

**PROYECTO DE LEY: “LEY DE ERRADICACIÓN DEL MERCURIO Y DE COMBATE INTEGRAL CONTRA LA MINERÍA ILEGAL EN LA AMAZONIA”**

El grupo parlamentario de Somos Perú, a iniciativa del congresista de la República Jorge Alberto Morante Figari, en ejercicio del derecho de iniciativa legislativa que le confiere el artículo 107 de la Constitución Política del Perú, y de conformidad con los artículos 75 y 76 del Reglamento del Congreso de la República, proponen el siguiente proyecto de Ley.

**I. FORMULA LEGAL**

**El Congreso de la República**

Ha dado la Ley siguiente:

**LEY DE ERRADICACIÓN DEL MERCURIO Y DE COMBATE INTEGRAL CONTRA LA MINERÍA ILEGAL EN LA AMAZONIA**

**TÍTULO I**

**DISPOSICIONES GENERALES**

**Artículo 1. Objeto de la Ley**

La presente ley tiene por objeto erradicar el mercurio metálico de la actividad minera, combatir de manera integral la minería ilegal, debilitar las economías criminales asociadas y proteger la salud humana, los ecosistemas amazónicos y el orden público, en la Amazonía.

**Artículo 2. Ámbito de aplicación**

La presente Ley es de aplicación obligatoria en la amazonia, que comprende, los departamentos de Loreto, Madre de Dios, Ucayali, Amazonas y San Martín, así como las demás establecidas en el numeral 3.1 de la Ley N.º 27037, Ley de Promoción de la Inversión en la Amazonía.

Su ámbito de aplicación comprende, de manera expresa, los ríos, cuencas hidrográficas, cuerpos de agua, áreas naturales protegidas, territorios de pueblos indígenas u originarios y sus zonas de amortiguamiento.

**Artículo 4. Principios rectores**

La interpretación y aplicación de la presente Ley se rige por los siguientes principios:

- a) Principio de prevención;
- b) Principio de precaución;
- c) Principio de interdicción efectiva de actividades ilícitas;
- d) Principio de responsabilidad ambiental integral;
- e) Principio de protección especial de los pueblos indígenas u originarios; y,
- f) Principio de tolerancia cero frente al uso del mercurio en la actividad minera.
- g) Otros que se consideren en el reglamento de la presente Ley.

El desarrollo y alcance de estos principios se precisan en el reglamento de la presente Ley.

## TÍTULO II

### PROHIBICIÓN ABSOLUTA Y ERRADICACIÓN DEL MERCURIO

#### Artículo 5. Prohibición absoluta

Se prohíbe de manera absoluta y permanente en la Amazonía:

1. El uso, producción, comercialización, transporte, almacenamiento, distribución e importación de mercurio, cualquiera sea su forma o presentación de mercurio para fines mineros.
2. La tenencia y posesión de mercurio sin autorización expresa de la autoridad competente.

#### Artículo 6. Presunción de ilicitud

La tenencia y/o posesión de mercurio, en la Amazonía, se presume vinculada a minería ilegal, salvo prueba en contrario debidamente acreditada para fines científicos o médicos autorizados.

#### Artículo 7. Destrucción y disposición final

Todo mercurio decomisado será destruido o dispuesto de manera ambientalmente segura bajo supervisión del Ministerio del Ambiente, quedando prohibida su reutilización o reventa.

## TÍTULO III

### COMBATE PENAL REFORZADO CONTRA LA MINERÍA ILEGAL

#### Artículo 8. Agravantes penales especiales

Constituyen agravantes específicas de los delitos de minería ilegal y delitos ambientales:

1. El uso, producción, comercialización, transporte, almacenamiento, distribución e importación de mercurio sin autorización de la entidad competente.
2. La afectación a ríos amazónicos o fuentes de agua.
3. La afectación a la persona humana que depende de los ríos amazónicos o fuente de agua a que se refiere en el numeral anterior.

#### Artículo 9. Responsabilidad penal de personas jurídicas

Las personas jurídicas que directa o indirectamente financien, faciliten o encubran el tráfico de mercurio o la minería ilegal serán sancionadas con, inhabilitación permanente y decomiso de bienes.

## TÍTULO IV

### CONTROL TERRITORIAL Y SEGURIDAD

#### Artículo 10. Control fluvial, aéreo y terrestre

Las Fuerzas Armadas, la Policía Nacional y las autoridades regionales establecen puestos de control permanentes en ríos, pistas aéreas y rutas estratégicas en la Amazonía.

#### **Artículo 11. Inteligencia y trazabilidad**

Créase un sistema obligatorio de trazabilidad de insumos químicos, combustibles y maquinaria pesada en la Amazonía, el cual estará administrada por el Ministerio del Ambiente.

### **TÍTULO V**

#### **PROTECCIÓN DE POBLACIONES Y REPARACIÓN AMBIENTAL**

#### **Artículo 12. Atención sanitaria prioritaria**

Las poblaciones expuestas a mercurio tendrán acceso prioritario al diagnóstico, y considerando el resultado, al tratamiento y vigilancia epidemiológica de manera inmediata.

#### **Artículo 13. Reparación ambiental integral**

Los responsables de contaminación por mercurio, a través de la actividad minera, están obligados a financiar la remediación ambiental y/o a realizar trabajo comunitario conforme al reglamento de la presente ley.

### **TÍTULO VI**

#### **CREACIÓN DE UNIDADES DE FLAGRANCIA ITINERANTE - FLUVIAL**

#### **Artículo 14. Creación de la Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial**

Créase la Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial como parte del Sistema Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva de la Ley 32348 y como mecanismo especializado de persecución penal en zonas amazónicas, con jurisdicción en ríos, cuencas y cuerpos acuáticos de la Amazonía, para la investigación, intervención y procesamiento en flagrancia de delitos ambientales, delitos vinculados a la minería ilegal y aquellos conexos.

El funcionamiento de la Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial se regirá por la Ley 32348 y su reglamento, sin perjuicio de lo establecido en la presente Ley y su reglamento.

#### **Artículo 15. Implementación y operación multisectorial**

La Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial será implementada por el Consejo Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva, quien garantizará el funcionamiento permanente del servicio de justicia en el ámbito fluvial.

La Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial está administrada por un funcionario es designado por el presidente de la Corte Superior de Justicia y tiene el apoyo de profesionales en las áreas de estadística, contrataciones e informática, entre otras, conforme a la parte in fine del art. 13 de la Ley 32348.

#### **Artículo 16. Apoyo del Ministerio de Defensa y logística fluvial**

El Ministerio de Defensa, a través de la Marina de Guerra del Perú, destinará una embarcación fluvial para implementar la Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial, y garantizará además su seguridad mediante el despliegue de unidades navales de escolta y protección operativa, durante toda su operación.

#### **Artículo 17. Rutas, circuitos fluviales y priorización territorial**

El Ministerio de Defensa, mediante la Marina de Guerra del Perú, elaborará las rutas, circuitos y trazabilidad operativa de la Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial, priorizando la lucha contra la minería ilegal en la Amazonía y lo entregará al Consejo Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva para su evaluación y ejecución.

#### **Artículo 18. Financiamiento y sostenibilidad**

Los Gobiernos Regionales, Provinciales y Distritales comprendidos en la ruta operativa de la Unidad destinarán recursos para garantizar la continuidad, sostenibilidad y permanencia del servicio, en el marco de sus competencias presupuestarias y sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público.

#### **Artículo 19. Tecnologías para la acreditación de la flagrancia**

La Unidad Itinerante de Flagrancia Fluvial estará equipada con sistemas de video y audio de alta definición, cámaras corporales, drones de largo alcance y registros digitales encriptados, cuya finalidad será documentar la flagrancia delictiva y constituir prueba válida para el proceso penal.

#### **Artículo 20. Operación piloto**

Consejo Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva, establecerá un Proyecto Piloto de Implementación en la cuenca del río Nanay, el cual se ejecutará conforme al Reglamento de la presente Ley, dentro del plazo máximo de ciento ochenta (180) días calendario tras la entrada en vigencia de la norma.

### **TITULO VII**

#### **PRMOCION DE TECNOLOGIAS LIMPIAS, ASISTENCIA TECNICA E INCENTIVOS PARA LA ACTIVIDAD MINERA**

#### **Artículo 21. Promoción de tecnologías limpias para la actividad minera en la Amazonía**

El Ministerio de Energía y Minas promoverá el uso de tecnologías mineras libres de mercurio, metales pesados y otros insumos químicos altamente tóxicos, incentivando la adopción de procesos que reduzcan o eliminen el impacto ambiental en la Amazonía.

Asimismo, regulará los incentivos y beneficios aplicables a los operadores que implementen dichas tecnologías.

#### **Artículo 22. Asistencia Técnica para Reconversión Tecnológica**

El Ministerio de Energía y Minas, en coordinación con el Ministerio del Ambiente y los gobiernos regionales amazónicos, implementará programas de asistencia técnica para la reconversión tecnológica de la actividad minera que prescindan del uso de mercurio y otros insumos altamente tóxicos, priorizando a la minería artesanal y de pequeña escala.

## **Artículo 23. Incentivos para tecnologías limpias**

El Ministerio de Economía y Finanzas establecerá un régimen de incentivos tributarios, crediticios o de compras públicas dirigidos a personas naturales y/o jurídicas de la actividad minera, que adopten tecnologías libres de mercurio y otros insumos químicos altamente tóxicos, conforme al reglamento.

### **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS MODIFICATORIAS**

## **Artículo 24. Modificación del Código Penal**

Incorpórese como agravante autónoma en los artículos 307-A y 307-B del Código Penal el uso, producción, comercialización, transporte, almacenamiento, distribución, tráfico, financiamiento, posesión, tenencia o importación de mercurio u otro elemento químico sin autorización de la entidad competente, incrementando la pena hasta en dos tercios del máximo legal.

Incorpórese como agravantes del delito de contaminación del ambiente, establecido en el art. 305 del Código Penal, siguiente:

### **Artículo 305. Formas agravadas**

(...)

*Quando por efecto de la actividad contaminante por mercurio en actividad minera, se produzcan daños graves al ecosistema, la pena será no menor de quince (15) ni mayor de veinticinco (25) años, sin perjuicio de la reparación civil correspondiente, si:*

#### **1. Sobre el resultado**

- a) *Se impide o altera gravemente la capacidad de regeneración del ecosistema;*
- b) *Se compromete la existencia, salud o seguridad de comunidades humanas o pueblos indígenas;*
- c) *Se afecta la salud humana, flora o fauna con carácter grave o irreversible;*

#### **2. Sobre los bienes protegidos**

- a) *Se afectan recursos estratégicos de interés nacional, cuencas hídricas o áreas naturales protegidas;*
- b) *Se produce daño transfronterizo o riesgo grave transfronterizo;*

#### **3. Sobre el medio o método**

- a) *Se empleen sustancias altamente tóxicas tales como el mercurio u otros metales pesados;*

#### **4. Sobre la modalidad de ejecución**

- a) *El hecho sea masivo, sistemático o continuado, o involucre la participación de dos o más personas u organizaciones criminales;*

#### **5. Sobre el sujeto activo**

- a) *El hecho sea cometido por funcionario público en ejercicio o abuso de su cargo;*

#### **6. Sobre el territorio**

- a) *La conducta se ejecute en la Amazonía, territorios indígenas o zonas ecológicas sensibles*

### **Artículo 313 - C Responsabilidad por Omisión**

*La actividad contaminante por mercurio en actividad minera también se configura cuando el agente, teniendo el deber jurídico de evitar el daño ambiental grave, se abstiene de actuar.*

### **Artículo 313 – D: Responsabilidad de Personas Jurídicas**

*Las personas jurídicas serán administrativamente responsables cuando la actividad contaminante por mercurio en actividad minera también sea cometido en su beneficio o mediante su estructura de gestión, sin perjuicio de la responsabilidad penal individual correspondiente.*

## **Artículo 25. Modificación de la Ley de Flagrancia (Ley N° 32348)**

*Artículo 7. Miembros del Consejo Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva*

*7.1. El Consejo Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva está integrado por los siguientes miembros:*

*(...)*

*h) Ministerio de Defensa a través de la Marina de Guerra del Perú para garantizar seguridad, control territorial fluvial, transporte y soporte operacional de las Unidades Itinerantes Fluviales.*

*Artículo 12. Unidades de flagrancia delictiva*

*La Unidad de Flagrancia Delictiva es la unidad básica del Sistema Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva, que concentra en un solo espacio físico o móvil (embarcaciones fluviales acondicionadas), que permitan operar en zonas sin sede judicial permanentemente instalada, y de forma articulada a los órganos jurisdiccionales especializados en flagrancia, integrantes del Poder Judicial; a los despachos fiscales, unidades médico legales y forenses integrantes del Ministerio Público; a las unidades de investigación forense dependientes del Ministerio del Interior; al Ministerio de Justicia y Derechos Humanos mediante la prestación del servicio de defensa pública y a la Policía Nacional del Perú a través de la participación de los efectivos policiales especializados en flagrancia delictiva, áreas de criminalística e investigación, así como las áreas que resulten necesarias para el desarrollo de las diligencias pertinentes en flagrancia, en cooperación con el personal del Instituto Nacional Penitenciario (INPE)*

## **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES**

### **PRIMERA. Prevalencia normativa**

La presente ley prevalece frente a cualquier norma que permita el uso de mercurio con fines mineros.

### TERCERA. Reglamentación

El Poder Ejecutivo reglamenta la presente ley en un plazo no mayor de noventa días.

Lima, 22 de enero de 2026



Firmado digitalmente por:  
MORANTE FIGARI Jorge  
Alberto FAU 20161740128 soft  
Motivo: Soy el autor del  
documento  
Fecha: 22/01/2026 16:29:05-0500

## EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

### I. FUNDAMENTOS DE LA PROPUESTA

La problemática que motiva la presente iniciativa legislativa se vincula directamente con la persistencia y expansión de la minería ilegal en la Amazonía peruana, actividad que ha incorporado de manera sistemática el uso de mercurio como insumo principal para la recuperación de oro, generando graves impactos sobre la salud humana, los ecosistemas amazónicos y el orden público. En regiones como Loreto, Madre de Dios y Ucayali; la liberación de mercurio en ríos y suelos ha configurado un escenario de contaminación crónica que afecta cadenas tróficas completas, compromete la seguridad alimentaria de las poblaciones ribereñas y vulnera de manera particular los derechos fundamentales de los pueblos indígenas u originarios, quienes mantienen una relación de dependencia directa con los recursos hídricos y biológicos del territorio amazónico.

En el estado actual de la situación fáctica y jurídica, si bien el ordenamiento nacional reconoce la ilegalidad de la minería no autorizada y ha incorporado disposiciones orientadas a controlar el uso de insumos químicos peligrosos, dichas medidas han resultado insuficientes para erradicar efectivamente el mercurio de la actividad minera ilegal. La dispersión normativa, la débil trazabilidad de insumos, las limitaciones operativas del control territorial y la ausencia de mecanismos de justicia adaptados a la realidad fluvial amazónica han permitido la consolidación de economías criminales que operan con altos niveles de impunidad. A ello se suma que la normativa vigente no establece una prohibición absoluta y permanente del mercurio en la Amazonía, lo que ha generado vacíos aprovechados por redes ilícitas para su tráfico, almacenamiento y uso indebido.

Frente a este escenario, la propuesta normativa plantea un nuevo estado regulatorio caracterizado por la erradicación total del mercurio de la actividad minera en la Amazonía, el fortalecimiento del enfoque penal frente a la minería ilegal y la implementación de mecanismos especializados de control y persecución del delito en territorios fluviales. La prohibición absoluta del mercurio, acompañada de una presunción legal de ilicitud en su tenencia y de la destrucción ambientalmente segura del material decomisado, introduce un cambio sustantivo en la lógica de intervención estatal, orientándola hacia la prevención del daño y la ruptura de la cadena de suministro que alimenta la minería ilegal.

La necesidad de la ley se sustenta en la evidencia científica acumulada sobre los efectos del mercurio en la salud humana y el ambiente. Diversos estudios han demostrado que el mercurio liberado en ecosistemas amazónicos<sup>1</sup> se bioacumula en peces y representa un riesgo significativo para las poblaciones que dependen de ellos como principal fuente de proteína, generando afectaciones neurológicas, reproductivas y cardiovasculares, especialmente en niños y mujeres gestantes. Estas conclusiones han sido ampliamente documentadas en literatura científica indexada, que advierte además sobre la persistencia del contaminante y la dificultad de revertir sus efectos una vez liberado en el ambiente.

---

<sup>1</sup> Del Águila Chávez, J., Grandez Mori, L. R., Ruiz Angulo, L. M., Arévalo, A. A., Vásquez Chumbe, J., & Rojas Zamora, R. R. (2026). Assessment of Mercury Levels in Amazonian Fishes of the Nanay River, Loreto, Peru: Implications for Human Consumption. *Sustainability*, 18(2), 552. Pág. 10. <https://doi.org/10.3390/su18020552>

Desde una perspectiva de viabilidad, la creación de Unidades Itinerantes de Flagrancia Fluvial responde a la necesidad de adaptar la administración de justicia a la geografía amazónica, superando las barreras de acceso que históricamente han limitado la respuesta estatal en ríos y cuencas alejadas de los centros urbanos. Asimismo, la promoción de tecnologías limpias y los programas de asistencia técnica para la reconversión productiva introducen un componente de transición que favorece la formalización y reduce la dependencia de insumos altamente tóxicos.

La oportunidad de la ley se inscribe en un contexto en el que el Perú ha asumido compromisos internacionales orientados a la reducción y eliminación del mercurio, así como a la protección de la Amazonía como ecosistema estratégico frente al cambio climático. La persistencia de la minería ilegal no solo compromete estos compromisos, sino que erosiona la autoridad del Estado y profundiza la conflictividad social en territorios vulnerables. En ese sentido, la propuesta resulta oportuna al plantear una respuesta integral que combina interdicción, sanción penal reforzada, control territorial, atención sanitaria y reparación ambiental.

En cuanto al marco normativo, la iniciativa se articula con la Constitución Política del Perú, particularmente con los deberes del Estado de proteger el ambiente, garantizar el derecho a la salud y preservar la diversidad biológica. Asimismo, dialoga con el Código Penal, la legislación ambiental y las normas de flagrancia delictiva, proponiendo modificaciones puntuales orientadas a cerrar vacíos legales, reforzar agravantes penales y reconocer la responsabilidad de personas jurídicas y de funcionarios por omisión. La prevalencia normativa establecida en la propuesta asegura coherencia y evita contradicciones con disposiciones que, directa o indirectamente, pudieran permitir el uso de mercurio con fines mineros. Asimismo, fortalece y da cumplimiento al Convenio de Minamata suscrito por el Perú el 10 de octubre de 2013, aprobado con Resolución Legislativa N° 30352, y ratificado con Decreto Supremo N° 061- 2015-RE<sup>2</sup>, el 25 de noviembre de 2015.

De esa manera, consideramos que las estrategias centradas únicamente en la interdicción resultan insuficientes si no se acompañan de medidas estructurales que eliminen los insumos críticos de la minería ilegal y fortalezcan la presencia estatal en el territorio. Resulta indispensable subrayar la importancia de enfoques integrales que combinen regulación estricta, control efectivo, alternativas tecnológicas y protección de las poblaciones expuestas, criterios que se encuentran reflejados de manera consistente en la presente propuesta normativa.

Finalmente, a efectos de evidenciar científicamente, adjuntamos a la presente propuesta legislativa la investigación científica publicada en la revista internacional *Sustainability* (2026), Vol. 18, Issue 2, titulada “Assessment of Mercury Levels in Amazonian Fishes of the Nanay River, Loreto, Peru: Implications for Human Consumption”, realizada por investigadores asociados con la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), ha evidenciado la presencia de niveles elevados de mercurio total (T-Hg) en especies piscívoras que son altamente consumidas localmente, con concentraciones registradas entre 0.16 mg/kg y 3.79 mg/kg; superando en numerosos casos el límite internacional de 0.5 mg/kg considerado seguro para consumo humano.

---

<sup>2</sup> MINAM (2016), Convenio de Minamata sobre mercurio - Ratificación peruana. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/wpcontent/uploads/2018/07/Convenio-de-Minamata-sobre-Mercurio-Ratificacion-peruana.pdf>

## II. EFECTO DE LA VIGENCIA DE LA NORMA QUE SE PROPONE SOBRE LA LEGISLACIÓN NACIONAL.

La entrada en vigencia de la Ley de Erradicación del Mercurio y de Combate Integral contra la Minería Ilegal en la Amazonía producirá un efecto de fortalecimiento, coherencia y actualización del marco normativo nacional en materia ambiental, penal y de control territorial, sin generar incompatibilidades sustantivas con la legislación vigente. Por el contrario, la propuesta normativa se orienta a cerrar vacíos legales, reforzar instrumentos ya existentes y dotar de mayor eficacia a las políticas públicas dirigidas a la protección del ambiente, la salud pública y el orden interno en territorios amazónicos particularmente vulnerables.

En el ámbito del derecho ambiental, la norma propuesta consolida y desarrolla los principios de prevención, precaución y responsabilidad ambiental ya reconocidos en la legislación nacional, incorporándolos de manera específica frente al uso del mercurio en la actividad minera. La prohibición absoluta y permanente del mercurio en la Amazonía no contradice el ordenamiento vigente, sino que lo complementa, al establecer un estándar más estricto en una zona ecológicamente sensible, en concordancia con el mandato constitucional de protección reforzada del ambiente y de los ecosistemas estratégicos. En ese sentido, la ley introduce una regla de prevalencia normativa que evita interpretaciones divergentes y garantiza seguridad jurídica frente a disposiciones sectoriales que pudieran admitir, de manera excepcional, el uso de dicho elemento químico.

En materia penal, la propuesta genera un impacto directo y positivo sobre el Código Penal, al incorporar agravantes específicas vinculadas al uso de mercurio en delitos de minería ilegal y contaminación ambiental, así como al reconocer de manera expresa la responsabilidad penal y administrativa de las personas jurídicas que financien, faciliten o encubran estas actividades ilícitas. Estas modificaciones no alteran la estructura básica del sistema penal, sino que refuerzan su capacidad disuasiva y sancionadora frente a conductas que, por su gravedad y carácter sistemático, han demostrado una alta capacidad de daño ambiental y social. Asimismo, la tipificación de la responsabilidad por omisión de funcionarios públicos contribuye a fortalecer los deberes de diligencia y control en la gestión estatal.

Desde la perspectiva del sistema de justicia, la creación de Unidades Itinerantes de Flagrancia Fluvial implica una adecuación funcional de la Ley del Sistema Nacional de Justicia Especializado en Flagrancia Delictiva, ampliando su alcance operativo a contextos geográficos donde la ausencia de sedes judiciales permanentes ha limitado históricamente el acceso efectivo a la justicia. Este ajuste normativo no supone una duplicidad institucional, sino una extensión razonable y necesaria de los mecanismos existentes, permitiendo una respuesta inmediata frente a delitos ambientales y conexos cometidos en ríos y cuencas amazónicas.

En el ámbito de la seguridad y el control territorial, la norma refuerza las competencias de las Fuerzas Armadas, la Policía Nacional y las autoridades regionales, articulando sus funciones dentro de un marco legal claro que legitima la instalación de puestos de control fluvial, aéreo y terrestre, así como la implementación de sistemas de trazabilidad de insumos críticos. Este enfoque contribuye a una mejor coordinación interinstitucional y evita la superposición de esfuerzos dispersos, alineándose con la legislación sobre lucha contra el crimen organizado y control de economías ilícitas.

Asimismo, la ley propuesta incide de manera complementaria en la legislación sectorial vinculada a la actividad minera, al promover la adopción de tecnologías limpias y programas de

reconversión productiva, sin imponer cargas normativas desproporcionadas ni afectar derechos adquiridos de operadores formales. Por el contrario, introduce incentivos y asistencia técnica que permiten una transición progresiva hacia prácticas compatibles con los estándares ambientales nacionales e internacionales, reforzando el principio de desarrollo sostenible consagrado en el ordenamiento jurídico peruano.

En conjunto, la vigencia de la norma propuesta no deroga de manera indiscriminada la legislación existente, sino que la integra y perfecciona, generando un efecto sistémico orientado a elevar los niveles de protección ambiental, fortalecer la persecución penal de la minería ilegal y garantizar una presencia estatal más efectiva en la Amazonía. De este modo, la propuesta contribuye a la coherencia interna del sistema jurídico nacional y a la materialización de los fines esenciales del Estado en territorios históricamente afectados por actividades ilícitas de alto impacto.

### III. ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

El análisis costo–beneficio de la presente propuesta normativa evidencia que los beneficios sociales, ambientales, sanitarios e institucionales derivados de su implementación superan ampliamente los costos económicos y administrativos asociados a su ejecución. La erradicación del mercurio y el combate integral contra la minería ilegal en la Amazonía no solo constituyen una intervención necesaria desde el punto de vista ambiental y de salud pública, sino también una medida económicamente racional frente a los elevados costos que actualmente asume el Estado por los efectos acumulativos de la contaminación, la degradación de ecosistemas y la expansión de economías ilícitas.

Desde la perspectiva de los costos, la vigencia de la norma implica principalmente gastos vinculados al fortalecimiento del control territorial, la implementación de sistemas de trazabilidad de insumos, el funcionamiento de las Unidades Itinerantes de Flagrancia Fluvial y la ejecución de acciones de interdicción, monitoreo ambiental y atención sanitaria prioritaria. No obstante, dichos costos no suponen una creación indiscriminada de nuevas estructuras administrativas ni una demanda significativa de recursos adicionales al Tesoro Público, en tanto la propuesta se apoya en entidades, competencias y presupuestos ya existentes, promoviendo una articulación más eficiente de los recursos del Estado y la participación presupuestaria de los gobiernos regionales y locales dentro de sus ámbitos de competencia.

En contraste, los beneficios económicos y sociales de la norma son sustanciales y de carácter estructural. La reducción progresiva de la contaminación por mercurio disminuye de manera significativa los costos futuros asociados a la atención médica de poblaciones expuestas, al tratamiento de enfermedades neurológicas, cardiovasculares y del desarrollo infantil, así como a la pérdida de productividad laboral derivada de dichas afecciones. Asimismo, la protección de los recursos hidrobiológicos y de las cuencas amazónicas contribuye a preservar actividades económicas lícitas como la pesca artesanal, el ecoturismo y el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad, que constituyen fuentes de ingreso esenciales para las comunidades locales.

Desde un enfoque ambiental, la prevención del daño resulta económicamente más eficiente que los procesos de remediación posteriores, los cuales suelen ser altamente costosos, técnicamente complejos y, en muchos casos, de eficacia limitada. La erradicación del mercurio evita la generación de pasivos ambientales de largo plazo que comprometerían recursos públicos futuros y reducirían el valor económico y ecológico de territorios estratégicos para el país. En ese

sentido, la norma genera un beneficio intergeneracional al proteger el capital natural amazónico y asegurar su disponibilidad para usos sostenibles a largo plazo.

En el plano institucional y de seguridad, el debilitamiento de las economías criminales asociadas a la minería ilegal produce beneficios indirectos relevantes, al reducir los costos vinculados a la violencia, la corrupción, el lavado de activos y la informalidad persistente. El fortalecimiento de la presencia estatal y de la capacidad de respuesta del sistema de justicia en territorios fluviales contribuye a restaurar la confianza ciudadana en las instituciones y a mejorar la gobernabilidad en zonas históricamente afectadas por la ausencia del Estado, generando un entorno más favorable para la inversión pública y privada lícita.

Finalmente, el análisis costo–beneficio de la propuesta debe valorarse también desde una perspectiva de cumplimiento de compromisos internacionales y reputación país. La adopción de medidas firmes para eliminar el mercurio y proteger la Amazonía refuerza la posición del Perú en la comunidad internacional, facilita el acceso a cooperación técnica y financiera, y reduce el riesgo de sanciones comerciales o ambientales derivadas del incumplimiento de estándares internacionales. En conjunto, la norma propuesta representa una inversión pública estratégica cuyos beneficios económicos, sociales y ambientales superan de manera clara y sostenida los costos asociados a su implementación.

#### IV. INCIDENCIA AMBIENTAL

La incidencia ambiental de la norma propuesta es directa, positiva y de carácter estructural, en la medida en que se orienta a prevenir, reducir y revertir los impactos negativos generados por el uso de mercurio y por la minería ilegal en los ecosistemas amazónicos. La erradicación absoluta de este insumo químico en la Amazonía constituye una medida de alto impacto preventivo, al atacar la principal fuente de contaminación persistente que afecta ríos, sedimentos, suelos y cadenas tróficas, cuyos efectos se prolongan en el tiempo y resultan particularmente difíciles de remediar una vez producidos.

La vigencia de la ley contribuirá de manera significativa a la protección de los recursos hídricos amazónicos, al reducir la descarga directa e indirecta de mercurio en ríos y cuencas, evitando su transformación en metilmercurio, compuesto altamente tóxico que se bioacumula en organismos acuáticos y se biomagnifica a lo largo de la cadena alimentaria. Esta medida resulta especialmente relevante en regiones donde la pesca constituye una actividad central para la subsistencia y la seguridad alimentaria de las poblaciones locales, ya que la disminución de la contaminación permitirá la recuperación progresiva de especies hidrobiológicas y la mejora de la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, la norma tiene una incidencia ambiental positiva sobre los ecosistemas terrestres amazónicos, al desincentivar la deforestación, la remoción de suelos y la alteración de hábitats asociados a la minería ilegal. El fortalecimiento del control territorial y la interdicción de actividades ilícitas contribuyen a frenar la degradación de áreas naturales protegidas, zonas de amortiguamiento y territorios de pueblos indígenas u originarios, los cuales cumplen un rol fundamental en la regulación climática, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de servicios ecosistémicos esenciales.

Desde una perspectiva de salud ambiental, la propuesta genera efectos favorables al reducir la exposición crónica de las poblaciones humanas a contaminantes peligrosos, particularmente en comunidades ribereñas e indígenas que dependen de los recursos del entorno para su

alimentación y sustento. La atención sanitaria prioritaria y la vigilancia epidemiológica previstas en la ley se articulan con los objetivos de protección ambiental, al permitir identificar, mitigar y monitorear los efectos de la contaminación, reforzando un enfoque integral que reconoce la estrecha interdependencia entre la salud humana y la salud de los ecosistemas.

La promoción de tecnologías limpias y la reconversión progresiva de la actividad minera hacia prácticas libres de mercurio refuerzan la incidencia ambiental positiva de la norma, al incentivar procesos productivos menos contaminantes y compatibles con los principios de desarrollo sostenible. Este enfoque no solo reduce la presión sobre los ecosistemas amazónicos, sino que también contribuye a la internalización de costos ambientales que históricamente han sido externalizados por actividades ilegales o informales.

En términos globales, la norma propuesta fortalece la capacidad del Estado para cumplir con sus obligaciones constitucionales y compromisos internacionales en materia de protección ambiental, conservación de la Amazonía y lucha contra la contaminación por mercurio. La incidencia ambiental de la ley no se limita a la mitigación de daños actuales, sino que proyecta efectos positivos de largo plazo, orientados a la restauración ecológica, la protección del patrimonio natural y la garantía de un ambiente sano y equilibrado para las generaciones presentes y futuras.

#### V. RELACIÓN DE LA INICIATIVA CON LA AGENDA LEGISLATIVA Y CON LAS POLÍTICAS DE ESTADO EXPRESADAS EN EL ACUERDO NACIONAL




La propuesta normativa guarda relación con los instrumentos de planificación legislativa y de políticas públicas vigentes en el país, conforme se establece en el siguiente cuadro:

ACUERDO NACIONAL		
OBJETIVOS	POLÍTICAS DE ESTADO	TEMAS / PROYECTOS DE LEY
DEMOCRACIA Y ESTADO DE DERECHO	FORTALECIMIENTO DEL RÉGIMEN DEMOCRÁTICO Y ESTADO DE DERECHO	FUNCIONAMIENTO DE LOS ÓRGANOS Y ORGANISMOS DEL ESTADO.
	POLÍTICA EXTERIOR PARA LA PAZ, LA DEMOCRACIA, EL DESARROLLO Y LA INTEGRACIÓN	CONVENIOS INTERNACIONALES.
	ERRADICACIÓN DE LA VIOLENCIA Y FORTALECIMIENTO DEL CIVISMO Y DE LA SEGURIDAD CIUDADANA	MODIFICACIONES AL CÓDIGO PENAL.
	LÍTICA DE SEGURIDAD NACIONAL	FUERZAS ARMADAS Y LA SEGURIDAD NACIONAL.
III.COMPETITIVIDAD EN EL PAÍS	DESARROLLO SOSTENIBLE Y GESTIÓAMBIENTAL	MEDIDAS ANTE INCENDIOS FORESTALES Y OTROS DAÑOS GENERADOS AL MEDIO AMBIENTE.
		BÚSQUEDA DE LA IGUALDAD Y RECONOCIMIENTO EN LAS RELACIONES LABORALES.
ESTADO EFICIENTE, TRANSPARENTE Y	AFIRMACIÓN DE UN ESTADO EFICIENTE Y TRANSPARENTE	MODERNIZACIÓN Y EFICIENCIA DE LA GESTIÓN DEL ESTADO Y LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA.

DESCENTRALIZADO		TRANSPARENCIA EN EL ESTADO.
	PLENA VIGENCIA DE LA CONSTITUCIÓN Y DE LOS DERECHOS HUMANOS Y ACCESO A LA JUSTICIA E INDEPENDENCIA JUDICIAL	MODERNIZACION Y ACCESO EN EL SISTEMA DE JUSTICIA

## Article

# Assessment of Mercury Levels in Amazonian Fishes of the Nanay River, Loreto, Peru: Implications for Human Consumption

Javier Del Águila Chávez <sup>1</sup>, Lizeth Roxana Grandez Mori <sup>2</sup>, Lady María Ruiz Angulo <sup>2</sup>, Alenguer Alva Arévalo <sup>2</sup>, Jessy Vásquez Chumbe <sup>2</sup> and Rommel R. Rojas Zamora <sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Hidrobiología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), Iquitos 16004, Peru; javier.chavez@unapiquitos.edu.pe

<sup>2</sup> Facultad de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), Iquitos 16004, Peru; ladyruiz49@gmail.com (L.R.G.M.); roxanagrandezmori@gmail.com (L.M.R.A.); alenguer.alva@unapiquitos.edu.pe (A.A.A.); jessy.vasquez@unapiquitos.edu.pe (J.V.C.)

<sup>3</sup> Departamento de Ecología y Fauna, Facultad de Ciencias Biológicas, Centro de Investigación de Recursos Naturales-CIRNA, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), Iquitos 16004, Peru

\* Correspondence: rommel.rojas@unapiquitos.edu.pe

## Abstract

Mercury exposure associated with fish consumption remains a significant public-health concern in the Amazon Basin. Here, we quantified total mercury (T-Hg) in muscle of five fish species from the Alto Nanay River (Loreto, Peru) across wet and dry seasons to characterize contamination patterns and implications for human consumers. Across all species, T-Hg ranged from 0.16 to 3.79 mg kg<sup>-1</sup>. The highest mean burdens occurred in piscivores: *Pseudoplatystoma punctifer* (2.63 ± 1.03 mg kg<sup>-1</sup>, 1.60–3.66; *n* = 6) and *Cichla monoculus* (2.43 ± 0.26 mg kg<sup>-1</sup>, 2.17–2.69; *n* = 6), exceeding a widely used food-safety guideline (0.5 mg kg<sup>-1</sup>). Mean concentrations were higher in the wet season (1.68 ± 0.94 mg kg<sup>-1</sup>; *n* = 15) than in the dry season (1.31 ± 0.54 mg kg<sup>-1</sup>; *n* = 15), with a difference of 0.37 mg kg<sup>-1</sup> (≈28% increase). Linear regression analyses indicated low-moderate size-dependence of T-Hg (standard length *R*<sup>2</sup> = 0.19; total length *R*<sup>2</sup> = 0.20; total weight *R*<sup>2</sup> = 0.12; all *p* < 0.05). These findings show that two piscivorous species from the Alto Nanay frequently exceed recommended limits for safe human consumption and highlight the need for continuous monitoring and species- and size-specific fish-consumption advisories to protect Amazonian riverine communities.

**Keywords:** Amazonia; bioaccumulation; fishery; Loreto; mercury limits; Nanay River



Academic Editor: Meng Wang

Received: 13 August 2025

Revised: 30 October 2025

Accepted: 10 November 2025

Published: 6 January 2026

**Copyright:** © 2026 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and

conditions of the [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

## 1. Introduction

Mercury contamination is an escalating environmental and public-health challenge in Amazonian freshwater ecosystems, shaped by natural geochemical processes and intensifying human activities. In aquatic environments, mercury occurs as elemental (Hg<sup>0</sup>), inorganic (Hg<sup>2+</sup>), and organic species, which differ in transport, transformation, and toxicity [1]. Although geogenic inputs (e.g., rock weathering, leaching, and atmospheric deposition) sustain background levels [2], anthropogenic sources such as industrial effluents, agricultural runoff, domestic wastewater, and especially artisanal and small-scale gold mining have markedly increased mercury loads across the Amazon Basin in recent decades [3,4].

Once introduced, mercury is efficiently retained in sediments where anaerobic microorganisms, particularly sulfate- and iron-reducing bacteria, methylate inorganic  $\text{Hg}^{2+}$  to methylmercury (MeHg), the most toxic and bioavailable form [5]. The flood-pulse hydrology characteristic of Amazonian rivers, together with redox oscillations and organic-matter enrichment in blackwater tributaries, enhances methylation and sustains long-lived sedimentary reservoirs [6]. MeHg subsequently enters aquatic food webs via benthic and periphytic communities (e.g., periphyton, epilithon, episammon, epipelon), forming the trophic foundation for diverse fish assemblages [7]. Within fish tissues, MeHg binds strongly to muscle proteins, promoting bioaccumulation; concentrations thereby increase with trophic position and age, such that long-lived piscivores often exhibit the highest burdens [8].

These processes have substantial implications for Amazonian riverine populations, for whom fish can supply up to 90% of dietary protein intake [9]. In humans, MeHg is efficiently absorbed (>90%) and distributed to neural and muscular tissues; a biological half-life of ~70 days facilitates cumulative retention [10,11]. Chronic exposures exceeding  $0.1 \mu\text{g MeHg kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ —the commonly cited reference dose—have been associated with neurodevelopmental impairment, hematological alterations, and cardiovascular dysfunction [12,13]. Risks are greatest for vulnerable groups such as children and pregnant women, underscoring the need for ecosystem-based risk assessments in fish-dependent communities.

The Alto Nanay River basin (department of Loreto, northeastern Peru) is a blackwater tributary of high ecological diversity and substantial socio-economic importance. Administratively, it lies within the Alto Nanay District (Maynas Province), which comprises ~80 rural settlements, including San Juan de Ungurahual and Diamante Azul, whose livelihoods rely heavily on subsistence and artisanal fisheries. The basin faces increasing pressures from illegal gold mining, particularly suction-dredge operations (“dragas”) that resuspend contaminated sediments and re-mobilize previously sequestered mercury. Reported sediment concentrations range from 1.63 to 3.03 ppm [14], and biomonitoring indicates that ~79% of residents exceed World Health Organization reference thresholds for total mercury exposure [15]. However, temporally resolved, species-specific assessments remain scarce, limiting the capacity to trace exposure pathways and design effective mitigation.

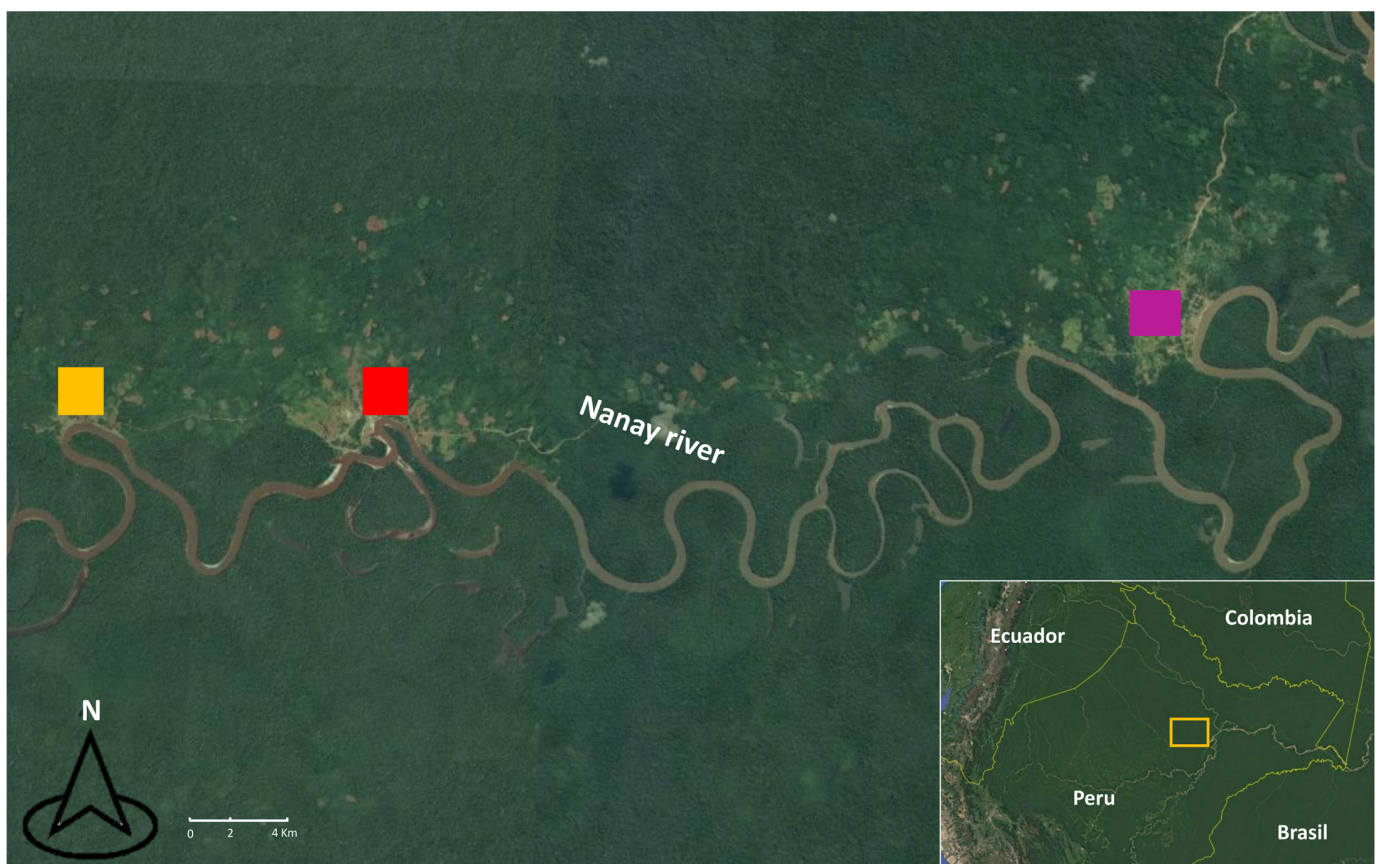
Accordingly, this study (i) quantifies total mercury (T-Hg) in dorsal muscle of five commercially important fish species from the Alto Nanay River, and (ii) evaluates potential human-health risks using estimated daily intake, Target Hazard Quotient and maximum allowable fish-consumption frequency. The findings establish a detailed baseline for the basin, identify species exceeding international safety limits, and provide evidence to inform community-based policies and sustainable fish-consumption advisories.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Sample Collection

Five commercial, commonly consumed species were sampled. A total of 30 specimens were collected, including four piscivorous species: *Hoplias malabaricus* (“fasaco”,  $n = 6$ ), *Pseudoplatystoma punctifer* (“doncella”,  $n = 6$ ), *Pimelodus blochii* (“bagre”,  $n = 6$ ), and *Cichla monoculus* (“tucunaré”,  $n = 6$ ), and one detritivorous species: *Semaprochilodus insignis* (“yaraqui”,  $n = 6$ ). The fish were captured using traditional fishing gear employed by local fishers, including gillnets and hand lines, to minimize stress and avoid biases associated with selective methods. Specimens ages were indirectly estimated from standard length and total weight, following regional growth references for each species. Juveniles were excluded from the study. The standard length, total length, total weight, of the specimens were also measured (Supplementary Material Table S1).

Sampling was conducted during the wet ( $n = 15$  specimens) and dry ( $n = 15$  specimens) seasons at three fishing sites at the Alto Nanay River basin in the Loreto department: San Juan de Ungurahual, Diamante Azul, and Santa María (Figure 1). The linear distances between sampling sites were as follows: San Juan de Ungurahual–Diamante Azul: 14.2 km; Diamante Azul–Santa María: 11.7 km; San Juan de Ungurahual–Santa María: 25.5 km. These distances encompass environmental and anthropogenic pressure gradients within the basin. The fish were euthanized in accordance with practices accepted by local communities and in compliance with ethical and cultural considerations. The specimens were then placed in insulated containers with dry ice and transported. Under temperature-controlled conditions ( $<4$  °C), five grams of skinless, boneless dorsal muscle tissue were excised using sterile instruments to prevent cross-contamination. Samples were placed in analytical-grade polyethylene bags, individually labeled, and frozen at  $-20$  °C until analysis.



**Figure 1.** Map of geographic sampling locations. A. Yellow square: San Juan de Ungurahual; red square: Diamante Azul; purple square: Santa María. Orange area is the study location. Source: Google earth.

## 2.2. Quantification and Limits of Mercury

Mercury quantification was carried out in the laboratory of the Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP) in Iquitos following previously established protocols [16]. Wet samples were used for mercury quantification. Total mercury concentrations in all samples were determined following U.S. EPA Method 7473: Mercury in Solids and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry [17]. Analyses were conducted using a Milestone DMA-80 direct mercury analyzer, which applies the aforementioned method to enable precise quantification without chemical digestion, thereby minimizing sample handling and potential contamination. Approximately 30–50 mg of homogenized tissue were weighed with a precision of  $\pm 0.001$  mg and analyzed

on both wet- and dry-weight bases to ensure comparability across standards. Samples were subjected to an oxygen stream (99.998%) under a programmed heating ramp—200 °C (60 s), 650 °C (150 s), and 850 °C (45 s)—to achieve complete combustion and release of mercury vapor. The vapor was oxidized catalytically, trapped in a gold amalgamator, and thermally desorbed for measurement at 253.7 nm via atomic absorption.

Calibration was performed using five NIST-traceable standards (0.5–100 ng Hg), yielding a linear response ( $R^2 > 0.999$ ). Analytical performance was evaluated using DORM-2 and DORM-4 certified reference materials (National Research Council Canada), with mean recoveries between 96% and 103% and relative standard deviations below 5% [18]. The method detection limit (MDL) and limit of quantification (LOQ) were  $0.003 \mu\text{g g}^{-1}$  and  $0.010 \mu\text{g g}^{-1}$ , respectively, determined according to [19]. Each batch included blanks and duplicates, and sample results were corrected for background contamination by blank subtraction. The analytical accuracy of the system was estimated at  $\pm 0.7\%$ , confirming compliance with international trace-metal quality assurance standards.

### 2.3. Risk Assessment of Mercury Exposure Through Fish Consumption

Human health risks associated with dietary exposure to mercury were assessed using three quantitative indicators: Estimated Daily Intake of mercury (EDI<sub>m</sub>), Target Hazard Quotient (THQ), and the Maximum Allowable Fish Consumption Rate per week (CR<sub>mw</sub>). These metrics were calculated following the procedures outlined by [13] in accordance with guidelines from the United States Environmental Protection Agency [20].

The estimated daily intake of Hg per meal size (EDI<sub>m</sub>) was calculated to estimate the amount of mercury ingested per meal, using the following equation:

$$\text{EDI}_m = (\text{MS} \times \text{C})/\text{BW}$$

where MS represents the standard adult portion size of 230 g [21], C is the average methylmercury concentration in fish muscle ( $\text{C} = 0.90 \times \text{total Hg}$ ) [22], and BW is the assumed adult body weight of 70 kg [23]. It was assumed that total mercury intake equaled absorption and that cooking did not alter mercury concentrations in muscle tissue [24]. Given the geographic focus on Amazonian communities in Loreto, Peru, anthropometric data from national health and demographic surveys [25,26]; indicate that in this region, the average adult body weights range between 65 and 72 kg.

The Target Hazard Quotient (THQ) is a widely used metric to evaluate non-carcinogenic health risks associated with chronic exposure to contaminants through food consumption. It was calculated as:

$$\text{THQ} = \text{EDI}_m/\text{RfD}$$

The United States Environmental Protection Agency [27] has established a reference dose (RfD) of  $0.1 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$  for methylmercury (MeHg). When THQ values exceed 1, they indicate a potential for systemic adverse effects resulting from the ingestion of fish muscle tissue [21].

The permissible frequency of fish meal consumption, based on a defined portion size and time interval, was assessed to estimate potential health risks. Specifically, for non-carcinogenic outcomes, we calculated the maximum weekly intake rate (CR<sub>mw</sub>) using [20] methodology, representing the threshold below which chronic systemic effects are not expected to occur:

$$\text{CR}_{mw} = 49/(\text{C} \times \text{MS})$$

Assuming a 70 kg adult body weight [28], the tolerable daily intake (TDI) of methylmercury is approximately  $7 \mu\text{g}/\text{day}$ , equivalent to  $49 \mu\text{g}/\text{week}$  [21]. C is the average methylmer-

cury concentration in fish muscle ( $C = 0.90 \times \text{total Hg}$ ) [28] and MS represents the standard adult portion size of 230 g [21].

#### 2.4. Data Analysis

The data were analyzed using descriptive statistical metrics of season (wet and dry), and species. We used a Wilcoxon test for statistical inference by season and adopted a  $p < 0.05$  cut-off. Mercury concentrations and morphometric data were  $\log_{10}$ -transformed to meet normality assumptions. Linear regressions were fitted with log-transformed T-Hg as the dependent variable and each metric as a predictor, including season as a categorical factor to test for seasonal effects. Models fit was evaluated using coefficients of determination ( $R^2$ ). All analyses and plots were performed in R (v4.x) using the ggplot2 package [29]. All data processing and statistical analyses were conducted using the R programming language using the standard package [30].

The mercury concentrations were evaluated against international and national safety thresholds established by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (0.5 mg/kg) [31], the European Commission regulation [32], the Peruvian Fisheries Health Agency [33], the Brazilian National Health Surveillance Agency [34], and Food Standards Australia New Zealand [35]. These benchmarks provide a comprehensive framework for assessing potential human health risks associated with fish consumption in Amazonian communities.

### 3. Results

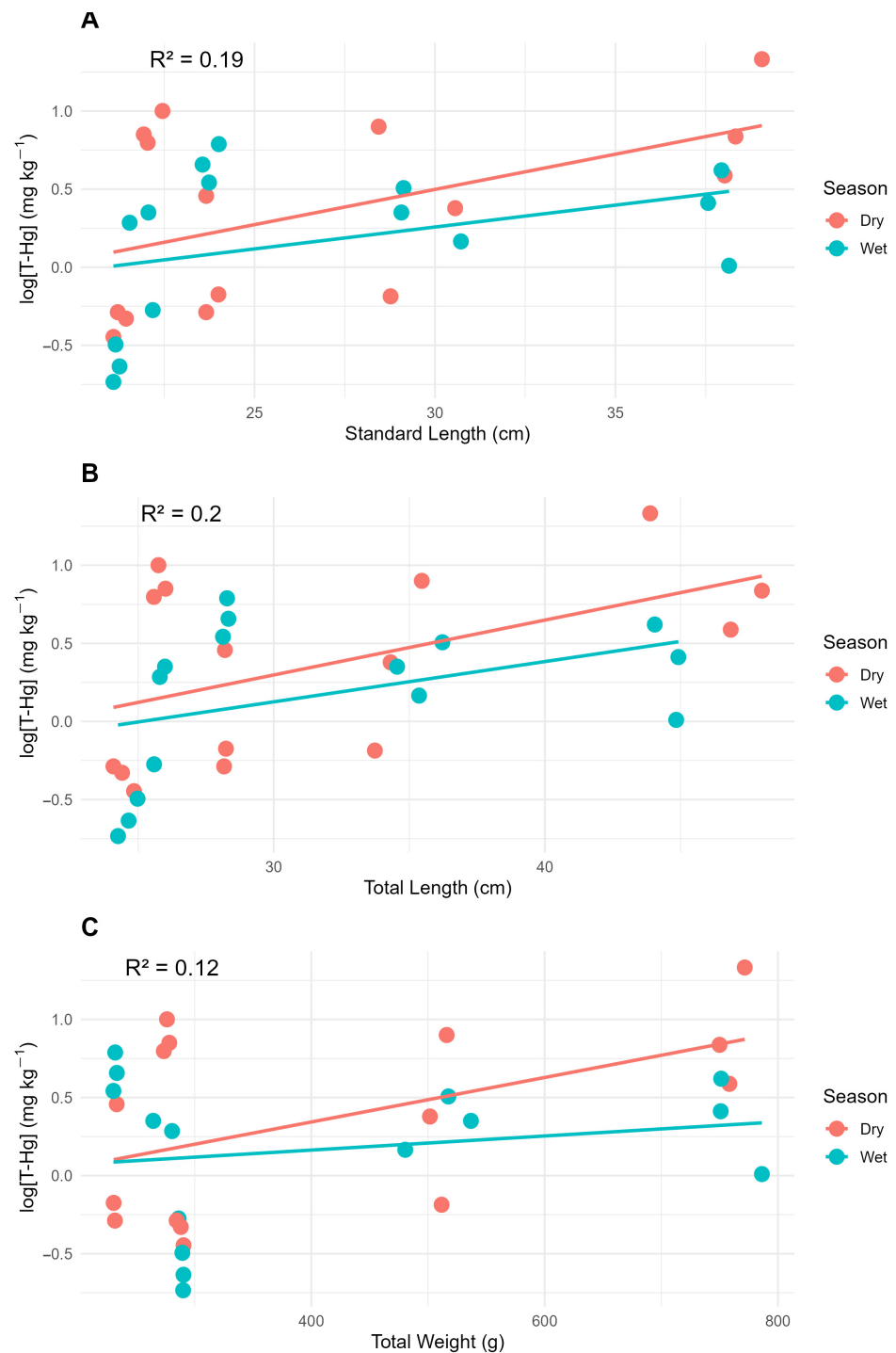
Total mercury concentrations in fish muscle ranged from 0.16 to 3.79 mg kg<sup>-1</sup> across all sampled species. The highest mean values were detected in the piscivorous species *Pseudoplatystoma punctifer* (mean = 2.63 ± 1.03 mg kg<sup>-1</sup>; range = 1.60–3.66 mg kg<sup>-1</sup>;  $n = 6$ ) and *Cichla monoculus* (mean = 2.43 ± 0.26 mg kg<sup>-1</sup>; range = 2.17–2.69 mg kg<sup>-1</sup>;  $n = 6$ ), both exceeding the maximum permissible limit of 0.5 mg kg<sup>-1</sup> established by the FAO, EU, and SANIPES (Table 1). Seasonal analysis showed slightly higher mercury concentrations during the wet season (mean = 1.68 ± 0.94 mg kg<sup>-1</sup>;  $n = 15$ ) than in the dry season (mean = 1.31 ± 0.54 mg kg<sup>-1</sup>;  $n = 15$ ). However, the Wilcoxon test revealed no statistically significant difference between the two periods ( $W = 84$ ,  $p = 0.24$ ), suggesting limited seasonal influence on mercury accumulation (Table 1).

**Table 1.** Descriptive statistical of total mercury concentration (T-Hg) in dry and wet seasons in 30 fish specimens from the Alto Nanay river basin, department of Loreto, Peru.

Species	Season	$n$	Total Mercury (mg kg <sup>-1</sup> ) in Muscle Samples (Mean ± Standard Deviation; Range)
<i>Hoplias malabaricus</i>	Wet	6	1.58 ± 0.82 (0.76–2.40)
	Dry	6	1.42 ± 0.24 (1.18–1.66)
<i>Pseudoplatystoma punctifer</i>	Wet	6	2.63 ± 1.03 (1.60–3.66)
	Dry	6	1.46 ± 0.43 (1.03–1.89)
<i>Pimelodus blochii</i>	Wet	6	1.06 ± 0.46 (0.60–1.52)
	Dry	6	1.95 ± 0.24 (1.71–2.19)
<i>Cichla monoculus</i>	Wet	6	2.43 ± 0.26 (2.17–2.69)
	Dry	6	1.17 ± 0.36 (0.81–1.53)
<i>Semaprochilodus insignis</i>	Wet	6	0.54 ± 0.07 (0.47–0.61)
	Dry	6	0.70 ± 0.06 (0.64–0.76)

Log-transformed regression analyses revealed weak to moderate positive relationships between fish morphometric traits and total mercury concentrations (T-Hg). The coefficients of determination were relatively low ( $R^2 = 0.19$  for standard length, 0.20 for total length,

and 0.12 for total weight), but consistent positive slopes indicate that larger individuals tend to accumulate higher mercury levels (Figure 2A–C).

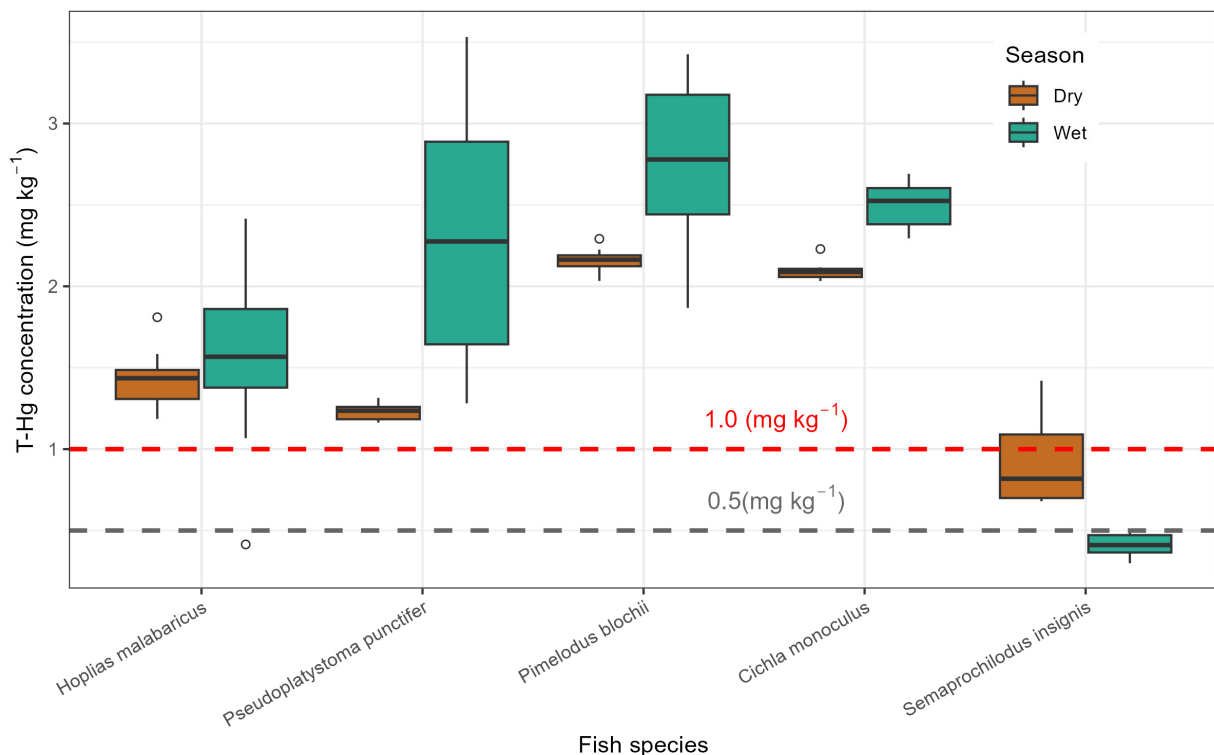


**Figure 2.** Log-transformed linear regression models showing the relationship between total mercury concentrations (T-Hg, mg kg<sup>-1</sup>) and biometric parameters—standard length (A), total length (B), and total weight (C)—in fish specimens sampled during dry and wet seasons. Each point represents an individual specimen ( $n = 30$ ), color-coded by season. Regression lines and  $R^2$  values indicate the strength of association between morphometric traits and mercury bioaccumulation, highlighting seasonal and size-dependent patterns relevant to ecotoxicological risk assessment.

### 3.1. Permissible Limits of Mercury

During the wet season, mercury concentrations were highest in species *Cichla monoculus* ( $0.57 \pm 0.08$  mg/kg) and *Pseudoplatystoma punctifer* ( $0.54 \pm 0.25$  mg/kg) and exceeded the maximum limits recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO), the European Union, and SANIPES ( $0.5$  mg/kg). In contrast, *Hoplias malabaricus* and *Pimelodus blochii* exhibited lower concentrations, with values of  $0.32 \pm 0.06$  mg/kg and  $0.28 \pm 0.03$  mg/kg, respectively. The species *Semaprochilodus insignis* showed the lowest concentration ( $0.17 \pm 0.02$  mg/kg) during this season (Figure 2).

In the dry season, mercury concentrations in piscivorous species were generally lower. *C. monoculus* yielded concentrations of  $0.25 \pm 0.09$  mg/kg, followed by *P. punctifer* ( $0.33 \pm 0.07$  mg/kg), *H. malabaricus* ( $0.36 \pm 0.05$  mg/kg), *P. blochii* ( $0.39 \pm 0.04$  mg/kg) and *S. insignis* maintained low concentrations ( $0.14 \pm 0.02$  mg/kg) (Figure 3).

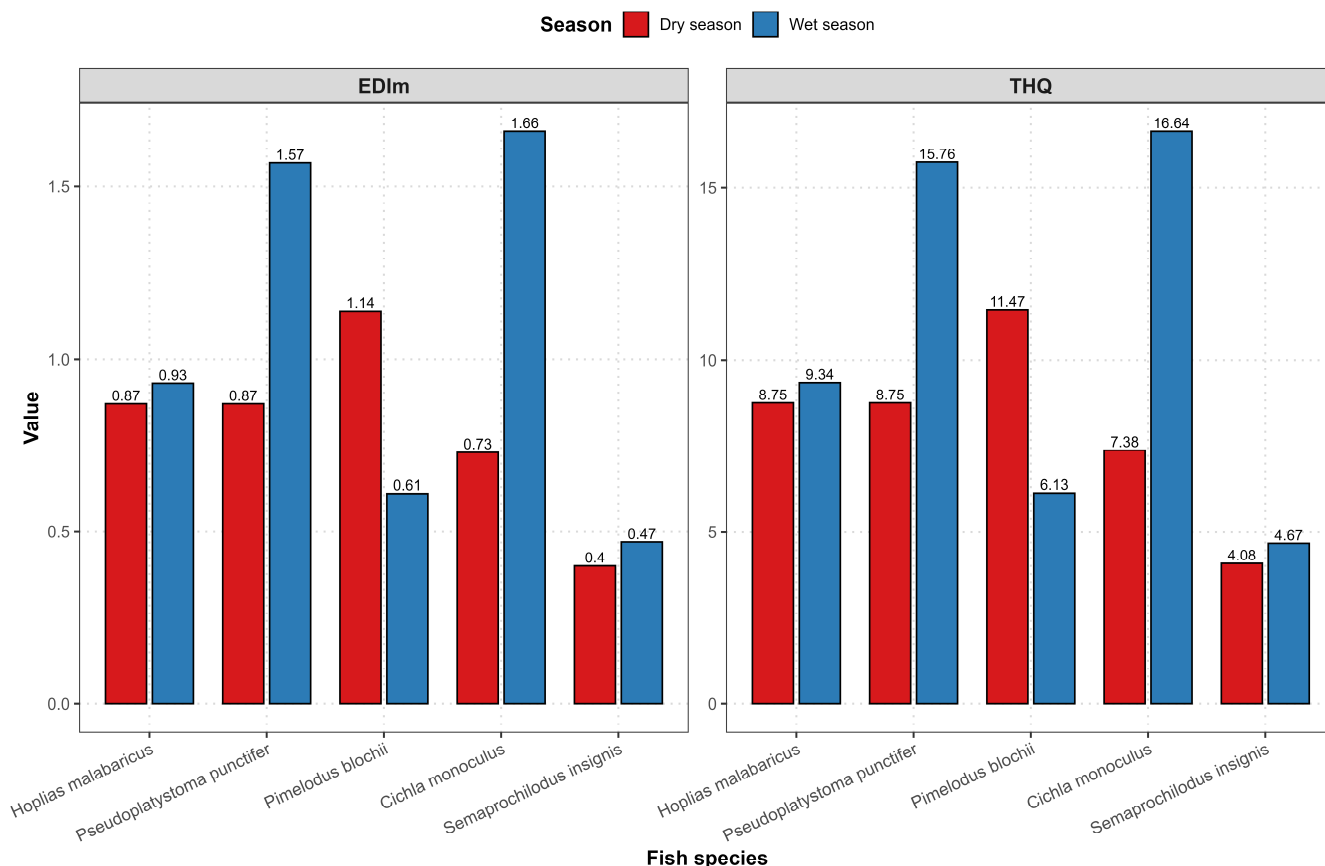


**Figure 3.** Total mercury concentrations ( $\text{mg kg}^{-1}$ , dry weight) in muscle tissue of five Amazonian fish species during the wet and dry seasons in the Alto Nanay basin near Iquitos, city, Peru. Boxes represent the interquartile range (IQR), horizontal lines inside boxes indicate the median, and whiskers show data dispersion. Horizontal dashed lines denote reference thresholds of  $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$  (grey) and  $1.0 \text{ mg kg}^{-1}$  (red) commonly used as guidance or safety limits for fish consumption. Green and orange colors represent wet and dry seasons, respectively.

### 3.2. Risk Indices

In wet season, the daily intake of mercury (EDIm) exhibited the highest methylmercury intake per kilogram of body weight in *Cichla monoculus* and *Pseudoplatystoma punctifer*, followed by *Hoplias malabaricus* and *Pimelodus blochii*. The detritivore *Semaprochilodus insignis* showed the lowest intake ( $0.47 \mu\text{g/kg}$ ), reflecting minimal bioaccumulation of mercury in muscle tissue. The Target Hazard Quotient (THQ) indicated substantial health risks associated with the consumption of the piscivore species that demonstrated the highest MeHg concentrations. These include *Cichla monoculus* (16.64) and *P. punctifer* (15.76), followed by *Pimelodus blochii* and *Hoplias malabaricus* (Figure 4). Based on consumption frequency per week (CRmw), we suggest that consumption of *H. malabaricus*, *P. punctifer* and *C. monoculus*

is not advisable, as their mercury levels exceed established limits. Only *S. insignis* and *Pimelodus blochii* can be safely consumed (Table 2).



**Figure 4.** Comparison of Estimated Daily Intake of mercury (EDIm) and Target Hazard Quotient (THQ) values for five fish species collected during the wet and dry seasons in the Alto Nanay basin, near Iquitos city, Peru. Bars represent the mean values for each species, grouped by season (blue = wet, red = dry). The results show clear seasonal variation in potential human health risk, with piscivorous species exhibiting higher THQ values overall.

**Table 2.** Risk-based intake limits. Estimated daily intake per fish meal (EDIm) (µg/kg, daily), target hazard quotient (THQ), and maximum allowable fish consumption rate in meals/week (CRmw) in adults.

Species (Wet Season)	Trophic Level	EDIm	THQ	CRmw
<i>Hoplias malabaricus</i>	Piscivorous	0.93	9.34	0
<i>Pseudoplatystoma punctifer</i>		1.57	15.76	0
<i>Pimelodus blochii</i>		0.61	6.13	1
<i>Cichla monoculus</i>		1.66	16.64	0
<i>Semaprochilodus insignis</i>	Detritivore	0.47	4.67	1
Species (Dry season)				
<i>Hoplias malabaricus</i>	Piscivorous	0.87	8.75	0
<i>Pseudoplatystoma punctifer</i>		0.87	8.75	0
<i>Pimelodus blochii</i>		1.14	11.47	0
<i>Cichla monoculus</i>		0.73	7.38	0
<i>Semaprochilodus insignis</i>	Detritivore	0.40	4.08	1

#### 4. Discussion

Mercury concentrations in fish species from the Alto Nanay River exhibited interspecific variation. Piscivorous taxa such as *Pseudoplatystoma punctifer* (mean =  $2.63 \pm 1.03 \text{ mg kg}^{-1}$ ) and *Cichla monoculus* (mean =  $2.43 \pm 0.26 \text{ mg kg}^{-1}$ ) presented the highest burdens, consistently exceeding the safety thresholds set by the FAO, European Union, and SANIPES ( $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ). These concentrations align with findings from the Madre de Dios basin, Peru, where artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities enhance mercury mobilization and biomagnification through aquatic food webs [36]. Similar trends have been documented in the Tapajós River, Brazil, where piscivorous *Cichla* species exhibit comparable mercury burdens, illustrating the broad geographic scope of mining-related contamination across Amazonian systems [37]. In the Colombian Amazon, *C. monoculus* shows parallel accumulation levels, reinforcing the consistency of trophic bioaccumulation processes across the region [13,38].

Although mercury concentrations tended to be higher during the wet season, seasonal differences were statistically not significant. This observation supports previous work indicating that hydrological fluctuations modulate mercury methylation and transport but may not substantially affect tissue concentrations in established trophic networks [39]. Log-transformed regression analyses revealed weak to moderate positive relationships between fish morphometric traits and total mercury concentrations, although the coefficients of determination were relatively low ( $R^2 = 0.19$  for standard length,  $0.20$  for total length, and  $0.12$  for total weight), the consistent positive slopes indicate that larger individuals tend to accumulate higher mercury levels. This pattern aligns with the well-established principle of bioaccumulation, where mercury concentrations increase with body size and age due to longer exposure times and trophic magnification through dietary intake. Seasonal differences were also evident, with dry-season specimens exhibiting higher T-Hg concentrations across size classes compared to those collected during the wet season. Such seasonal variation likely reflects hydrological and biogeochemical influences on mercury dynamics, as lower water levels and enhanced sediment–water interactions during the dry period may facilitate methylmercury production and uptake by aquatic organisms. Overall, these results underscore the combined roles of individual growth and environmental conditions in modulating mercury bioaccumulation within freshwater fish populations [40].

Risk assessment outcomes reveal that piscivorous species, particularly *C. monoculus* and *P. punctifer*, pose substantial health risks to consumers, as indicated by Target Hazard Quotients (THQ) exceeding unity. These findings are consistent with previous assessments from Madre de Dios and the Brazilian Amazon, where habitual consumption of piscivorous fish has been associated with neurological and developmental effects in human populations [41,42]. Conversely, detritivorous taxa such as *Semaprochilodus insignis* consistently exhibited low mercury concentrations, supporting safer consumption guidance. This trophic differentiation is essential for designing culturally appropriate fish-consumption advisories and promoting sustainable fishery management in subsistence-based communities [43]. Comparable trophic gradients have been reported across the Brazilian Amazon, where carnivorous fish frequently exceed  $0.5 \mu\text{g g}^{-1}$  (wet weight) and drive THQ  $> 1$  at typical intake rates, reinforcing that frequent consumption of *Hoplias malabaricus*, *P. punctifer*, and *C. monoculus* should be discouraged [37].

We acknowledge study limitations, including constraints in sample size ( $n = 30$  for seasonal analyses, six individuals per species), limited temporal coverage, and assumptions embedded in exposure modeling. The small sample set reflects the logistical challenges of obtaining specimens from mining-impacted habitats where fish populations are declining. These constraints inevitably reduce statistical power and limit generalization of results to broader spatial or temporal contexts. Additionally, mercury analyses focused solely on total

mercury in muscle tissue, without speciation between methylated and inorganic forms, which restricts toxicokinetic interpretation. Recognizing these limitations is essential for contextualizing findings and guiding future investigations. Expanding temporal sampling, integrating sediment and water chemistry, and employing stable-isotope tracing could substantially improve understanding of mercury transfer dynamics in the basin.

Despite these limitations, the results establish an essential baseline for evaluating mercury bioaccumulation and associated risks in the Alto Nanay River system. The findings confirm that ASGM activities remain a dominant source of contamination in Peruvian Amazonian watersheds. The pronounced bioaccumulation in piscivorous species highlights the need for coordinated management between environmental and health authorities, including the enforcement of mercury-use restrictions, continuous environmental monitoring, and the dissemination of risk-communication strategies tailored to local dietary practices.

## 5. Conclusions

Mercury contamination in the Alto Nanay River reflects the cumulative effects of artisanal gold mining and trophic biomagnification in a vulnerable Amazonian ecosystem. Piscivorous species, particularly *Pseudoplatystoma punctifer* and *Cichla monoculus*, exhibited concentrations far exceeding international safety guidelines, posing a tangible risk to dependent human populations. In contrast, detritivorous species such as *Semaprochilodus insignis* showed minimal contamination and represent viable alternatives for safer dietary consumption. Although sample size and temporal coverage constrain broader inference, this study provides the first integrated dataset for mercury levels in Alto Nanay fish and demonstrates the urgent need for systematic monitoring programs. Future research should combine ecological, geochemical, and public health approaches to better characterize exposure pathways and inform evidence-based policy. Effective mercury mitigation in the Amazon will depend not only on technological solutions but also on sustained governance, community participation, and regional collaboration.

**Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/su18020552/s1>.

**Author Contributions:** Conceptualization, J.D.Á.C., L.R.G.M. and L.M.R.A.; methodology, L.R.G.M., L.M.R.A., A.A.A. and J.V.C.; software, R.R.R.Z.; validation, A.A.A. and J.V.C.; formal analysis, R.R.R.Z.; investigation, J.D.Á.C.; resources, J.D.Á.C.; data curation, R.R.R.Z.; writing—original draft preparation, J.D.Á.C. and R.R.R.Z.; writing—review and editing, J.D.Á.C. and R.R.R.Z.; visualization, J.D.Á.C.; supervision, R.R.R.Z.; project administration, L.R.G.M. and L.M.R.A.; funding acquisition, J.D.Á.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This study was funded by Vicerectorado de investigación, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana-UNAP.

**Institutional Review Board Statement:** Ethical review and approval were waived for this study, because no experimental work was conducted with a regulated vertebrate species.

**Informed Consent Statement:** Informed consent statement was waived because the subjects of the experiment were fish.

**Data Availability Statement:** The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors on request.

**Acknowledgments:** The authors thank the Centro de Innovación Científica Amazónica—CINCIA, and Facultad de Ciencias Biológicas -FCB of Universidad Nacional de la Amazonía Peruana-UNAP.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no competing interests.

## References

1. Beckers, F.; Rinklebe, J. Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **2017**, *47*, 693–794. [CrossRef]
2. Fornasaro, S.; Fulignati, P.; Gioncada, A.; Garces, D.; Mulas, M. Geogenic and Anthropogenic Origins of Mercury and Other Potentially Toxic Elements in the Ponce Enriquez Artisanal and Small-Scale Gold Mining District, Southern Ecuador. *Minerals* **2025**, *15*, 725. [CrossRef]
3. Crespo-Lopez, M.E.; Arrifano, G.P.; Augusto-Oliveira, M.; Macchi, B.M.; Lima, R.R.; do Nascimento, J.L.M.; Souza, C.B.A. Mercury in the Amazon: The danger of a single story. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2023**, *256*, 114895. [CrossRef] [PubMed]
4. Gerson, J.R.; Szponar, N.; Zambrano, A.A.; Bergquist, B.; Broadbent, E.; Driscoll, C.T.; Erkenswick, G.; Evers, D.C.; Fernandez, L.E.; Hsu-Kim, H.; et al. Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 559. [CrossRef]
5. Domingues, V.S.; Colmenero, C.; Vinograd, M.; Oliveira-da-Costa, M.; Balbuena, R. Mercury Dynamics and Bioaccumulation Risk Assessment in Three Gold Mining-Impacted Amazon River Basins. *Toxics* **2024**, *12*, 599. [CrossRef] [PubMed]
6. Ullrich, S.M.; Tanton, T.W.; Abdrashitova, S.A. Mercury in the Aquatic Environment: A Review of Factors Affecting Methylation. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **2001**, *31*, 241–293. [CrossRef]
7. Ali, H.; Khan, E. Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. *Environ. Chem. Lett.* **2018**, *16*, 903–917. [CrossRef]
8. Paiva Tde, C.; Pestana, I.A.; Miranda, L.N.L.; de Carvalho, G.O.; Bastos, W.R.; Kasper, D. Mercury Scenario in Fish from the Amazon Basin: Exploring the Interplay of Social Groups and Environmental Diversity. *Toxics* **2025**, *13*, 580. [CrossRef]
9. Crespo-Lopez, M.E.; Augusto-Oliveira, M.; Lopes-Araújo, A.; Santos-Sacramento, L.; Yuki Takeda, P.; Macchi Bde, M.; do Nascimento, J.L.M.; Maia, C.S.F.; Lima, R.R.; Arrifano, G.P. Mercury: What can we learn from the Amazon? *Environ. Int.* **2021**, *146*, 106223. [CrossRef]
10. Dorea, J.; Barbosa, A.C.; Ferrari, I.; de Souza, J.R. Mercury in hair and in fish consumed by Riparian women of the Rio Negro, Amazon, Brazil. *Int. J. Environ. Health Res.* **2003**, *13*, 239–248. [CrossRef]
11. Oliveira, R.C.; Dórea, J.G.; Bernardi, J.V.E.; Bastos, W.R.; Almeida, R.; Manzatto, A.G. Fish consumption by traditional subsistence villagers of the Rio Madeira (Amazon): Impact on hair mercury. *Ann. Hum. Biol.* **2010**, *37*, 629–642. [CrossRef]
12. Khatoun-Abadi, A.; Sheikh Hoseini, A.R.; Khalili, B. Effect of mercury on the human health and environment: An overview. *Int. J. Food Saf. Nutr. Public Health* **2008**, *1*, 33–50. [CrossRef]
13. Olivero-Verbel, J.; Carranza-Lopez, L.; Caballero-Gallardo, K.; Ripoll-Arboleda, A.; Muñoz-Sosa, D. Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2016**, *23*, 20761–20771. [CrossRef]
14. Sotero-Solís, V.; Alva-Astudillo, M. Contenido de metales pesados en agua y sedimento en el bajo Nanay. *Cienc. Amaz.* **2013**, *3*, 24–32. [CrossRef]
15. Vega, C.M.; Pisconte, J.N.; García, C.; Torres, M.I.; Salcedo, K.D.; Fernandez, L. Evaluación de la Exposición a Mercurio en Peces y en Pobladores de Comunidades Ribereñas de la Cuenca de los ríos Nanay y Pintuyacu (Loreto, Perú). 2024. Available online: <https://cincia.org/wp-content/uploads/Informe-Mercurio-en-comunidades-de-Loreto.docx.pdf> (accessed on 26 October 2025).
16. Miranda, L.J.; Castellanos, M.D.; Gómez, T.B.; Olivero, V.J.T.; Moreno, R.V.M.; Novoa, M.D. Protocolo para Recolección de Muestras de Peces para Análisis de Mercurio. Cartagena, Bogotá. 2018. Available online: <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2019/07/PROTOCOLO-PECES.pdf> (accessed on 26 October 2025).
17. U.S. Environmental Protection Agency. Method 7473: Mercury in Solids and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry. 2007. Available online: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-7473-mercury-solids-and-solutions-thermal-decomposition-amalgamation> (accessed on 5 November 2025).
18. Scott, W.; Christine, B.; Joseph, C.V.L.; Ralph, S.; Lu, Y. *DORM-4: Fish Protein Certified Reference Material for TRACE Metals*; National Research Council Canada: Ottawa, ON, Canada, 2012. [CrossRef]
19. *ISO 11885:2007*; Water Quality—Determination of Selected Elements by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2007. Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:11885:ed-2:v1:en> (accessed on 5 November 2025).
20. USA-EPA. *Guidance for Assessing Chemical Contamination Data for Use in Fish Advisories, Volume II. Risk Assessment and Fish Consumption Limits EPA/823-B94-004*; United States Environment Protection Agency: Washington, DC, USA, 2000.

21. Hosseini, S.M.; Mirghaffari, N.; Sufiani, N.M.; Hosseini, S.V.; Ghasemi, A.F. Risk assessment of the total mercury in Golden gray mullet (*Liza aurata*) from Caspian Sea. *Int. J. Aquat. Biol.* **2013**, *1*, 258–265.
22. Marrugo-Negrete, J.; Olivero-Verbel, J.; Lans-Ceballos, E.; Benitez, L.N. Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environ. Geochem. Health* **2008**, *30*, 21–30. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Copat, C.; Arena, G.; Fiore, M.; Ledda, C.; Fallico, R.; Sciacca, S.; Ferrante, M. Heavy metals concentrations in fish and shellfish from eastern Mediterranean Sea: Consumption advisories. *Food Chem Toxicol.* **2013**, *53*, 33–37. [[CrossRef](#)]
24. Chien, L.C.; Hung, T.C.; Choang, K.Y.; Yeh, C.Y.; Meng, P.J.; Shieh, M.J.; Han, B.C. Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan. *Sci. Total Environ.* **2002**, *285*, 177–185. [[CrossRef](#)]
25. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: Características de la Población. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda. Lima: INEI. 2019. Available online: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf) (accessed on 26 October 2025).
26. Ministerio de Salud (MINSA). Encuesta Demográfica y de Salud Familiar—ENDES 2021. Nacional y Departamental. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática. 2022. 393p. Available online: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/es/biblio-1427910> (accessed on 26 October 2025).
27. United States Environmental Protection Agency (US-EPA). *Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A)*; Report No.: EPA/540/1-89/002; US-EPA: Washington, DC, USA, 1989. Available online: <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part> (accessed on 26 October 2025).
28. United States Environmental Protection Agency (US-EPA). *Guidance Manual for the Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children*; Report No.: EPA/540/R-93/081; US-EPA: Washington, DC, USA, 1994. Available online: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100L3LN.PDF> (accessed on 26 October 2025).
29. Wickham, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*; Springer: New York, NY, USA, 2016; ISBN 978-3-319-24277-4.
30. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2021. Available online: <https://www.R-project.org/> (accessed on 3 November 2025).
31. Food and Agriculture Organization (FAO). *Compilation of Legal Limits for Hazardous Substances in Fish and Fishery Products*; Food and Agriculture Organization: Rome, Italy, 1983; Volume 464. Available online: <http://www.fao.org/docrep/014/q5114e/q5114e.pdf> (accessed on 11 October 2025).
32. European Commission. Commission Regulation (EU) 2022/617 of 12 April 2022 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of mercury in fish and salt. *Off. J. Eur. Union* **2022**, *L 115*, 60–63. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/617/oj> (accessed on 26 October 2025).
33. SANIPES (Organismo Nacional de Sanidad Pesquera). Resolución de Presidencia Ejecutiva N° 059-2020-SANIPES-PE. 2020. Available online: [https://www.sanipes.gob.pe/documentos\\_sanipes/otros/11.R.P.E.N°059-2020-SANIPES-PE.pdf](https://www.sanipes.gob.pe/documentos_sanipes/otros/11.R.P.E.N°059-2020-SANIPES-PE.pdf) (accessed on 3 November 2025).
34. Agência Nacional de Vigilância Sanitária—ANVISA. *Resolução RDC No 42, de 29 de Agosto de 2013: Regulamento Técnico Sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos*; Ministério da Agricultura e Pecuária: Brasília, Brazil, 2013.
35. FSANZ. Food Standards Code Legislation | Food Standards Australia New Zealand, 2013. 2025. Available online: <https://www.foodstandards.gov.au/food-standards-code/legislation#compilation> (accessed on 15 October 2025).
36. Kristensen, A.; Thomsen, J.; Mikkelsen, S. A review of mercury exposure among artisanal small-scale gold miners in developing countries. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **2013**, *87*, 579–590. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Basta, P.C.; de Vasconcellos, A.C.S.; Hallwass, G.; Yokota, D.; Pinto Dde Od’El, R.; de Aguiar, D.S.; de Souza, C.C.; Oliveira-da-Costa, M. Risk Assessment of Mercury-Contaminated Fish Consumption in the Brazilian Amazon: An Ecological Study. *Toxics* **2023**, *11*, 800. [[CrossRef](#)]
38. Ferreira da Silva, S.; de Oliveira Lima, M. Mercury in fish marketed in the Amazon Triple Frontier and Health Risk Assessment. *Chemosphere* **2020**, *248*, 125989. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Silva, S.F.d.; Oliveira, D.C.; Pereira, J.P.G.; Castro, S.P.; Costa, B.N.S.; Lima, M.d.O. Seasonal variation of mercury in commercial fishes of the Amazon Triple Frontier, Western Amazon Basin. *Ecol. Indic.* **2019**, *106*, 105549. [[CrossRef](#)]
40. Storelli, M.M.; Giacomini-Stuffler, R.; Marcotrigiano, G. Relationship between Total Mercury Concentration and Fish Size in Two Pelagic Fish Species: Implications for Consumer Health. *J. Food Prot.* **2006**, *69*, 1402–1405. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

41. Canham, R.; González-Prieto, A.M.; Elliott, J.E. Mercury Exposure and Toxicological Consequences in Fish and Fish-Eating Wildlife from Anthropogenic Activity in Latin America. *Integr. Environ. Assess. Manag.* **2021**, *17*, 13–26. [[CrossRef](#)]
42. Huaypar Loayza, K.H. *Exposición a Mercurio por Consumo de Pescados Contaminados, en la Población de Puerto Maldonado, Región de Madre de Dios*; Universidad Nacional San Antonio Abad del Cuzco: Cusco, Peru, 2022. Available online: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6839> (accessed on 27 October 2025).
43. Martoredjo, I.; Calvão Santos, L.B.; Vilhena, J.C.E.; Rodrigues, A.B.L.; de Almeida, A.; Sousa Passos, C.J.; Florentino, A.C. Trends in Mercury Contamination Distribution among Human and Animal Populations in the Amazon Region. *Toxics* **2024**, *12*, 204. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.