerte, presentaron contaminación leve ( $1 < Pi \leq 2$ ). En ese mismo sentido, se calcula el índice de contaminación basándose en el umbral de la OMS (2008), *P. schultzi* en Murindó, *H. malabaricus* en Bojayá y Vigía del Fuerte, *C. beani* y *T. fisheri* en Medio Atrato, *C. kraussii* y *G.Pellegrini* en Vigía del Fuerte, resultaron con un grado de contaminación leve ( $1 < Pi \leq 2$ ); *A. pardalis* en Murindó, *R. quelen* en Murindó Y Vigía del Fuerte, *C. kraussii* en MU, *Sternopygus aequilabiatus* en MU, *Hoplias malabaricus* en Murindó y Medio Atrato, *P. schultzi* en Medio Atrato y Vigia del Fuerte, *C. beani* y *R.quelen* en Vigia del Fuerte, manifestaron un grado de contaminación moderado ( $2 < Pi < 3$ ); *T. fisheri* en Murindó y Vigia del Fuerte, *C. beani* en Murindó y Bojayá, *S. aequilabiatus*, *C. atratoensis* y *A. pardalis* en Vigia del Fuerte, presentaron un alto grado de contaminación (tabla 5).

Nombre científico	Nombre común	Habitat	Hg	%MeHg	Pb	Cd	As	Longitud peces
Medio Atrato								
<i>Hoplias malabaricus</i> (n=17)	Quicharo	p	468.53±344.6	93.88±2.9	23.25±11.4	1.1±0.8	32.60±19.3	29.66±4.4
<i>Trachelyopterus fisheri</i> (n=5)	Caga	p	401.95±87.6	92.3±2.5	10.89±6.1	1.1±0.0	60.15±19.7	23.52±2.6
<i>Pseudopimelodus schultzi</i> (n=13)	Bagre	c	442.0±1096.8	95.2±1.8	13.6±7.1	1.1±0.5	17.2±8.0	51.6±6.8
<i>Ctenolucius beani</i> (n=5)	Agujeta	c	349.7±103.0	92.0±2.8	4.3±6.6	1.1±0.5	41.7±28.4	27.7±3.9
<i>Caquetaia umbrifera</i> (n=17)	Mojarra negra	c	123.4±56.3	90.3±3.1	16.0±6.2	1.1±0.9	46.12±18.1	22.4±3.6
<i>Sternopygus aequilabatus</i> (n=6)	Beringo	c	168.2±632.4	88.6±3.0	6.7±15.1	1.1±2.7	60.1±9.1	38.9±13.2
<i>Rhamdia quelen</i> (n=21)	Barbudo	oc	165.8±235.2	93.5±3.2	16.6±9.4	1.1±2.3	18.3±25.2	21.4±2.7
<i>Astyanax fasciatus</i> (n=31)	Sardina	oc	212.8±133.9	92.5±3.5	4.3±3.7	1.1±0.5	46.9±25.9	10.6±3.5
<i>Andinoacara pulcher</i> (n=23)	Cocoa o Cocobolo	opv	144.5±54.7	87.2±3.1	17.6±8.2	1.1±0.6	14.3±9.0	11.5±2.2
<i>Leporinus muyscorum</i> (n=10)	Denton o liseta	o	109.1±32.4	92.7±2.7	14.1±28.6	1.1±0.9	41.3±24.3	31.0±2.4
<i>Prochilodus magdalenae</i> (n=12)	Bocachico	d	77.0±20.5	92.7±3.9	9.3±3.8	1.1±0.9	39.4±11.0	31.7±4.4
<i>Hypostomus hondae</i> (n=24)	Guacuco	d	140.5±43.9	81.4±4.8	22.5±10.5	1.1±0.6	134.2±61.0	21.2±5.1
Bojayá								
<i>Hoplias malabaricus</i> (n=11)	Quicharo	p	486.0±139.2	82.0±3.3	25.6±54.1	1.1±2.3	18.6±10.5	31.7±2.9
<i>Ctenolucius beani</i> (n=5)	Agujeta	c	1008.0±552.7	92.1±2.8	4.3±5.1	1.1±0.0	7.8±4.6	28.4±4.2
<i>Prochilodus magdalenae</i> (n=10)	Bocachico	d	136.3±43.6	88.1±6.2	17.8±11.0	1.1±2.3	16.0±22.7	25.7±1.7
Vigía del Fuerte								
<i>Ageneiosus pardalis</i> (n=6)	Doncella	P	990.9±364.6	96.3±2.3	15.3±5.6	1.1±0.4	42.6±17.1	47.0±18.2
<i>Hoplias malabaricus</i> (n=11)	Quicharo	p	486.6±193.6	77.1±2.7	4.3±11.8	1.1±2.6	11.9±95.6	33.0±3.5
<i>Trachelyopterus fisheri</i> (n=3)	Caga	p	754.2±331.6	93.4±4.8	4.3±7.3	1.0±0.0	2.7±1.6	24.2±3.2
<i>Pseudopimelodus schultzi</i> (n=6)	Bagre	p	560.5±222.7	75.9±3.5	16.4±1.0	1.1±2.4	12.1±71.1	48.0±7.7
<i>Ctenolucius beani</i> (n=4)	Agujeta	c	480.3±81.8	93.3±3.2	7.3±6.0	1.1±0.0	12.5±27.8	27.0±5.5
<i>Sternopygus aequilabatus</i> (n=16)	Beringo	c	745.3±243.6	90.8±2.5	4.3±18.1	1.1±2.3	11.0±19.0	60.5±11.7
<i>Cynopotamus atratoensis</i> (n=2)	Boquiancha	c	729.6±105.7	89.5±7.9	4.3±0.0	1.1±0.0	12.5±2.1	14.5±3.5
<i>Geophagus pellegrini</i> (n=2)	Mojarra copetona	c	262.5±310.3	83.3±0.7	42.9±54.6	1.1±0.0	187.2±164.8	22.5±0.7
<i>Caquetaia kraussii</i> (n=10)	Mojarra amarilla o mojarra	oc	419.9±166.4	82.3±1.1	4.3±21.5	1.1±2.3	20.1±29.3	20.6±2.0
<i>Rhamdia quelen</i> (n=7)	Barbudo	oc	424.7±183.9	91.0±7.9	4.3±3.4	1.1±2.3	50.0±2.0	25.9±4.4
<i>Pimelodus sp</i> (n=6)	Gunguma	oc	147.9±277.4	96.3±1.6	9.0±41.5	1.1±2.4	21.9±16.9	27.7±12.1
<i>Andinoacara pulcher</i> (n=1)	Cocoa o Cocobolo	opv	41.48	99.21	11.10	LDM	18.94	11.0
<i>Leporinus muyscorum</i> (n=1)	denton o liseta	o	96.64	87.33	40.26	LDM	58.17	27.5
<i>Prochilodus magdalenae</i> (n=22)	Bocachico	d	95.3±36.9	91.4±4.4	4.33±27.9	1.1±0.5	30.3±14.7	25.0±3.8
<i>Hypostomus hondae</i> (n=10)	Guacuco	d	41.5±32.5	88.0±16.3	4.33±4.7	1.1±0.4	33.1±27.6	20.9±6.2
Murindó								
<i>Ageneiosus pardalis</i> (n=22)	Doncella	p	700.9±202.2	88.0±7.6	17.1±22.4	1.1±0.2	26.8±48.6	27.0±5.2
<i>Hoplias malabaricus</i> (n=10)	Quicharo	p	668.8±89.5	75.6±6.0	12.5±8.5	1.1±0.4	21.9±26.0	35.8±2.3
<i>Trachelyopterus fisheri</i> (n=6)	Caga	p	606.9±224.6	95.8±1.7	10.2±7.8	1.1±2.4	4.5±2.0	22.1±3.6
<i>Pseudopimelodus schultzi</i> (n=1)	Bagre	p	348.88	71.08	LDM	LDM	5.91	19
<i>Ctenolucius beani</i> (n=1)	Agujeta	c	961.51	96.06	LDM	LDM	19.03	30
<i>Sternopygus aequilabatus</i> (n=1)	Beringo	c	657.13	71.98	15.362	LDM	LDM	67
<i>Caquetaia kraussii</i> (n=10)	Mojarra amarilla o mojarra	oc	511.8±231.,5	94.4±2.4	22.3±14.3	1.1±2.3	10.0±8.9	20.7±3.3
<i>Rhamdia quelen</i> (n=16)	Barbudo	oc	542.6±186.6	85.3±9.6	18.5±29.5	1.1±0.3	20.6±208.9	27.0±1.1
<i>Astyanax fasciatus</i> (n=7)	Sardina	oc	84.8±116.2	92.9±2.6	12.1±155.6	1.1±0.7	13.9±7.9	8.4±2.0
<i>Pimelodus punctatus</i> (n=2)	Charre	oc	193.5±43.5	73.8±1.7	4.3±0	1.1±0.0	8.0±7.4	21.5±2.1
<i>Pimelodella chagresi</i> (n=10)	Micudo	oc	146.9±82.5	89.6±7.6	4.3±7.1	1.06±2.3	6.6±3.2	11.9±2.3
<i>Andinoacara pulcher</i> (n=2)	Cocoa o Cocobolo	opv	32.9±4.3	84.8±3.4	136.6±187.1	1.1±0.0	7.8±7.1	7.85±8.7
<i>Leporinus muyscorum</i> (n=3)	Dentón o Liseta	o	44.5±22.7	87.0±5.2	103.9±1.0	1.1±0.0	28.8±26.3	25.4±1.4
<i>Prochilodus magdalenae</i> (n=26)	Bocachico	d	134.4±45.9	91.6±4.1	21.3±34.7	1.1±0.4	24.5±26.5	24.5±2.8
<i>Hypostomus hondae</i> (n=6)	Guacuco	d	45.6±15.9	86.2±3.2	12.0±7.3	1.1±2.4	86.3±56.1	24.5±3.6

**Table 1.** Hábitos: P: piscívoro, C: carnívoro, OC: omnívoro con tendencia carnívora, OPV: omnívoro con preferencia por peces y material vegetal, O: omnívoro, D: detritívoro; las concentraciones en ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) se establecen con la mediana, la media y la respectiva desviación estándar para cada especie de pez en la cuenca media del río Atrato. LDM es el límite de detección de las concentraciones de cada metal (Pb: 4.33, As: 2.71, Cd: 1.06).

Especies de peces	THg (g/kg)	MeHg (g/kg)	%MeHg	FIR (dias/semana)	IR (g/semana)	EWI (µg/kg peso/semana)	MeHg permissible (g/kg) <sup>a</sup>	MFW (g/semana) <sup>a</sup>	Pi <sup>b</sup>	Pi <sup>c</sup>
Medio Atrato										
<i>Hoplias malabaricus</i>	468.54	432.99	93.50	3.0	768	4.77	290.62	515.5	0.86	2.16
<i>Trachelyopterus fisheri</i>	412.38	395.16	91.29	2.3	588.8	3.33	379.08	564.8	0.79	1.97
<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	442.02	423.65	95.14	3.0	768	4.66	290.62	526.8	0.84	2.11
<i>Ctenolucius beani</i>	373.50	341.20	91.39	Nd	998.4	4.88	223.55	654.2	0.68	1.70
<i>Caquetaia umbrifera</i>	109.44	99.46	90.88	Nd	588.8	0.84	379.07	2244.1	0.19	0.49
<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	168.24	148.43	88.23	2.6	665.6	1.41	335.33	1503.7	0.29	0.74
<i>Rhamdia quelen</i>	165.76	143.46	93.92	3.2	819.2	1.68	272.46	1555.9	0.28	0.71
<i>Astyanax fasciatus</i>	212.82	188.68	92.47	3.6	921.6	2.49	242.18	1182.9	0.37	0.94
<i>Andinoacara pulcher</i>	142.26	117.79	87.47	3.0	768	1.29	290.62	1894.9	0.23	0.58
<i>Leporinus muyscorum</i>	117.56	106.53	92.69	3.3	844.8	1.29	264.20	2095.2	0.21	0.53
<i>Prochilodus magdalenae</i>	79.67	72.86	93.66	4.3	1100.8	1.14	202.76	3063.3	0.14	0.36
<i>Hypostomus hondae</i>	132.85	101.89	82.30	4.3	1100.8	1.60	202.76	2190.6	0.20	0.50
Bojayá										
<i>Hoplias malabaricus</i>	447.63	358.96	81.69	3.1	793.6	3.92	292.58	646.8	0.71	1.79
<i>Ctenolucius beani</i>	1007.98	963.72	92.28	2.0	512	6.80	453.5	240.9	1.92	4.81
<i>Prochilodus magdalenae</i>	142.04	126.37	87.98	4.1	1049.6	1.82	221.21	1837.3	0.25	0.63
Vigía del fuerte										
<i>Ageneiosus pardalis</i>	1006.26	956.82	97.01	3.1	793.6	10.65	287.29	238.2	1.91	4.78
<i>Hoplias malabaricus</i>	471.62	374.22	75.77	3.3	844.8	4.44	269.88	609.2	0.75	1.87
<i>Trachelyopterus fisheri</i>	842.86	794.90	94.30	2.7	691.2	7.71	329.86	286.8	1.58	3.97
<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	586.04	459.35	75.34	3.5	896	5.77	254.46	496.3	0.92	2.30
<i>Ctenolucius beani</i>	460.84	439.84	94.19	3.0	768	4.74	296.87	518.4	0.88	2.20
<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	772.82	681.65	90.30	3.1	793.6	7.59	287.29	334.5	1.36	3.40
<i>Cynopotamus atratoensis</i>	729.60	648.91	89.51	2.0	512	4.66	445.31	351.3	1.30	3.24
<i>Geophagus pellegrini</i>	262.54	219.72	83.26	4.0	1024	3.16	222.66	1037.6	0.44	1.09
<i>Caquetaia kraussii</i>	402.53	335.63	82.63	3.2	819.2	3.85	278.32	679.3	0.67	1.68
<i>Rhamdia quelen</i>	456.27	456.80	95.58	2.7	691.2	4.43	329.86	499.1	0.91	2.28
<i>Pimelodus sp</i>	147.92	143.87	95.99	Nd	691.2	1.39	329.86	1584.7	0.29	0.71
<i>Andinoacara pulcher</i>	41.48	41.16	99.21	3.6	921.6	0.53	247.39	5539.4	0.08	0.21
<i>Leporinus muyscorum</i>	96.64	84.40	87.33	4.0	1024	1.21	222.65	2701.4	0.16	0.42
<i>Prochilodus magdalenae</i>	96.76	82.96	91.80	4.0	1024	1.19	222.65	2748.2	0.16	0.41
<i>Hypostomus hondae</i>	29.91	25.73	87.97	3.3	844.8	0.30	269.88	8861.8	0.05	0.12
Murindó										
<i>Ageneiosus pardalis</i>	700.89	589.08	88.60	4.3	1100.8	9.51	198.08	370.1	1.17	2.94
<i>Hoplias malabaricus</i>	689.33	485.71	77.94	4.4	1126.4	8.03	193.58	448.9	0.97	2.42
<i>Trachelyopterus fisheri</i>	711.74	673.38	96.05	2.0	512	5.05	425.87	323.8	1.34	3.36
<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	348.88	248.00	71.08	6.2	1587.2	5.77	137.38	879.2	0.49	1.24
<i>Ctenolucius beani</i>	961.52	923.64	96.06	2.5	640	8.67	340.7	236.0	1.84	4.61
<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	657.14	473.05	71.98	3.9	998.4	6.93	218.40	460.9	0.94	2.36
<i>Caquetaia kraussii</i>	506.85	471.97	93.84	3.6	921.6	6.38	236.59	461.9	0.94	2.35
<i>Rhamdia quelen</i>	524.42	458.17	84.08	4.9	1254.4	8.43	173.82	475.9	0.91	2.29
<i>Astyanax fasciatus</i>	84.78	78.04	93.46	4.1	1049.6	1.20	207.74	2794.2	0.16	0.39
<i>Pimelodus punctatus</i>	193.48	142.42	73.80	2.5	640	1.33	340.7	1530.9	0.28	0.71
<i>Pimelodella chagresi</i>	118.04	131.69	89.57	3.2	819.2	1.58	266.17	1655.7	0.26	0.65
<i>Andinoacara pulcher</i>	32.9	27.97	84.83	3.5	896	0.36	243.35	7793.3	0.05	0.13
<i>Leporinus muyscorum</i>	32.69	27.69	84.73	5.6	1433.6	0.58	152.09	7872.1	0.05	0.13
<i>Prochilodus magdalenae</i>	124.69	113.50	91.29	4.8	1228.8	2.04	177.44	1921.1	0.22	0.56
<i>Hypostomus hondae</i>	44.17	38.86	85.96	3.7	947.2	0.54	230.20	5610.1	0.07	0.19

**Tabla 2.** Estimación del riesgo potencial para la población por el consumo de pescado en la cuenca media del río Atrato. EWI (µg/kg pc/semana) es la ingesta semanal estimada de MeHg; MeHg permitido es el nivel seguro permitido (g/kg), y MFW (g/semana) es la cantidad máxima estimada de pescado que puede consumirse semanalmente por persona. Pi: índice de contaminación. PTWI = 3.2 µg /kg bw /semana para la población adulta. <sup>b</sup> Para el cálculo de Pi se utilizó el valor umbral de 500 µg /kg<sup>-1</sup> de peso corporal para la población adulta. <sup>c</sup> Se utilizó el valor umbral de 200 µg /kg<sup>-1</sup> de peso corporal para las poblaciones vulnerables para calcular Pi. (Nd) valores no determinados.

Especies vegetales	Nombre común	Consumo (díasxsemana)	Consumo de alimentos (g/días)	Concentraciones de metales pesados			
				Hg	Pb	Cd	As
Medio Atrato	Frutas - bulbos: 14						
<i>Colocasia esculenta</i>	Achín	2.6±1.4	572±10	2.62±0.3	28.34±0.9	LDM	9.51±1.5
<i>Oryza sativa</i>	Arroz	6.3±1.6	125±5	12.02±2.2	LDM	LDM	28.75±5.3
<i>Alibertia patinoi</i>	Borojó	4.0±1.7	122.5±6	3.97±1.8	LDM	LDM	203.16±10.3
<i>Musa x paradisiaca</i>	Plátano	5.5±2.1	400±20	2.90±0.5	LDM	LDM	3.18±0.3
<i>Musa balbisiana</i>	Banano	4.5±2.1	640±30	1.34±0.1	LDM	9.88±2.3	LDM
<i>Cocos nucifera</i>	Coco	4.2±2.6	645±25	12.39±3.3	LDM	2.89±0.3	LDM
<i>Citrus aurantifolia</i>	Limón	5.8±1.8	135±5	0.39±0.03	Nd	Nd	Nd
<i>Musa sp</i>	Papoche	4.8±2.5	610±30	3.12±0.3	10.63	LDM	12.49±1.3
<i>Musa sapientum</i>	Primitivo	3.1±1.1	436±15	3.14±0.2	LDM	LDM	9.96±0.8
<i>Solanum sessiliflorum Dunal</i>	Lulo	4.0±0.0	300±13	3.27±0.5	LDM	8.10	LDM
<i>Zea mays</i>	Maíz	4.3±1.5	200±18	3.91±0.9	LDM	LDM	38.16±2.3
<i>Dioscorea trifida</i>	Ñame	2.4±0.8	495±32	2.88±0.3	LDM	LDM	LDM
<i>Carica papaya</i>	Papaya	2.6±1.1	300±22	4.16±0.4	8.13±0.8	3.36±0.3	7.97±0.5
<i>Manihot esculenta</i>	Yuca	3.3±1.7	420±20	2.06±0.1	LDM	LDM	LDM
	Verduras- tallos: 4						
<i>Ocimum campechianum</i>	Albahaca	3.0±1.3	140±10	23.42±5.3	63.10±10.3	11.01±2.3	110.41±20.3
<i>Eryngium foetidum</i>	Cilantro	5.6±1.4	50±5	21.11±4.3	39.11±6.3	9.98±3.3	76.12±20.3
<i>Origanum vulgare</i>	Orégano	0.9±1.0	30±2	42.94	66.71	25.34	146.72±25.3
<i>Saccharum officinalis</i>	Caña	4.3±2.5	462±16	2.38±0.4	Nd	Nd	Nd
	Total: 18	4.0±1.4		8.2±10.9	16.2±21.5	5.3±6.5	41.2±61.2
Bojayá	Frutas - bulbos: 9						
<i>Colocasia esculenta</i>	Achín	2.4±0.9	572±10	1.87±0.1	LDM	50.92±10.3	29.38±9.3
<i>Musa balbisiana</i>	Banano	3.3±1.8	640±15	1.55±0.5	LDM	4.26±0.9	LDM
<i>Manihot esculenta</i>	Yuca	2.8±1.5	420±9	2.40±0.8	LDM	2.17±0.3	13.07±3.6
<i>Musa x paradisiaca</i>	Plátano	5.8±2.1	400±35	2.06±0.5	LDM	3.46±1.3	18.11±4.3
<i>Citrus aurantifolia</i>	Limón	7.0±0.0	135±10	1.18±0.3	LDM	462.69	50.06±9.3
<i>Musa sp</i>	Papoche	3.7±1.5	610±26	2.71±0.6	LDM	LDM	LDM
<i>Alibertia patinoi</i>	Borojó	1.5±0.9	122.5±10	1.80±0.1	LDM	LDM	6.73±7.3
<i>Solanum sessiliflorum Dunal</i>	Lulo	1.2±1.0	300±29	2.65±0.3	LDM	8.22±2.3	LDM
<i>Zingiber officinale</i>	Jengibre	1.3±1.0	33±2	9.01±2.3	LDM	12.63	50.54±7.3
	Verduras - tallos: 7						
<i>Ocimum campechianum</i>	Albahaca	4.3±1.2	140±10±20.2	9.99±1.9	LDM	11.39±2.3	391.75±30.8
<i>Eryngium foetidum</i>	Cilantro	5.2±1.7	50±3	16.3±8.3	LDM	57.84	74.36±9.3
<i>Origanum vulgare</i>	Orégano	1.6±1.0	30±1	10.75±4.3	LDM	32.99	70.00±4.3
<i>Minthostachys mollis</i>	Poleo	1.2±1.0	50±4	10.48±7.3	Nd	Nd	Nd
<i>Basella rubra var</i>	Espinaca	0.3±0.6	60±10	15.31±4.3	LDM	14.78	27.33±9.3
<i>Allium fistulosum L</i>	Cebollín	3.6±1.3	0.85±0.4	6.73±2.3	9.99	23.06	60.54±10.6
<i>Saccharum officinalis</i>	Caña	0.03±0.01	462±35	2.34±0.7	Nd	Nd	Nd
	Total:16	2.9±2.0		6.1±5.1	4.7±1.5	49.0±120.4	57.1±99.6
Vigía del fuerte	Frutas - bulbos: 9						
<i>Colocasia esculenta</i>	Achín	2.4±0.9	572±18	2.46±0.3	Nd	Nd	Nd
<i>Oryza sativa</i>	Arroz	6.7±1.3	125±10	1.51±0.1	LDM	LDM	32.54±10.0
<i>Citrus aurantifolia</i>	Limón	4.3±2.5	135±8	0.29±0.2	Nd	Nd	Nd
<i>Musa balbisiana</i>	Banano	3.9±2.5	640±30	1.68±0.4	LDM	LDM	LDM
<i>Zea mays</i>	Maíz	2.7±1.5	200±20	1.95±0.3	LDM	LDM	26.75±9.5
<i>Musa sp</i>	Papoche	3.6±2.8	610±35	1.70±0.2	LDM	LDM	12.55±2.5
<i>Musa x paradisiaca</i>	Plátano	6.3±1.9	400±23	2.19±0.3	LDM	LDM	38.45±8.9
<i>Manihot esculenta</i>	Yuca	2.7±1.5	420±16	3.30±0.5	LDM	5.65±2.3	28.95±9.3
<i>Solanum sessiliflorum Dunal</i>	Lulo	4.5±3.5	300±19	1.87±0.2	7.07±1.3	4.82±1.3	16.66±7.9
	Verduras - tallos: 7						
<i>Ocimum campechianum</i>	Albahaca	5.8±1.2	140±10	15.02±4.9	LDM	12.65±1.3	101.54±20.8
<i>Eryngium foetidum</i>	Cilantro	6.4±0.5	50±3	9.58±2.3	LDM	6.73	75.35±10.3
<i>Origanum vulgare</i>	Orégano	0.03±0.01	30±2	17.35±3.3	15.32	12.45	121.60±10.9
<i>Ocimum basilicum L</i>	Albahaca blanca	2.7±1.1	140±6	7.85	21.50	LDM	89.54±10.9
<i>Minthostachys mollis</i>	Poleo	0.04±0.01	50±2	9.85	Nd	Nd	Nd
<i>Basella rubra var</i>	Espinaca	0.04±0.02	60±9	11.05	4.33	LDM	14.75±4.3
<i>Saccharum officinalis</i>	Caña	0.05±0.01	462±25	2.20±0.8	Nd	Nd	Nd
	Total: 16	3.2±2.3		5.6±5.4	6.9±5.6	4.1±4.4	46.8±39.6
Murindó	Frutas - bulbos: 8						
<i>Colocasia esculenta</i>	Achín	2.4±0.9	572±17	3.82±0.9	LDM	16.54±0.9	29.93±5.3
<i>Musa balbisiana</i>	Banano	4.6±2.2	640±10	7.33±1.3	LDM	LDM	6.89±1.3
<i>Musa sapientum</i>	Primitivo	5.6±2.0	436±10	4.54±1.8	LDM	LDM	9.78±0.9
<i>Musa x paradisiaca</i>	Plátano	6.5±1.3	400±25	2.84±0.3	LDM	1.94±0.3	39.41±9.3
<i>Manihot esculenta</i>	Yuca	2.8±1.6	420±22	3.99±0.9	LDM	35.79±12.3	19.84±4.3
<i>Citrus aurantifolia</i>	Limón	4.7±1.0	135±10	0.30±0.3	Nd	Nd	Nd
<i>Alibertia patinoi</i>	Borojó	2.8±1.0	122.5±11	2.04±0.8	LDM	3.46±0.9	6.61±1.2
<i>Zea mays</i>	Maíz	0.04±0.01	200±10	2.38±0.9	LDM	1.62±0.3	26.43±5.3
	Verduras - tallos: 6						
<i>Eryngium foetidum</i>	Cilantro	4.1±1.5	50±6	9.87±0.8	LDM	2.80±0.4	77.94±10.5

<i>Ocimum basilicum L</i>	Albahaca blanca	3.8±1.2	140±14	6.96±0.3	LDM	Nd	Nd
<i>Mintostachys mollis</i>	Poleo	0.9±1.0	50±10	19.26±3.3	LDM	LDM	352.82±10.9
<i>Ocimum tenuiflorum</i>	Albahaca morada	4.0±1.0	140±15	10.03±1.3	LDM	LDM	Nd
<i>Allium fistulosum L</i>	Cebollín	4.1±1.2	0.85±0.6	6.67±0.3	LDM	LDM	38.72±9.3
<i>Saccharum officinalis</i>	Caña	0.03±0.01	462±18	1.32±0.4	Nd	Nd	Nd
	Total: 14	3.3±1.9		5.8±4.9	4.3±0.0	6.1±10.8	60.84±107.8

**Table 3.** Consumo días x semana, consumo gramos x días y Concentraciones mg kg de frutas-bulbos y verduras-tallos de los municipios de Media Atrato, Bojayá, Vigía del Fuerte y Bojayá pertenecientes a la cuenca media del río Atrato, las concentraciones se realizaron utilizando la media y la desviación estándar en cada alimento vegetal de la cuenca media del río Atrato. Las concentraciones no determinadas (Nd); LDM, es el límite de detección de las concentraciones de cada metal (Pb: 4.33, As: 2.71, Cd: 1.06)

Especies de peces	Hg		Cd		As		Pb		TTHQ	As*	Pb*
	EDI*	THQ	EDI	THQ	EDI	THQ	EDI	THQ		CR	CR
Medio Atrato											
<i>Hoplias malabaricus</i>	1.719	10.30	0.003	0.023	0.117	0.376	0.074	0.020	10.719	1.695 x 10 <sup>-3</sup>	6.057 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Trachelyopterus fisheri</i>	1.513	9.070	0.003	0.023	0.223	1.340	0.047	0.013	10.446	3.217 x 10 <sup>-3</sup>	3.890 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	1.622	9.722	0.003	0.023	0.062	0.200	0.045	0.012	9.957	9.003 x 10 <sup>-5</sup>	3.703 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Ctenolucius beani</i>	1.370	8.215	0.003	0.023	0.156	0.501	0.015	0.004	8.743	2.256 x 10 <sup>-3</sup>	1.295 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Caquetaia umbrifera</i>	0.401	2.407	0.003	0.023	0.169	0.541	0.058	0.016	2.987	2.436 x 10 <sup>-3</sup>	4.777 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	0.617	3.700	0.003	0.023	0.237	0.757	0.024	0.006	4.486	3.409 x 10 <sup>-3</sup>	2.003 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Rhamdia quelen</i>	0.608	3.646	0.003	0.023	0.067	0.214	0.060	0.016	3.899	9.674 x 10 <sup>-5</sup>	4.958 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Astyanax fasciatus</i>	0.781	4.681	0.003	0.023	0.172	0.550	0.015	0.004	5.258	2.476 x 10 <sup>-3</sup>	1.295 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Andinoacara pulcher</i>	0.522	3.129	0.003	0.023	0.041	0.133	0.064	0.017	3.302	6.003 x 10 <sup>-5</sup>	5.256 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Leporinus muyscorum</i>	0.431	2.585	0.003	0.023	0.155	0.497	0.051	0.014	3.119	2.237 x 10 <sup>-3</sup>	4.207 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Prochilodus magdalenae</i>	0.292	1.752	0.003	0.023	0.140	0.450	0.034	0.009	2.234	2.026 x 10 <sup>-3</sup>	2.797 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Hypostomus hondae</i>	0.487	2.922	0.003	0.023	0.437	1.398	0.082	0.022	4.365	6.291 x 10 <sup>-3</sup>	6.723 x 10 <sup>-7</sup>
Bojayá											
<i>Hoplias malabaricus</i>	1.579	9.465	0.003	0.022	0.063	0.201	0.090	0.024	9.532	9.070 x 10 <sup>-5</sup>	7.374 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Ctenolucius beani</i>	3.556	21.313	0.003	0.022	0.025	0.080	0.015	0.004	21.419	3.610 x 10 <sup>-5</sup>	1.245 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Prochilodus magdalenae</i>	0.501	3.003	0.003	0.022	0.056	0.179	0.057	0.015	3.219	8.090 x 10 <sup>-5</sup>	4.697 x 10 <sup>-7</sup>
Vigía del fuerte											
<i>Ageneiosus pardalis</i>	3.615	21.668	0.003	0.022	0.120	0.384	0.049	0.013	22.087	1.728 x 10 <sup>-3</sup>	4.033 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Hoplias malabaricus</i>	1.694	10.155	0.003	0.022	0.042	0.136	0.015	0.004	10.317	6.131 x 10 <sup>-5</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Trachelyopterus fisheri</i>	3.028	18.149	0.003	0.022	0.009	0.031	0.004	0.004	18.206	1.400 x 10 <sup>-5</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	2.105	12.619	0.003	0.022	0.043	0.139	0.050	0.013	12.793	6.272 x 10 <sup>-5</sup>	4.076 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Ctenolucius beani</i>	1.655	9.923	0.003	0.022	0.044	0.143	0.026	0.007	10.095	6.441 x 10 <sup>-5</sup>	2.132 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	2.776	16.641	0.003	0.022	0.039	0.126	0.015	0.004	16.793	5.705 x 10 <sup>-5</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Cynopotamus atratoensis</i>	2.621	15.710	0.003	0.022	0.044	0.143	0.015	0.004	15.879	6.467 x 10 <sup>-5</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Geophagus Pellegrini</i>	0.943	5.653	0.003	0.022	0.672	2.149	0.154	0.042	7.866	9.674 x 10 <sup>-3</sup>	1.256 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Caquetaia kraussii</i>	1.446	8.667	0.003	0.022	0.072	0.230	0.015	0.004	8.923	1.036 x 10 <sup>-3</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Rhamdia quelen</i>	1.639	9.824	0.003	0.022	0.187	0.598	0.015	0.004	10.448	2.694 x 10 <sup>-3</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Pimelodus sp</i>	0.531	3.185	0.003	0.022	0.052	0.167	0.032	0.008	3.382	7.536 x 10 <sup>-5</sup>	2.632 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Andinoacara pulcher</i>	0.149	0.893	0.003	0.022	0.068	0.217	0.039	0.010	1.142	9.788 x 10 <sup>-5</sup>	3.251 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Leporinus muyscorum</i>	0.347	2.080	0.003	0.022	0.209	0.668	0.144	0.039	2.809	3.006 x 10 <sup>-3</sup>	1.179 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Prochilodus magdalenae</i>	0.347	2.083	0.003	0.022	0.097	0.310	0.015	0.004	2.419	1.398 x 10 <sup>-3</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Hypostomus hondae</i>	0.107	0.643	0.003	0.022	0.079	0.253	0.015	0.004	0.922	1.142 x 10 <sup>-3</sup>	1.268 x 10 <sup>-7</sup>
Murindó											
<i>Ageneiosus pardalis</i>	2.633	15.781	0.003	0.023	0.100	0.321	0.064	0.017	16.142	1.448 x 10 <sup>-3</sup>	5.244 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Hoplias malabaricus</i>	2.589	15.521	0.003	0.023	0.082	0.262	0.045	0.012	15.818	1.182 x 10 <sup>-3</sup>	3.712 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Trachelyopterus fisheri</i>	2.673	16.025	0.003	0.023	0.016	0.053	0.038	0.010	16.111	2.409 x 10 <sup>-5</sup>	3.117 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Pseudopimelodus schultzi</i>	1.310	7.855	0.003	0.023	0.022	0.071	0.016	0.004	7.953	3.197 x 10 <sup>-5</sup>	1.325 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Ctenolucius beani</i>	3.612	21.649	0.003	0.023	0.071	0.228	0.016	0.004	21.904	1.028 x 10 <sup>-3</sup>	1.325 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Sternopygus aequilabiatus</i>	2.468	14.796	0.003	0.023	0.010	0.032	0.057	0.015	14.866	1.464 x 10 <sup>-5</sup>	4.704 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Caquetaia kraussii</i>	1.904	11.412	0.003	0.023	0.037	0.119	0.091	0.025	11.579	5.383 x 10 <sup>-5</sup>	7.443 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Rhamdia quelen</i>	1.970	11.808	0.003	0.023	0.077	0.247	0.069	0.019	12.097	1.113 x 10 <sup>-3</sup>	5.633 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Astyanax fasciatus</i>	0.318	1.908	0.003	0.023	0.060	0.193	0.158	0.043	2.167	8.729 x 10 <sup>-5</sup>	1.293 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Pimelodus punctatus</i>	0.726	4.356	0.003	0.023	0.030	0.096	0.016	0.004	4.479	4.328 x 10 <sup>-5</sup>	1.325 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Pimelodella chagresi</i>	0.443	2.657	0.003	0.023	0.023	0.075	0.016	0.004	2.759	3.382 x 10 <sup>-5</sup>	1.325 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Andinoacara pulcher</i>	0.123	0.740	0.003	0.023	0.029	0.093	0.513	0.140	0.996	4.195 x 10 <sup>-5</sup>	4.183 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Leporinus muyscorum</i>	0.122	0.736	0.003	0.023	0.106	0.341	0.390	0.106	1.206	1.535 x 10 <sup>-3</sup>	3.181 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Prochilodus magdalenae</i>	0.468	2.807	0.003	0.023	0.091	0.293	0.080	0.021	3.144	1.322 x 10 <sup>-3</sup>	6.537 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Hypostomus hondae</i>	0.165	0.994	0.003	0.023	0.312	0.997	0.044	0.012	2.006	4.490 x 10 <sup>-3</sup>	3.619 x 10 <sup>-7</sup>

**Tabla 4.** Ingesta diaria estimada (IDE), cociente de peligrosidad estimado (THQ), cociente de peligrosidad total estimado (TTHQ) y riesgo carcinogénico de los pescados más consumidos, para los metales individuales del consumo de pescado.\* Riesgo carcinogénico. Valores de +EDI en (g/kg/día). Los valores de la dosis oral de referencia (RfDo) utilizados fueron: Hg = 0.16 g/kg/día. Cd = 1.00 g/kg/día. Pb = 3.50 g/kg/día y As = 0.30 g/kg/día

Especies vegetales	Hg		Cd		As		Pb		TTHQ	As*	Pb*
	EDI*	THQ	EDI	THQ	EDI	THQ	EDI	THQ		CR	CR
Medio Atrato											
Frutas - bulbos											
<i>Colocasia esculenta</i>	0.021	0.128	0.008	0.052	0.077	0.021	0.232	0.063	0.264	6.356 x 10 <sup>-7</sup>	1.894 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Oryza sativa</i>	0.021	0.129	0.011	0.070	0.051	0.014	0.007	0.002	0.215	4.199 x 10 <sup>-7</sup>	6.324 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Alibertia patinoi</i>	0.006	0.041	0.001	0.011	0.356	0.097	0.007	0.002	0.151	2.908 x 10 <sup>-6</sup>	6.198 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Musa x paradisiaca</i>	0.013	0.080	0.006	0.036	0.018	0.004	0.024	0.006	0.126	1.486 x 10 <sup>-7</sup>	2.023 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa balbisiana</i>	0.012	0.073	0.090	0.543	0.024	0.006	0.039	0.010	0.632	6.467 x 10 <sup>-5</sup>	2.026 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Cocos nucifera</i>	0.035	0.021	0.008	0.049	0.007	0.002	0.012	0.003	0.075	6.333 x 10 <sup>-8</sup>	1.012 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Citrus aurantifolia</i>	0.001	0.004	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.004	Nd	Nd
<i>Musa sp</i>	0.027	0.163	0.009	0.055	0.109	0.029	0.092	0.025	0.272	8.903 x 10 <sup>-7</sup>	7.577 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa sapientum</i>	0.019	0.117	0.006	0.039	0.062	0.017	0.027	0.007	0.180	5.073 x 10 <sup>-7</sup>	2.206 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Solanum sessiliflorum</i>	0.014	0.084	0.034	0.208	0.011	0.003	0.018	0.005	0.300	9.500 x 10 <sup>-8</sup>	1.518 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Zea mays</i>	0.011	0.067	0.003	0.018	0.109	0.029	0.012	0.003	0.117	8.918 x 10 <sup>-7</sup>	1.012 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Dioscorea trifida</i>	0.020	0.122	0.007	0.045	0.019	0.005	0.030	0.008	0.180	1.567 x 10 <sup>-7</sup>	2.504 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Carica papaya</i>	0.004	0.302	0.040	0.243	0.034	0.009	0.034	0.009	0.563	2.795 x 10 <sup>-7</sup>	2.851 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Manihot esculenta</i>	0.012	0.074	0.006	0.038	0.016	0.004	0.026	0.007	0.123	1.330 x 10 <sup>-7</sup>	2.215 x 10 <sup>-7</sup>
Verduras - tallos											
<i>Eryngium foetidum</i>	0.015	0.090	0.007	0.042	0.014	0.054	0.028	0.007	0.193	4.447 x 10 <sup>-7</sup>	2.285 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Ocimum campechianum</i>	0.047	0.028	0.022	0.132	0.221	0.060	0.126	0.034	0.254	1.806 x 10 <sup>-6</sup>	1.032 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Origanum vulgare</i>	0.018	0.110	0.010	0.065	0.063	0.017	0.028	0.007	0.199	5.143 x 10 <sup>-7</sup>	2.338 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Saccharum officinalis</i>	0.015	0.094	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.094	Nd	Nd
Bojayá											
Frutas - bulbos											
<i>Colocasia esculenta</i>	0.014	0.088	0.401	2.405	0.231	0.063	0.034	0.009	2.565	1.887 x 10 <sup>-6</sup>	2.782 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa balbisiana</i>	0.013	0.081	0.037	0.225	0.023	0.006	0.038	0.010	0.322	1.948 x 10 <sup>-7</sup>	3.112 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Manihot esculenta</i>	0.013	0.083	0.012	0.075	0.075	0.020	0.025	0.006	0.184	6.166 x 10 <sup>-7</sup>	2.042 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa x paradisiaca</i>	0.011	0.068	0.019	0.114	0.099	0.027	0.023	0.006	0.215	8.137 x 10 <sup>-7</sup>	1.945 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Citrus aurantifolia</i>	0.002	0.013	0.860	0.476	0.093	0.025	0.008	0.002	0.516	7.591 x 10 <sup>-7</sup>	6.566 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Alibertia patinoi</i>	0.003	0.018	0.001	0.010	0.011	0.003	0.007	0.002	0.033	9.258 x 10 <sup>-8</sup>	5.958 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Musa sp</i>	0.022	0.136	0.008	0.053	0.022	0.006	0.036	0.009	0.204	1.856 x 10 <sup>-7</sup>	2.967 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Solanum sessiliflorum</i>	0.010	0.065	0.033	0.203	0.011	0.003	0.017	0.004	0.275	9.138 x 10 <sup>-8</sup>	1.459 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Zingiber officinale</i>	0.004	0.024	0.005	0.034	0.022	0.006	0.001	0.001	0.065	1.873 x 10 <sup>-7</sup>	1.605 x 10 <sup>-8</sup>
Verduras - tallos											
<i>Ocimum campechianum</i>	0.019	0.015	0.021	0.131	0.755	0.207	0.008	0.002	0.355	6.160 x 10 <sup>-6</sup>	6.809 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Eryngium foetidum</i>	0.011	0.067	0.039	0.238	0.051	0.014	0.002	0.001	0.320	4.176 x 10 <sup>-7</sup>	2.432 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Origanum vulgare</i>	0.004	0.026	0.013	0.081	0.028	0.007	0.001	0.001	0.115	2.358 x 10 <sup>-7</sup>	1.459 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Minthostachys mollis</i>	0.007	0.043	Nd	Nd	Nd	Nd	0.002	0.001	0.044	Nd	2.432 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Basella rubra var</i>	0.012	0.075	0.012	0.073	0.022	0.006	0.003	0.001	0.155	1.842 x 10 <sup>-7</sup>	2.918 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Allium fistulosum L</i>	7.882 <sup>-5</sup>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	3.206 <sup>-5</sup>	3.209 <sup>-5</sup>	5.780 x 10 <sup>-9</sup>	9.538 x 10 <sup>-10</sup>
<i>Saccharum officinalis</i>	0.014	0.089	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.089	Nd	Nd
Vigía del fuerte											
Frutas - bulbos											
<i>Colocasia esculenta</i>	0.019	0.118	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.118	Nd	Nd
<i>Oryza sativa</i>	0.002	0.015	0.001	0.011	0.057	0.015	0.007	0.002	0.043	4.653 x 10 <sup>-7</sup>	6.191 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Citrus aurantifolia</i>	0.001	0.003	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.003	Nd	Nd
<i>Musa balbisiana</i>	0.015	0.090	0.009	0.057	0.024	0.006	0.038	0.010	0.163	1.984 x 10 <sup>-7</sup>	3.170 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Zea mays</i>	0.005	0.032	0.002	0.017	0.075	0.020	0.012	0.003	0.072	6.120 x 10 <sup>-7</sup>	9.906 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Musa sp</i>	0.014	0.087	0.009	0.054	0.107	0.029	0.037	0.026	0.196	8.757 x 10 <sup>-7</sup>	7.747 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa x paradisiaca</i>	0.012	0.073	0.005	0.035	0.215	0.059	0.024	0.006	0.173	1.759 x 10 <sup>-6</sup>	1.981 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Manihot esculenta</i>	0.019	0.116	0.033	0.199	0.170	0.046	0.025	0.006	0.367	1.390 x 10 <sup>-6</sup>	2.080 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Solanum sessiliflorum</i>	0.007	0.047	0.020	0.121	0.070	0.019	0.029	0.008	0.195	5.717 x 10 <sup>-7</sup>	2.426 x 10 <sup>-7</sup>
Verduras - tallos											
<i>Ocimum campechianum</i>	0.029	0.176	0.024	0.148	0.199	0.054	0.008	0.002	0.380	1.626 x 10 <sup>-6</sup>	6.934 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Eryngium foetidum</i>	0.006	0.040	0.004	0.028	0.052	0.014	0.003	0.001	0.083	4.309 x 10 <sup>-7</sup>	2.476 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Origanum vulgare</i>	0.007	0.043	0.005	0.031	0.051	0.014	0.006	0.001	0.089	4.173 x 10 <sup>-7</sup>	1.486 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Ocimum basilicum L</i>	0.015	0.092	0.002	0.012	0.175	0.048	0.042	0.011	0.163	1.434 x 10 <sup>-6</sup>	3.443 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Minthostachys mollis</i>	0.006	0.041	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.041	Nd	Nd
<i>Basella rubra var</i>	0.009	0.055	0.001	0.005	0.012	0.003	0.003	0.001	0.064	1.012 x 10 <sup>-7</sup>	2.972 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Saccharum officinalis</i>	0.014	0.085	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.085	Nd	Nd
Murindó											
Frutas - bulbos											
<i>Colocasia esculenta</i>	0.032	0.192	0.138	0.832	0.251	0.068	0.036	0.009	1.101	2.047 x 10 <sup>-6</sup>	2.962 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa balbisiana</i>	0.068	0.412	0.009	0.059	0.064	0.017	0.040	0.012	0.500	5.274 x 10 <sup>-7</sup>	3.314 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa sapientum</i>	0.029	0.174	0.006	0.040	0.062	0.017	0.027	0.007	0.238	5.100 x 10 <sup>-7</sup>	2.258 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Musa x paradisiaca</i>	0.016	0.099	0.011	0.068	0.231	0.063	0.025	0.006	0.236	1.885 x 10 <sup>-6</sup>	2.071 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Manihot esculenta</i>	0.024	0.147	0.220	1.322	0.122	0.033	0.026	0.007	1.509	9.967 x 10 <sup>-7</sup>	2.175 x 10 <sup>-7</sup>
<i>Citrus aurantifolia</i>	0.001	0.003	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.003	Nd	Nd
<i>Alibertia patinoi</i>	0.003	0.022	0.006	0.037	0.011	0.003	0.007	0.002	0.064	9.679 x 10 <sup>-8</sup>	6.344 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Zea mays</i>	0.006	0.041	0.004	0.028	0.077	0.021	0.012	0.003	0.093	6.322 x 10 <sup>-7</sup>	1.035 x 10 <sup>-7</sup>
Verduras - tallos											
<i>Eryngium foetidum</i>	0.007	0.043	0.002	0.012	0.057	0.015	0.003	0.001	0.071	4.661 x 10 <sup>-7</sup>	2.589 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Ocimum basilicum L</i>	0.014	0.085	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.085	Nd	Nd
<i>Minthostachys mollis</i>	0.014	0.084	0.001	0.004	0.258	0.070	0.003	0.001	0.159	2.110 x 10 <sup>-6</sup>	2.589 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Ocimum tenuiflorum</i>	0.020	0.123	0.002	0.013	Nd	Nd	0.008	0.002	0.138	Nd	7.251 x 10 <sup>-8</sup>
<i>Allium fistulosum L</i>	8.324 <sup>-5</sup>	0.001	1.322 <sup>-5</sup>	7.924 <sup>-5</sup>	0.001	0.001	5.401 <sup>-5</sup>	1.479 <sup>-5</sup>	9.405 <sup>-5</sup>	3.937 x 10 <sup>-9</sup>	4.402 x 10 <sup>-10</sup>
<i>Saccharum officinalis</i>	0.008	0.053	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.053	Nd	Nd

**Tabla 5.** Ingesta diaria estimada (IDE), cociente de peligrosidad estimado (THQ), cociente de peligrosidad total estimado (TTHQ) y riesgo carcinogénico de las frutas y verduras más consumidas, para los metales individuales del consumo de frutas y verduras.\* Riesgo carcinogénico. Valores de +EDI en (g/kg/día). Los valores de la dosis oral de referencia (RfDo) utilizados fueron: Hg = 0.16 g/kg/día. Cd = 1.00 g/kg/día. Pb = 3.50 g/kg/día y As = 0.30 g/kg/día. (Nd) concentraciones no determinadas.

País	Region o localidad	Alimento	Metales pesados	Numero de muestras	Fuente de contaminación	Referencias
Colombia	middle basin of the atrato river	Peces y vegetales	Hg, Cd, Pb y As	594	Minería del oro y platino	Caicedo-Rivas., et al (2022)
Polonia	Warmia y Mazury	peces	Hg, Cd, Pb y As	212	Not specified	Mielcarek et al., (2022).
china	Shaanxi,	vegetales	Cd, As y Pb	180	Fertilizantes y pesticidas	Guo et al., (2022).
Sudáfrica	río Hex	peces	As, Cd y Pb	136	Minería del oro y platino	Erasmus et al., (2022).
Bosnia y Herzegovina	mercado minorista	peces	Hg, Cd, Pb y As	185		Hajrić et al., (2022).
Irlanda	Donegal, Sligo, Leitrim, Cavan, Monaghan, Louth, Mayo, Galway	vegetales	Pb	No especificada	Actividades agrícolas	Nag y Cummins, (2022)
México	Campeche	peces	Pb y Cd	95	Impacto antropogénico	Castañeda-Chávez et al., (2021)
china	daye	vegetales	As, Cd y Pb	90	Minería	Wang et al., (2021)
Perú	Arequipa	vegetales	Hg, Cd, Pb y As	1000 gr	Contaminación de ríos y suelos, actividad volcánica	Román-Ochoa et al., (2021).
Irak	Erbil	vegetales	Pb y Cd	No especificada	Aguas residuales	Tariq, (2021).
Gana	Tano	peces	Hg, Cd, Pb y As	18	Actividades agrícolas	Nyantakyi et al., (2021).
Brasil	río Tramandaí,	peces	Cd, pb y Hg	7032	Actividades industriales	Tesser et al., (2021)
Nigeria	Choba y Khana	peces	As, Cd, Pb, y Hg,	No especificado	Actividades antropogénicas	Okoye et al., (2021).
Colombia	Mojana	vegetales	Hg	1000 granos	Actividades mineras	Enamorado-Montes et al., (2021).
Colombia	Guajira	peces	Hg, Pb	40	Contaminación industrial	Doria-Argumedo, (2021).
Colombia	Rio Atrato	fish	Hg	520	Minería del oro	Salazar-Camacho et al., (2021).
Etiopía	Arba Minch	vegetales	Pb y Cd	36	Aguas residuales	Guadie et al., (2021).
Daneses	No especificada	vegetales	Hg, Cd, Pb y As	456	Procesos industriales y urbanización	Marini et al., (2020).
Canadá	Norte de Ontario	peces	Hg (0,2 y 19,2), AS (0,1 y 27,0), Pb y Cd	388	Actividad volcánica y contaminación atmosférica	Lescord et al., (2020)
Pakistán	lago Keenjhar	peces	Pb y Cd	30	Desarrollo industrial	Mehmood et al., (2020).
Nigeria	Kano	peces y vegetales	Cd y Pb	210	Prácticas agrícolas e industriales	Edogbo et al., (2020).
Colombia	sibate	vegetables	As, Pb y Cd	416	Contaminación del agua	Lizarazo et al., 2020).
Colombia	salado	peces	Hg, Pb y Cd	15	Actividad antropogénica	Hernández-Morales et al., (2020).
Colombia	Rio Atrato	peces	AS y Cd	104	Minería del oro	Palacios-Torres et al., (2020).
Colombia	Rio Atrato	peces	Hg	842	Minería del oro	Salazar-Camacho et al., (2020).
Colombia	amazonia	peces	Hg y Cd	102	Minería del oro	Alcala-Orozco et al., (2020).
Colombia	Santa marta	peces	Hg, As, Pb y Cd	160	Not specified	Pinzón-Bedoya et al., (2020).
Colombia	Antioquia, Bolívar, Cauca, Córdoba, Guainía, Nariño, Santander, Sucre y Valle del Cauca, Chocó y otros	peces	Hg	4259	Mineral del oro y carbón	Paula- Gutiérrez y Agudelo, (2020).
china	Nevsehi	vegetales	As, Cd, Pb	No especificado	pesticida	Leblebici et al., (2020).
Colombia	Antioquia, chocó, bolívar, atlántico, Huila, putumayo. Otros	peces	Hg, Cd, Pb y AS	No especificado	Minería del oro	Vargas-Licono y Marrugo-Negrete, (2019).
Tanzania	islas Unguja y Pemba de Zanzíbar y en la aldea de Ndumbwe en Mtwara	peces	Pb, Cd, Hg,	48	Contaminación atmosférica	Mwakalapa, et al., (2019).
China	Qingyuan	vegetales	Pb y Cd	106	electronic waste	Zhang et al., (2019)
irán	Chaharmahal y bakhtiari	peces	Pb (5,70–27)	80	Minería, aguas residuales y actividades domésticas	Solgi y Beigzadeh, (2019).
China	20 provincias	vegetales	As, Cd, Pb, y Hg,	No especificada	Minería y pesticidas	Wei y Cen, (2019).
Vietnam	laguna Cau Hai	peces	As, Cd, Pb	23	Actividades antropogénicas	Tran et al., (2018)
Sudáfrica y Mozambique	Río Olifants	vegetables	As, Cd y Hg	23	Minería, actividades industriales y aguas residuales	Genthe et al., (2018).
serbia	Vojvodina	vegetables	Pb y Cd	No especificada	fertilizantes	Pajević et al., 2018
Colombia	Rio Atrato	peces	Hg	258	Gold mining	Palacios-Torres et al., (2018).
Colombia	Ayapel y la raya	peces	Hg	71	Minería y aguas residuales	Marrugo-Negrete et al., (2018).
Colombia	Rio cauca	peces	Hg, Cd y Pb	21	Agua residual, procesos industriales y minería	Rivera et al., (2018).
Bangladesh	Kawran Bazar/ río Buriganga	peces y vegetales	As, Cd y Pb	240	Agua contaminada	Real et al., (2017).
china	Guangdong, Hubei Liaoning	vegetales	Hg, Cd y Pb	1335	Agricultura, aguas residuales y actividades industriales	Zhong et al., (2018).
Irán	región de Sistán	peces	Cd, Pb Y Hg	40	Crecimiento de la población	Miri et al., (2017)

china		vegetales	Hg	No especificado	Emisiones antropogénica	Wai et al., (2017).
Colombia	Rio Caquetá	peces	Hg	46	Minería del oro	Olivero-Verbel et al., (2016).
china	huludao	vegetales	Hg, Cd, Pb y AS	271	Minería	Li, et al., (2016).
Bangladesh	río Buriganga,	peces	Cd, As y Pb	No especificada	Desarrollo industrial	Kawser et al., (2016).
Colombia	Cali	vegetables	Pb, Cd y Hg	No especificado	Aguas residuales	Echeverry et al., (2015).
Bangladesh	Bogra	peces y vegetales	As, Cd y Pb	No especificado	Fertilizantes y pesticidas	Islam et al., (2015).
Rumania	Baia Mare	Vegetales	Pb y Cd	150	Minería	Roba et al., 2015
Bangladesh	Patuakhali	peces y vegetales	As, Pb y Cd	189	Industrialización y procesos agrícolas	Islam et al., (2014).
china	beigin	peces y vegetales	Cd, Pb y As	Veg (10) y peces (6)	Not specified	Fang et al., (2014).
china	Gejiu	vegetales	Cd, Pb y As	19	Minería	Yanyan Li et al., 2014
Colombia	sucre	vegetales	Hg	No especificada	Minería	Argumedo-García et al., (2013).
Bangladesh	Shaheb Bazar	peces y vegetales	Pb, Cd y As	Peces 5- frutas y vegetales 15	Agroquímicos, fertilizantes y pesticidas	Saha et al., (2012).

**Tabla 6.** Algunas investigaciones realizadas en la última década, donde se evalúan riesgos o determinan concentraciones de Hg, As, Cd y Pb en peces, frutas y verduras. El orden es establecido de las investigaciones más recientes a más antigua.

## 6. DISCUSIÓN

La cuenca media del río Atrato del pacífico colombiano ha sufrido un gran impacto por la explotación indiscriminada de la minería aurífera en su caudal y suelos aledaños; la alerta de presencia de estos metales ha llamado la ejecución a diversas investigaciones para la región, centralizándose a totalidad en la ictiofauna. Basados en la sentencia T-622 y el convenio de Minamata es importante evaluar el riesgo a la salud humana por el consumo de alimentos contaminados con estos metales pesados en los pobladores de la cuenca media de río Atrato.

Las concentraciones de Hg en frutas-bulbos y verduras-tallos en el municipio del medio Atrato, reportaron datos con rangos de 0.39 – 42.94 mg kg, donde las verduras-tallos *E. foetidum* (cilantro), *O. campechianum* (albahaca) y *O. vulgare* (oregano), presentaron las concentraciones mayores. Lo anterior puede ser atribuido a la capacidad de bioacumulación que poseen estas especies vegetales (Li et al. 2016). Estudios similares han reportado que existen diferencias en las concentraciones de vegetales, las verduras de hoja son un grupo de plantas reconocidas por poseer una alta capacidad de acumulación de metales pesados (Zhong et al., 2017). La contaminación de estas especies vegetales podría estar asociada al uso de agua del río contaminada con metales pesados producto de las actividades mineras con Hg. Los cultivos en áreas altamente contaminadas están más propensos en acumular grandes cantidades de metales tóxicos (Sol et al., 2020). Además, la contaminación del suelo o de la superficie de los vegetales por la deposición de partículas que contienen Hg o desposición del mismo metal (Siudek et al., 2016).

Las concentraciones de Hg en frutas-bulbos y verduras-tallos en la cuenca media del Atrato, no excedieron los límites permisibles seguros de ingesta recomendados por (OMS, 2002/2009) 500 mg kg de peso corporal para la población adulta y 200 mg kg de peso corporal para niños, adultos mayores y mujeres embarazadas, similar a lo reportado por Genthe et al., (2018). En el caso particular de la especie *O. sativa* (arroz) las concentraciones mas altas de Hg reportadas fue de 12.02 mg kg fue superior a la reportada por Enamorado-Montes et al., (2021) en la región de la mojana- sucreña para la variedad FA473 con 8.64 mg kg, sin embargo en la variedad FAM los resultados fueron

inferiores 20,09 mg kg; la concentración de Hg mas baja encontrada fue de 0.30 mg kg, estuvo por encima de la reportada para el Perú 0.0036 mg kg por (Roman-Ochoa et al., 2021). Estas variaciones en las concentraciones posiblemente están asociadas al grado de contaminación del suelo (Enamorado-Montes et al., 2021). Las concentraciones de Hg en verduras-tallos presentaron datos superiores con respecto a las frutas-bulbos, investigaciones en China por (Li et al., 2016; Zhong et al., 2018) registran el mismo comportamiento de acumulación por este tipo de especies vegetales. Las elevadas concentraciones en las verduras, además de estar relacionada con la capacidad de bioacumulación de estas (Zhong et al., 2017), puede obedecer a la contaminación producto de la minería y grado de contaminación del suelo (Soto-Benavente et al., 2020).

Las concentraciones de Pb en las verduras - tallos y frutas - bulbos en la cuenca media del Atrato, no sobrepasaron los límites permisibles de consumo de la OMS (2002/2009), estos resultados concuerdan con los estudios realizados por Genthe et al., (2018) en frutas y verduras de la región africana (Sudafrica y Mozambique); los contenidos de Pb se consolidaron superiores en las verduras-tallos, este comportamiento concuerda con los datos de las investigaciones de (Li et al., 2016; Zhong et al., 2018). Lo anterior, posiblemente está relacionado con el crecimiento de esas especies en suelos contaminados y uso del agua para riego (Zwolak et al., 2019). Los municipios de Vigía del Fuerte y Medio Atrato en las verduras - tallos obtuvieron niveles de concentración superiores y por encima de lo permitido por (Codex, 1995 y U.E, 2016), especialmente *E. foetidum* (cilantro), *O. campechianum* (albahaca) y *O. vulgare* (oregano), *B. rubra var* (espinaca), *M. mollis* (poleo), *O. basilicum* L (albahaca blanca) (4.33 - 66.71 mg/kg); la alta densidad de estomas en las hojas y la evaporación, posibilita la acumulación del plomo atmosférico (Gan et al., 2017) el Pb puede adsorberse y fijarse en el material arcilloso de los suelos. Se caracteriza por ser un metal de alta movilidad, la cual aumenta con el pH, y más en condiciones ácidas como la parte media atrateña; lo que pudo favorecer su adsorción y acumulación (Prieto et al., 2018); registros inferiores se obtuvieron en lo descrito por (Lizarazo et al., 2020; Román-Ochoa et al., 2021) y superiores en (Wei et al., 2019; Guadie et al., 2020).

Los niveles de Cd en las frutas - bulbos de los municipios de Murindó y Bojayá fueron altos con respecto a los otros dos municipios, en particular *C. esculenta* de alta pretención en el consumo por los pobladores, la cuál presentó concentraciones de 1.06 - 50.92 mg/kg sobrepasando el límite del codex (codex, 1995; U.E, 2016). Estas plantas se caracterizan por ser tuberculos, de esta forma los bulbos crecen debajo de la tierra y están en contacto directo con el suelo contaminado presente e la zona de estudio, de esta forma puede acumular concentraciones importantes de Cd. Existen reportes sobre la gran capacidad de acumulación de metales pesados de este tipo de plantas, debido a que sus partes crecen bajo la superficie terrestre conformados por bulbos de gran tamaño para el consumo (Herforth et al., 2019; Ir -mez et al., 2019). En general el Cd como otros metales, pueden ser absorbidos por los poros de los estomas de las hojas (Bi et al., 2018), a diferencia de otros metales tóxicos como el Pb, tiene una alta movilidad en el suelo, siendo fácilmente absorbido por las raíces y transportado a los brotes, distribuyéndose uniformemente en las plantas (Dong et al., 2007). Su grado elevado de bioacumulación se debe más a la contaminación de los suelos, que a la deposición atmosférica (Zhou et al., 2016). Siendo las verduras especialmente las de hoja más capaces en absorberlo (Xiao et al., 2018). Para nuestra investigación, las concentraciones de Cd no sobrepasaron el límite permisible de consumo de la OMS (2002/2009) a diferencia de lo reportado por Genthe et al., (2018). Además, los rangos de bioacumulación están por encima de los reportados por Real et al., (2017), en los cuales el rango establecido estuvo en (0.003–1.616) *O. sativa*. De otro lado, los datos de nuestra investigación muestran concentraciones superiores a los reportes en *Solanum lycopersicum* (Guadie et al., 2020), *Daucus carota*, *cynara scolymus* y *petroselinum crispum* (Lizarazo et al., 2020), *M. paradisiaca* y *C. aurantifolia* (Marini et al., 2020); *Apium graveolens*, *Lepidium sativum* y *Porrum de Alliuml* (Tariq, 2021), *Z. mays* y *O. sativa* (Román-Ochoa et al., 2021).

El As en frutas-bulbos y verduras-tallos de elevadas concentraciones no sobrepasa los límites permisibles seguros de consumo de la OMS/2002, estos registros son similares a los reportados en investigaciones realizadas en *Origanum vulgare* (oregano), *Ocimum campechianum* (albahaca) y *Alibertia patinoi* (borojó) (Genthe et al., 2018). Las concentraciones en *Eryngium foetidum* (cilantro) y *Allium fistulosum* L (cebollin),

presentaron niveles cercanos a los máximos permitidos, específicamente 75.35 y 60.54 mg/kg. En este estudio las concentraciones de As presentaron valores más elevadas con respecto a Hg, Pb y Cd. Estos valores fueron superiores a los reportados en (Real et al., 2017) de 0.17 mg/kg, (Lizarazo et al., 2020) con 2.36 mg/kg, (Marini et al., 2020) 0.016 mg/kg, (Román-Ochoa et al., 2021) 0.07 mg/kg. Las altas concentraciones de As en las especies de frutas-bulbos y verduras-tallos, pueden considerar algunas condiciones específicas del biotopo como la humedad del suelo, pH y la disponibilidad de materia orgánica, es decir, la variabilidad de la transferencia de metales del suelo al vegetal y sus partes, es condicionada por características físicas, químicas y naturales, aunque en dicha correlación interfiere la característica del As donde se complementa la posible transferencia de metal, del suelo al vegetal (Samsuri et al., 2021).

El análisis estadístico realizado para las concentraciones de Hg, Pb, Cd y As en vegetales en la cuenca media del río Atrato muestra diferencias significativas ( $p < 0,05$ ); las concentraciones de Hg, Cd y As en frutas-bulbos y verduras-tallos en el municipio de Medio Atrato son mucho más elevadas que las concentraciones del municipio de Murindo ( $p < 0,05$ ).

La agricultura de sustento para los habitantes de la cuenca del río Atrato, se encuentra desarrollada en suelo y el río es la principal fuente de riego de agua para los cultivos; sin embargo, el alto impacto de la minería del oro en la cuenca del río Atrato y sus afluentes ha generado altos índices de contaminación, los cuales contribuyen a la contaminación de cultivos con Hg, Cd, Pb y As. Por lo tanto, estas actividades antropogénicas constituyen un riesgo inminente para la salud humana en las poblaciones ribereñas de la cuenca. De esta forma la evaluación de riesgo carcinogénico fue realizada para As y Pb, para esta investigación fueron tomados los valores superiores a  $1.0 \times 10^{-4}$  como índices de riesgo en los vegetales (EPA, 1989). En nuestro estudio el índice carcinogénico por la contaminación de vegetales no obtuvo ninguna incidencia en los dos metales evaluados As y Pb. Un estudio similar en Bangladesh por Real et al., (2017) encontró incidencia carcinogénica para estos dos metales, resultando el As con mayor efecto carcinogénico con respecto al Pb. En investigaciones donde incluyeron algunos de nuestros metales Nag y Cummins, (2021) en la república de Irlanda, donde el Pb no

resultado significativo para la evaluación de riesgo carcinogénico. En el Perú el trabajo de Roman-Ochoa, et al (2021) en algunas especies como *O. zativa* largas exposiciones a As manifestaron un posible riesgo para la población.

Nuestra investigación registra para peces las concentraciones de los metales pesados en el siguiente orden  $Hg > As > Pb > Cd$ , donde se evidencia altos niveles de concentración en Hg, MeHg y As; los datos superiores en concentraciones medias de THg en peces se presentó en *C. beani* ( $1008.0 \pm 552.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) municipio de Bojayá. Sin embargo el municipio de Vigía del Fuerte posee un mayor número en especies con elevadas concentraciones para *C. kraussii*, *R. quelen*, *C. beani*, *H. malabaricus*, *P. schultzi*, *C. atratoensis*, *S. aequilabiatus*, *T. fisheri* y *A. pardalis*. Estas zonas se caracterizan por desarrollar actividades extensiva de minería sobre el río murrí y otros afluentes. (Salazar-Camacho et al., 2020). En la cuenca del río Atrato otros estudios reportaron datos similares en *Ageneiosus pardalis*, *Hoplias malabaricus*, *Ctenolucius beani*, sus concentraciones estas relacionadas con la minería extractiva del río Atrato y sus afluentes; las elevadas concentraciones encontradas de THg se relaciona con lo descrito por Vargas-Licon y Marrugo-Negrete, (2019) donde alertan sobre el riesgo toxicológico a causa de la minería en algunos ecosistemas de Colombia. Las concentraciones de MeHg en peces de la cuenca media del Atrato que sobrepasan los límites permisibles seguros de consumo en  $500 \mu\text{g kg}^{-1}$  (OMS, 1990)  $\text{kg}^{-1}$ , estos resultados son similares a los reportes realizados Salazar-Camacho et al., (2021) en esta zona de la cuenca. Las concentraciones de THg y MeHg en peces reportadas en esta investigación fueron similares a reportadas en otras investigaciones en la cuenca del río atrato (Placios-Torres et al., 2018; Salazar-Camacho et al., 2022). Estos resultados también concuerdan con otras investigaciones, donde las especies de hábito carnívoro c-p y oc presentaron mayor bioacumulación del THg y MeHg, como *H. malabaricus*, *C. kraussii* y *A. pardalis* (Marrugo-Negrete et al.; 2018; Canham et al., 2021).

Las concentraciones medias de Pb y Cd en peces fueron,  $12.03 \pm 24.4$  y  $1.1 \pm 2.2 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente. Estas concentraciones fueron superiores a los reportes realizados en peces del río Buriganga (Bangladesh) específicamente las especies *Heteropneustes fossilis*, *Channa striata*, *Labeo rohita* y *Catla catla* Real et al., (2017); en especies

*Oreochromis aureus* y *Oreochromis niloticu* del río Challawa (Nigeria) Edogbo et al., (2020); y en reportes en polonia en la especie *Common whitefish* Mielcarek et al., (2022). Sin embargo, otros estudios han reportado cifras menores en peces de la ciénaga grande de Santa Marta (Lorenzo-Márquez et al., 2016; Pinzon-Bedoya et al., 2020).

Las concentraciones de los metales Pb y Cd para las especies icticas en la cuenca media sobrepasaron el limite establecido por el codex (Codex, 1995 y U.E, 2016), sin embargo, no excedieron los limites permisibles de la ingesta de la OMS (2002/2009).

Las concentraciones de As en peces en general para la cuenca reportaron datos por encima de lo permitido (codex, 1995; U.E, 2016), los municipios de Medio Atrato y vigia del Fuerte registraron las cifras mas elevadas para sus concentraciones medias en la cuenca  $134.2 \pm 61.0$  y  $187.2 \pm 164.8$  ug kg<sup>-1</sup>. Las especies *P. magdalенаe* y *Leporinus muyscorum* de importancia gastronómica, no excedieron los limites permisibles de la ingesta de la OMS (2002/2009), este estado es asociado al habito alimenticio de preferencia de la especie en el ecosistema.

El analisis estadístico realizado para las concentraciones de As y Pb, nuestro estudio determina alto riesgo carcinogenico en cuenca media del atrato por la ingesta de alimentos contaminados, *A. pardalis*, *P. magdalенаe*, *H. malabaricus*, *Leporinus muyscorum* y *R. quelen* de importancia gastronómica arrojan datos de importancia carcinogenia para el As, con la excepción del municipio de bojayá. Salazar- Camacho et al., (2022) reportaron datos similares para el riesgo carcinogénico en As; el instituto nacional de cancerología (INC) estima en colombia alrededor de 74.8 casos nuevos por cada 100.000 habitantes, aunque la región pacifica no se considera determinante a el aumento del riesgo carcinogenico nacional, la contaminación por metales pesados y la ingesta excesiva de alimentos contaminados puede incidir a futuro en el riesgo carcinogénico local y nacional. Estudio por Vergara-Dagobeth, (2017) considera limitantes para diagnosticos en zonas vulnerables. Luginaah et al., (2012) no desconocen las influencias del medio ambiente sobre las concentraciones de casos carcinogénicos.

Los datos de TQH para Hg en nuestro estudio fueron significativamente altos 0.736-21.68, lo cuál muestra un riesgo para las poblaciones ribereñas por el consumo de peces

contaminados con Hg. Estos datos son similares a los reportados por Salazar-Camacho et al., (2022) para los municipios de Vigía del Fuerte, Murindó, Bojayá y Medio Atrato. Otros estudios demostraron que especies como *P. schultzi*, *A. pardalis*, *S. aequilabiatus*, *R. quelen*, *H. malabaricus*, *Cathorops melanopus*, *Centropomo undecimalis*, *C. umbrifera*, *C. kraussii*, *P. sp*, *P. punctatus*, *P. magdalenae*, *Spatuloricaria atratoensis*, *Leporinus muyscorum*, *Hemiancistrus wilsoni* y *Cyphochara Magdalena* presentaron los valores mayores de 1 en el índice del THQ (Palacios-Torres et al., 2017).

Los límites recomendados para el consumo (MFW) de peces en los municipios de Medio Atrato, Bojayá, Vigía del Fuerte y Murindó en esta zona media de la cuenca Atrateña, reportaron que algunas especies como *C. beani*, *P. schultzi*, *H. malabaricus*, *T. fisheri*, *A. pardalis*, *S. aequilabiatus*, *R. quelen*, *C. atratoensis*, *C. kraussii* sobrepasaron las ingesta recomendada en g/semana de sus pobladores, la investigación en la misma área de estudio por Camacho-salazar et al., (2022) reportaron un número menor en especies, superando este límite *P. schultzi*, *H. malabaricus*, *A. pardalis*, *R. quelen*, *C. kraussii*. Estos resultados evidencian posiblemente el aumento de zonas con actividades mineras en el área de estudio, nuestra investigación arroja resultados precisos y fundamentales de ayuda a conformar estrategias y políticas de mitigación por los impactos que causa la minería aurífera en la cuenca media del río Atrato.

## 7. CONCLUSIONES

En general, este estudio evaluó las concentraciones de metales pesados en vegetales y peces, habitualmente consumidos por los habitantes de la cuenca media del río Atrato; se identificó altas concentraciones en vegetales de As, Hg, Pb, y Cd que sobrepasaron el límite del (Codex, 1995; U.E, 2016). En los peces, las concentraciones de los metales se presentaron el siguiente orden Hg, As, Cd y Pb, de igual manera, excedieron el límite del (Codex, 1995; U.E, 2016).

La evaluación de riesgos señala que el peligro en la población se debe a la contaminación de As, MeHg y THg en ciertos alimentos. Se reconoce riesgo carcinogénico en los

pobladores de la cuenca media del Atrato a largas exposiciones de As por el consumo de peces *A. pardalis*, *R. quelen*, *L. muyscorum*, *H. hondae*, *P. magdalenae*, *C. beani*, *H. malabaricus*, *T. fisheri*, *S. aequilabiatus*, *C. umbrifera*, *A. fasciatus*, *C. kraussii*, *G. Pellegrini*, sin embargo el municipio de Bojayá no presenta riesgo de esta clase.

Los valores de esta evaluación demuestran que no existe un alto riesgo carcinogénico por el consumo de vegetales contaminados con As y Pb en la cuenca media del río Atrato. Sin embargo, los resultados en peces contaminados con As se evidencia un riesgo por el consumo de estos en especies como: *A. pardalis*, *R. quelen*, *L. muyscorum*, *H. hondae*, *P.s magdalenae*, *C. beani*, *H. malabaricus*, *T. fisheri*, *S. aequilabiatus*, *C. umbrifera*, *A. fasciatus*, *C. kraussii*, *G. Pellegrini*.

Algunas especies de peces han excedido el consumo recomendado (MFW) *C. beani*, *P.schultzi*, *H.malabaricus*, *T fisheri*, *A. pardalis*, *S. aequilabiatus*, *R.quelen* *C. atratoensis*, *C. kraussii*, el peligro por el consumo excesivo está presente en las elevadas concentraciones de THg y MeHg que presentan estas especies. La especie *P. magdalenae* de alto consumo por los ribereños de la cuenca media no excedió los límites recomendados de consumo.

El análisis del índice de contaminación (Pi) estudiado para los municipios de Medio Atrato, Bojayá, Vigía del fuerte y Murindó de la zona media de la cuenca del río Atrato, determino que, la población adulta y de condición vulnerable donde encontramos niños, madres gestantes y adulto mayores, poseen un riesgo a la salud por los altos contenidos de THg y MeHg en sus alimentos.

La exposición combinada de los cuatro metales a través del consumo de peces, frutas y verduras probablemente conduciría a exceder la RfD para la población de la cuenca media del Atrato. Es pertinente realizar otros estudios de múltiple exposición de tóxicos encontrados en los alimentos más consumidos por los pobladores de la cuenca media. Las elevadas concentraciones de algunos de los metales analizados en alimentos y el riesgo carcinogénico que tienen las poblaciones, hace que el presente estudio haga un llamado para la construcción de posibles alternativas alimentarias a la población, al igual que se acuda a la reactivación de nuevos proyectos productivos como alternativas socioeconómicas para (OMS y FAO).

El soporte científico evidencia el aumento de la contaminación de metales pesados en zonas vulnerables, claramente está comprometida la salud y seguridad de estos ecosistemas, planteamos realizar monitoreo de estos tóxicos, y se permita adelantar acciones de mitigación en esta zona de gran biodiversidad del planeta, garantizando lo que se pretende por parte de los objetivos del desarrollo sostenibles (1,2, 3, 6, 13 y 15).

## REFERENCIAS

- Adimalla, N. 2019. Distribución espacial, exposición y evaluación del riesgo potencial para la salud de nitrato en el agua potable de la región semiárida del sur de la India. *Riesgo humano y ecológico Evaluación: An International Journal*.
- Alamdard A, Ali S, Waqar S, Sohail M, Bhowmik A, Cincinelli A. 2016. Human Arsenic exposure via dust across the different ecological zones of Pakistan. *Ecotoxicol Environ Saf*; 126:219–227.
- Alamdard A, Eqani S, Hanif N, Ali S, Fasola M, Bokhari H. 2017. Human exposure to trace metals and arsenic via consumption of fish from river Chenab, Pakistan and associated health risks. *Chemosphere*; 168:1004–1012.
- Alcala-Orozco, M., Caballero-Gallardo, K. y Olivero-Verbel, J. 2020. Biomonitorio de Mercurio, Cadmio y Selenio en Peces y Población de Puerto Nariño, Esquina Sur de la Amazonía Colombiana. *Archivos de Toxicología y Contaminación Ambiental*, 79 (3), 354-370.
- Alonso, D. L., Latorre, S., Castillo, E., & Brandão, P. F. 2014. Environmental occurrence of arsenic in Colombia: A review. *Environmental pollution*, 186, 272-281.
- Al-Saleh, I., & Abduljabbar, M. 2017. Heavy metals (lead, cadmium, methylmercury, arsenic) in commonly imported rice grains (*Oryza sativa*) sold in Saudi Arabia and their potential health risk. *International journal of hygiene and environmental health*, 220(7), 1168–1178.
- Amador, L. R. T., Martínez, F. D. G., Hernández, L. J. M., Vergara, L. A. W., & Suárez, J. N. C. 2015. Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud. *Revista Nacional de Odontología*, 11(21).
- Amiri Qandashtani Roya & Mohamadi Sani Ali .2016. Metales pesados en muestras de arroz en el mercado Torbat-Heidarieh, Irán, Aditivos alimentarios y contaminantes: Parte B.
- Andrade-C G. 2011. Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Revista*

- de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 35(137): 491-507.
- Argumedo, C. D. 2021. Bioconcentration of heavy metals (Zn, Hg, Pb) in tissues of *Ariopsis felis* and *Diplodus annularis* in the Ranchería river, Northern Colombia. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 68(2), 124-136.
- Arostegui, V. 2017. Determinación de los niveles de concentración de mercurio en suelos y plátano *musa cultivar aab*, sub grupo *plantain*, en Sarayacu, Punkiri Chico e Iberia. Perú: Universidad Nacional Amazonica Madre de Dios.
- Asociación de Químicos Analíticos Oficiales. Método oficial 999.11. En AOAC Official Methods de Análisis; Gaithersburg, MD, USA, 2000.
- Barragán, O. L. 2008. Estudio de diferentes metodologías para determinar la biodisponibilidad de cadmio y arsénico en suelos y su relación con la concentración en plantas. Obtenido de Unicol mayor: [http://www.unicolmayor.edu.co/invest\\_nova/NOVA/NOVA9\\_ART4\\_CADMIO.pdf](http://www.unicolmayor.edu.co/invest_nova/NOVA/NOVA9_ART4_CADMIO.pdf)
- Barraza-Martín, h. 2018. Análisis cuantitativo de metales pesados en pescados para exportación a la unión europea, Trabajo de grado de Maestría, Facultad de Ciencias veterinarias, -UNCPBA, Argentina.
- Barraza-Martín, h. 2018. Análisis cuantitativo de metales pesados en pescados para exportación a la unión europea, Trabajo de grado de Maestría, Facultad de Ciencias veterinarias, -UNCPBA, Argentina.
- Beltrán, M., & Gómez, A. (2015). Heavy metals (Cd, Cr and Hg): impact on environment and possible biotechnological strategies for remediation. *Investigación, Innovación e ingeniería*, 82-112.
- Bi, CJ; Zhou, Y.; Chen, ZL; Jia, JP; Bao, 2018. metales pesados XY e isótopos de plomo en suelos, polvo de carreteras y vegetales de hojas y riesgos para la salud a través del consumo de vegetales en las áreas industriales de Shanghái, China. *ciencia Entorno Total*, 619, 1349–1357.
- Blasco, J., Chapman, P. M., Campana, O., & Hampel, M. (2016). *Marine Ecotoxicology: Current Knowledge and Future Issues*. London, United States: Elsevier.
- Bogard, J. R., Thilsted, S. H., Marks, G. C., Wahab, M. A., Hossain, M. A., Jakobsen, J., & Stangoulis, J. 2015. Nutrient composition of important fish species in Bangladesh and potential contribution to recommended nutrient intakes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 42, 120-133.
- Burger J., Gaines K. F., Boring S., Syepfans L., Snodgrass J. y Dixon C. (2002). Metals levels in fish from the Savannah River: potential hazards to fish and other receptors. *Environ. Res.* 89, 95-97

- Caley, Julian., M, Buckley., K, A., & Jones, G. P. 2001. separating ecological effects of habitat fragmentation, degradation, and loss on coral commensals. *Ecology*, 82(12), 3435–3448.
- Canham, R., González-Prieto, A. M., & Elliott, J. E. 2021. Mercury exposure and toxicological consequences in fish and fish-eating wildlife from anthropogenic activity in Latin America. *Integrated environmental assessment and management*, 17(1), 13-26.
- Castañeda-Chávez, MdR; Lango-Reynoso, F.; NavarreteRodríguez, G.; Wakida-Kusunoki, AT .2021. Concentración de metales en especies nativas e invasoras de peces en el sistema fluvial-lagunero-deltaico del río Palizada, Campeche.
- Castellanos, A., Chaparro-Narváez, P., Morales-Plaza, CD, Alzate, A., Padilla, 445 J., Arévalo, M., Herrera, S. 2016. Malaria en zonas mineras de oro en Colombia. 446 *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*. 111, 59-66
- Caviedes, D., Muñoz, R., Gualtero, A., Rodrigiez, D., & Sandoval, I. 2015. Tratamiento para la remoción de metales pesados comunmente presente en aguas residuales industriales. Colombia : *Revista Ingeniería y Región*.
- Chen, Y., Hu, W., Huang, B., Weindorf, D. C., Rajan, N., Liu, X., & Niedermann, S. 2013. Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production systems of China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 98, 324–330.
- Cheng, Z., Lam, C. L., Mo, W. Y., Nie, X. P., Choi, W. M., Man, Y. B., & Wong, M. H. 2016. Food wastes as fish feeds for polyculture of low-trophic-level fish: bioaccumulation and health risk assessments of heavy metals in the cultured fish. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8), 7195-7203.
- Chien, LC-C., Hung, TC-C., Choang, K.-Y., Yeh, C.-Y., Meng, P.-J., Shieh, M.-J., 465 Han, B.-C. 2002. Ingesta diaria de TBT, Cu, Zn, Cd y As para pescadores en 466 Taiwán. *Ciencia Entorno Total*. 285, 177-185.
- Codex Stand . 1995. Norma general del codex para los contaminantes y las tóxicas presentes en los alimentos. Recuperado de: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/livestockgov/documents/CXS\\_193s.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf)
- Conde Puertas, E., Conde Puertas, E., & Carreras Blesa, C. (2015). Evaluación de la ingesta de pescado en población gestante en relación a la exposición al metilmercurio. *Nutricion Clinica y Dietetica Hospitalaria*, 35(3), 66-73.
- Cordeiro, F., Gonçalves, S., Caldéron, J., Robouch, P., Emteborg, H., Coneely, P., Tumba- Tshilumba, M.F., Kortsen, B., de la Calle, B., 2013. IMEP-115: Determinación del metilmercurio en los alimentos de origen marino (edición de febrero de 2013).

- Cordy, P., Veiga, M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., Garcia, O., Roeser, M. 2011. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of the Total Environment*, 410–411, 154–160.
- De Paula Gutierrez, B., & Agudelo, C. A. R. (2020). Fish as bioindicators: coal and mercury pollution in Colombia's ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 27541-27562.
- Dhanakumar S., Solaraj G. y Mohanraj R. 2015. Heavy metal partitioning in sediments and bioaccumulation in commercial fish species of three major reservoirs of river Cauvery delta region, India. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 113, 145-151.
- Dong J, Mao WH, Zhang GP, Wu FB, Cai Y (2007) Excreción de raíces y tolerancia de las plantas a la toxicidad del cadmio: una revisión. *Planta Suelo Medio ambiente* 53(5):193–200
- Doria-Argumedo C. 2021. Bioconcentración de metales pesados (Zn, Hg, Pb) en tejidos de *Ariopsis feliz* y *Diplodus anularis* en el río Ranchería, al norte de Colombia. *Rev Med Vet Zoot.* 68 (2): 124-136. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v68n2.98025>
- Duque, G., Cartagena, C., Marrugo-Negrete, J., Montoya, M., Sánchez, I., Mahecha, H., Wills, A., Olivares-Tenorio, M., 2015. INS/ERIA. Instituto Nacional de Salud. Grupo de Evaluación de Riesgos en Inocuidad de Alimentos. "Evaluación de riesgo de mercurio en peces de aguas continentales en Colombia" [https://www.researchgate.net/publication/309679739\\_Evaluacion\\_de\\_riesgo\\_de\\_mercurio\\_en\\_peces\\_de\\_aguas\\_continentalas\\_en\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/309679739_Evaluacion_de_riesgo_de_mercurio_en_peces_de_aguas_continentalas_en_Colombia). Accessed 21/07/2020.
- Duque, G., Marrugo, J., Suárez, H., & Olivares, M. 2016. Evaluación de riesgo de mercurio en peces de aguas continentales en Colombia. *Bogotá: Instituto Nacional de Salud*.
- Edogbo, B., Okolocha, E., Maikai, B., Aluwong, T., & Uchendu, C. 2020. Risk analysis of heavy metal contamination in soil, vegetables and fish around Challawa area in Kano State, Nigeria. *Scientific African*, 7, e00281.
- Enamorado-Montes, G., Reino-Causil, B., Urango-Cardenas, I., Marrugo-Madrid, S., & Marrugo-Negrete, J. 2021. Mercury Accumulation in Commercial Varieties of *Oryza sativa* L. Cultivated in Soils of La Mojana Region, Colombia. *Toxics*, 9(11), 304.
- EPA, 1998. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Método 7473 (SW-846). Mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica". Washington DC. (1998).

- European Food Safety Authority (efsa). 2015. Recuperado de: <http://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/metals>
- FAO/OMS, 2017. Organización conjunta para la agricultura y la alimentación/organización mundial de la salud comité de expertos en aditivos alimentarios. Resumen y conclusiones de las reuniones del Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios. <http://apps.who.int/foodadditives-contaminants-jecfa-database/Search.aspx>, Fecha de acceso: diciembre de
- Fasinu, PS, Orisakwe, OE, 2013. Contaminación por metales pesados en África subsahariana y posibles implicaciones en la epidemiología del cáncer. Pac asiático. J. Cáncer Anterior. APJCP 14 (6), 3393–3402.
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. In *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 26, pp. 141-153). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.
- Figueroa, R., Caicedo, D., Echeverry, G., Peña, M., & Méndez, F. (2017). Condición socioeconómica, patrones de alimentación y exposición a metales pesados en mujeres en edad fértil de Cali, Colombia. *Biomédica: Revista del Instituto Nacional de Salud*, 37(3).
- FishBaseFishBase[DocumentoWWW].URL <http://www.fishbase.org/search.php>2020
- Frías Espericueta M. G., Osuna López J. I., Izaguirre Fierro G., Aguilar Juárez M. y Voltolina D. 2010. Cadmio y Plomo en organismos de importancia comercial de la zona costera de Sinaloa, México: 20 años de estudios. *CICIMAR Oceanides*. 25, 27-39.
- Fuentes-Gandara, F., Pinedo-Hernández, J., Marrugo-Negrete, J. y Diez, S. 2018. Impactos en la salud humana de la exposición a metales a través del consumo extremo de pescado del Mar Caribe colombiano. *Geoquímica ambiental y salud*, 40 (1), 229-242.
- Fytianos, K., Katsianis, G., Triantafyllou, P., & Zachariadis, G. 2001. Accumulation of heavy metals in vegetables grown in an industrial area in relation to soil. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 67(3), 423–430.
- Gan, Y., Wang, L., Yang, G., Dai, J., Wang, R. y Wang, W. 2017. Múltiples factores impactan el contenido de metales pesados en vegetales en áreas de alta naturaleza en China. *Quimiosfera*, 184, 1388–1395.
- Genthe, B., Kapwata, T., Le Roux, W., Chamier, J., & Wright, C. Y. 2018. The reach of human health risks associated with metals/metalloids in water and vegetables along a contaminated river catchment: South Africa and Mozambique. *Chemosphere*, 199, 19.
- Goldman, L. R., Shannon, M. W., & American Academy of Pediatrics: Committee on Environmental Health. 2001. Technical report: mercury in the environment: implications for pediatricians. *Pediatrics*, 108(1), 197–205.

- Guadie, A., Yesigat, A., Gatew, S., Worku, A., Liu, W., Ajibade, F. O., & Wang, A. 2020. *Evaluating the health risks of heavy metals from vegetables grown on soil irrigated with untreated and treated wastewater in Arba Minch, Ethiopia*. *Science of The Total Environment*, 143302. doi:10.1016/j.scitotenv.143302.
- Gutiérrez, H., Marrugo, J., Díez, S., Morales, G., Montoya, L., Jonathan, M.P., 2020. Distribution of chemical forms of mercury in sediments from abandoned ponds created during former gold mining operations in Colombia. *Chemosphere* 127319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127319>.
- Heredia, D. R. (2017). Occupational poisoning due to heavy metals. *MediSan*, 21(12), 3372-3385.
- Herforth, A., Arimond, M., Alvarez-Sanchez, C., Coates, J., Christianson, K., Muehlhoff, EA, 2019. Revisión global de las pautas dietéticas basadas en alimentos. *Nutrición avanzada* 10 (4), 590–605.
- Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia (2004 y continuamente actualizado). Colecciones en Línea. Publicado en Internet <http://www.biovirtual.unal.edu.co> [accesado el 29 de marzo de 2011]
- Irmez, G., Fisberg, RM, Nogueira Previdelli, A., Hermes Sales, C., Kovalskys, I., Fisberg, M., Elans Study Group, O., 2019. Calidad dietética y diversidad dietética en países latinoamericanos: resultados del Estudio Latinoamericano de Nutrición y Salud (ELANS). *Nutrientes* 11 (7), 1605.
- Järup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.* 2003;68(1):167–182.
- 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
- Jomova K, Valko M. 2011. Avances en el estrés oxidativo inducido por metales y las enfermedades humanas. *Toxicología*; 283: 65–87.
- K. Dhama, S. Hassan, S. Ullah, Niveles de metales pesados en dos especies de pescado consumidas en el distrito inferior DIR, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistán, Pak. *J. Biol. ciencia* 19 (2016) 115–121, doi:10.3923 / pjbs.2016.115.121.
- Kim, K.-H., Kabir, E., & Jahan, S. A. 2016. A review on the distribution of Hg in the environment and its human health impacts. *Journal of Hazardous Materials*, 306, 376–385. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.11.031
- Lara-Rodríguez, J. S., Furtado, A. T., & Altimiras-Martin, A. 2020. Minería del platino y el oro en Chocó: pobreza, riqueza natural e informalidad. *Revista de Economía Institucional*, 22(42), 241-268.

- Lehotay, S. J. 2018. Food safety analysis. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 410(22), 5329-5330.
- Lehotay, S. J. 2018. Food safety analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(22), 5329–5330. doi:10.1007/s00216-018-1129-0.
- Lescord, G. L., Johnston, T. A., Heerschap, M. J., Keller, W. (Bill), Southee, F. M., O'Connor, C. M., ... Gunn, J. M. 2020. Arsenic, chromium, and other elements of concern in fish from remote boreal lakes and rivers: Drivers of variation and implications for subsistence consumption. *Environmental Pollution*, 259, 113878. doi:10.1016/j.envpol.2019.113878.
- Li, Y., Wang, Y., Gou, X., Su, Y. y Wang, G. 2016. Riesgo evaluación de metales pesados en suelos y vegetales alrededor de sitios de minería y fundición de metales no ferrosos, Baiyin, China. *Revista de Ciencias Ambientales*, 18 (6), 1124-1134.
- Izquierdo, M. F., Herrera, C. D., Celis, C. A., Pombo, L. M., Teherán, A. A., Piñeros, L. G., Rodríguez, O. E. 2020). *Contamination of staple crops by heavy metals in Sibaté, Colombia. Heliyon*, 6(7), e04212. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04212 10.1016/j.heliyon.2020.e04212.
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz-García, F. G. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153.
- Lorenzo-Márquez, H., Torres-Dosal, A., Barba Macías, E., Ilizaliturri Hernández, C. A., Martínez-Salinas, R. I., Morales López, J. J., & Sánchez Moreno, I. 2016. Estimación de riesgo de exposición a metales pesados por consumo de plecos (*Pterygoplichthys* spp.) en infantes de comunidades ribereñas de los ríos Grijalva y Usumacinta, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 153-164.
- Luginaah IN, Gorey KM, Oiamo TH, Tang KX, Holowaty EJ, Hamm C, 2012. A geographical analysis of breast cancer clustering in southern Ontario: generating hypotheses on environmental influences. *Int J Environ Health Res.*;22(3):232-48.
- Maha Ahmed y Mohamed Abdallah., (2008). *Trace element levels in some commercially valuable fish species from coastal waters of Mediterranean Sea, Egypt.* , 73(1-2), 114–122. doi:10.1016/j.jmarsys.2007.09.006.
- Marini, M., Angouria-Tsorochidou, E., Caro, D., & Thomsen, M. 2020. *Daily intake of heavy metals and minerals in food – a case study of four Danish dietary profiles. Journal of Cleaner Production*, 124279. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124279
- Marrugo-Negrete, J., Vargas-Licona, S., Ruiz-Guzmán, J. A., Marrugo-Madrid, S., Bravo, A. G., & Díez, S. 2020. Human health risk of methylmercury from fish consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environmental research*, 182, 109050.

- Marrugo-Negrete, Ruiz-Guzmán, J., Ruiz-Fernández, A., 2018. Biomagnification of mercury en peces de dos pantanos tropicales afectados por la minería aurífera en el norte de Colombia. *Arco. Rein. contacto Toxicol.* 74 (1), 121–130.
- Martorell I, Perelló G, Martí-Cid R, Llobet JM, Castell V, Domingo JL 2011. Exposición humana al arsénico, cadmio, mercurio y plomo de los alimentos en Cataluña, España: tendencia temporal. *Biol Trace Elem Res* 142: 309 – 322.
- Mielcarek, K., Nowakowski, P., Puścion-Jakubik, A., Gromkowska-Kępa, K. J., Soroczyńska, J., Markiewicz-Żukowska, R., Naliwajko, S. K., Grabia, M., Bielecka, J., Żmudzińska, A., Moskwa, J., Karpińska, E., & Socha, K. (2022). Arsenic, cadmium, lead and mercury content and health risk assessment of consuming freshwater fish with elements of chemometric analysis. *Food chemistry*, 379, 132167
- Ministerio de Salud y Protección Social, 2012. "Resolución 122 de 2012". <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30033961>.
- 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.
- Mojica, C., Usma, S., Galvis, G., 2004. Peces dulceacuícolas en el Chocó Biogeográfico-Catálogo. Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico / Costa Pacífica. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, págs. 725-744.
- Muñoz L, García L, Rodríguez M. 2012. Percepción sobre daños a la salud y utilidad de medidas de protección de personas expuestas ocupacionalmente al mercurio en la minería del oro. *Rev. Lasallista Investig*; 9(1): p. 53-61.
- Naeem, N., Salam, A., Tahir, S., & Rauf, N. (2011). The effect of fish size and condition on the contents of twelve essential and non essential elements in *Aristichthys nobilis*. *Pakistan Veterinary Journal*, 31(2), 109–112.
- Nag, R., & Cummins, E. (2022). Human health risk assessment of lead (Pb) through the environmental-food pathway. *The Science of the total environment*, 810, 151168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151168>
- Nava-Ruíz, C. & Méndez-Armenta, M., 2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16(3), pp.140–147.
- 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;202:54–164.
- Nieves, Y., Parra, N., & Villanueva, S. 2019. Biorremediación: Enemigo del Cadmio. *Ingeniería UC*, 96-104

- Olivero Verbel, J. 2002. "El lado gris de la minería del oro: La contaminación con mercurio en el norte de Colombia" Universidad de Cartagena. Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas. Grupo de Química Ambiental y computacional, Colombia.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) .2000. Líder. En: Evaluación de seguridad de ciertos aditivos alimentarios y contaminantes. 53ª reunión del Comité Mixto FAO / OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA). Serie de aditivos alimentarios de la OMS No. 44. Ginebra: OMS
- Orisakwe, O. E. 2020. The cost of civilization. *Current Opinion in Toxicology*, 22, iii-v.
- Ortega-Lara, A., Milani, N., DoNascimento, C., Villa-Navarro, F., & Maldonado-Ocampo, J. A. 2011. Two new trans-Andean species of *Imparfinis* Eigenmann & Norris, 1900 (Siluriformes: Heptapteridae) from Colombia. *Neotropical Ichthyology*, 9(4), 777-793.
- Ovayolu, A., Ovayolu, G., Karaman, E., Yuce, T., Ozek, M. A., & Turksoy, V. A. 2019. Amniotic fluid levels of selected trace elements and heavy metals in pregnancies complicated with neural tube defects. *Congenital Anomalies*.
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. 2020. Water contamination by heavy metals, analysis methods and removal technologies. A review. *Entre Ciencia E Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Palacios-Torres, Y., Caballero-Gallardo, K., Olivero-Verbel, J., 2018. Mercury pollution by gold 798 mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*. 193, 421-430.
- Palacios-Torres, Y., de la Rosa, J. D., & Olivero-Verbel, J. 2020. Trace elements in sediments and fish from Atrato River: an ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific. *Environmental pollution (Barking, Essex:1987)*, 256,113290.
- Palomino-Ángel, S., Anaya-Acevedo, J. A., Simard, M., Liao, T. H., & Jaramillo, F. 2019. Analysis of floodplain dynamics in the Atrato River Colombia using SAR interferometry. *Water*, 11(5), 875.
- Pan, J., Plant, JA, Voulvoulis, N., Oates, CJ y Ihlenfeld, C. 2009. Niveles de cadmio en Europa: implicaciones para la salud humana. *Geoquímica ambiental y salud*, 32 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9273-2>
- Pereira P, Pablo Hd, Vale C, Pacheco M. Combined use of environmental data and biomarkers in fish (*Liza aurata*) inhabiting a eutrophic and metal-contaminated coastal system – Gills reflect environmental contamination. *Marine Environmental Research*. 2010; 69(2):53-62.

- Perelló, G., Llobet, J. M., Gómez-Catalán, J., Castell, V., Centrich, F., Nadal, M., & Domingo, J. L. 2014. Human health risks derived from dietary exposure to toxic metals in Catalonia, Spain: temporal trend. *Biological trace element research*, 162(1-3), 26–37.
- Pernia, B., Mero, M., & Cornejo, X. 2018. Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores del Estero Salado, Ecuador. *Enfoque UTE*, 89-105.
- Pinedo J, Marrugo J, Díez S. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere*. 2015;119:1289–1295.
- Pinzón-Bedoya, C. H., Pinzón-Bedoya, M. L., Pinedo-Hernández, J., Urango-Cardenas, I., & Marrugo-Negrete, J. 2020. Assessment of Potential Health Risks Associated with the Intake of Heavy Metals in Fish Harvested from the Largest Estuary in Colombia. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2921.
- PNUMA. Evaluación Mundial Sobre El Mercurio. Ginebra, Suiza: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; 2002. Available from: <http://www.chem.unep.ch/mercury/GMA%20in%20F%20and%20S/final-assessment-report-Nov05-Spanish.pdf>
- PNUMA/OMS, 2008. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Mundial de la Salud. "Guidance for Identifying Populations At Risk From Mercury Exposure". *Exposure*, (agosto), 176. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11786/IdentifyingPopnatRiskExposuretoMercury\\_2008Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11786/IdentifyingPopnatRiskExposuretoMercury_2008Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Consultado el 21/07/2020.
- Prieto, G., González, L., Vargas, O., Matamoros, A., 2018. Geoquímica de Suelos de la Cuenca del Río Bogotá-a. *Globo. Geol.* 41 (41), 41–56
- Rahman M., Binte K., Banit S., Sikder T., Akter M., Corpus S., Rahaman S., Hosokawa T., Saito T., Kurasaki M. 2019. Selenium and zinc protections against metal-(oids)-induced toxicity and disease manifestations: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*; 168: 146-163.
- Ramírez, A. V. 2013. Exposición ocupacional y ambiental al arsénico. Actualización bibliográfica para investigación científica. *An de La Facultad de Medicina.*, 74(3): 237–247.
- Ramos, C., Gracia, M. 2012. Estudio de percepción de la problemática ambiental en Arauca. *Revista Gestión y Ambiente*. Mayo; 15(1): p. 119- 128. *Revista de Economía Institucional*, 22(42), 241-268.
- Real, M. I. H., Azam, H. M., & Majed, N. 2017. *Consumption of heavy metal contaminated foods and associated risks in Bangladesh. Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12). doi:10.1007/s10661-017-6362-z

- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. 2016. Heavy metals contamination: implications for health and food safety. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Rice, K., Walker, E., Wu, M., Gillette, C., & Blough, E. 2014. Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 47(2), 74–83.
- Ríos, E. Y. C., & Incel, M. C. 2012. Anotaciones de la ecología reproductiva del Gunguma *Pimelodus* sp. en la Ciénaga El Tigre, cuenca media del río Atrato Chocó, Colombia. *Revista Bioetnia*, 9(1), 42-47.
- Rivera, A. M. Z., Melo, M. I. P., Paz, F. M., Chow, N. A., Trejos, Y. P. A., & Ordoñez, J. 2018. Estudio exploratorio de evaluación de riesgo en la salud de madres lactantes por consumo de pescado contaminado del río Cauca, en el Valle del Cauca (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 22(43).
- Rodríguez, D. 2017. Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 3372-3385.
- Rodríguez-Lado, L., Sun, G., Berg, M., Zhang, Q., Xue, H., Zheng, Q., & Johnson, C. A. 2013. Groundwater arsenic contamination throughout China. *Science (New York, N.Y.)*, 341(6148), 866–868.
- Román-Ochoa, Y., Choque Delgado, G. T., Tejada, T. R., Yucra, H. R., Durand, A. E., & Hamaker, B. R. 2021. Heavy metal contamination and health risk assessment in grains and grain-based processed food in Arequipa region of Peru. *Chemosphere*, 274,129792.
- Rosero Chaves, Y. P. 2019. *Impacto medioambiental del uso del mercurio en la minería artesanal y de pequeña escala en Colombia* (Doctoral dissertation, Universidad Santiago de Cali).
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. 2017. Dietary human exposure to mercury in two artisanal small-scale gold mining communities of northwestern Colombia. *Environment International*, 107(May), 47–54.
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. 2022. A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the colombian pacific region. *Environmental Research*, 113120.
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. 2020. Dataset of concentrations of mercury and methylmercury in fish from a tropical river impacted by gold mining in the Colombian Pacific. *Data in brief*, 33, 106513.

- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. 2021. Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere*, 264(Pt 2), 128478.
- Samsuri, AW, Tariq, FS, Karam, DS, Aris, AZ, Jamilu, G., 2021. Distribución de Fraccionamiento de metales pesados en relaves de minas de oro modificado con ceniza de cáscara de arroz sin recubrimiento y con recubrimiento de hierro. Contaminación de suelos y sedimentos. En t. J. 1–16.
- Siudek, P., Kurzyca, I., & Siepak, J. 2016. Atmospheric deposition of mercury in central Poland: sources and seasonal trends. *Atmospheric research*, 170, 14-22.
- Sol, ZH; Hu, SN; Cheng, HF 2020. Riesgo para la salud pública de la contaminación por metales tóxicos (Loid) para la población que vive cerca de una mina polimetálica de pequeña escala abandonada. *ciencia Entorno Total.*, 718, 137434.
- Soto-Benavente, M., Rodriguez-Achata, L., Olivera, M., Arostegui Sanchez, V., Colina Nano, C., & Garate Quispe, J. 2020. Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59.
- Szkoda, J.; Zmudzki, J.; Grzebalska, A. 2006. Determinación del arsénico en material biológico por el método de espectrometría de absorción atómica de generación de hidruros. *Bull. Vet. Inst. Pulawy*, 50, 269-272.
- Tagne-Fotso R, Leroyer A, HowsamM, Dehon B, Richeval C, Nisse C. Fuentes actuales de plomo Exposición y sus contribuciones relativas a los niveles de plomo en sangre en la población adulta general del norte de Francia: Estudio Imepoge, 2008-2010. *J Toxicol Environ Health A*. 2016; 79: 245-265.
- Tariq, F. S. 2021. *Heavy metals concentration in vegetables irrigated with municipal wastewater and their human daily intake in Erbil city. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16.
- Tesser, T. T., da Rocha, C. M., & Castro, D. 2021. *Metal contamination in omnivores, carnivores and detritivores fish along the Tramandaí River Basin, RS, Brazil. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100496.
- Tropicos.org. Jardín Botánico de Missouri. 29 de marzo 2011 <<http://www.tropicos.org>>;
- Unión Europea. 2016. Contenidos máximos en metales pesados en productos alimenticios. Recuperado de: <http://plaguicidas.comercio.es/MetalPesa.pdf>
- UPME, 2014. Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía – Universidad de cordoba. Estudio de la cadena de mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera del oro. <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1315>.

- USEPA, 2000. En: Agency, USEP (Ed.), Tabla de concentración basada en el riesgo. Washington, CORRIENTE CONTINUAUSEPA, 2000. Guía para evaluar datos de contaminación química para uso en pescado avisos, vol. II. Evaluación de riesgos y límites de consumo de pescado EPA/823-B94- 004. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, Washington, DC
- USEPA. , 2002. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Mercury Treatment Technologies for soil, waste and water. Office of Solid waste and Emergency Response. <https://clu-in.org/download/remed/542r07003.pd>. Consultado el 25/07/2020
- USEPA. 1989. Guía de evaluación de riesgos para el superfondo. Human health evaluation manual (Part A) (Vol. 1). Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response. <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part>.
- Vargas-Licon SP, Marrugo-Negrete JL. (2019) Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta biol. Colomb.*; 24(2):232-242.
- Vergara-Dagobeth, E., Suárez-Causado, A., & Gómez-Arias, R. D. (2017). Plan Control del cáncer en Colombia 2012-2021. Un análisis formal. *Revista Gerencia y Políticas de Salud*, 16(33), 6-18.
- Villalba Kong, G. 2019. Niveles de mercurio asociado a riesgo cardiovascular en pobladores del Distrito de Taraco, Puno. Universidad Nacional del Altiplano.
- Vives De Andrés, JB. 2009. “Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)” INVEMAR Vinculado al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Instituto de investigaciones marinas y costeras, Colombia.
- Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. 2003. Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. *Toxicology*, 192(2-3), 95-117.
- Wang, B., Du, Y., 2013. Cadmio y sus efectos neurotóxicos. *Oxid Med Cell Longev* 2013, 898034.
- Wei, J., Gao, J., & Cen, K. 2019. *Levels of eight heavy metals and health risk assessment considering food consumption by China's residents based on the 5th China total diet study. Science of The Total Environment.* doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.502.
- Wennig, R. (2000). Threshold values in toxicology — useful or not? *Forensic Science International*, 113(1-3), 323–330. Zamora-Arellano, N., Ruelas-Inzunza, J., García-Hernández, J., Ilizaliturri-Hernández, C., & Betancourt-Lozano, M. (2017). Linking fish consumption patterns and health risk assessment of mercury exposure

- in a coastal community of NW Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment*, 23(6), 1505–1521.
- WHO .1985.Guidelines for the Study of Dietary Intakes of Chemical Contaminants. WHO offset publication n° 87. Ginebra
- Xiao, W.; Vosotros, XZ; Zhang, Q.; Chen, D.; Hu, J.; Gao, N. 2018. Evaluación de la transferencia de cadmio del suelo a las hortalizas de hoja: factores influyentes, modelos de transferencia e indicación del contenido umbral del suelo. *Ecotox. Reinar. Seguro*, 164, 355–362.
- Xie, Q., Qian, L., Liu, S., Zhang, Y., & Wang, D. 2020. Assessment of long-term effects from cage culture practices on heavy metal accumulation in sediment and fish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 110-117.
- Xie, Q., Qian, L., Liu, S., Zhang, Y., & Wang, D. 2020. Assessment of long-term effects from cage culture practices on heavy metal accumulation in sediment and fish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 110-117.
- Yi, Yujun; Tang, Caihong; Yi, Tieci; Yang, Zhifeng; Zhang, Shanghong .2017. Evaluación del riesgo para la salud de los metales pesados en los peces y los patrones de acumulación en la red alimentaria en el río Yangtze superior, China. *Ecotoxicología y seguridad ambiental*, 145(), 295-302.
- Zazouli, MA, Yousefi, Z., Taghavi, M., Akbari-adergani, B. y Cheratí, JY.2013. Eliminación de cadmio de soluciones acuosas utilizando nanotubos de carbono de pared simple funcionalizados con L-cisteína. *J Mazand Univ Ciencias Médicas*, 23 (98), 37–47.
- Zhang, T., Xu, W., Lin, X., Yan, H., Ma, M., He, Z. 2019. Evaluación de la contaminación por metales pesados de los granos de soja en el norte de Anhui de China. *Sci. Total Environ.* ,646, 914-922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.335>
- Zhong, T., Xue, D., Zhao, L. y Zhang, X. 2017. Concentración de metales pesados en vegetales y evaluación de riesgos potenciales para la salud en China. *Geoquímica ambiental y salud*, 1–10
- Zhou, H., Yang, W. T., Zhou, X., Liu, L., Gu, J. F., Wang, W. L., & Liao, B. H. 2016. Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment. *International journal of environmental research and public health*, 13(3), 289.
- Zwolak, A., Sarzyaska, M., Szpyrka, E., Stawarczyk, K., 2019. Fuentes de contaminación del suelo por metales pesados y su acumulación en vegetales: una revisión. *Contaminación del suelo del aire del agua*. 230. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4221-y>.

## ANEXOS

municipio	Peces (diasxsem)	Vegetales (diasxsem)	mujeres	edad (años)	Rango edad (años)	hombres	edad (años)	Rango edad (años)
Murindó			106		15.4-82.8	69		15.2-88.8
	4.0±1.1	3.3±1.9		40.9±17.3			45.8±18.6	
Bojayá			88		15.5-79.0	70		15.0-80.3
	3.1±1.0	2.9±2.0		39.2±15.6			43.3±16.7	
Medio Atrato			123		15.0-84.7	85		15.2-84.7
	3.2±0.6	4.0±1.4		43.3±16.7			40.2±19.4	
Vigía del fuerte			129		15.1-81.7	99		15.3-88.0
	3.3±0.6	3.2±2.3		43.0±17.6			42.9±18.3	

**Anexo 1.** Características generales de la población (consumo) consumo de pescado y vegetales por municipio días/semana, tipo de población, cantidad y rango de años, presentado en medias y desviación estándar.