

Determinación de Hg, Cu, Se, Ba, Al, Co, Zn, Cr y su afectación a los sistemas acuáticos de las microcuencas de la provincia de Cotopaxi.

Determination of Hg, Cu, Se, Ba, Al, Co, Zn, Cr and Their Impact on the Aquatic Systems of the Micro-watersheds in the Province of Cotopaxi.

Real-Ramón, Christopher Javier¹; Ronquillo-Quinga, Kevin Josué²; Riofrío-Guevara, Marco Antonio³; Villarroel-Guerrero, Jorge Luis⁴.

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0002-0364-5077>; christopher.real2773@utc.edu.ec

² Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0001-7729-0929>; kevin.ronquillo7956@utc.edu.ec

³ Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0002-8916-9656>; marco.riofrio2916@utc.edu.ec

⁴ Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0007-5920-5114>; jorge.villarroel3491@utc.edu.ec

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/88>

Cita: Real-Ramón, C. J., Ronquillo-Quinga, K. J., Riofrío-Guevara, M. A., & Villarroel-Guerrero, J. L. (2025). Determinación de Hg, Cu, Se, Ba, Al, Co, Zn, Cr y su afectación a los sistemas acuáticos de las microcuencas de la provincia de Cotopaxi. *Innova Science Journal*, 3(3), 374-387. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/88>

Recibido: 04/05/2025

Aceptado: 11/07/2025

Publicado: 31/07/2025



Copyright: © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: La presencia de metales pesados en cuerpos de agua superficiales representa una amenaza significativa para la salud de los ecosistemas acuáticos y las poblaciones humanas que dependen de ellos. Este estudio determinó las concentraciones de mercurio (Hg), cobre (Cu), selenio (Se), bario (Ba), aluminio (Al), cobalto (Co), zinc (Zn) y cromo (Cr) en cinco puntos de muestreo ubicados en los ríos Cutuchi y Pumacunchi, pertenecientes a las microcuencas de la provincia de Cotopaxi, Ecuador. Se realizaron análisis fisicoquímicos de laboratorio, acompañados del cálculo del índice de contaminación por metales pesados (HPI) y del índice biológico andino (ABI), basado en la evaluación de macroinvertebrados bentónicos. Los resultados revelaron concentraciones preocupantes de algunos metales como Cu, Al y Cr, especialmente en zonas de alta intervención antrópica, comprometiendo la calidad del agua para usos domésticos, agrícolas y ganaderos. Se recomienda establecer programas de monitoreo y estrategias de remediación para preservar la funcionalidad ecológica y reducir los riesgos sanitarios.

Palabras clave: mercurio; cobre; contaminación hídrica; índice HPI; macroinvertebrados bentónicos.

Abstract: The presence of heavy metals in surface water bodies represents a significant threat to the health of aquatic ecosystems and the human populations that depend on them. This study determined the concentrations of mercury (Hg), copper (Cu), selenium (Se), barium (Ba), aluminum (Al), cobalt (Co), zinc (Zn), and chromium (Cr) at five sampling points located in the Cutuchi and Pumacunchi rivers, within the micro-watersheds of Cotopaxi Province, Ecuador. Laboratory-based physicochemical analyses were conducted, along with the calculation of the Heavy Metal Pollution Index (HPI) and the Andean Biological Index (ABI), based on benthic macroinvertebrate assessments. The results revealed concerning concentrations of certain metals such as Cu, Al, and Cr, particularly in areas with high anthropogenic activity, compromising water quality for domestic, agricultural, and livestock use. Monitoring programs and remediation strategies are recommended to preserve ecological functionality and reduce public health risks.

Keywords: mercury; copper; water pollution; HPI index; benthic macroinvertebrates.

1. Introducción

La contaminación por metales pesados en cuerpos de agua representa una de las amenazas ambientales más persistentes y críticas a nivel mundial, debido a su toxicidad, acumulación en los organismos vivos y persistencia en los ecosistemas. Elementos como mercurio (Hg), cobre (Cu), cromo (Cr), aluminio (Al), bario (Ba), selenio (Se), cobalto (Co) y zinc (Zn) han sido catalogados como metales de riesgo prioritario por su capacidad de generar efectos adversos en la salud humana, la fauna acuática y los cultivos, incluso en concentraciones relativamente bajas (Liu et al., 2022). Su presencia en ambientes acuáticos se asocia tanto a fuentes naturales —como la geología local— como a fuentes antropogénicas, principalmente derivadas de actividades agrícolas, mineras, industriales y de disposición inadecuada de aguas residuales (Hidalgo y Osorio, 2013).

En el contexto ecuatoriano, los sistemas fluviales de la provincia de Cotopaxi, especialmente los ríos Cutuchi y Pumacunchi, están expuestos a un uso intensivo del suelo agrícola y a una creciente expansión urbana sin planificación ambiental, lo que ha generado preocupación por la calidad del agua superficial. Estudios previos revelan que el río Cutuchi presenta una contaminación severa, al punto de ser considerado por algunos actores locales como un río ecológicamente muerto (Riofrío et al., 2024). Además, informes recientes de monitoreo señalan la presencia de concentraciones de varios metales pesados que se aproximan o superan los límites permisibles establecidos por la normativa ecuatoriana (TULSMA), comprometiendo la aptitud del agua para consumo humano, uso pecuario y agrícola (Carrera y Piovanelli, 2023).

El análisis de la calidad del agua en estas cuencas no puede limitarse únicamente a parámetros fisicoquímicos. En los últimos años, se ha consolidado el uso de metodologías integradas que incorporan bioindicadores, como los macroinvertebrados acuáticos, capaces de reflejar alteraciones ecológicas con mayor sensibilidad. El Índice Biológico Andino (ABI) permite identificar la presencia o ausencia de familias de macroinvertebrados en función del grado de contaminación, especialmente útil en ríos de alta montaña en los Andes (Pérez y Quishpi, 2016). A su vez, el índice HPI (Heavy Metal Pollution Index) ofrece una herramienta robusta para sintetizar el nivel de contaminación por múltiples metales en un solo valor cuantitativo, facilitando su interpretación y gestión (Collaguazo, 2023).

Adicionalmente, las características geológicas de la región influyen en la movilidad y acumulación de metales pesados. La presencia de formaciones volcánicas, lutitas y calizas en los alrededores de las zonas de muestreo puede explicar parcialmente la variabilidad en las concentraciones detectadas, especialmente cuando se combinan con procesos de lixiviación inducidos por las lluvias. En paralelo, se han identificado prácticas agrícolas intensivas, vertidos domésticos sin tratamiento previo y el uso de fertilizantes fosfatados como fuentes recurrentes de contaminación en las cuencas analizadas (Dueñas Rivadeneira y Intriago, 2022; Loyde de la Cruz et al., 2022).

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo principal determinar las concentraciones de Hg, Cu, Se, Ba, Al, Co, Zn y Cr y su afectación a los sistemas acuáticos de las microcuencas de la provincia de Cotopaxi, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos, el uso del índice HPI y la evaluación biológica a través del índice ABI. Esta investigación no solo permite diagnosticar el estado actual de la calidad

del agua, sino que también aporta información clave para la toma de decisiones en gestión ambiental y salud pública en una de las zonas más vulnerables del Ecuador andino.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diseño metodológico y tipo de investigación

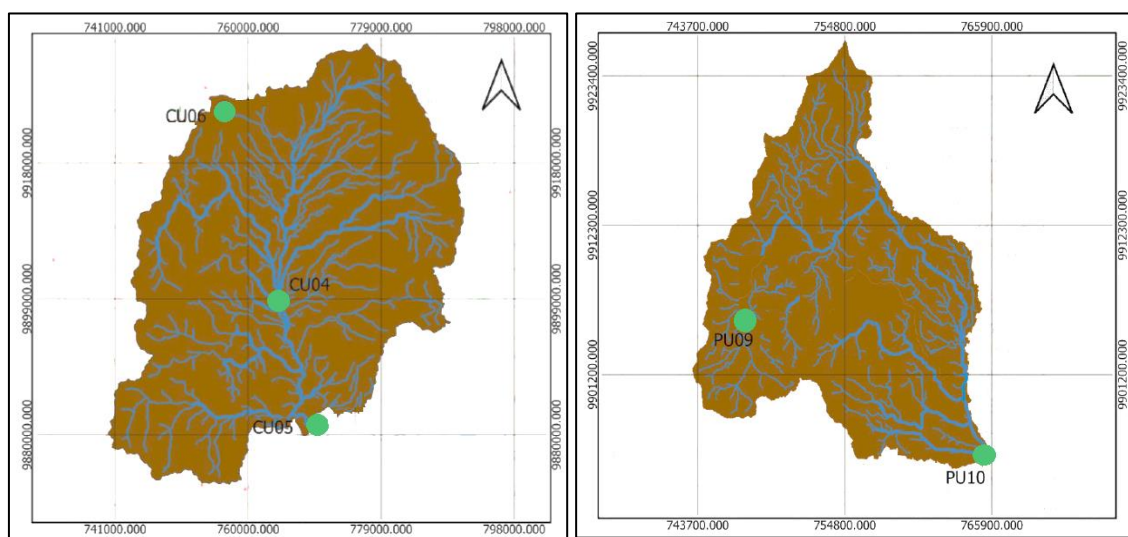
El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, correlacional y explicativo, con un diseño no experimental, de campo y transversal. La investigación se orientó a determinar la relación entre las concentraciones de ocho metales pesados (mercurio, cobre, selenio, bario, aluminio, cobalto, zinc y cromo) y la calidad del agua en los ríos Cutuchi y Pumacunchi, ubicados en la provincia de Cotopaxi. Se utilizaron datos primarios obtenidos mediante muestreo directo en campo, así como información secundaria proporcionada por la Prefectura de Cotopaxi correspondiente a los años 2022 y 2023.

2.2. Área de estudio y unidades de análisis

El estudio se llevó a cabo en cinco puntos estratégicos: tres en la subcuenca del río Cutuchi (CU04: San Felipe, CU05: Salcedo, CU06: Ilinizas) y dos en la microcuenca del río Pumacunchi (PU09: Zumbahua, PU10: Quebrada San Rafael). La selección se fundamentó en antecedentes de monitoreo previos y en la identificación de zonas con alta exposición a actividades agrícolas, urbanas o industriales. Cada punto fue georreferenciado mediante coordenadas UTM y caracterizado morfológicamente (área, perímetro y longitud de cauce)

Figura 1.

Mapa de localización de puntos de muestreo con coordenadas UTM

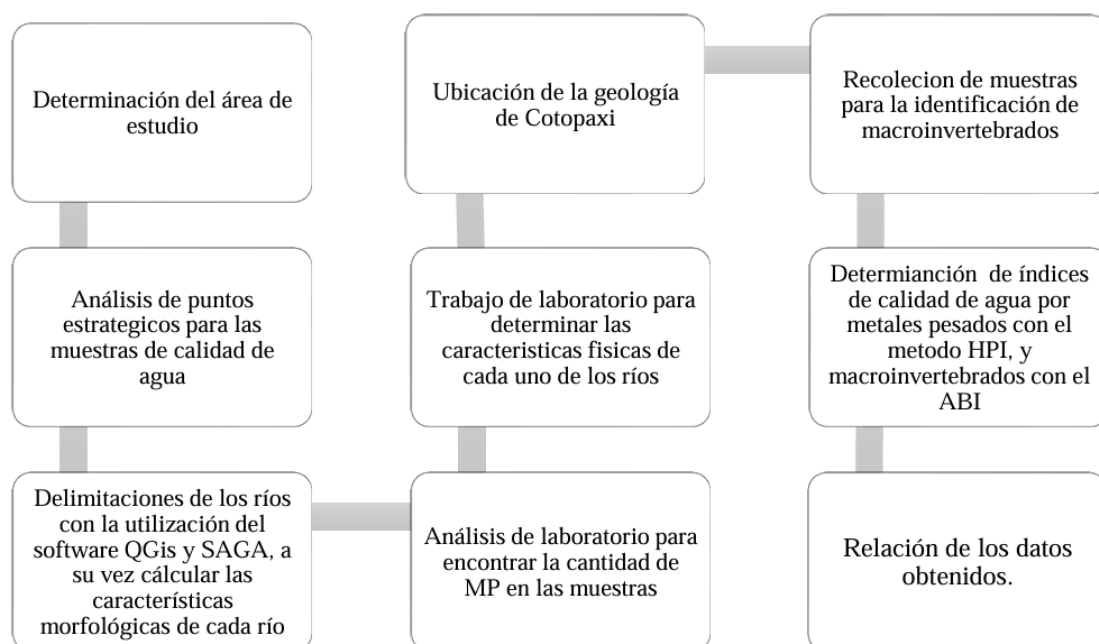


2.3. Recolección de muestras y análisis fisicoquímico

Las muestras de agua se recolectaron durante el año 2024 siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ecuatoriana NTE INEN 2169. En cada punto de muestreo, se extrajo un litro de agua a una profundidad aproximada de 25 cm desde la superficie (espejo de agua), utilizando frascos plásticos estériles previamente acidificados con ácido nítrico (HNO_3). Para prevenir la contaminación cruzada, se emplearon guantes de nitrilo y materiales desechables en cada toma. Las muestras se mantuvieron refrigeradas a 4 °C en hieleras portátiles y se conservaron mediante acidificación con HNO_3 hasta su análisis en laboratorio, con el fin de preservar la integridad química de los metales disueltos.

Figura 2.

Esquema del proceso de recolección, transporte y conservación de muestras



El análisis de las concentraciones de mercurio (Hg), cobre (Cu), selenio (Se), bario (Ba), aluminio (Al), cobalto (Co), zinc (Zn) y cromo (Cr) se realizó en el laboratorio certificado MULTIANALITYCA S.A., mediante espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), utilizando el protocolo interno MFQ; el cual fue apoyado por la prefectura de Cotopaxi. Este método fue seleccionado por su alta sensibilidad multielemental, precisión en la cuantificación de metales traza y confiabilidad para estudios ambientales, permitiendo detectar concentraciones en mg/L con bajos límites de detección.

Además, se analizaron las concentraciones de la mayoría de metales a excepción de mercurio en el espectrofotómetro DR6000 y con el fin de no tener vacíos en el estudio se consideró por utilizar una solución medida clave, la que contenga cierto porcentaje de los metales para así al comparar con las muestras recogidas y disminuir errores y ser más precisos en los cálculos.

2.4. Evaluación de calidad del agua

Se empleó el Índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI) para integrar los resultados analíticos y determinar el nivel general de contaminación en cada punto de muestreo. Este índice asigna un coeficiente de ponderación (W_i) a cada metal en función de los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana (TULSMA), y calcula un subíndice de calidad (Q_i) en base a las concentraciones reales medidas. La combinación ponderada de estos subíndices permite clasificar el agua en niveles de calidad aceptable, moderadamente contaminada o fuertemente contaminada, facilitando su interpretación ambiental.

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Donde:

- $W_i = \frac{k}{S_i}$, siendo S_i el límite normativo del i -ésimo metal.
- $Q_i = 100 \times \frac{V_i}{S_i}$, con V_i como valor medido.

Los valores de HPI se interpretaron en tres categorías: <100 (bajo riesgo), $=100$ (riesgo umbral), >100 (contaminación crítica).

Tabla 2.

Calidad del agua (HPI)

Valor del HPI	Clasificación de la calidad del agua	Interpretación
HPI < 100	Agua con bajo nivel de contaminación	Apta para uso; no se detecta riesgo significativo.
HPI = 100	Nivel umbral de contaminación	Límite de seguridad; requiere vigilancia.
HPI > 100	Contaminación crítica por metales pesados	No apta; riesgo para la salud y los ecosistemas.

2.5. Evaluación biológica con macroinvertebrados

Como complemento a los análisis fisicoquímicos, se aplicó el Índice Biológico Andino (ABI), basado en la presencia, diversidad y sensibilidad de macroinvertebrados acuáticos. Los organismos se recolectaron mediante la técnica de "patada", que consiste en remover el sustrato del fondo del cauce en un tramo de aproximadamente 20 metros, utilizando una red de malla de 500 micras. Las muestras fueron conservadas en alcohol al 70 % y posteriormente identificadas hasta nivel de familia, siguiendo claves taxonómicas especializadas recomendadas para ecosistemas altoandinos.

Tabla 3.

Reconocimiento de familias de macroinvertebrados para el índice ABI y su puntuación

ORDEN	FAMILIA	PUNTUACIÓN
	Turbellaria	5
	Hirudinea	3
	Oligochaeta	1
Gasteropoda	Ancylidae	6
Gasteropoda	Physidae	3
Gasteropoda	Hydrobiidae	3
Gasteropoda	Limnaeidae	3
Gasteropoda	Planorbidae	3
Bivalvia	Sphaeriidae	3
Amphipoda	Hyalellidae	6
	Ostracoda	3
	Hydracarina	4
Ephemeroptera	Baetidae	4
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	10
Ephemeroptera	Leptohyphidae	7
Ephemeroptera	Oligoneuridae	10
Odonata	Aeshnidae	6
Odonata	Gomphidae	8
Odonata	Libellulidae	6
Odonata	Coenagrionidae	6
Odonata	Calopterygidae	8
Odonata	Polythoridae	10
Plecoptera	Perlidae	10
Plecoptera	Gripopterygidae	10
Heteroptera	Veliidae	5
Heteroptera	Gerridae	5
Heteroptera	Corixidae	5
Heteroptera	Notonectidae	5
Heteroptera	Belostomatidae	4
Heteroptera	Naucoridae	5
Trichoptera	Helicopsychidae	10
Trichoptera	Calamoceratidae	10
Trichoptera	Odontoceridae	10
Trichoptera	Leptoceridae	8
Trichoptera	Polycentropodidae	8
Trichoptera	Hydroptilidae	6
Trichoptera	Xiphocentronidae	8
Trichoptera	Hydrobiosidae	8
Trichoptera	Glossosomatidae	7
Trichoptera	Hydropsychidae	5
Trichoptera	Anomalopsychidae	10
Trichoptera	Philopotamidae	8
Trichoptera	Limnephilidae	7

Lepidoptera	Pyralidae	4
Coleoptera	Ptilodactylidae	5
Coleoptera	Lampyridae	5
Coleoptera	Psephenidae	5
Coleoptera	Scirtidae	5
Coleoptera	(Helodidae)	3
Coleoptera	Staphylinidae	5
Coleoptera	Elmidae	5
Coleoptera	Dryopidae	3
Coleoptera	Gyrinidae	3
Coleoptera	Dytiscidae	3
Coleoptera	Hydrophilidae	5
Coleoptera	Hydraenidae	10
Diptera	Blepharoceridae	5
Diptera	Simuliidae	4
Diptera	Tabanidae	5
Diptera	Tipulidae	4
Diptera	Limoniidae	4
Diptera	Ceratopogonidae	4
Diptera	Dixidae	4
Diptera	Psychodidae	3
Diptera	Dolichopodidae	4
Diptera	Stratiomyidae	4
Diptera	Empididae	4
Diptera	Chironomidae	2
Diptera	Culicidae	2
Diptera	Muscidae	2
Diptera	Ephydriidae	2
Diptera	Athericidae	10
Diptera	Syrphidae	1

La puntuación del ABI permitió clasificar la calidad ecológica en las siguientes categorías: >74 (muy buena), 45–74 (buena), 27–44 (regular), <27 (mala).

Tabla 4.

Rango de clasificación del índice ABI

Valor	Calidad	Color
>74	MUY BUENO	
45 – 74	BUENO	
27 – 44	REGULAR	
< 27	MALA	

2.6. Técnicas de análisis de datos

Los resultados fisicoquímicos obtenidos se compararon con los límites permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente del Ecuador (TULSMA), considerando los usos potenciales del agua (consumo humano, riego agrícola y uso pecuario). Para explorar patrones de asociación entre metales pesados, parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad) y riqueza de macroinvertebrados, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA). Esta técnica estadística multivariada permitió visualizar la correlación entre variables y diferenciar los sitios de muestreo según su grado de afectación.

2.7. Criterios de inclusión, exclusión y aspectos éticos

Se incluyeron únicamente puntos de muestreo con accesibilidad logística adecuada y con antecedentes técnicos documentados en monitoreos previos. Se excluyeron zonas con estructuras artificiales directas (presas, canales cerrados u otras infraestructuras) que pudieran alterar significativamente las condiciones hidrobiológicas naturales. No se requirió consentimiento informado individual, dado que el estudio no involucró la participación de seres humanos ni animales vertebrados. No obstante, se gestionó la participación conjunta de la Prefectura de Cotopaxi y el departamento de Riego y Drenaje mediante el convenio específico interinstitucional.

3. Resultados

La evaluación de ocho metales pesados en los ríos Cutuchi y Pumacunchi durante los años 2022 y 2023 reveló diferencias significativas en la concentración de aluminio (Al), cobre (Cu) y cromo hexavalente (Cr⁶⁺), los cuales presentaron niveles cuantificables con marcada variabilidad espacial entre los puntos de muestreo. Estos elementos fueron identificados como los principales indicadores de presión antrópica sobre el sistema hídrico evaluado, debido a su asociación con zonas de alta actividad agrícola, urbana o industrial.

En contraste, los elementos bario (Ba), cobalto (Co), mercurio (Hg), selenio (Se) y zinc (Zn) se mantuvieron por debajo del límite de detección del método instrumental (<LDM) en todos los puntos y campañas analizadas, lo cual sugiere una concentración muy baja o nula bajo las condiciones operativas del equipo ICP-OES o su calibración pudo tener averías. La distribución espacial y la recurrencia temporal de los metales detectados permitió identificar zonas críticas con mayor carga contaminante, así como sectores relativamente conservados, lo cual representa un insumo clave para el diagnóstico de la calidad del agua en estas microcuencas altoandinas.

Tabla 5.

Concentraciones de metales pesados en puntos de muestreo

IDENTIFICACION	RIO CUTUCHI			RIO PUMACUNCHI		
	CU04	CU05	CU06	PU09	PU10	
COORDENADAS	X	764198	769604	756283	746986	765073
	Y	9898321	9881058	9924979	9904815	9894843
MICROCUENCA	499699 RIO CUTUCHI	499695 RIO CUTUCHI SECTOR PANZALEO	499699 RIO CUTUCHI	499698 RIO PUMACUNCHI	499698 RIO PUMACUNCHI	
TIPO	RIO	RIO	RIO	RIO	RIO	

FECHA DE TOMA DE MUESTRA		15.07.2022	09.05.2025	14.07.2022	09.05.2025	21.07.2022	16.05.2025	21.07.2022	16.05.2025	15.07.2022	16.05.2025
PARAMETROS	U	1ER	2DO	1ER	2DO	1ER	2DO	1ER	2DO	1ER	2DO
Aluminio	mg/L	0,56	0,23	0,13	0,09	0,05	0,021	0,16	0,11	0,01	0,002
Bario	mg/L	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cobalto	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cobre	mg/L	0,02	0,017	0,015	0,012	0,052	0,003	0,017	0,006	0,070	0,009
Cromo Hexavalente	mg/L	0,016	0,015	0,014	0,010	0,016	0,012	0,016	0,013	0,015	0,012
Mercurio	mg/L	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
		0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Selenio	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Zinc	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05

3.1. Aluminio (Al)

El aluminio presentó sus mayores concentraciones en el punto CU04, con valores de 0,56 mg/L durante ambas campañas (julio de 2022 y mayo de 2025), constituyendo el registro más alto de toda la muestra. Le siguió PU09 con 0,16 mg/L, con una pequeña disminución en el año 2025. En CU05 se midió una concentración de 0,13 mg/L, mientras que CU06 y PU10 mostraron los niveles más bajos, con 0,05 mg/L y 0,01 mg/L, respectivamente. Este patrón sugiere una mayor carga de aluminio en sectores bajos del río Cutuchi, probablemente relacionada con el arrastre de sedimentos ricos en este metal, influencias antrópicas como descargas urbanas o la naturaleza geológica del terreno.

3.2. Cobre (Cu)

El cobre evidenció una mayor dispersión espacial en sus concentraciones. El valor más elevado se detectó en PU10 (0,070 mg/L), seguido por CU06 (0,052 mg/L). PU09 y CU04 presentaron niveles intermedios (0,017 mg/L y 0,020 mg/L, respectivamente), mientras que CU05 registró la concentración más baja (0,015 mg/L). La variabilidad de los datos entre las dos análisis sugiere la temporada climática en que se desarrolló el análisis o posiblemente relacionada con actividades agrícolas, como el uso de fungicidas a base de compuestos cúpricos, o con la composición litológica local que podría contener trazas naturales de cobre.

3.3. Cromo Hexavalente (Cr⁶⁺)

El cromo hexavalente mostró concentraciones similares en todos los puntos de muestreo, oscilando entre 0,014 mg/L y 0,016 mg/L (CU05, CU04, CU06, PU09 y PU10). Esta homogeneidad sugiere la presencia de una fuente de contaminación difusa o de origen común, posiblemente asociada con residuos urbanos o actividades industriales de baja intensidad. Aunque los valores obtenidos no superan los límites establecidos por la normativa nacional para agua de consumo humano, su persistencia temporal y distribución espacial uniforme indican un aporte crónico que amerita monitoreo continuo.

3.4. Metales no detectables (por debajo del límite del método)

Los elementos bario, cobalto, mercurio, selenio y zinc presentaron concentraciones por debajo del límite de detección analítico en todos los puntos y fechas de muestreo:

- Bario: <1,0 mg/L
- Cobalto: <0,01 mg/L
- Mercurio: <0,0010 mg/L
- Selenio: <0,005 mg/L
- Zinc: <0,05 mg/L

La ausencia cuantificable de estos elementos en las muestras no implica necesariamente su inexistencia en el sistema, sino que sus concentraciones están por debajo del umbral de detección del instrumental utilizado (ICP-OES bajo protocolo MFQ-102). Sin embargo, su monitoreo continuo es importante debido a su alta toxicidad potencial en bioacumulación prolongada.

3.5. Comparación entre puntos de muestreo

De forma comparativa, los puntos CU04 (San Felipe) y PU10 (San Rafael) destacaron como los sitios con mayor carga metálica. CU04 registró simultáneamente la concentración más alta de aluminio y una de las más altas de cobre, mientras que PU10 se destacó por su alta concentración de cobre y niveles bajos de aluminio, pero presentó presencia constante de cromo hexavalente. En contraste, los puntos CU06 (Ilinizas) y PU09 (Zumbahua) mostraron los perfiles más limpios, con concentraciones mínimas de todos los metales analizados, posiblemente asociados a su ubicación en zonas de menor intervención antrópica y altitud superior.

4. Discusión

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada: los metales pesados analizados aluminio, cobre y cromo hexavalente exhiben concentraciones significativas en puntos específicos de los ríos Cutuchi y Pumacunchi, superando los niveles de fondo y evidenciando contaminación localizada. Esta distribución es consistente con patrones observados en otros sistemas de montaña afectados por presión antropogénica, tales como en ríos altoandinos en Perú y Ecuador, donde se ha identificado una asociación clara entre la presencia de metales y actividades agrícolas o urbanas (Matovelle et al., 2024; Oyedotun y Ally, 2021).

En particular, la elevación en los niveles de aluminio en CU04 y PU10 sigue tendencias observadas previamente en cuencas andinas, donde el arrastre edáfico y la geología volcánica (como la del Cotopaxi) favorecen la lixiviación de este metal, se muestran diferencias significativas entre zonas altas y bajas, lo que respalda la influencia de procesos geológicos combinados con usos humanos del suelo (Ahmed et al., 2020).

El cobre, con niveles en PU10 de hasta 0.070 mg/L, se relaciona con el uso agrícola de compuestos cúpricos. Investigaciones en ecosistemas acuáticos muestran que elevaciones similares en cobre y cadmio afectan la diversidad y abundancia de macroinvertebrados (Sudmoon et al., 2024), dado que cobre en concentraciones altas aumenta la mortalidad de organismos sensibles (Boussadia et al., 2025).

En ríos altoandinos del Perú, altos niveles de cobre también se han asociado con la pérdida de especies sensibles, en favor de comunidades resistentes (Villanueva-Alvarado et al., 2023). El cromo hexavalente, presente en concentraciones constantes entre 0.014–0.016 mg/L, guarda similitud con lo reportado en cuencas andinas cuando existen descargas urbanas (Pernía et al., 2018), lo cual sugiere fuentes crónicas o difusas. Aunque los valores no exceden los límites normativos, estudios en ríos expuestos a metales muestran que incluso concentraciones subnormativas pueden causar efectos biológicos adversos (Machado y Aguilar, 2022).

Los metales no detectables (Ba, Co, Hg, Se, Zn) podrían deberse tanto a bajos niveles reales como a las limitaciones del método ICP-OES. En regiones andinas similares, se

han reportado valores sub-LDM para estos metales, aunque en algunos casos existen bioacumulaciones en sedimentos o biota (Pabón et al., 2020). Su persistente monitoreo es crucial, pues en casos como La Oroya (Perú), altos niveles de plomo y cadmio en sedimentos terminaron transformándose en riesgos sanitarios importantes (Quispe-Yana et al., 2019).

Una limitación técnica del estudio radica en la falta de análisis de sedimentos y biota, lo cual impide evaluar la magnitud de bioacumulación. En estudios sobre escurrentía ácida y drenaje minero, se demuestra que la contaminación sedimentaria puede alterar notablemente las comunidades bentónicas, con reemplazo de especies sensibles por tolerantes (Brito et al., 2022). Por tanto, futuros trabajos deberán incluir sedimentos y macroinvertebrados para una visión más completa.

Desde el punto de vista de gestión de riesgos, existe evidencia de que los ríos altoandinos con metales presentan un riesgo ecológico y sanitario significativo (Chevasco-Figueroa y García-Bermello, 2023). La presencia de cobre y aluminio en rangos detectables obliga a establecer evaluaciones toxicológicas basadas en modelos (Monte Carlo), como los implementados en ríos de altura peruanos (González y Murga, 2020).

En cuanto al alcance del estudio, este sienta una base sólida para delimitación geoespacial de zonas críticas con carga metálica alta, y para el diseño de sistemas de monitoreo continuo como los recomendados por organismos de gestión del agua en regiones mineras altoandinas (Huaman-Castrejon y Lezama-Acuña, 2024). Finalmente, entre las direcciones futuras, se propone:

- Monitoreo anual y estacional con análisis multielementales, incluyendo metales traza.
- Integración de SIG y análisis PCA para modelar la dispersión espacial.
- Estudios ecotoxicológicos con bioensayos siguiendo protocolos de alta montaña.

En definitiva, la investigación aporta evidencia local valiosa sobre la situación de la calidad del agua en Cotopaxi, validando hipótesis de presión antrópica y señalando áreas prioritarias para intervención, aunque con la limitación de no haber evaluado sedimentos ni impacto biológico directo, lo cual debe abordarse en futuras etapas del monitoreo.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos a lo largo del estudio permitieron identificar concentraciones significativas de metales pesados en puntos específicos de los ríos Cutuchi y Pumacunchi, particularmente aluminio (Al), cobre (Cu) y cromo hexavalente (Cr^{6+}), los cuales presentaron variaciones espaciales notables asociadas a zonas con alta presión antrópica. Estos metales superaron los niveles de fondo y, en algunos casos, se aproximaron a los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana, evidenciando una contaminación localizada que compromete la calidad del agua.

Desde una perspectiva socioambiental, la presencia sostenida de Al y Cu en concentraciones detectables representa un riesgo potencial para la agricultura y la ganadería local. El uso de agua contaminada puede afectar la absorción de nutrientes en cultivos y provocar alteraciones fisiológicas en animales de pastoreo, lo cual

repercute negativamente en la productividad y en la seguridad alimentaria de las comunidades rurales.

En términos ecológicos, la estabilidad de las concentraciones de Cr^{6+} en todos los puntos sugiere la existencia de una fuente crónica o difusa de contaminación, posiblemente asociada a descargas urbanas. Aunque las concentraciones observadas no exceden los límites normativos para consumo humano, la exposición prolongada puede tener efectos subletales sobre la biota acuática. Esta hipótesis se ve respaldada por la disminución en la diversidad de macroinvertebrados observada en puntos críticos, según lo evidenciado por la aplicación del Índice Biológico Andino (ABI).

El uso del Índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI) permitió sintetizar los datos fisicoquímicos y categorizar los niveles de riesgo de manera efectiva, identificando sitios con prioridad de intervención. En conjunto, estas herramientas ofrecieron una evaluación integral de la calidad del agua y aportaron insumos valiosos para la gestión ambiental en la región. La investigación ha cumplido con su objetivo de establecer una línea base para la calidad del agua en las microcuencas estudiadas, determinar los metales prioritarios presentes y analizar su variación espacial y temporal. Además, ha logrado relacionar la presencia de estos elementos con posibles fuentes de origen geológico y antropogénico, contribuyendo con evidencia científica útil para la planificación territorial y el diseño de estrategias de control.

Uno de los principales aportes del estudio radica en su enfoque interdisciplinario, que combina análisis fisicoquímico, biológico y normativo, y que puede replicarse en otras cuencas altoandinas del país. Esta aproximación ha permitido caracterizar con precisión el estado del recurso hídrico y ofrece criterios técnicos para definir acciones de remediación, monitoreo y educación ambiental.

En síntesis, se concluye que la calidad del agua en los ríos Cutuchi y Pumacunchi se encuentra comprometida en sectores puntuales, principalmente donde las actividades humanas intensifican la carga contaminante. La implementación de tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas, el fortalecimiento de la gestión integrada de cuencas y la participación comunitaria son pilares fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y la salud de las poblaciones que dependen de ellos.

Referencias Bibliográficas

- Ahmed, M. F., Mokhtar, M. B., Alam, L., Mohamed, C. A. R., y Ta, G. C. (2020). Investigating the Status of Cadmium, Chromium and Lead in the Drinking Water Supply Chain to Ensure Drinking Water Quality in Malaysia. *Water*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/w12102653>
- Boussadia, M. I., Boudebbouz, A., Boudalia, S., Kerdoun, M. A., Zebza, R., Bensakhri, Z., y Sadek, A. (2025). Health risk assessment of lead and cadmium contamination in raw cow's milk from eastern Algeria. *Environmental Research Communications*, 7(1), 015017. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ada674>
- Brito, M. A., Méndez, P. V., Alvarado, R. A., y Cazorla, X. R. (2022). Evaluación de la contaminación por metales pesados del Río Cuchipamba, Morona Santiago. *Polo del Conocimiento*, 7(7), Article 7. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i7.4328>

- Carrera, W., y Piovaneli, R. (2023). Memorando Nro. GADPC-GRYD-WC-RP-2023-003.
- Chevasco-Figueroa, F. J., y García-Bermello, N. E. (2023). Análisis de la concentración de metales pesados en la cuenca baja del Río Portoviejo, Provincia de Manabí. [Pregrado, UNESUM]. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/5327>
- Collaguazo, L. (2023). Cálculo del índice de calidad del agua con Python en cuerpos de agua superficial lóticos, impactados por actividades humanas.
- Dueñas Rivadeneira, J. P., y Intriago Flor, F. G. (2022). Contenido de metales pesados (Cu, Pb, Ni, Cd) en abonos orgánicos y las materias primas para su elaboración. *La Técnica: Revista de Las Agrociencias*, 27(1), 26–35. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.3674
- González, O., y Murga, L. R. (2020). Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad. *Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.46380/rias.v3i2.93>
- Hidalgo, C., y Osorio, E. (2013). Evaluación y determinación de la capacidad secuestrante de los metales pesados cromo (Cr) y cadmio (Cd) por taxas de mohos aisladas de los alrededores de los ríos Cutuchi y Machángara.
- Huaman-Castrejon, T. L., y Lezama-Acuña, I. A. (2024). Evaluación de la dispersión de Cadmio y Arsénico en suelos de la quebrada Shahuindo, regados con aguas del río Crisnejas- Cajamarca [Pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/149406>
- Liu, T., et al. (2022). Adsorption of cadmium and lead from aqueous solution using modified biochar: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106502. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106502>
- Loyde de la Cruz, L. A., et al. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *Epistemus*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>
- Machado, J., y Aguilar, J. M. (2022). Análisis de la contaminación por metales pesados en la ciudad de Cuenca mediante el uso de bioindicadores. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.18272/aci.v14i2.2600>
- Matovelle, C., Quinteros, M., Quinteros, K. S., y Jaramillo, K. (2024). Water quality assessment methods of the highland Andean rivers: A scoping systematic review. *Heliyon*, 10(9), e30552. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30552>
- Oyedotun, T. D. T., y Ally, N. (2021). Environmental issues and challenges confronting surface waters in South America: A review. *Environmental Challenges*, 3, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100049>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., y Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>

- Pérez, P., y Quishpi, A. (2016). Análisis de la calidad de agua de los ríos Nagsiche y Pumacunchi, pertenecientes a la subcuenca del río Patate, de la provincia de Cotopaxi.
- Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L., Bravo, K., López, D., Muñoz, J., Zambrano, J., Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L., Bravo, K., López, D., Muñoz, J., y Zambrano, J. (2018). Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. *Enfoque UTE*, 9(2), 89–105. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.246>
- Quispe-Yana, R. F., Belizario-Quispe, G., Chui-Betancur, H. N., Huaquisto-Cáceres, S., Calatayud-Mendoza, A. P., y Yábar-Miranda, P. S. (2019). Concentración de metales pesados: Cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(2), 83–90. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.2.3>
- Riofrío Guevara, M. A., et al. (2024). El río Cutuchi, contaminante que fluye en nuestra sociedad y la afecta. *RECIMUNDO*, 8(Especial), 51–60. [https://doi.org/10.26820/recimundo/8.\(especial\).octubre.2024.51-60](https://doi.org/10.26820/recimundo/8.(especial).octubre.2024.51-60)
- Sudmoon, R., Chaveerach, A., Thamsenanupap, P., Pumipuntu, N., Khowhit, S., Thipparut, S., Nattaprasert, S., Cheng, W. H., y Tanee, T. (2024). Assessment of Lead and Cadmium Contamination in Water Resources of Northeastern Thailand and Its Implications for Ecological Risk Evaluation. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2024.369525>
- Villanueva-Alvarado, T. L., Belizario-Quispe, G., Chui-Betancur, H. N., y Perez-Argollo, K. (2023). Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas superficiales del río chacapalca para fines de riego. *Revista Boliviana de Química*, 40(4), 1–8. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.4.1>

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.