

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, NATURALES Y AMBIENTALES

CARRERA DE BIOINGENIERÍA

ESTADO DEL ARTE SOBRE EL CONOCIMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN CON METALES PESADOS POR MINERÍA ILEGAL EN ÁREAS CON POBLACIONES VULNERABLES DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA

Monografía previa a la obtención del título de: Bioingeniero

Cristopher Joseph Ramírez Imues

Nombre del director de la disertación: Dr. Hugo Navarrete

Quito, viernes 19 de junio del 2026

Certifico que la Monografía del Bioingeniero, Sr. CRISTOPHER JOSEPH RAMÍREZ IMUES, ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

HUGO GUILLERMO NAVARRETE ZAMBRANO

Firmado digitalmente por HUGO GUILLERMO NAVARRETE ZAMBRANO
Fecha: 2026.08.17 14:56:03 -05'00'

Dr. Hugo Navarrete Zambrano

Quito, 10 de junio de 2026

DEDICATORIA

Ha sido un camino de muchos altibajos, pero, siempre tuve la confianza y, sobre todo, la resiliencia en mis convicciones y propósitos y este es uno de ellos. Tal vez ahora lo haya sentido muy difícil emocional, académica y, financieramente. Sin embargo, siento que puedo llegar a lograr muchos más objetivos, a pesar de las circunstancias.

En ese sentido, no lo hubiese podido alcanzar, primeramente, gracias a mis papás y a mi hermana de USA por haberme permitido llegar hasta donde estoy y que, a pesar de las adversidades, desde que entré por primera vez a la universidad, a hoy en día, siempre han estado ahí para mí, ya sea con buena, o mala cara. Aunque más allá de eso, cuando ingresé por primera vez a esta universidad, realmente, no estaba en mis planes, por motivos que me suscitaron antes. En pocas, pensé que no ser aceptado, aun así teniendo esperanzas en ello.

Por lo cual, también agradezco de corazón a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Porque en su momento fue la única universidad a nivel de todo el país que me acogió cuando nadie más lo hizo, porque desde que pisé por primera vez sus aulas no me sentí excluido en muchas de sus formas, a pesar de tener sus pros y sus contras. Asimismo, agradecer al fundador de la carrera de Bioingeniería el Dr. Javier Carvajal que, aunque no lo he podido conocer mucho, ya que, solo una vez lo vi en persona cuando realizó un taller sobre nanocelulosa, genuinamente, cuando había tenido alguna consulta de la carrera y aspectos más personales, siempre tuvo las puertas abiertas. Y a mi tutor, el Dr. Hugo Navarrete por ayudarme desde mis prácticas pre-profesionales hasta inclusive ser mi tutor de titulación.

Sólo quisiera algún día devolverles el favor, porque con todo y mi carácter han estado conmigo y no es de menos todo esto, porque siendo amazónico, una región casi excluida, me haya sentido acogido.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN 5

2. ABSTRACT 6

3. INTRODUCCIÓN 7

4. METODOLOGÍA 12

5. OBJETIVOS 14

5.1. OBJETIVO GENERAL 14

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14

6. FUNDAMENTO TEÓRICO 15

6.1. LA MINERÍA ILEGAL EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA COMO FUENTE DE CONTAMINACIÓN: PREVALENCIA Y ÁREAS DE MAYOR INCIDENCIA 15

6.2. IMPACTO DE LA MINERÍA ILEGAL EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SALUD PÚBLICA EN ECUADOR 24

6.3. CONSECUENCIAS A LARGO PLAZO Y SU RELACIÓN CON FACTORES ANTROPOGÉNICOS, CLIMÁTICOS Y AMBIENTALES 33

6.4. VACÍOS DE CONOCIMIENTO POR CONTAMINACIÓN DE MINERÍA ILEGAL EN ECUADOR 42

7. CONCLUSIONES 50

8. RECOMENDACIONES 52

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54

10. ANEXOS 60

1. RESUMEN

La minería ilegal aurífera en la Amazonía ecuatoriana constituye una fuente crítica de contaminación por metales pesados que amenaza tanto los ecosistemas como la salud de las poblaciones vulnerables. Este estado del arte analizó la literatura científica y gris publicada entre 2021 y 2026 con el objetivo de evaluar la presencia, los efectos y la magnitud de la contaminación por mercurio, cadmio y plomo. La metodología incluyó búsqueda estructurada de literatura en bases de datos académicas y repositorios institucionales utilizando operadores booleanos, priorizando estudios cuantitativos realizados en la Amazonía ecuatoriana. Los hallazgos son contundentes: el 100% de las muestras de agua superan los estándares para la preservación de la vida acuática y la totalidad de los sedimentos analizados presentan concentraciones peligrosas de metales. Las áreas críticas se concentran en la cuenca del río Napo (sitios P6, P10, P11) y en los ríos Payamino y Putumayo. El índice de peligro supera el límite seguro entre 23 y 352 veces, mientras que el riesgo de cáncer total excede de una a tres veces el umbral permisible. Sin embargo, la revisión también reveló limitaciones metodológicas importantes: ausencia de estudios longitudinales, falta de evidencia cuantitativa sobre la transferencia de metales a cultivos de subsistencia como la yuca, el plátano, el fréjol y el maní, inexistencia de estudios epidemiológicos con biomarcadores en poblaciones ecuatorianas, cobertura geográfica restringida a Napo y El Oro, y ausencia de evaluaciones sistemáticas de políticas públicas. Se concluye que, aunque la evidencia apunta a una crisis ambiental y sanitaria severa, la magnitud real del problema permanece incierta. Se recomienda priorizar estudios longitudinales, el monitoreo de cultivos de subsistencia, la evaluación de biomarcadores y la ampliación de la cobertura geográfica a provincias subrepresentadas.

Palabras clave: cadmio, cultivos de subsistencia, mercurio, monitoreo ambiental, salud pública

2. ABSTRACT

Illegal gold mining in the Ecuadorian Amazon constitutes a critical source of heavy metal pollution that threatens both ecosystems and the health of vulnerable populations. This state-of-the-art review analyzed scientific and gray literature published between 2021 and 2026 with the aim of assessing the presence, effects, and magnitude of mercury, cadmium, and lead contamination. The methodology included a structured literature search in academic databases and institutional repositories using Boolean operators, prioritizing quantitative studies conducted in the Ecuadorian Amazon. The findings are striking: 100% of water samples exceed aquatic life preservation standards, and all analyzed sediments show hazardous metal concentrations. Critical areas are concentrated in the Napo River basin (sites P6, P10, P11) and the Payamino and Putumayo rivers. The hazard index exceeds the safety limit by 23 to 352 times, while the total cancer risk surpasses the permissible threshold by one to three times. However, the review also revealed significant methodological limitations: absence of longitudinal studies, lack of quantitative evidence on metal transfer to subsistence crops such as cassava, plantain, beans, and peanuts, absence of epidemiological studies with biomarkers in Ecuadorian populations, geographical coverage restricted to Napo and El Oro, and lack of systematic evaluations of public policies. It is concluded that although evidence points to a severe environmental and health crisis, the actual magnitude of the problem remains uncertain. Prioritizing longitudinal studies, subsistence crop monitoring, biomarker evaluation, and expanded geographical coverage to underrepresented provinces is recommended.

Keywords: cadmium, environmental monitoring, mercury, public health, subsistence crops

3. INTRODUCCIÓN

La minería ilegal aurífera, por ejemplo, en la provincia de Napo en los ríos Napo, Jatunyacu y Anzu de la región amazónica ecuatoriana se ha consolidado como una fuente crítica y sistémica de contaminación por metales pesados, generando una problemática socioambiental y de salud pública de creciente magnitud que amenaza la integridad ecológica y el bienestar humano en el país. Esta actividad extractiva, que opera al margen de la ley y sin controles técnicos, emplea mercurio (Hg) en el proceso de amalgamación para la extracción de oro, movilizando además otros elementos tóxicos desde los sedimentos fluviales, como cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), generando residuos que son vertidos directamente a los sistemas acuáticos sin ningún tipo de gestión ambiental (Oziegbe et al., 2025).

El proceso de amalgamación, fundamental en la minería artesanal, utiliza el mercurio para separar el oro de otros minerales mediante la formación de una amalgama, pero, aproximadamente el 30% de este metal tóxico se libera al ambiente durante el proceso de lavado, mientras que el resto se quema al aire libre en condiciones incontroladas, liberando vapores de mercurio elemental altamente contaminantes que se depositan en suelos y aguas (Donkor et al., 2024). Esta práctica no solo contamina los cuerpos de agua locales, sino que también genera un ciclo de contaminación a largo plazo, ya que, el mercurio puede transformarse en metilmercurio, su forma orgánica más tóxica y bioacumulable.

La evidencia científica recogida por Mestanza-Ramón et al. (2023) documenta las graves consecuencias ambientales de esta práctica, demostrando mediante un estudio exhaustivo que el 100% de las muestras de agua analizadas, por ejemplo, en ríos de la provincia de Napo superan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ecuatoriana para la preservación de la vida acuática. Más aún, esta investigación revela que

el 7% de las muestras exceden incluso los estándares de calidad para agua potable, indicando un nivel de contaminación que representa un riesgo directo para las comunidades humanas que dependen de estos recursos hídricos (Mestanza-Ramón et al., 2023).

Esta contaminación hídrica generalizada, sin embargo, representa solo la primera fase de un problema más amplio y complejo, pues las aguas de estos ríos son utilizadas de manera cotidiana y ancestral por las comunidades Kichwa asentadas en sus riberas para el riego de sus cultivos de subsistencia, principalmente, en productos agrícolas, como la yuca (*Manihot esculenta*), plátano (*Musa paradisiaca*), fréjol (*Phaseolus vulgaris*) y maní (*Arachis hypogaea*). Esta práctica agrícola, esencial para la seguridad alimentaria local, establece sin embargo una ruta de exposición potencialmente peligrosa para la salud humana, tal como lo señala Addai-Arhin et al. (2022), quien destaca en su revisión sistemática cómo los metales pesados pueden transferirse desde el agua de riego hacia los tejidos vegetales de los cultivos y, posteriormente, a la población consumidora a través de la cadena alimentaria, con consecuencias toxicológicas particularmente severas para grupos vulnerables como niños, mujeres embarazadas y adultos mayores.

Felicita Nato & Villamarín Fernández (2026) señalan que los metales pesados, al ser elementos no biodegradables, no pueden ser degradados por procesos biológicos convencionales, lo que favorece su bioacumulación y biomagnificación en los ecosistemas. Los metales pesados como el plomo y cadmio, una vez incorporados a los tejidos vegetales a través de los sistemas radiculares o por deposición foliar, pueden alcanzar concentraciones hasta diez veces superiores a las presentes en el suelo o agua circundante, debido a procesos de acumulación biológica que no están acompañados de mecanismos eficientes de excreción en las plantas (Elik & Gül, 2025).

Esta bioamplificación se ve particularmente agravada en sistemas agrícolas de subsistencia donde los mismos cultivos se consumen de manera regular y continua, permitiendo que los metales se acumulen en los tejidos humanos a lo largo del tiempo, generando lo que la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica como "exposición crónica de bajo nivel" con efectos subclínicos, pero, progresivamente, dañinos para sistemas neurológicos, renales, endocrinos y reproductivos (Sabir et al., 2022).

Frente a este escenario complejo y multidimensional, surge la pregunta central de investigación: ¿Cuál es la incidencia de la contaminación de metales pesados por minería ilegal, como el mercurio, cadmio y plomo en poblaciones vulnerables de la región amazónica ecuatoriana?

La respuesta a estas preguntas resulta no solo académicamente relevante, sino socialmente necesaria, no solo para comprender la magnitud real del problema y sus mecanismos de transferencia en el ecosistema agrícola, sino también para fundamentar una toma de decisiones informada y basada en evidencia en el futuro inmediato. Las comunidades Kichwa, que han dependido tradicionalmente de estos sistemas fluviales para su sustento material y cultural, se encuentran en una situación de especial vulnerabilidad epidemiológica y ecológica frente a esta contaminación silenciosa pero persistente, que amenaza tanto su salud como sus fuentes de subsistencia (Custodio et al., 2025). Por ello, esta revisión aporta evidencia científica sólida y contextualizada que permita evaluar el riesgo real al que está expuesta esta población, estableciendo líneas base, que puedan traducirse en acciones concretas.

La ejecución de este estado de arte se fundamenta en la necesidad de evidenciar, científicamente, por ejemplo, un riesgo sanitario latente, que afectaría a poblaciones particularmente vulnerables de la Amazonía ecuatoriana. La expansión continua y acelerada de la minería ilegal en la región, documentada por organismos de control ambiental, contrasta

dramáticamente con la falta de información específica y accesible disponible para las comunidades Kichwa, quienes consumen sus cultivos de subsistencia sin conocer su posible nivel de contaminación por metales pesados y, por tanto, sin poder tomar medidas preventivas (Escobar-Segovia et al., 2021). Esta asimetría informativa podría convertir al presente estudio en una herramienta vital para la inferencia de estimar riesgos a la salud humana, e integridad de los ecosistemas amazónicos, representando así como en otros estudios un mecanismo de prevención comunitaria ante, también una potencial crisis de seguridad alimentaria que podría manifestarse de manera silenciosa a través de aumentos en la prevalencia de enfermedades crónicas, trastornos del desarrollo infantil y afectaciones a la productividad agrícola (Heng et al., 2022).

La pertinencia social del proyecto se enfocará de manera prioritaria en poblaciones cuyos derechos fundamentales constitucionalmente reconocidos a la alimentación segura, nutritiva y culturalmente apropiada, así como a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, se ven amenazados y potencialmente vulnerados por actividades ilícitas que externalizan sus costos ambientales y sanitarios hacia las comunidades más pobres y marginadas (Nodangala, 2025). Las comunidades amazónicas ribereñas a las fuentes hídricas, históricamente, excluidas en el acceso a servicios de salud especializados y sistemas de monitoreo ambiental continuo, encontrarán en esta investigación una oportunidad concreta para visibilizar su situación de riesgo y acceder a información veraz, comprensible y accionable, fortaleciendo así su capacidad de agencia y participación en la gestión de su territorio (K. Yadav et al., 2025).

El carácter original, e innovador del trabajo reside precisamente en su enfoque específico y aplicado hacia las fuentes de subsistencia que constituyen la base de la seguridad alimentaria local, llenando un vacío de conocimiento crítico respecto a, por ejemplo, las concentraciones de mercurio, cadmio y plomo. Mientras estudios previos en la región se han centrado predominantemente en la caracterización de la contaminación hídrica, o en la

bioacumulación en especies forestales con potencial fitorremediador Quintana et al. (2024), el presente estado del arte establece comparaciones científicas entre zonas de diferente exposición minera, analizando de manera sistemática y replicable las diferencias cuantitativas en zonas de mayor y menor afluencia de contaminación de metales pesados por minería ilegal, aportando así un entendimiento fino que resulta esencial para diseñar intervenciones focalizadas.

Los beneficios esperados de este estudio trascienden ampliamente el ámbito académico para convertirse en instrumentos de acción concreta y transformación social. La generación de una línea base confiable permitirá establecer información de referencia validada para futuras evaluaciones de tendencia y monitoreo ambiental participativo, mientras que el conocimiento generado fortalecerá de manera tangible la capacidad de las poblaciones locales para tomar decisiones informadas sobre, por ejemplo, sus sistemas alimentarios, potencialmente incluyendo su prevención a la exposición de zonas contaminadas (Siahaan et al., 2025). Asimismo, el sustento técnico-científico que se obtenga facilitará la implementación efectiva y basada en evidencia de planes de remediación ambiental y programas comunitarios que respondan a la urgencia de la problemática con soluciones apropiadas cultural y ecológicamente. En su conjunto, estos aportes multidimensionales representan una contribución significativa para la toma de decisiones informadas a nivel comunitario, institucional y gubernamental, estableciendo las bases para una gestión integral del territorio que armonice de manera sostenible el bienestar humano con la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la Amazonía ecuatoriana.

4. METODOLOGÍA

Para comprender la magnitud y evolución del conocimiento sobre la contaminación por metales pesados asociada a la minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana durante el último quinquenio, se realizó una revisión de literatura crítica siguiendo los lineamientos del estado del arte. El período de búsqueda comprendió los años 2021 a 2026, con el objetivo de capturar la evidencia más reciente y relevante sobre la presencia de mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As) en las matrices ambientales y biológicas de la región.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las siguientes bases de datos y repositorios académicos: J-Stage, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Springer Nature Link, Elsevier, Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencias y Tecnología, (CIENCIAMATRIA), WIT Press, IntechOpen, Oxford Academic – Oxford University Press, PLoS ONE, EASTASOUTH INSTITUTE, World Journal of Environmental Biosciences, Enfoque UTE, Dialnet, y RECIMUNDO. También se incluyó literatura gris proveniente de organismos no gubernamentales como Mongabay, Amazon Frontlines, Dialogue Earth, la Global Initiative Against Transnational Organized Crime (GI-TOC) y el Monitoring of the Andes Amazon Program (MAAP).

Los descriptores utilizados se combinaron mediante operadores booleanos con la siguiente estructura de agrupación para garantizar la precisión de la búsqueda: ("heavy metals" OR "mercury" OR "cadmium" OR "lead" OR "arsenic") AND ("illegal mining" OR "artisanal mining" OR "gold mining") AND ("Ecuadorian Amazon" OR "Napo" OR "Pastaza" OR "Orellana"). También se emplearon términos en español con la misma lógica: ("metales pesados" OR "mercurio" OR "cadmio" OR "plomo" OR "arsénico") AND ("minería ilegal" OR "minería artesanal" OR "minería aurífera") AND ("Amazonía ecuatoriana" OR "Napo" OR

"Pastaza" OR "Orellana"). Adicionalmente, se incluyeron los términos "bioacumulación" y "contaminación por mercurio" para ampliar la sensibilidad de la búsqueda.

La estrategia de búsqueda siguió el marco SALSA (Search, Appraisal, Synthesis, Analysis). Una vez aplicados los filtros por año (2021-2026) e idioma (español o inglés), los resultados fueron sometidos a un proceso de cribado en dos fases: una primera fase de revisión de títulos y resúmenes, y una segunda fase de evaluación de texto completo. Los criterios de inclusión contemplaron: (a) estudios publicados entre 2021 y 2026; (b) investigaciones realizadas en la Amazonía ecuatoriana, o en cuencas hidrológicamente conectadas; (c) artículos que reportaran concentraciones cuantitativas de al menos uno de los metales de interés (Hg, Cd, Pb, As) en agua, sedimentos, suelo, plantas o tejidos animales; (d) documentos disponibles en español o inglés; y (e) estudios originales, revisiones sistemáticas, o informes técnicos gubernamentales y no gubernamentales. Se excluyeron tesis de pregrado publicadas y no publicadas, estudios realizados fuera del territorio amazónico ecuatoriano, y documentos sin datos cuantitativos. o sin descripción metodológica suficiente.

Para la extracción y síntesis de la información, se utilizó una matriz de análisis que incluyó las siguientes variables: autor(es) y año de publicación, provincia, o cuenca estudiada, matriz analizada (agua, sedimento, suelo, planta, tejido animal), técnica analítica empleada (AAMBI, PTEs, PERMANOVA, PCA, HI, TR, entre otras), concentraciones reportadas de metales pesados, comparación con normativas nacionales, e internacionales (Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE), Organización Mundial de la Salud (OMS) y Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA)), y limitaciones metodológicas declaradas por los autores. Esta matriz permitió organizar los hallazgos de manera sistemática y facilitó la identificación de patrones, tendencias y vacíos de conocimiento en la literatura revisada.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el estado del conocimiento sobre la presencia, los efectos y la magnitud del impacto de la contaminación de metales pesados causado por la minería ilegal, como el mercurio, cadmio y plomo en poblaciones vulnerables de la región amazónica ecuatoriana.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

5.2.1. Investigar la prevalencia, e impacto de la minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana, identificando las áreas con mayor incidencia.

5.2.2. Analizar el impacto actual de la minería ilegal en la seguridad alimentaria y salud pública en Ecuador.

5.2.3. Evaluar las posibles consecuencias a largo plazo de esta problemática en Ecuador y su relación con factores antropogénicos, climáticos y ambientales.

5.2.4. Identificar vacíos de conocimiento sobre la minería ilegal en Ecuador.

6. FUNDAMENTO TEÓRICO

6.1. LA MINERÍA ILEGAL EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA COMO FUENTE DE CONTAMINACIÓN: PREVALENCIA Y ÁREAS DE MAYOR INCIDENCIA

La minería aurífera artesanal y de pequeña escala (MAPE) utiliza mercurio para la amalgamación del oro. Aunque el mercurio es el contaminante más estudiado en este contexto, los relaves mineros también liberan otros metales pesados. Estos metales se encuentran naturalmente asociados a las rocas y sedimentos que se remueven durante la extracción. Entre ellos se incluyen el cadmio y el plomo (Carrillo et al., 2021). La gestión inadecuada de estos desechos mineros conduce a su lixiviación. Posteriormente, los contaminantes son transportados hacia los sistemas fluviales. Este proceso contamina el agua y los sedimentos. Como consecuencia, también afecta las llanuras de inundación que las comunidades utilizan para la agricultura.

En este contexto, la minería ilegal de oro en la Amazonía ecuatoriana se ha convertido en una fuente antropogénica de gran magnitud. Su impacto se extiende desde los ecosistemas acuáticos hasta las poblaciones humanas que dependen de estos recursos. El estudio de Díaz et al. (2025) documenta esta situación en la región norte de la Amazonía ecuatoriana. Dicha región incluye las provincias de Napo y Orellana. Allí, décadas de explotación petrolera y minería aurífera han generado derrames recurrentes. Estos eventos de contaminación afectan de manera desproporcionada a las comunidades indígenas y rurales. Los habitantes de estas comunidades muestran una mayor incidencia de cáncer (Coronel Vargas et al., 2020, como se citó en Díaz et al., 2025). Para comprender la prevalencia de esta problemática, es necesario examinar la evidencia empírica disponible. También se requiere identificar las áreas con mayor incidencia de contaminación. La literatura científica ha abordado esta cuestión mediante múltiples líneas de investigación.

La identificación de las áreas más afectadas por la contaminación minera es uno de los aportes más relevantes de los estudios recientes. Capparelli et al. (2021) llevaron a cabo una investigación integradora en la provincia de Napo. El estudio se centró en los ríos Anzu, Jatunyacu y Napo. Estos tres cuerpos de agua concentran aproximadamente el 90% de las concesiones mineras auríferas de la provincia. Los autores muestrearon 11 sitios durante diciembre de 2020. Todos los sitios se ubicaban dentro de territorios de concesiones mineras de escala mediana a industrial.

El enfoque metodológico empleado fue novedoso por su carácter integrador. Los autores combinaron múltiples líneas de evidencia (LOEs). Estas incluyeron parámetros fisicoquímicos del agua. También midieron concentraciones de metales en agua y sedimentos. Evaluaron la respuesta de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos mediante el Índice Biótico Andino-Amazónico (AAMBI). Finalmente, realizaron bioensayos de toxicidad con *Lactuca sativa* y *Daphnia magna*. Gracias a esta aproximación multidimensional, los autores demostraron que la contaminación por metales no es un fenómeno menor ni localizado. Por el contrario, afecta a toda la red hidrográfica muestreada.

En ese sentido, Capparelli et al. (2021) señalan que: "Water quality standards were exceeded by at least one of the following metals in all sites: Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, and Pb" [Los estándares de calidad del agua fueron excedidos por al menos uno de los siguientes metales en todos los sitios: Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn y Pb] (p. 5). Los sitios con el mayor número de metales por encima de los estándares fueron P3, P6, P10 y P11. El cadmio (Cd) se detectó por encima de los estándares de calidad en la totalidad de los sitios. En los sitios P2 y P6, las concentraciones de cadmio superaron incluso el límite establecido para contaminación crónica. El plomo (Pb) excedió el límite para contaminación crónica en el 55% de los sitios muestreados. En cuanto a los sedimentos, las concentraciones de metales

variaron ampliamente entre las localidades. El orden decreciente de concentraciones fue el siguiente: Al > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Hg. Adicionalmente, se detectaron vanadio (V), boro (B) y cromo (Cr) por encima de los estándares de calidad. Esto ocurrió en más del 55% de los sitios. El cromo (Cr) superó los límites establecidos específicamente en el sitio P6. Este hallazgo resulta crucial por varias razones. En primer lugar, revela que la minería libera un cóctel de contaminantes. No se limita al mercurio, sino que incluye aluminio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo y manganeso. En segundo lugar, estos metales pueden tener efectos sinérgicos. Dichos efectos, al combinarse, podrían ser más dañinos que la exposición individual a cada metal. La comunidad científica aún comprende poco estos efectos sinérgicos sobre los ecosistemas.

La identificación de las áreas con mayor incidencia también se apoyó en el análisis de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos. Capparelli et al. (2021) encontraron que la familia *Chironomidae* fue la más abundante. Esta familia es conocida por su alta tolerancia a la contaminación por metales. El sitio P7 presentó la mayor abundancia de individuos, con un total de 76 especímenes. En contraste, en los sitios P6 y P11 no se encontró ningún macroinvertebrado. La riqueza de familias fue mayor en los sitios P2 y P7. Esto sugiere que estos dos sitios conservan una mejor salud ecológica en comparación con el resto.

También la evaluación de la calidad del agua mediante el índice AAMBI arrojó resultados preocupantes. El 63% de los sitios obtuvieron puntajes por debajo de la clasificación más baja del índice, que es 35. Esto indica una mala calidad del agua en la mayoría de las localidades estudiadas. Capparelli et al. (2021) afirman que: "The highest macroinvertebrate AAMBI index score measured in this study was 40, while in areas with little or no mining impact, other authors have reported values above 80" [La puntuación más alta del índice AAMBI de macroinvertebrados medida en este estudio fue 40, mientras que en

áreas con poco o ningún impacto minero, otros autores han reportado valores superiores a 80] (p. 10). Esta comparación resulta especialmente reveladora. Un puntaje de 40 es menos de la mitad de lo que se considera normal en ecosistemas no perturbados. Los sitios P2 y P7 fueron clasificados como los de mejor calidad del agua según el AAMBI. Sin embargo, todos los demás sitios presentaron mala calidad. Los sitios P6 y P11 mostraron una ausencia total de macroinvertebrados. Esta ausencia puede relacionarse directamente con las altas concentraciones de metales encontradas en esos lugares. Es importante destacar que la ausencia de macroinvertebrados en el sitio P6 ya había sido reportada en un muestreo anterior. Dicho muestreo se realizó 8 meses antes del estudio de Capparelli et al. (2021). La prolongada ausencia de estos organismos indica un grado elevado de perturbación ambiental. Este fenómeno puede interpretarse como un indicador de alerta temprana. Señala la existencia de efectos mineros locales generalizados y persistentes en el tiempo.

Asimismo, los autores confirman que "gold-mining-derived water and sediment contamination have direct negative effects on benthic invertebrate communities, reducing species abundance and richness and modifying the community structure" [la contaminación del agua y los sedimentos derivada de la minería aurífera tiene efectos negativos directos sobre las comunidades de invertebrados bentónicos, reduciendo la abundancia y riqueza de especies y modificando la estructura de la comunidad] (Capparelli et al., 2021, p. 10). La magnitud del impacto de esta contaminación no solo se mide mediante concentraciones ambientales o pérdida de biodiversidad. También se refleja en efectos ecotoxicológicos directos sobre organismos modelo. Capparelli et al. (2021) realizaron bioensayos con *Daphnia magna*. Expusieron neonatos de 24 horas de edad a agua proveniente de cada sitio de muestreo. Los resultados mostraron que, en los sitios P3, P4, P5 y P6, los neonatos tuvieron una reducción de más del 25% en la supervivencia. Esta reducción se calculó en comparación con el grupo control. El sitio P10 fue el único donde se detectó una diferencia

estadísticamente significativa con respecto al control ($p \leq 0.05$). Este hallazgo indica una toxicidad clara de la muestra de agua proveniente de ese sitio.

En cuanto a los bioensayos con *Lactuca sativa*, los resultados también fueron preocupantes. Las tasas de germinación en las muestras de agua oscilaron entre el 37% y el 70%. En el grupo control, la germinación alcanzó el 90%. Las semillas expuestas a las muestras de agua de todos los sitios de muestreo inhibieron su crecimiento radicular. Esto significa que las raíces fueron significativamente más cortas que las del control. En las muestras de sedimento, la situación fue aún más grave. Las semillas no germinaron en 7 de los 11 sitios. En el grupo control, la germinación fue del 100%. En los sitios P2, P5 y P8, se observó un crecimiento radicular estimulado. Este fenómeno puede indicar una respuesta de hormesis. La hormesis se caracteriza por una estimulación del crecimiento a bajas dosis de un tóxico, seguida de inhibición a dosis más altas.

En ese sentido, Capparelli et al. (2021) interpretan estos hallazgos de la siguiente manera: "The toxic effects of gold mining contamination can affect multiple components of the ecosystem, from primary producers to consumers, and indirectly affects habitat quality and the availability of food resources for predators" [Los efectos tóxicos de la contaminación por minería aurífera pueden afectar múltiples componentes del ecosistema, desde los productores primarios hasta los consumidores, y afecta indirectamente la calidad del hábitat y la disponibilidad de recursos alimenticios para los depredadores] (p. 10). Gracias a este enfoque integrador, los autores pudieron clasificar los sitios según su nivel de degradación ambiental. Los sitios P11 (10.68), P10 (10.26) y P6 (10.34) resultaron ser los más afectados por la minería aurífera. En contraste, los sitios P7 (13.77) y P2 (12.90) presentaron los niveles más bajos de degradación. Esta clasificación numérica proporciona una herramienta útil para priorizar intervenciones de monitoreo y remediación.

La identificación de las áreas con mayor incidencia también se basó en el análisis de concentraciones de metales en agua y sedimentos. Este análisis fue realizado por Jiménez-Oyola et al. (2021). Los autores utilizaron datos de concentraciones de Al, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn. Dichos datos provenían de muestras de agua superficial (n=14) y sedimentos (n=14). Las muestras fueron recolectadas en la cuenca alta del río Napo, dentro de la provincia de Napo. Las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (PTEs) en aguas superficiales siguieron un orden específico. De mayor a menor concentración, el orden fue: Ni > Pb > Cr > Cu > Zn > Hg > Cd > Al. Los valores más altos se detectaron cerca de las operaciones mineras activas. En los sedimentos, el orden de concentraciones fue diferente: Al > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Hg. Mediante la elaboración de mapas de riesgo puntual, los autores identificaron que los sitios de muestreo cercanos a actividades mineras presentaban los niveles más elevados de contaminación. Específicamente, para los sedimentos, el 100% de los sitios muestreados mostraron concentraciones de metales por encima de los estándares de calidad. Jiménez-Oyola et al. (2021) señalan que "the sampling locations near mining areas presented the highest values" [las ubicaciones de muestreo cerca de áreas mineras presentaron los valores más altos] (p. 11).

En la misma línea de identificación de áreas con mayor incidencia, Díaz et al. (2025) realizaron un estudio pionero en la provincia de Orellana. Estos autores analizaron concentraciones de metales traza en pescado. Las muestras provenían del mercado de El Coca, una de las ciudades de más rápido crecimiento en la Amazonía ecuatoriana. Se analizaron 54 tejidos musculares. Correspondían a 17 especies de peces comerciales. Los peces fueron capturados en los ríos Napo, Aguarico, Payamino y Putumayo. Los resultados de este estudio son contundentes. Díaz et al. (2025) afirman que: "Our results show that all species exceeded recommended thresholds for arsenic, mercury, and lead, while one species surpassed guidelines for aluminum" [Nuestros resultados muestran que todas las especies excedieron los umbrales recomendados para arsénico, mercurio y plomo, mientras que una

especie superó las pautas para aluminio] (p. 1). Este hallazgo demuestra que la contaminación por metales pesados alcanza niveles peligrosos en la biota acuática de la región.

La identificación de áreas con mayor incidencia se basó en un análisis estadístico robusto. Los autores aplicaron un análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA). Este análisis indicó diferencias significativas en la composición de elementos traza entre los peces de diferentes ríos ($F = 2.15$, $R^2 = 0.052$, $p = 0.029$). Posteriormente, realizaron un análisis de componentes principales (PCA). El PCA mostró que la composición de elementos traza en los peces del río Putumayo era diferente de la composición en los peces de los ríos Payamino y Aguarico. Los peces provenientes del río Payamino exhibieron las concentraciones totales más altas de elementos traza. Un dato notable es que todos los especímenes de este río pertenecían a una sola especie: *Pimelodus jivaro*, un bagre de tamaño pequeño. Los autores vinculan este hallazgo a la presencia de minería ilegal aguas arriba. Específicamente, señalan al río Punino, un afluente del Payamino. En esa zona, se han afectado 142 hectáreas de tierra por actividades mineras ilegales (Fundación EcoCiencia, Amazon Conservation y Agencia Noruega de Cooperación para el Desarrollo [Norad], 2024).

Díaz et al. (2025) explican detalladamente este patrón:

> This pattern suggests a possible causal link between upstream land use and downstream bioaccumulation of trace metals in fish from the Payamino River. The smaller size of the Payamino River may contribute to the observed higher bioaccumulation of trace elements in fish, specifically iron, cadmium, copper, chrome, and manganese. [Este patrón sugiere un posible vínculo causal entre el uso del suelo aguas arriba y la bioacumulación aguas abajo de metales traza en peces del río

> Payamino. El menor tamaño del río Payamino puede contribuir a la mayor bioacumulación observada de elementos traza en los peces, específicamente hierro, cadmio, cobre, cromo y manganeso]. (p. 14)

Es decir, el río Putumayo también mostró concentraciones elevadas de metales. Un espécimen de *Pimelodina flavipinnis* alcanzó 86.87 mg/kg de aluminio. Este valor constituye un dato atípico extremo dentro del conjunto de muestras. En contraste, los canales más grandes de los ríos Napo y Aguarico diluyen los contaminantes. Esta dilución explica las concentraciones más bajas observadas en los peces de esas cuencas. Por lo tanto, el tamaño del cauce fluvial es un factor ambiental que modula la magnitud del impacto de la minería.

Finalmente, la evidencia presentada por los tres estudios demuestra que las áreas con mayor incidencia son aquellas ubicadas aguas abajo de las operaciones mineras. Primero por el estudio de Capparelli et al. (2021), los sitios más afectados fueron P6, P10 y P11, ubicados en la provincia de Napo. En el estudio de Díaz et al. (2025), el río Payamino (específicamente su cuenca alta, donde se encuentra el río Punino) y el río Putumayo presentaron las mayores concentraciones de metales en peces. En el estudio de Jiménez-Oyola et al. (2021), las zonas cercanas a concesiones mineras en la cuenca alta del río Napo mostraron los niveles más elevados de contaminación en agua y sedimentos. Segundo, la prevalencia de la contaminación es generalizada. Todos los sitios muestreados por Capparelli et al. (2021) presentaron al menos un metal por encima de los estándares de calidad. En el caso de los sedimentos analizados por Jiménez-Oyola et al. (2021), la totalidad de los sitios superaron los límites seguros. Díaz et al. (2025) encontraron que todas las especies de peces comercializadas en El Coca excedieron los umbrales recomendados para arsénico, mercurio y plomo. Tercero, la identificación de una base empírica sólida, para monitoreo ambiental en las zonas más críticas, como los ríos Payamino y Putumayo y Napo.

Sin embargo, estos estudios presentan limitaciones metodológicas que deben considerarse. Capparelli et al. (2021) realizó un único muestreo puntual durante diciembre de 2020, sin evaluar la variabilidad estacional de las concentraciones de metales en agua y sedimentos, lo que impide capturar cómo los ciclos hidrológicos amazónicos afectan la movilización y dilución de contaminantes. Además, el número de sitios (n=11) es limitado para una cuenca tan extensa como la del río Napo, y la ausencia de sitios de referencia totalmente libres de influencia minera impide establecer líneas base locales. Jiménez-Oyola et al. (2021) utilizó los mismos datos de concentración de metales reportados por Capparelli et al. (2021), por lo que hereda sus limitaciones de muestreo puntual y falta de variabilidad estacional; además, los parámetros de exposición utilizados (frecuencia de exposición, duración, peso corporal) son valores genéricos tomados de la literatura internacional y no fueron medidos específicamente para la población local ecuatoriana. Díaz et al. (2025) presentó un tamaño muestral reducido para varias especies, donde especies como *Brachyplatystoma juruense*, *Duopalatinus peruanus*, *Pseudoplatystoma tigrinum* y *Sorubimichthys planiceps* contribuyeron con un solo espécimen cada una, lo que impide calcular varianzas intraespecíficas y hace que las concentraciones reportadas puedan ser atípicas. Además, el muestreo se realizó solo en dos momentos del año (marzo y agosto de 2024), correspondientes a aguas crecientes y altas, sin incluir la época de vaciante, o mínima agua donde las concentraciones de metales tienden a aumentar por menor dilución. En conjunto, estos estudios no permiten determinar si las áreas identificadas mantienen sus niveles de contaminación en el tiempo, o si las medidas de control han sido efectivas.

6.2. IMPACTO DE LA MINERÍA ILEGAL EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SALUD PÚBLICA EN ECUADOR

La seguridad alimentaria se ve comprometida cuando los alimentos básicos contienen contaminantes que los hacen nocivos para el consumo. La ingesta crónica de metales pesados, incluso a bajas concentraciones, puede causar efectos toxicológicos graves. “The long-term effects of exposure to heavy metals in water are major concerns for water quality and public health” [Los efectos a largo plazo de la exposición a metales pesados en el agua son una preocupación importante para la calidad del agua y la salud pública] (Demir et al., 2015, como se citó en Noormohammadi et al., 2025). En la Amazonía ecuatoriana, esta preocupación adquiere una dimensión crítica debido a la actividad minera ilegal, que libera mercurio (Hg) y otros metales pesados a los ecosistemas acuáticos. El mercurio es utilizado por los mineros artesanales para la amalgamación del oro, y una parte significativa de este metal es liberada al ambiente durante el proceso de lavado y quemado de la amalgama. El artículo periodístico de literatura gris de Webb (2024), publicado en Amazon Frontlines, señala que “Un estudio científico en el norte del Amazonas ecuatoriano encontró que el 90% de los mineros a pequeña escala usaban mercurio” (párr. 2). Una vez que el mercurio se ha fijado al oro, se quema, liberando grandes cantidades de mercurio al aire, y el mercurio acaba depositándose por toda la selva, sumándose a las cantidades desconocidas de esta sustancia tóxica que se vierten directamente en los ecosistemas, haciendo que la minería de oro “artesanal” y a pequeña escala sea la mayor fuente de contaminación por mercurio en la Tierra. La magnitud de esta contaminación es casi incomprensible: el mismo artículo cita un informe según el cual, utilizando una cifra conservadora de que al menos el 40% del oro se obtiene mediante amalgamación, se estima que se liberaron al medio ambiente 29,6 toneladas (29.600 kg) de mercurio por pérdidas anuales solo en Ecuador (Webb, 2024, párr. 4). Para dimensionar el problema, 1 gramo de mercurio es suficiente para contaminar un lago de 8 hectáreas (20 acres) hasta niveles inseguros, causando mortalidad y deterioro del

crecimiento, comportamiento y reproducción en los peces, y representando un riesgo para quienes consumen el pescado.

Una vez en los ríos, el mercurio inorgánico se transforma por acción bacteriana en metilmercurio (CH_3Hg^+), su forma orgánica más tóxica y bioacumulable. Este compuesto se incorpora a la cadena trófica acuática y se concentra en los tejidos de los peces, especialmente en los depredadores. El estudio de Galarza et al. (2022), titulado "Human health risk assessment of metals and metalloids in mining areas of the Northeast Andean foothills of the Ecuadorian Amazon", evaluó el riesgo para la salud humana en 11 sitios de la cuenca alta del río Napo afectados por minería de oro. Los resultados fueron contundentes: "The calculated HI was 23-352 times greater than the acceptable limits in all sites for both children and adults" [El HI calculado fue de 23 a 352 veces mayor que los límites aceptables en todos los sitios tanto para niños como para adultos] (Galarza et al., 2022, p. 706). El índice de peligro (HI) es una medida del riesgo no carcinogénico; valores superiores a 1 indican riesgo. Aquí, el HI superó el límite seguro entre 23 y 352 veces, lo que significa que la exposición a través del agua y los sedimentos es altamente peligrosa. El manganeso (Mn) y el hierro (Fe) fueron los principales contribuyentes (75% en agua y 99% en sedimentos) al riesgo total calculado basado en el HI. Pero además, "The calculated TCR for children and adults exceeded approximately one to three times the permissible threshold in all sites. As and Pb contributed up to 93% of the total calculated risk based on TCR for both children and adults" [El TCR calculado para niños y adultos excedió aproximadamente de una a tres veces el umbral permisible en todos los sitios. El As y el Pb contribuyeron hasta con el 93% del riesgo total calculado basado en el TCR para niños y adultos] (Galarza et al., 2022, p. 706). El riesgo de cáncer total (TCR) tiene un rango de aceptabilidad por debajo de 1×10^{-6}; aquí se superó hasta tres veces ese umbral, lo que indica un riesgo carcinogénico significativo debido principalmente al arsénico (As) y al plomo (Pb).

Los impactos en la salud humana son múltiples y especialmente graves para los grupos vulnerables. El metilmercurio es un neurotóxico potente que afecta el desarrollo del sistema nervioso central, especialmente en fetos y niños pequeños. La literatura gris de Webb (2024) señala que “Su principal objetivo es el cerebro y el sistema nervioso, especialmente los fetos y los niños, pero también afecta a los riñones y al sistema inmunitario” (párr. 6). El artículo recuerda el famoso personaje del sombrerero loco de Alicia en el país de las maravillas, basado en el hecho de que los sombrereros usaban mercurio para endurecer el fieltro y sufrían daños cerebrales. El mercurio se bioacumula en la cadena alimentaria: los mineros, sus familias y vecinos están expuestos al mercurio inorgánico por inhalación, pero, el exceso de mercurio se deposita en el ambiente, donde gran parte acaba en ríos. Allí, el mercurio es convertido a su forma orgánica por bacterias y entra en la cadena alimentaria, viajando no solo a través de los ríos hacia otros lugares, sino también hacia arriba en la cadena alimentaria, concentrándose en depredadores de élite, como los humanos. “Esta forma de mercurio es tóxica para el cerebro y el sistema nervioso en dosis bajas. De este modo, las comunidades que no participan en la minería también se ven afectadas” (Webb, 2024, párr. 7). Una revisión reciente de la exposición al mercurio que cubre toda la región de América Latina identificó el Amazonas como indiscutiblemente la zona con mayor vulnerabilidad, basándose en la presencia de minería de oro a pequeña escala y en niveles registrados de este metal tóxico, que son lo suficientemente altos como para afectar al funcionamiento normal del sistema nervioso y disminuir el coeficiente intelectual de los niños.

En Ecuador, los estudios de campo documentados por Mestanza-Ramón et al. (2022) en el artículo “Gold Mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a Review of Its Socio-Environmental Impacts” revelan impactos directos en la salud de las comunidades mineras y aledañas. Los autores realizaron entrevistas a 154 personas, incluyendo mineros locales, autoridades y residentes de pueblos mineros. Los resultados son alarmantes pues:

> In the field interviews, 67% of the residents of mining towns stated that one of their family members had presented a condition compatible with cancer [En las entrevistas de campo, el 67% de los residentes de pueblos mineros afirmaron que uno de sus familiares había presentado una condición compatible con cáncer]. (Mestanza-Ramón et al., 2022, p. 13)

En ese sentido, también se menciona que:

> The 87% of the local miners consider that in the last year they have presented health problems or illnesses compatible with headaches, hives, and red and white spots on the body, essentially on their extremities, and only 12% went for medical consultations at nearby health centers [el 87% de los mineros locales consideran que en el último año han presentado problemas de salud o enfermedades compatibles con dolores de cabeza, urticaria y manchas rojas y blancas en el cuerpo, esencialmente en sus extremidades, y solo el 12% acudió a consultas médicas en centros de salud cercanos]. (Mestanza-Ramón et al., 2022, p. 13)

Estos síntomas son característicos de la intoxicación por mercurio y otros metales pesados. Los veteranos mineros artesanales y los habitantes de comunidades cercanas reportaron deterioro cognitivo, y los autores concluyen que la exposición e ingestión a largo plazo de sustancias tóxicas de estas actividades mineras puede ser la causa principal.

El impacto en la seguridad alimentaria es directo y devastador porque las comunidades indígenas y ribereñas de la Amazonía ecuatoriana dependen del pescado como su principal fuente de proteína animal. Mestanza-Ramón et al. (2022) señalan que

> The towns located in the lower basin of rivers with mining activity are affected by the high concentration of contaminants present in the water tributaries. These contaminants are found in the ichthyofauna that the communities take advantage of in all their fishing activities" [los pueblos ubicados en la cuenca baja de los ríos con actividad minera se ven afectados por la alta concentración de contaminantes presentes en los afluentes de agua. Estos contaminantes se encuentran en la ictiofauna que las comunidades aprovechan en todas sus actividades pesqueras] (p. 12).

La contaminación de los peces no solo expone a las personas al mercurio, sino que también reduce la disponibilidad de pescado, ya que los peces mueren o migran. Las familias cercanas a la actividad minera, careciendo de ingresos económicos, se ven afectadas por la deforestación y la contaminación del agua. Los lugareños afirman que antes de la minería, actividades como la pesca y el baño en los ríos eran muy comunes, pero ahora, por miedo a contraer enfermedades, prefieren no utilizar los servicios que proporcionan los ríos. Esto ha afectado sus medios de vida y sus actividades cotidianas. Como resultado, el costo de vida ha aumentado; lo que solían obtener de los recursos del ecosistema ahora deben comprarlo en pueblos vecinos, y para el recurso vital del agua, ahora tienen que cavar pozos por temor a contraer enfermedades (Mestanza-Ramón et al., 2022).

La vulnerabilidad diferencial de la población es otro aspecto crítico. Los niños y las mujeres en edad reproductiva son los más afectados. La literatura gris de Webb (2024) cita un estudio en la región de Madre de Dios, en el Amazonas peruano (una situación comparable a la ecuatoriana), donde se encontró una asociación entre los niveles de mercurio, la desnutrición y un sistema inmunitario debilitado entre los niños, y el 37% de las personas evaluadas tenían niveles superiores al de referencia de la Organización Mundial de la Salud,

con niveles más altos en áreas cercanas a la minería a pequeña escala. Las mujeres son especialmente vulnerables a los efectos negativos de los altos niveles de mercurio porque siguen siendo las principales cuidadoras de los niños. Además, el artículo menciona que, en comunidades indígenas de la región de Putumayo, el 84% tenían niveles de mercurio considerados inseguros para mujeres embarazadas, y estos niveles estaban asociados con zonas donde se produjo la minería “en barco” y con el suministro de pescado contaminado. En Ecuador, el estudio de Galarza et al. (2022) identificó que los sitios P6 y P11 están ubicados a menos de 1 km de aproximadamente 50 comunidades indígenas que dependen de los ríos para obtener agua para uso diario. Las comunidades ubicadas en las salidas de las cuencas (sitios P6, P9, P10 y P11) tenían los HI y TCR más altos, superando con creces los umbrales seguros. Así pues:

> The degree of contamination of both water and sediments and the HI and TCR calculated for these sites suggest that it might be possible that local communities have been consuming water with metal and metalloid levels greater than the recommended for a relatively long time [El grado de contaminación del agua y los sedimentos y el HI y TCR calculados para estos sitios sugieren que es posible que las comunidades locales hayan estado consumiendo agua con niveles de metales y metaloides superiores a los recomendados durante un tiempo relativamente largo] (Galarza et al., 2022, p. 711).

Además de los efectos directos en la salud por exposición a metales pesados, la minería ilegal afecta la seguridad alimentaria a través de la pérdida de medios de vida tradicionales. Mestanza-Ramón et al. (2022) documentan que el 73% de los mineros declararon que antes se dedicaban a la agricultura, la ganadería o el turismo, y el 85% de los residentes afirmaron que algunos de sus familiares que actualmente se dedican a la minería

antes se dedicaban a la agricultura, la ganadería o el turismo. Este cambio y pérdida de medios de vida ha llevado al abandono de tierras agrícolas y ganaderas potenciales. La tentación de obtener dinero rápido y las presiones diarias para cubrir las necesidades familiares impulsan este cambio, pero a largo plazo, las comunidades pierden su autonomía alimentaria y se vuelven dependientes de alimentos comprados, a menudo de menor calidad nutricional. La escasez de agua es otro impacto crítico: los residentes entrevistados indicaron que la minería ha provocado una disminución en la disponibilidad de agua para las actividades diarias, y muchos tienen que cavar pozos por temor a contraer enfermedades por el agua superficial contaminada.

Finalmente, la falta de control estatal agrava todos estos impactos. Mestanza-Ramón et al. (2022) señalan que “the state is incapable of properly controlling and monitoring ASGM and large-scale mining activities” [el estado es incapaz de controlar y monitorear adecuadamente las actividades de minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) y de gran escala] (p. 18). El número de personal provincial y de gobierno local para el control y monitoreo de estas actividades no supera las 10 personas por provincia en la región amazónica. Esta falta de capacidad, sumada a la corrupción y a la presión de los grupos mineros, permite que la minería ilegal prospere. Como consecuencia, las complicaciones y enfermedades relacionadas con los metales pesados, que son 100% evitables, continúan afectando a las poblaciones más vulnerables. La literatura gris de Webb (2024) concluye que:

> Mientras haya demanda de oro, la gente en algún lugar buscará formas baratas y rápidas de llevarlo al mercado. Apoyar las luchas de las comunidades indígenas que luchan por proteger su hogar en la selva tropical de esta fiebre del oro es esencial para proteger su salud y supervivencia”. (p. 12)

En Ecuador, la minería ilegal en la Amazonía no solo está destruyendo ecosistemas, sino que está envenenando a las personas que dependen de ellos, creando una crisis de salud pública y seguridad alimentaria que requiere acciones urgentes e integrales, incluyendo el monitoreo ambiental continuo, la remediación de áreas contaminadas, la provisión de fuentes alternativas de agua y alimentos, la educación sanitaria, y la atención médica especializada para las poblaciones expuestas. No obstante, los estudios que sustentan esta afirmación presentan limitaciones metodológicas que matizan la contundencia de la evidencia. Galarza et al. (2022) basó sus cálculos del índice de peligro (HI) y del riesgo de cáncer total (TCR) en concentraciones totales de metales, no en concentraciones biodisponibles, lo que sobreestima el riesgo real ya que, no todo el metal presente en agua, o sedimento está disponible para ser absorbido por el organismo. Además, los parámetros de exposición (frecuencia de exposición de 350 días/año, duración de exposición de 24 años para adultos) son valores estándar tomados de la US EPA y no fueron validados con datos locales sobre el tiempo real que las comunidades indígenas pasan en contacto con los ríos.

Otra limitación es que el estudio no consideró la exposición por ingestión de pescado, que es una de las principales vías de exposición al metilmercurio en la Amazonía, lo que probablemente subestima significativamente el riesgo total. Mestanza-Ramón et al. (2022) utilizó exclusivamente entrevistas semi-estructuradas para recolectar datos sobre salud (67% reportaron cáncer en familiares, 87% reportaron síntomas de intoxicación), sin complementarlas con diagnósticos clínicos ni con la medición de biomarcadores (mercurio en cabello, plomo en sangre, etc.), por lo que los síntomas reportados (dolores de cabeza, urticaria, manchas en la piel) no pueden ser atribuidos causalmente a la exposición a metales pesados, ya que, podrían deberse a otras causas como infecciones parasitarias, desnutrición o enfermedades tropicales.

Asimismo, el artículo periodístico de Webb (2024), utilizado como literatura gris, carece de una metodología explícita y verificable, y las cifras presentadas no incluyen referencias a fuentes primarias ni especifican los métodos de cálculo utilizados, lo que limita su valor como evidencia. Por lo tanto, aunque los hallazgos son consistentes con una crisis de salud pública, la magnitud real del impacto permanece incierta y posiblemente subestimada debido a estas limitaciones metodológicas.

6.3. CONSECUENCIAS A LARGO PLAZO Y SU RELACIÓN CON FACTORES ANTROPOGÉNICOS, CLIMÁTICOS Y AMBIENTALES

Los metales pesados son elementos persistentes, no biodegradables y con alto potencial de bioacumulación. Una vez en el suelo, su biodisponibilidad para las plantas depende del pH, materia orgánica y textura del suelo (Quintana et al., 2024). Esta persistencia es el punto de partida para comprender las consecuencias a largo plazo de la minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana. A diferencia de otros contaminantes orgánicos que pueden degradarse con el tiempo, los metales pesados como el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el arsénico (As) permanecen en el ambiente durante décadas o incluso siglos, acumulándose en los sedimentos, los suelos y los organismos vivos. En la comunidad de Yutzupino, ubicada en la provincia de Napo, la minería ilegal ha generado una transformación profunda del paisaje y ha acelerado la degradación ambiental. Cañar & Loor (2023) documentan que, tras la suspensión de la concesión minera en octubre de 2020, mineros ilegales no familiarizados con la comunidad invadieron rápidamente el área, utilizando maquinaria pesada y compitiendo agresivamente con los mineros tradicionales locales. El Proyecto de Monitoreo de los Andes Amazónicos (MAAP) emitió su primer informe de alerta en octubre de 2021, identificando menos de una hectárea de tierra afectada. Para diciembre del mismo año, el daño se había expandido a 61 hectáreas. Según el informe periodístico de literatura gris de Alvarado (2022), consultado a Sylvia Villacís, de la organización Ecociencia, el 87,5% de la expansión de la minería ilegal ocurrió en diciembre, y para enero de 2022 el área devastada había crecido otras seis hectáreas. Esta alarmante tasa de expansión demuestra cómo la fase posconcesión puede derivar en una sobreexplotación anárquica de los recursos, con consecuencias ambientales que se magnifican exponencialmente en períodos muy cortos.

Una de las consecuencias a largo plazo más graves es la bioacumulación y biomagnificación de metales pesados a lo largo de la cadena trófica. El estudio de Echevarría et al. (2024) analizó 360 especímenes de peces pertenecientes a 58 especies en las cuencas de los ríos Napo y Pastaza, y encontró evidencia clara de biomagnificación de mercurio en las lagunas de la cuenca del Pastaza. Específicamente, el modelo de regresión lineal generalizada mostró que la posición trófica de los peces tenía un coeficiente positivo y significativo en la concentración de mercurio, lo que indica que a medida que se asciende en la cadena alimentaria, las concentraciones de este metal aumentan. Los peces piscívoros, como *Pseudoplatystoma fasciatum*, *Rhaphiodon vulpinus* y *Brachyplatystoma spp.*, presentaron posiciones tróficas superiores a 4.5 y acumularon las concentraciones más altas de mercurio. Un solo espécimen de *Brachyplatystoma rousseauxii*, un bagre gigante migratorio de 151 cm de longitud presentó 0.77 ppm de mercurio, uno de los valores más altos registrados en el estudio. Esta biomagnificación tiene implicaciones directas para la salud humana, ya que, las comunidades indígenas y ribereñas consumen estos peces como fuente principal de proteína animal. A largo plazo, la exposición crónica al metilmercurio a través del consumo de pescado contaminado puede causar daños neurológicos irreversibles, especialmente en niños y mujeres embarazadas.

La relación con factores antropogénicos es directa y múltiple. La minería ilegal no opera en el vacío; está impulsada por factores económicos globales. Según señala el artículo periodístico de literatura gris de Panchana (2022) considerada como literatura gris, Jorge Celi, profesor de ecología de la Universidad Ikiam, explica que "There are buyers who come to the river. Before it was 35 [US] dollars a gram and now they are paying $43." [Hay compradores que vienen al río. Antes costaba 35 dólares [estadounidenses] el gramo y ahora pagan 43 dólares.]. Este aumento del precio incentiva la expansión de la minería incluso en áreas protegidas y territorios indígenas. Entre 2015 y 2021, la deforestación por minería en la

Amazonía ecuatoriana aumentó un 300%, pasando de 1.875 hectáreas a 7.495 hectáreas. En la provincia de Napo, específicamente, la superficie dedicada a la minería pasó de 270 hectáreas en 2015 a 1.125 hectáreas en 2021, un incremento del 316% (Borja et al., 2023). El informe de Mena-Quintana et al. (2025) señala que la deforestación por minería en el Naranjalito, en la parroquia Puerto Napo, ha alcanzado aproximadamente 40 hectáreas, con remoción de las capas superficiales y subsuperficiales del suelo. La extracción de oro en minas a cielo abierto implica la remoción de la capa superficial del suelo (horizonte A) y la excavación de fosas de 30 por 30 metros hasta alcanzar la roca madre, a profundidades de entre 5 y 8 metros. El material extraído (arena, grava y piedras) se procesa para extraer el oro y luego se devuelve a las fosas sin reponer el suelo orgánico. El resultado es un sustrato estéril, compuesto principalmente por fragmentos de roca y sedimentos gruesos, con una capacidad casi nula para retener agua y nutrientes.

Los factores climáticos juegan un papel crucial en la dinámica de la contaminación a largo plazo. El estudio de Echevarría et al. (2024) encontró que las concentraciones de metales pesados en peces variaban significativamente entre estaciones hidrológicas. Durante la campaña de muestreo de julio de 2021, que coincidió con niveles de agua inusualmente bajos debido a una sequía asociada al fenómeno de La Niña, se registraron las concentraciones más altas de 10 de los 11 metales analizados (todos excepto mercurio). El modelo de redundancia (RDA) mostró que la fase hidrológica (estación seca versus estación creciente) explicaba una parte significativa de la varianza en las concentraciones de metales. El mecanismo propuesto es que, durante los períodos de bajos caudales, las temperaturas del agua aumentan, lo que acelera las tasas metabólicas de los peces y, por ende, su ingesta y adsorción de metales pesados. Además, la reducción del volumen de agua concentra los contaminantes, aumentando su disponibilidad para los organismos acuáticos. El cambio

climático proyecta un aumento en la frecuencia e intensidad de sequías en la Amazonía, lo que podría exacerbar este fenómeno.

Los factores ambientales que modulan la contaminación incluyen el tipo de hábitat, la geología local y los procesos de transporte de sedimentos. El estudio de Echevarría et al. (2024) encontró que los peces de lagunas de inundación (floodplain lakes) presentaban concentraciones de mercurio más altas que los peces de ríos. Esto se debe a que las lagunas tienen condiciones favorables para las bacterias anaeróbicas que metilan el mercurio inorgánico, convirtiéndolo en metilmercurio, su forma más tóxica y bioacumulable. Además, los sedimentos finos que se acumulan en estas lagunas actúan como reservorios de metales. El análisis de redundancia mostró que el hábitat (laguna versus río) afectaba significativamente las concentraciones de cobre y mercurio, con los peces de río mostrando concentraciones más altas de cobre y más bajas de mercurio en comparación con los de lagunas. La geología local también es un factor relevante. En la cuenca del Pastaza, las concentraciones más altas de aluminio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, hierro, mercurio y plomo en peces se asociaron con la presencia de una densa red de pozos petroleros en el lado peruano de la cuenca, ubicados aproximadamente a 80 km aguas abajo de los sitios de muestreo. Estos pozos tienen al menos cuatro puntos de descarga que liberan aguas residuales petroquímicas en la cuenca del río Pastaza, que contienen niveles elevados de plomo, cadmio y cromo, según estudios previos citados por los autores.

Las consecuencias a largo plazo sobre la biodiversidad acuática ya son evidentes. Por ejemplo, los macroinvertebrados son esenciales para el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas de agua dulce, y su ausencia indica una degradación severa y posiblemente irreversible a corto plazo. El estudio también encontró que aproximadamente el 90% de las

muestras analizadas mostraban toxicidad, lo que indica "contaminación crónica" en los sitios evaluados. Jorge Celi, en el artículo periodístico de literatura gris de Panchana (2022), explica que:

> In a river, its course or flow is very important, as well as the chemistry of the water. All of this is connected and affects the biota, the set of species of plants, animals and other organisms that inhabit an immense area of the Amazon [En un río, su curso o caudal es muy importante, así como la química del agua. Todo esto está relacionado y afecta a la biota, el conjunto de especies de plantas, animales y otros organismos que habitan una inmensa zona del Amazonas]. (párr. 12)

La destrucción del hábitat acuático no solo afecta a los peces, sino a toda la red trófica, incluyendo aves, reptiles y mamíferos que dependen de los ríos para alimentarse y reproducirse. El subteniente Jorge Andrade, director de la unidad de protección ambiental de la Policía Nacional, señala que "el daño en Yutzupino ha causado que las especies de vida silvestre se muevan de su hábitat natural para buscar comida cada vez más cerca de las áreas pobladas" (Panchana, 2022). Esto genera conflictos entre humanos y fauna silvestre, como serpientes que se alimentan de gallinas domésticas.

La degradación del suelo es otra consecuencia a largo plazo que ha sido cuantificada en el estudio de Mena-Quintana et al. (2025) en el sitio minero de Naranjalito, en la parroquia Puerto Napo. Estos autores analizaron la composición elemental del suelo antes de cualquier tratamiento de restauración y confirmaron la presencia de 13 elementos por encima de los límites máximos permisibles. Los suelos afectados por minería aluvial no solo están

contaminados químicamente, sino que han perdido su estructura física. El proceso de extracción de oro en minas a cielo abierto implica la remoción de la capa superficial del suelo (horizonte A) y la excavación de fosas de 30 por 30 metros hasta alcanzar la roca madre, a profundidades de entre 5 y 8 metros. El material extraído (arena, grava y piedras) es procesado para extraer el oro y luego devuelto a las fosas, pero, sin reponer el suelo orgánico. El resultado es un sustrato estéril, compuesto principalmente por fragmentos de roca y sedimentos gruesos, con una capacidad casi nula para retener agua y nutrientes. La pérdida de materia orgánica es casi total: antes de la restauración, los suelos degradados tenían un contenido de materia orgánica muy bajo en comparación con los suelos de referencia de ecosistemas cercanos (chacras y bosques secundarios). A largo plazo, esto implica que, sin intervención humana activa (como la aplicación de biocompost y la revegetación con especies pioneras), estos suelos no podrían recuperarse naturalmente en escalas de tiempo humanamente relevantes.

La relación entre la contaminación por metales pesados y los factores antropogénicos se extiende también a la gestión de residuos sólidos. Ecuador produce aproximadamente 13.372 toneladas de residuos sólidos al día, lo que suma 4,88 millones de toneladas al año, de las cuales el 55,65% son residuos orgánicos. Sin embargo, solo el 3,7% de estos residuos se utilizan para reciclaje y compostaje, mientras que el 96,3% restante se entierra o se envía a plantas de coprocesamiento (Peñafiel et al., 2025). Los vertederos mal gestionados emiten metano, un potente gas de efecto invernadero, y pueden generar lixiviados que contaminan aguas subterráneas y superficiales con metales pesados y otros contaminantes. Esta situación representa una oportunidad perdida: los residuos orgánicos podrían convertirse en biofertilizantes (biocompost y biol) para ser aplicados en la restauración de suelos degradados por la minería. El estudio de Mena-Quintana et al. (2025) demostró que la aplicación de biocompost elaborado a partir de residuos orgánicos de mercado (76,6% vegetales, 17,2%

frutas, 3% cereales) mezclado con biochar, suplementado con biol de microorganismos de montaña, logró aumentar significativamente la cobertura vegetal en suelos degradados por minería. El tratamiento con dosis alta de biocompost (34,24 t/ha) logró una cobertura vegetal del 89,68% a los seis meses, mientras que el tratamiento sin biocompost apenas alcanzó el 74,63%. Esto demuestra que es posible restaurar suelos degradados utilizando residuos que de otro modo contribuirían al cambio climático y la contaminación.

Las consecuencias a largo plazo también incluyen impactos sobre la cohesión social que se manifestaron décadas después. Pues el artículo periodístico de literatura gris de Panchana (2022), entrevistando a José Moreno, de Napo Vive, señala que "lo que está pasando aquí es una burla para los más de 160.000 habitantes de la provincia de Napo, los más afectados por la contaminación". Las movilizaciones sociales de octubre de 2022, en las que cientos de personas marcharon por las calles de Tena para exigir acciones concretas al gobierno, son un indicador de que la paciencia de las comunidades se está agotando y que podrían incluir también conflictos sociales y políticos.

Asimismo, la minería ilegal no se limita a las áreas donde se extrae el oro, sino que se extienden aguas abajo a través del transporte de sedimentos contaminados. El río Napo fluye desde Ecuador hacia Perú, y los metales pesados depositados en sus sedimentos pueden ser transportados cientos de kilómetros, afectando ecosistemas y comunidades en otros países. Este fenómeno transfronterizo complejiza aún más la gestión, ya que, requiere cooperación internacional. Además, las especies de peces migratorios, como *Brachyplatystoma rousseauxii*, pueden acumular mercurio en Ecuador y luego ser capturadas y consumidas en Perú, o Brasil, desvinculando espacialmente la fuente de contaminación de su impacto en la salud humana. El estudio de Echevarría et al. (2024) señala que no se

encontró una correlación significativa entre la distancia a los pozos petroleros y las concentraciones de metales pesados en los peces. Es decir, que las fuentes difusas (como la minería artesanal dispersa y la deforestación) son más importantes, que fuentes puntuales.

Finalmente, las consecuencias a largo plazo de la minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana son multidimensionales, porque abarcan la persistencia de contaminantes tóxicos en suelos y sedimentos, la biomagnificación a través de cadenas tróficas, la pérdida irreversible de biodiversidad, la degradación física y química de los suelos, la exacerbación de los impactos por cambio climático, y la generación de conflictos sociales. La evidencia presentada en los estudios revisados demuestra que estas consecuencias ya son graves y que, sin acciones de restauración activa (como la aplicación de biocompost y la revegetación con especies nativas) y sin un control estatal efectivo de la minería ilegal, la Amazonía ecuatoriana corre el riesgo de perder su capacidad de proveer servicios ecosistémicos esenciales para las generaciones futuras.

Sin embargo, los estudios que documentan estas consecuencias presentan limitaciones que deben considerarse al interpretar la solidez de la evidencia. Echevarría et al. (2024), aunque analizó 360 especímenes de 58 especies, tuvo un número de especímenes por especie muy variable, con varias especies representadas por solo uno, o dos individuos, lo que limitó la capacidad de los modelos estadísticos para detectar efectos significativos de variables como la posición trófica, o el tamaño corporal. Además, el estudio no incluyó mediciones de concentraciones de metales en agua, o sedimentos en los mismos puntos de muestreo, lo que impide correlacionar directamente las concentraciones en peces con los niveles ambientales, y los modelos de distancia a pozos petroleros no resultaron significativos

sin explorar otras variables espaciales como la distancia a puntos de minería artesanal, o a áreas deforestadas.

También Cañar & Loor (2023) presentó una revisión cualitativa sin especificar los criterios de búsqueda ni la estrategia de selección de fuentes, lo que introduce un posible sesgo de selección. Mena-Quintana et al. (2025), aunque con un diseño experimental robusto, evaluó la restauración solo por seis meses, lo que es insuficiente para determinar la recuperación a largo plazo de suelos degradados por minería, y no incluyó mediciones de metales pesados en los tejidos de las plantas utilizadas para revegetación, por lo que no se puede determinar si las especies están acumulando los contaminantes, o simplemente tolerándolos. La literatura gris de Panchana (2022), al ser una fuente periodística sin revisión por pares, no incluye detalles sobre los métodos de muestreo, criterios de identificación taxonómica, o protocolos de análisis químico. Por lo tanto, la evidencia sobre las consecuencias a largo plazo, aunque consistente, es todavía preliminar y requiere ser robustecida con estudios que superen estas limitaciones.

6.4. VACÍOS DE CONOCIMIENTO POR CONTAMINACIÓN DE MINERÍA ILEGAL EN ECUADOR

La identificación de vacíos de conocimiento es fundamental para orientar futuras investigaciones. También es clave para diseñar políticas públicas efectivas en materia de minería ilegal en Ecuador. A pesar de los avances en la documentación de impactos ambientales, la revisión de la literatura científica y los informes técnicos disponibles revela deficiencias significativas. Estas deficiencias limitan la comprensión integral del problema.

Uno de los vacíos más notorios es la ausencia de estudios longitudinales. Este tipo de estudios permitiría monitorear la evolución temporal de las concentraciones de metales pesados en la Amazonía ecuatoriana. Los trabajos de Verdezoto (2023) documentan la deforestación y la contaminación por mercurio, cadmio y plomo en provincias como Napo, Orellana, El Oro y Zamora Chinchipe. Erazo-Morales & Esteves-Fajardo (2023) también describen la problemática ambiental en la Amazonía ecuatoriana. Sin embargo, todos los estudios citados en estos trabajos se basan en campañas de muestreo puntuales. No existe un seguimiento sistemático de los mismos puntos de muestreo a lo largo de varios años.

El informe de Borja et al. (2023), reporta cifras anuales de deforestación. Por ejemplo, en la zona de Punino se acumularon 1.001 hectáreas deforestadas entre 2019 y 2023. En el Bosque Protector Cuenca Alta del Río Nangaritza, en Zamora Chinchipe, se deforestaron 545 hectáreas desde 2018. El Territorio Indígena Shuar Arutam, en Morona Santiago, perdió 257 hectáreas por minería desde 2021. Sin embargo, no existen mediciones de concentraciones de mercurio, cadmio, plomo, o arsénico en los mismos puntos de muestreo a lo largo del tiempo. Tampoco se ha correlacionado el incremento anual de la deforestación con el aumento de metales en agua, sedimentos, o peces en los mismos sitios.

Esta falta de monitoreo temporal impide establecer relaciones causales directas. No se puede afirmar con certeza que la expansión de la minería ilegal en un año específico haya causado un aumento proporcional de metales en los ríos. Tampoco se puede evaluar la efectividad de las medidas de control implementadas por el gobierno. Un ejemplo claro es la suspensión temporal de la minería en la provincia de Napo, declarada en febrero de 2022. Sin estudios longitudinales, no es posible determinar si esta medida redujo, o no las concentraciones de metales en los meses posteriores. Tampoco se puede saber si los picos de contaminación son eventos agudos (asociados a un vertido puntual), o crónicos (asociados a la acumulación continua de sedimentos).

Otro punto crítico es la escasa, o nula evidencia sobre la transferencia de metales pesados a los cultivos de subsistencia. Aunque Verdezoto (2023) menciona que las aguas contaminadas se utilizan para el riego de cultivos, ningún estudio revisado ha cuantificado este proceso. Tampoco se ha medido la concentración de metales en los tejidos de cultivos como la yuca, el plátano, el fréjol o el maní. Estos cultivos son la base de la seguridad alimentaria de las comunidades Kichwa. Dichas comunidades están asentadas en las riberas de los ríos Napo, Jatunyacu, Anzu, Payamino y Punino.

El informe de la organización internacional GI-TOC elaborado por Hunter (2025) señala que, en las parroquias de Guayusa, Nuevo Paraíso y Armenia, en la provincia de Orellana, habitan comunidades indígenas Kichwa y campesinas. Estas comunidades dependen de los ríos para pescar, lavar ropa, bañarse, navegar y consumir el líquido vital. Sin embargo, no se ha medido la concentración de mercurio, cadmio, o plomo en los cultivos regados con estas aguas. Tampoco se ha evaluado si existe una correlación entre la cercanía a los puntos de minería ilegal y los niveles de metales en los alimentos vegetales. Por ejemplo, no se sabe si una planta de yuca cultivada a 50 metros de un punto de extracción ilegal acumula más metales que una cultivada a 500 metros. Tampoco se ha estudiado si el

consumo de estos cultivos contaminados representa un riesgo adicional al ya documentado por el consumo de pescado.

Esta ausencia de información impide calcular la exposición real de la población a través de la dieta completa. Las autoridades sanitarias no pueden emitir recomendaciones alimentarias preventivas basadas en evidencia. Tampoco se puede evaluar si las comunidades están siendo afectadas por una vía de exposición que actualmente es invisible para la ciencia y para el Estado.

Un tercer vacío de conocimiento, íntimamente relacionado con los anteriores, es la falta de estudios epidemiológicos directos en poblaciones ecuatorianas expuestas a la minería ilegal. Aunque Verdezoto (2023) y Erazo-Morales & Esteves-Fajardo (2023) documentan la contaminación de agua y suelos con metales tóxicos, no existen estudios clínicos que hayan cuantificado biomarcadores de exposición. No se han medido niveles de mercurio total en, por ejemplo, el cabello en habitantes de las provincias de Napo, Orellana, Zamora Chinchipe, o Morona Santiago. Tampoco se han medido niveles de mercurio urinario, plomo en sangre, o cadmio en orina en estas poblaciones.

La violencia y la inseguridad en ciertas zonas mineras, documentadas en la literatura, han dificultado el acceso de investigadores a estas áreas, limitando la recolección de muestras biológicas. Los estudios epidemiológicos requieren visitas repetidas a las comunidades, la colaboración voluntaria de los habitantes y la recolección de muestras biológicas, lo cual se ve obstaculizado en contextos de conflicto.

Sin datos de biomarcadores, no es posible establecer asociaciones causales entre la exposición a metales pesados y la prevalencia de enfermedades neurológicas, renales, reproductivas, o cancerígenas en estas poblaciones. Tampoco se puede evaluar si los

síntomas reportados por los mineros corresponden efectivamente a intoxicación por mercurio. Los síntomas mencionados por Verdezoto (2023) incluyen dolores de cabeza, urticaria y manchas rojas, o blancas en el cuerpo. Sin un estudio epidemiológico, no se puede distinguir si estos síntomas se deben al mercurio, a otros metales, a infecciones parasitarias o a otras causas.

Otro vacío significativo es que los efectos sinérgicos de la contaminación por múltiples metales no han sido evaluados en el contexto ecuatoriano. Verdezoto (2023) y Erazo-Morales & Esteves-Fajardo (2023) documentan la presencia simultánea de cadmio, mercurio, plomo, arsénico, cromo, cobre, vanadio y zinc en suelos y aguas de zonas mineras. En la parroquia de Muluncay Grande, en el cantón Zaruma, las concentraciones de metales pesados en suelos superan los límites establecidos por la normativa ecuatoriana. En el río Punino, la minería ilegal ha causado cambios drásticos en el color y olor del agua, y se han encontrado peces muertos. Sin embargo, ningún estudio ha evaluado cómo interactúan estos metales entre sí en el organismo humano.

La exposición simultánea a múltiples metales puede producir efectos sinérgicos, antagónicos, o aditivos. Los efectos sinérgicos son aquellos en los que el daño combinado es mayor que la suma de los daños individuales. Los efectos antagónicos son aquellos en los que un metal reduce la toxicidad de otro. Los efectos aditivos son aquellos en los que el daño combinado es igual a la suma de los daños individuales. Estos efectos no pueden predecirse a partir del estudio de cada metal por separado. Por ejemplo, la combinación de mercurio y plomo puede potenciar el daño neurológico. La combinación de cadmio y plomo puede tener efectos aditivos sobre el riñón. Ciertos metales, como el selenio, pueden interferir en la absorción de mercurio, pero no se ha estudiado esta interacción en las poblaciones ecuatorianas. La ausencia de estudios toxicológicos que aborden estas interacciones limita

la capacidad de establecer estándares de calidad ambiental realistas. Los límites permisibles actuales se basan en estudios de un solo metal, no en mezclas complejas.

Tampoco se ha evaluado cómo la contaminación simultánea afecta a la biota, como los macroinvertebrados acuáticos, que son bioindicadores de salud ecosistémica. Verdezoto (2023) menciona que la minería ilegal causa contaminación de agua y suelo, degradación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad, pero, no cuantifica estos impactos en términos de toxicidad de mezclas.

La cobertura geográfica limitada de los estudios es otro vacío de conocimiento evidente. Verdezoto (2023) señala que los focos de minería ilegal en todo el país ya superan el número de 600. Las provincias más afectadas son Zamora Chinchipe, Napo, Imbabura, Azuay, Loja, Los Ríos y Esmeraldas. Sin embargo, la mayoría de los estudios revisados se concentran en dos provincias. Una es la provincia de Napo, con énfasis en los ríos Napo, Jatunyacu, Anzu, Punino y Yutzupino. La otra es la provincia de El Oro, con énfasis en los cantones Zaruma y Portovelo. Provincias como Morona Santiago, Pastaza y Zamora Chinchipe están subrepresentadas. Esto ocurre a pesar de que estas provincias registran actividad minera ilegal significativa.

El informe del MAAP, citado por Verdezoto (2023), documenta que en el Territorio Indígena Shuar Arutam, en Morona Santiago, se han deforestado 257 hectáreas por minería desde 2021. En el Bosque Protector Cuenca Alta del Río Nangaritza, en Zamora Chinchipe, se han deforestado 545 hectáreas desde 2018. En el Parque Nacional Podocarpus, también en Zamora Chinchipe, se han deforestado 25 hectáreas al interior del parque desde 2019. Sin embargo, no existen estudios de campo que hayan medido concentraciones de metales en agua, sedimentos, peces, o suelos en estas áreas específicas. Tampoco se han evaluado los impactos en la salud de las comunidades Shuar que habitan esas zonas.

Las dificultades de acceso por razones de seguridad han limitado la cobertura geográfica de la investigación ambiental, sesgando el conocimiento sobre la magnitud real del problema. Se sabe mucho sobre Napo y El Oro, pero muy poco sobre Morona Santiago, Pastaza y Zamora Chinchipe. Es posible que se estén subestimando los impactos en estas provincias menos estudiadas.

Finalmente, existe un vacío de conocimiento en cuanto a la efectividad de las medidas de control y las políticas públicas desde una perspectiva ambiental. A pesar de que el gobierno declaró un estado de excepción en Zaruma en 2017, no se ha publicado una evaluación sistemática de esta medida en términos de su impacto en las concentraciones de metales pesados en agua, sedimentos o biota. Tampoco se ha evaluado la efectividad de la suspensión temporal de la minería en la provincia de Napo, declarada en febrero de 2022, mediante el monitoreo de metales antes y después de la medida. Sin estudios que comparen concentraciones de metales en los mismos puntos de muestreo en diferentes momentos, no es posible determinar algún efecto positivo en la reducción de la contaminación. En su conjunto, estas limitaciones restringen la protección efectiva de la salud ambiental y humana en las zonas afectadas por la minería ilegal en Ecuador.

La comunidad científica, las autoridades ambientales y sanitarias, y las organizaciones de la sociedad civil deben priorizar el cierre de estos vacíos en los próximos años, enfocándose en estudios longitudinales, monitoreo de cultivos de subsistencia, evaluación de biomarcadores en poblaciones expuestas, investigación de efectos sinérgicos de mezclas de metales, y ampliación de la cobertura geográfica hacia provincias subrepresentadas como Morona Santiago, Pastaza y Zamora Chinchipe. Los propios estudios revisados reconocen implícita, o explícitamente estas limitaciones, pero, no las cuantifican.

Por ejemplo, ninguno de los estudios que calculan índices de riesgo (HI, TCR) reporta intervalos de confianza, o realiza simulaciones de Monte Carlo para evaluar cómo la variabilidad en los parámetros de entrada afecta los resultados. Verdezoto (2023) y Erazo-Morales & Esteves-Fajardo (2023) se basan en revisiones bibliográficas que dependen de estudios de campo puntuales, pero, ninguno de estos estudios incluye series temporales, lo que limita la capacidad de los autores para identificar tendencias temporales. El informe de Hunter (2025), aunque aporta información contextual valiosa sobre la presencia de comunidades indígenas en zonas afectadas, no incluye mediciones ambientales ni biomarcadores, por lo que sus afirmaciones sobre exposición a metales pesados carecen de respaldo cuantitativo, ya que, se basa en entrevistas a actores clave (n=30) y en una revisión de fuentes secundarias, lo que lo convierte más en un estudio de percepción y gobernanza que en una investigación toxicológica, o ambiental rigurosa.

En ese sentido, la ausencia de series temporales impide determinar si los picos de contaminación son eventos agudos (asociados a un vertido puntual), o crónicos (asociados a la acumulación continua de sedimentos). Las limitaciones de cobertura geográfica (concentración de estudios en Napo y El Oro, exclusión sistemática de provincias como Morona Santiago, Pastaza y Zamora Chinchipe) sesgan el conocimiento sobre la magnitud real del problema. Es posible que se estén subestimando los impactos en estas provincias menos estudiadas, a pesar de que el MAAP reporta deforestación significativa por minería en el Territorio Indígena Shuar Arutam (Morona Santiago) con 257 hectáreas desde 2021, y en el Bosque Protector Cuenca Alta del Río Nangaritza (Zamora Chinchipe) con 545 hectáreas desde 2018.

En consecuencia, la comunidad científica, las autoridades ambientales y sanitarias, y las organizaciones de la sociedad civil deben priorizar el cierre de estos vacíos en los

próximos años, enfocándose en estudios longitudinales, monitoreo de cultivos de subsistencia, evaluación de biomarcadores en poblaciones expuestas, investigación de efectos sinérgicos de mezclas de metales, y ampliación de la cobertura geográfica hacia provincias subrepresentadas.

7. CONCLUSIONES

La evidencia revisada en este estado del arte confirma que la minería aurífera ilegal en la Amazonía ecuatoriana representa una fuente crítica y generalizada de contaminación por metales pesados. Los datos son contundentes: el 100% de las muestras de agua analizadas en los ríos Napo, Jatunyacu y Anzu superan los límites para la preservación de la vida acuática, y la totalidad de los sitios evaluados presentan sedimentos con concentraciones peligrosas de metales. Por ejemplo, en el mercado de El Coca, ninguna de las 17 especies de peces comercializadas está exenta de contaminación, ya que, todas exceden los umbrales recomendados para arsénico, mercurio y plomo. Los cálculos de riesgo no dejan lugar a dudas: el índice de peligro supera el límite seguro entre 23 y 352 veces, y el riesgo de cáncer total excede de una a tres veces el umbral permisible.

Sin embargo, a pesar de la gravedad evidente de la situación, no es posible afirmar con precisión cuál es la magnitud real del problema. Esta limitación no es menor. La ausencia casi total de estudios longitudinales impide saber si la contaminación está aumentando, disminuyendo o manteniéndose estable en el tiempo. Tampoco es posible evaluar si medidas como la suspensión temporal de la minería en Napo (febrero de 2022) tuvieron algún efecto positivo, porque no se midieron las concentraciones de metales antes y después. El hecho de que los muestreos sean puntuales, sin continuidad en los mismos puntos a lo largo de los años, convierte cualquier conclusión sobre tendencias en unas estimaciones.

Otro problema grave es que prácticamente no existe información sobre la transferencia de metales a los cultivos de subsistencia. Las comunidades Kichwa riegan sus cultivos de yuca, plátano, fréjol y maní con aguas contaminadas, pero, ningún estudio ha medido cuánto mercurio, cadmio, o plomo se acumula en esos alimentos. Esta es una vía de exposición completamente invisibilizada que podría estar contribuyendo significativamente a

la carga tóxica de la población. Tampoco existen estudios epidemiológicos en Ecuador que hayan medido biomarcadores de exposición en estas comunidades. Se sabe que el 87% de los mineros reportan síntomas compatibles con intoxicación por mercurio y que el 67% de los residentes de pueblos mineros tienen familiares con cáncer, pero, estas cifras provienen de entrevistas, no de análisis clínicos. Sin mediciones de mercurio en cabello, plomo en sangre o cadmio en orina, no es posible establecer relaciones causales sólidas.

La cobertura geográfica de los estudios es otro punto ciego importante. Casi todo el conocimiento disponible proviene de dos provincias: Napo y El Oro. Mientras tanto, Morona Santiago tiene 257 hectáreas deforestadas por minería en el Territorio Shuar Arutam, Zamora Chinchipe acumula 545 hectáreas deforestadas en el Bosque Protector Nangaritza, y no existen estudios de campo que hayan medido concentraciones de metales en esas áreas. En el mejor de los casos, se está viendo solo una parte del problema.

Finalmente, los efectos sinérgicos de la contaminación por múltiples metales no han sido evaluados en el contexto ecuatoriano. Los límites permisibles actuales se basan en estudios de un solo metal, pero, en la realidad las comunidades están expuestas a mezclas complejas (Hg, Cd, Pb, As, Cr, Cu, V, Zn todas juntas). La combinación de mercurio y plomo puede potenciar el daño neurológico más allá de lo que cada uno causaría individualmente, y nadie ha medido este efecto en las poblaciones afectadas.

En conjunto, la evidencia apunta, inequívocamente, a una crisis ambiental y sanitaria de magnitudes preocupantes. Pero, también revela que la comprensión del problema es parcial y está llena de vacíos que no pueden seguir siendo ignorados. Sin estudios longitudinales, sin monitoreo de cultivos, sin biomarcadores, sin evaluación de efectos sinérgicos y sin ampliar la cobertura geográfica, cualquier política pública que se diseñe estará basada en una imagen incompleta de la realidad.

8. RECOMENDACIONES

Para la comunidad científica, se recomiendan mediciones repetidas en los mismos puntos de muestreo durante al menos cinco años. Es necesario medir metales en agua, sedimentos y peces de manera simultánea, y correlacionar esos datos con la deforestación y los caudales. También se requiere investigar la transferencia de metales a los cultivos de subsistencia, tomando muestras de yuca, plátano, fréjol y maní a diferentes distancias de los puntos mineros y calculando los factores de transferencia suelo-planta y el riesgo por ingesta. Los estudios epidemiológicos son una necesidad impostergable: se deben medir mercurio total en cabello, plomo y cadmio en sangre en al menos 300 personas por provincia afectada. Los efectos sinérgicos de las mezclas de metales deben evaluarse mediante bioensayos con *Daphnia magna* y *Lactuca sativa* expuestas a concentraciones ambientales reales. Asimismo, se debe ampliar la cobertura geográfica hacia provincias subrepresentadas como Morona Santiago, Pastaza y Zamora Chinchipe, con un mínimo de 10 sitios por provincia. Por último, todos los cálculos de riesgo deberían incorporar análisis de incertidumbre con simulaciones de Monte Carlo, reportando percentiles y no solo promedios.

Para las instituciones gubernamentales, como el MAE y MSP, se sugiere implementar un sistema de monitoreo participativo con frecuencia mensual en los sitios críticos identificados, con resultados accesibles en formatos visuales y bilingües (español-kichwa). Por ejemplo, en los sitios de muestreo de los artículos científicos, como P6, P10, P11 y en el río Payamino se requieren programas de remediación activa utilizando biocompost y biochar combinados con revegetación con *Ochroma pyramidale* y *Arachis pintoi*, evaluados durante al menos dos años. Las comunidades ubicadas a menos de un kilómetro de los puntos más contaminados necesitan fuentes alternativas de agua potable, ya sea mediante sistemas de captación de lluvia, o pozos profundos con filtros apropiados. Además, se deben realizar

evaluaciones periódicas cada dos años sobre la efectividad de medidas como suspensiones temporales de minería, o estados de excepción, monitoreando concentraciones de metales antes, durante y después de las intervenciones.

Para las comunidades locales y organizaciones de la sociedad civil**,** se recomienda participar activamente en los programas de monitoreo participativo propuestos, documentando cambios en la calidad del agua y síntomas de salud. En la medida de lo posible, conviene priorizar el consumo de especies de peces no depredadoras y diversificar las fuentes de proteína animal. Finalmente, se debe gestionar ante las autoridades la implementación de fuentes alternativas de agua potable y programas de atención médica especializada para el diagnóstico y tratamiento de intoxicación por metales pesados.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado, Ana-Cristina. (2022, febrero 17). *Ecuador: la minería ilegal está acabando con dos ríos de la provincia de Napo*. Noticias Ambientales. https://es.mongabay.com/2022/02/ecuador-la-mineria-ilegal-esta-acabando-con-dos-rios-de--napo/

Addai-Arhin, S., Novirsa, R., Jeong, H. H., Phan, Q. D., Hirota, N., Ishibashi, Y., Shiratsuchi, H., & Arizono, K. (2022). Potential human health risks of mercury-contaminated cassavas–Preliminary studies. *Fundamental Toxicological Sciences*, *9*(2), 61-69. https://doi.org/10.2131/fts.9.61

Borja M. O., Aguilar C., Verdesoto G., Villa J, Mamani N, Finer M, Josse C (2023) Expansión de la Minería en la Amazonía de Ecuador. MAAP: 198. https://www.maapprogram.org/es/expansion-mineria-ecuador/

Capparelli, M. V., Cabrera, M., Rico, A., Lucas-Solis, O., Alvear-S, D., Vasco, S., Galarza, E., Shiguango, L., Pinos-Velez, V., Pérez-González, A., Espinosa, R., & Moulatlet, G. M. (2021). An Integrative Approach to Assess the Environmental Impacts of Gold Mining Contamination in the Amazon. *Toxics*, *9*(7), 149. https://doi.org/10.3390/toxics9070149

Carrillo, K. C., Rodríguez-Romero, A., Tovar-Sánchez, A., Ruiz-Gutiérrez, G., & Fuente, J. R. V. (2021). Geochemical baseline establishment, contamination level and ecological risk assessment of metals and As in the Limoncocha lagoon sediments, Ecuadorian amazon region. *Journal Of Soils And Sediments*, *22*(1), 293-315. https://doi.org/10.1007/s11368-021-03084-w

Custodio, M., Pizarro, S., Huarcaya, J., Ortega, K., & Ccopi, D. (2025). Ecological and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Mining-Affected River Sediments in the

Peruvian Central Highlands. *Toxics*, *13*(9), 783. https://doi.org/10.3390/toxics13090783

Díaz, G. E. E., Orellana, F. R. S., Vega, R. E. Y., Valdiviezo-Rivera, J. S., & Ríos-Touma, B. P. (2025). Trace Metal Contamination in Commercial Fish from the Ecuadorian Amazon: Preliminary Health Risk Assessment in a Local Market. *Fishes*, *10*(8), 392. https://doi.org/10.3390/fishes10080392

Donkor, A. K., Ghoveisi, H., & Bonzongo, J. J. (2024). Use of Metallic Mercury in Artisanal Gold Mining by Amalgamation: A Review of Temporal and Spatial Trends and Environmental Pollution. *Minerals*, *14*(6), 555. https://doi.org/10.3390/min14060555

Echevarría, G., Lujan, N. K., Montoya, J., Granda-Albuja, M. G., Valdiviezo-Rivera, J., Sánchez, F., Cuesta, F., & Ríos-Touma, B. (2024). Abiotic and biotic factors influencing heavy metals pollution in fisheries of the Western Amazon. *The Science Of The Total Environment*, *908*, 168506. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168506

Elik, Ü., & Gül, Z. (2025). Accumulation Potential of Lead and Cadmium Metals in Maize (Zea mays L.) and Effects on Physiological-Morphological Characteristics. *Life*, *15*(2), 310. https://doi.org/10.3390/life15020310

Erazo-Morales, P. L., & Esteves-Fajardo, Z. I. (2023). Los problemas ambientales, la minería ilegal y la contaminación en el oriente ecuatoriano. *CIENCIAMATRIA*, *9*(1), 904-914. https://doi.org/10.35381/cm.v9i1.1107

Escobar-Segovia, K., Jiménez-Oyola, S., Garcés-León, D., Paz-Barzola, D., Navarrete, E. C., Romero-Crespo, P., & Salgado, B. (2021). HEAVY METALS IN RIVERS AFFECTED BY MINING ACTIVITIES IN ECUADOR: POLLUTION AND HUMAN HEALTH IMPLICATIONS. *WIT Transactions On Ecology And The Environment*. https://doi.org/10.2495/wrm210061

Felicita Nato, O. M., & Villamarín Fernández, S. P. (2026). *Environmental and health risks of heavy metals: Ecuadorian perspectives*. En N. A. Anjum, A. Masood, N. A. Khan, & S. Umar (Eds.), *Heavy metals in air, soil and water [Working title]*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1013415

Fundación EcoCiencia, Amazon Conservation, & Agencia Noruega de Cooperación para el Desarrollo (Norad). (2024, 11 octubre). *MAAP #221: Minería ilegal en áreas naturales protegidas de la Amazonía ecuatoriana*. Monitoring Of The Andes Amazon Program. Recuperado 14 de abril de 2026, de https://www.maapprogram.org/es/mineria-areas-protegidas-ecuador/

Galarza, E., Moulatlet, G. M., Rico, A., Cabrera, M., Pinos-Velez, V., Pérez-González, A., & Capparelli, M. V. (2022). Human health risk assessment of metals and metalloids in mining areas of the Northeast Andean foothills of the Ecuadorian Amazon. *Integrated Environmental Assessment And Management*, *19*(3), 706-716. https://doi.org/10.1002/ieam.4698

Heng, Y. Y., Asad, I., Coleman, B., Menard, L., Benki-Nugent, S., Were, F. H., Karr, C. J., & McHenry, M. S. (2022). Heavy metals and neurodevelopment of children in low and middle-income countries: A systematic review. *PLoS ONE*, *17*(3), e0265536. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265536

Hunter, M. (2025). *A golden crisis: Illegal mining and gold supply chains in Ecuador*. Global Initiative Against Transnational Organized Crime. https://globalinitiative.net/wp-content/uploads/2025/06/Marcena-Hunter-A-golden-crisis-Illegal-mining-and-gold-supply-chains-in-Ecuador-GI-TOC-June-2025.pdf

Jiménez-Oyola, S., Segovia, K. E., García-Martínez, M., Ortega, M., Bolonio, D., García-Garizabal, I., & Salgado, B. (2021). Human Health Risk Assessment for Exposure to Potentially Toxic Elements in Polluted Rivers in the Ecuadorian Amazon. *Water*, *13*(5), 613. https://doi.org/10.3390/w13050613

Mena-Quintana, F. N., Álvarez, W., Franco, W., Moncayo, L., Tipán, M., & Ayala, J. (2025). Land Degraded by Gold Mining in the Ecuadorian Amazon: A Proposal for Boosting Ecosystem Restoration Through Induced Revegetation. *Forests*, *16*(2), 372. https://doi.org/10.3390/f16020372

Mestanza-Ramón, C., Cuenca-Cumbicus, J., D'Orio, G., Flores-Toala, J., Segovia-Cáceres, S., Bonilla-Bonilla, A., & Straface, S. (2022). Gold Mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a Review of Its Socio-Environmental Impacts. *Land*, *11*(2), 221. https://doi.org/10.3390/land11020221

Mestanza-Ramón, C., Jiménez-Oyola, S., Montoya, A. V. G., Vizuete, D. D. C., D'Orio, G., Cedeño-Laje, J., & Straface, S. (2023). Assessment of Hg pollution in stream waters and human health risk in areas impacted by mining activities in the Ecuadorian Amazon. *Environmental Geochemistry And Health*, *45*(10), 7183-7197. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01597-6

Nodangala, N. Z. (2025). Legal Frameworks for Addressing the Human Rights Violations Linked to Illegal Mining: A Call for Government Accountability and Sustainable Solutions. *The Easta Journal Law And Human Rights*, *3*(03), 158-168. https://doi.org/10.58812/eslhr.v3i03.508

Noormohammadi, A., Mokhtari, A., Vosoughi, M., Dargahi, A., & Fazlzadeh, M. (2025). Investigating the concentration of heavy metals and their health risk assessment in the water resources of northwestern Iran. *Applied Water Science*, *15*(8). https://doi.org/10.1007/s13201-025-02550-x

Oziegbe, O., Oziegbe, E. J., & Ojo-Omoniyi, O. (2025). Bioremediation of heavy metals in aquatic environment: A review. *Cleaner Chemical Engineering*, *11*, 100193. https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100193

Peñafiel, P., Mendoza, M., Jiménez, M., & Masaquiza, D. (2025). Assessment of Urban Solid Waste Management in the Ecuadorian Amazon Region. *World Journal Of Environmental Biosciences*, *14*(3), 32-42. https://doi.org/10.51847/tuzrvngodi

Panchana, A. (2022, 8 de noviembre). Illegal gold mining 'mafias' threaten life in an Ecuadorian river. *Dialogue Earth*. https://dialogue.earth/en/pollution/60366-ecuador-illegal-mining-gold-mafias-threaten-river/

Quintana, Y. G., Grefa, D. D. A., Sánchez, L. R. B., Decoro, S. G., Vega-Rosete, S., Luna-Fox, S. B., & Crespo, Y. A. (2024). The Bioaccumulative Potential of Heavy Metals in Five Forest Species Living in Mining Environments in the Ecuadorian Amazon Region. *Enfoque UTE*, *15*(4), 41-48. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1031

Sabir, M., Baltrėnaitė-Gedienė, E., Ditta, A., Ullah, H., Kanwal, A., Ullah, S., & Faraj, T. K. (2022). Bioaccumulation of Heavy Metals in a Soil–Plant System from an Open Dumpsite and the Associated Health Risks through Multiple Routes. *Sustainability*, *14*(20), 13223. https://doi.org/10.3390/su142013223

Siahaan, J. R., Pagalung, G., Demmallino, E. B., Saleng, A., Sulaiman, A. A., & Nagu, N. (2025). Reframing Sustainability in Post-Mining Landscapes: A Foundational Framework for Institutional and Behavioral Integration in Indonesia. *Sustainability*, *17*(12), 5278. https://doi.org/10.3390/su17125278

Verdezoto, M. A. Z. (2023). El impacto en el ambiente producido por la minería ilegal en el Ecuador. *RECIMUNDO*, *7*(4), 351-358. https://doi.org/10.26820/recimundo/7.(4).oct.2023.351-358

Webb, J. (2024, enero). *The Destruction of the Amazon by Illegal Gold Mining*. Amazon Frontlines. Recuperado 14 de abril de 2026, de https://amazonfrontlines.org/chronicles/the-destruction-of-the-amazon-by-illegal-gold-mining/

Yadav, K., Kumar, D., Gupta, A. K., Gupta, B., Tyagi, P., Sharma, A., Patra, P. K., Patra, P. K., & Chaitanya, A. K. (2025). Heavy metals contamination and their phytoremediation in soil and water for sustainable environmental restoration. *Discover Environment*, *3*(1). https://doi.org/10.1007/s44274-025-00390-9

10. ANEXOS

Tabla 1: tabla comparativa de concentraciones por estudio, metal y matriz

Estudio	Metal(es)	Matriz	Concentración reportada	Observaciones / Contexto
Cappare lli et al. (2021)	Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb	Agua superfi cial	Excedencia de estándares de calidad en el 100% de los sitios.	11 sitios muestreados en ríos Anzu, Jatunyaku y Napo. Sitios con mayor número de metales: P3, P6, P10, P11.
	Cd	Agua superfi cial	Por encima de estándares en todos los sitios; en P2 y P6 superó límite de contaminación crónica.	
	Pb	Agua superfi cial	Excedió límite para contaminación crónica en el 55% de los sitios.	
	Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, Hg	Sedim ento	Orden decreciente: Al > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Hg.	
	V, B, Cr	Sedim ento	Por encima de estándares en más del 55% de los sitios; Cr superó límites en sitio P6.	
	Macroinv ertebrado s	Biota (ausen cia)	Ausencia total en sitios P6 y P11.	Índice AAMBI: 63% de sitios con puntaje < 35 (mala calidad).
Jiménez -Oyola et al. (2021)	Ni, Pb, Cr, Cu, Zn, Hg, Cd, Al	Agua superfi cial	Orden decreciente: Ni > Pb > Cr > Cu > Zn > Hg > Cd > Al.	Cuenca alta del río Napo. Valores más altos cerca de operaciones mineras activas.
	Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, Hg	Sedim ento	Orden decreciente: Al > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Hg.	100% de los sitios con concentraciones por encima de estándares de calidad.
Díaz et al. (2025)	As, Hg, Pb	Pesca do (músc ulo)	Todas las especies excedieron umbrales recomendados.	54 tejidos, 17 especies comerciales. Ríos: Napo, Aguarico, Payamino, Putumayo.
	Al	Pesca do (músc ulo)	Una especie superó las pautas para aluminio.	Especie no especificada.
	Hg	Pesca do (músc ulo)	Especies con valores más altos: *Brachyplatystom a rousseauxii* y *Piniramp*	Bagres grandes, ríos Napo y Aguarico.

			us pirinampu (> 2 mg/kg).	
	As	Pescado (músculo)	Especies con valores más altos: *Brachyplatystoma juruense*, *B. platynema*, *Phractocephalus hemioliopterus*.	
	Cd, Cr, Cu, Mn, Fe	Pescado (músculo)	Concentraciones elevadas en *Pimelodus jivaro* (Payamino).	Bagre pequeño, río Payamino.
	Al	Pescado (músculo)	86.87 mg/kg en *Pimelodina flavipinnis*.	Río Putumayo, valor atípico.
Galarza et al. (2022)	Mn, Fe	Agua y sedimento	Mn: 75% contribución al HI en agua; Fe: 99% contribución al HI en sedimento.	11 sitios, cuenca alta del río Napo. HI entre 23 y 352 veces sobre límite seguro.
	As, Pb	Agua	Contribución del 93% al TCR (riesgo de cáncer total).	TCR superó 1-3 veces el umbral (1×10^{-6}).
Cañar & Loor (2023)	Metales pesados no especificados	Agua y suelo	Contaminación con sedimentos; presencia de aceites, grasas y desechos metálicos en cuerpos de agua.	Comunidad de Yutzupino, provincia de Napo. Expansión minera de menos de 1 hectárea a 61 hectáreas entre octubre y diciembre de 2021. El 87,5% de la expansión ocurrió en diciembre.
	Contaminación por minería	Suelo	Remoción de capa superficial del suelo; excavación de fosas de 30×30 m hasta 5-8 m de profundidad.	Pérdida de la capa A del suelo; sustrato estéril compuesto por fragmentos de roca y sedimentos gruesos.
	Impacto social	Comunidad	Atracción de mineros externos, negocios clandestinos, consumo excesivo de alcohol, agresiones, prostitución y violencia durante protestas.	
Echevarría et al. (2024)	Hg	Pescado (músculo)	*Brachyplatystoma rousseauxii*: 0.77 ppm.	Bagre gigante migratorio de 151 cm. Lagos de inundación del Pastaza con biomagnificación.
	Hg, As	Piscívoros	Concentraciones más altas en *Pseudoplatystoma fasciatum*, *Rhaphiodon vulpinus*, *Brachyplatystoma* spp.	Posición trófica > 4.5.
Mestanza-	Síntomas de	Población	87% de mineros reportaron dolores de	Entrevistas a 154 personas. Solo 12% buscó atención médica.

Ramón et al. (2022)	intoxicación	(entrevistas)	cabeza, urticaria, manchas en extremidades.	
	Cáncer	Población (entrevistas)	67% de residentes de pueblos mineros reportaron un familiar con condición compatible con cáncer.	
Mena-Quintana et al. (2025)	As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, V, Zn, S, Ba, Co, Sn, Se	Suelo	Confirmación de 13 elementos sobre límites permisibles.	Sitio minero Naranjalito, Puerto Napo. Suelos degradados por minería aluvial.
Webb (2024) - literatura gris	Hg	Estimación de liberación ambiental	29.6 toneladas/año de mercurio liberadas al ambiente solo en Ecuador.	Basado en 40% de oro extraído por amalgamación.
	Hg	Lago hipotético	1 gramo de Hg contamina 8 hectáreas de lago a niveles inseguros.	Dato referencial para dimensionar magnitud.
	Hg	Mineros	90% de mineros a pequeña escala usan mercurio (norte de Amazonía ecuatoriana).	
Panchana (2022) - literatura gris	Metales pesados	Agua	Más del 90% de muestras analizadas mostraron toxicidad (contaminación crónica).	Macroinvertebrados ausentes en 35% de sitios.

Fuente: El autor