

PROPUESTA METODOLÓGICA DE CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA, CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE OCURRENCIAS MINERALES RÍO AMARILLO, PROVINCIA DE IMBABURA

Methodological proposal for hydrochemical characterization, case study: Río Amarillo mineral occurrence area, Imbabura province

Marcelo Calderón-Viveros^{1*}, Amanda Viteri-Nolivos¹

¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético, 170124, Quito-Ecuador.

Identificador ORCID de los autores y e-mail

Marcelo Calderón-Viveros: <https://orcid.org/0009-0006-7073-4669>. E-mail: edmundocalderon@geoenergia.gob.ec

Amanda Viteri-Nolivos: <https://orcid.org/0009-0001-8778-7170>. E-mail: amandanolivos@geoenergia.gob.ec

*Autor correspondiente: edmundocalderon@geoenergia.gob.ec

Recibido: 6-02-2025. **Aceptado:** 27-10-2025. **Fecha de publicación on-line:** 04-03-2026

Citation/Cómo citar este artículo: Calderón-Viveros, M., Viteri-Nolivos, A. (2025). Propuesta metodológica de caracterización hidroquímica, caso de estudio: área de ocurrencias minerales Río Amarillo, provincia de Imbabura. *Pirineos*, 180 e092. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2025.180.377>

RESUMEN: Este estudio caracteriza la hidroquímica de aguas superficiales y geoquímica de sedimentos fluviales en el sector de ocurrencias minerales “Río Amarillo” (200,78 km²), ubicado en la provincia de Imbabura, Ecuador. En marzo de 2017 se realizó una campaña de muestreo en 22 puntos, recolectando muestras que fueron sometidas a medición *in situ* de parámetros físico-químicos, así como a análisis elementales y de aniones. Se detectaron metales como arsénico, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc, con implicaciones ambientales relevantes. Su origen se atribuye a procesos litogénicos o geoquímicos, intensificados por actividades mineras, en particular minería informal. La investigación contribuye a la comprensión de los procesos geoquímicos y antropogénicos que afectan la calidad del agua y los sedimentos.

PALABRAS CLAVE: ocurrencias minerales; hidroquímica; aguas superficiales; sedimentos fluviales; metales traza; contaminación minera; geoquímica ambiental; Imbabura, Ecuador.

ABSTRACT: This study characterizes the hydrochemistry of surface water and geochemistry of river sediments in the “Río Amarillo” mineral occurrences area (200.78 km²), located in the province of Imbabura, Ecuador. In March 2017, a sampling campaign was conducted at 22 sites, collecting samples subjected to *in situ* measurement of physicochemical parameters, as well as elemental and anion analyses. Environmentally significant metals such as arsenic, chromium, copper, lead, nickel, and zinc were detected. Their presence is attributed to lithogenic or geochemical processes, intensified by mining activities, particularly informal mining. The research contributes to the understanding of geochemical and anthropogenic processes affecting water and sediment quality.

KEYWORDS: mineral occurrences; hydrochemical; surface water; river sediments, trace metals; mining pollution; environmental geochemistry; Imbabura, Ecuador.

1. Introducción

Los metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn) forman parte del ciclo geoquímico natural y pueden concentrarse en el ambiente debido a procesos endógenos o exógenos, generando zonas anómalas o de ocurrencias minerales con extensión local o regional (Mitra et al., 2022). No obstante, actividades antropogénicas como la minería, la agricultura y la industria pueden incrementar significativamente sus concentraciones. Debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación, estos elementos representan una amenaza potencial para la salud humana y los ecosistemas (Tchounwou et al., 2012; Mitra et al., 2022).

Las anomalías geoquímicas se definen como desviaciones respecto a la distribución geoquímica normal de un entorno y suelen manifestarse en redes fluviales y sedimentos de drenaje (Yurkevich et al., 2023). En sistemas de agua dulce, estas anomalías pueden originarse por procesos naturales de meteorización y lixiviación de rocas y suelos, liberando iones mayoritarios como sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) y carbonato (CO_3^{2-}). Además, metales traza de importancia ambiental como arsénico (As), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn) pueden estar presentes en concentraciones variables, determinadas tanto por la geología del área como por aportes antropogénicos (Tchounwou et al., 2012; Mitra et al., 2022).

La estimación de las concentraciones naturales de metales y la identificación de aportes antrópicos en aguas y sedimentos fluviales son fundamentales para evaluar el grado de afectación ambiental de un sitio específico. Este análisis permite diferenciar entre las concentraciones de origen natural y aquellas derivadas de actividades humanas, facilitando la implementación de medidas de mitigación y remediación adecuadas. Según la Guía para la Evaluación de Sitios Contaminados y la Gestión de Pasivos Ambientales, es esencial establecer niveles de referencia para determinar la necesidad de acciones correctivas y garantizar la protección de la salud humana y los ecosistemas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024).

En 2016, el Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico (INIGEMM) de Ecuador, realizó un diagnóstico hidroquímico del denominado Bloque 1, abarcando aproximadamente 16.702 km² en las provincias de Esmeraldas, Imbabura y Carchi, centrado en ríos principales y sus afluentes representativos. Los resultados revelaron que la zona de ocurrencias minerales Río Amarillo presenta valores de conductividad eléctrica y concentración de sulfatos, hierro, manganeso, cobre y zinc que sobrepasan a los límites de la norma ambiental ecuatoriana.

En este sentido, el objetivo principal de este estudio es establecer un procedimiento de diagnóstico hidroquímico de los cuerpos hídricos que atraviesan la zona de ocurrencias minerales Río Amarillo, con el fin de identificar las anomalías ambientales presentes que podrían alterar los parámetros fisicoquímicos del río receptor, el Mira, en relación con la normativa ambiental ecuatoriana. Para ello, los objetivos específicos incluyen: recopilar y sistematizar información hidroquímica del sector; describir los parámetros morfométricos generales; realizar una campaña de muestreo de aguas superficiales y sedimentos fluviales; efectuar análisis elementales y de aniones en laboratorio; y llevar a cabo la caracterización hidroquímica de aguas superficiales y geoquímica de sedimentos fluviales. Procedimiento de diagnóstico que pueda ser replicado en zonas de ocurrencias minerales de características similares.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La zona de ocurrencias minerales Río Amarillo abarca aproximadamente 200,78 km² y se localiza en la sierra norte del callejón interandino del Ecuador, en la provincia de Imbabura, específicamente entre los cantones San Miguel de Urcuquí e Ibarra, con una pequeña porción que se extiende hacia el cantón Mira, en la provincia del Carchi (INIGEMM, 2016a). Uno de sus límites (al oeste), es con la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas, una de las áreas protegidas más importantes del país por su biodiversidad.

La región se encuentra altitudinalmente entre los 1.600 y 3.000 m.s.n.m., y presenta un clima ecuatorial mesotérmico, predominantemente semi-húmedo. Se caracteriza por dos estaciones lluviosas (enero a mayo y septiembre a diciembre) y una estación seca marcada entre julio y agosto (GAD Imbabura, 2015). La campaña de muestreo fue realizada durante marzo del 2017, por lo que corresponde a la temporada lluviosa.

Desde el punto de vista edafológico, predominan suelos del orden Mollisol, con presencia secundaria de Entisoles e Inceptisoles (Figura 1). El uso del suelo es diverso, incluyendo áreas con procesos erosivos activos, cultivos agrícolas (frutales y cereales), vegetación arbustiva, pastizales, bosque natural y páramo altoandino (MAGAP-MAE, 2016).

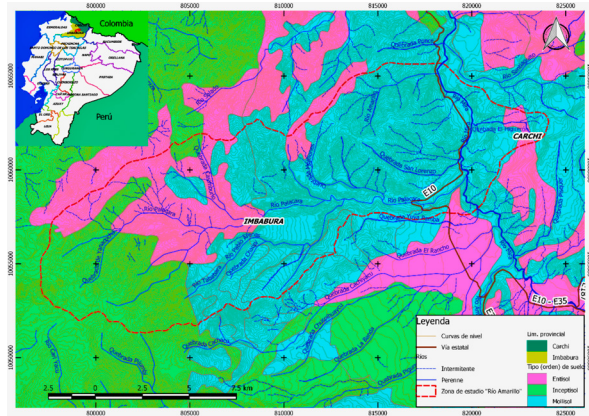


Figura 1. Ubicación y tipo de suelo dentro del área de estudio.

Figure 1. Location and soil type within the study area.

En términos geológicos, se reconocen tres ambientes geotectónicos principales: (a) rocas básicas y ultrabásicas de origen intraoceánico con afinidad toleítica, (b) rocas básicas a intermedias asociadas a magmatismo calco-alcalino, y (c) unidades volcánicas y magmáticas continentales del Terciario (INIGEMM, 2016a). Esta configuración sugiere una geodiversidad que influye significativamente en la geoquímica local.

El sistema hidrográfico del área está conformado por los ríos Palacará, Amarillo y Mira, así como por las quebradas El Higuero y San Lorenzo, que constituyen elementos clave para el monitoreo de procesos geoquímicos y la evaluación de posibles anomalías ambientales relacionadas con la presencia de metales traza (Figura 2).

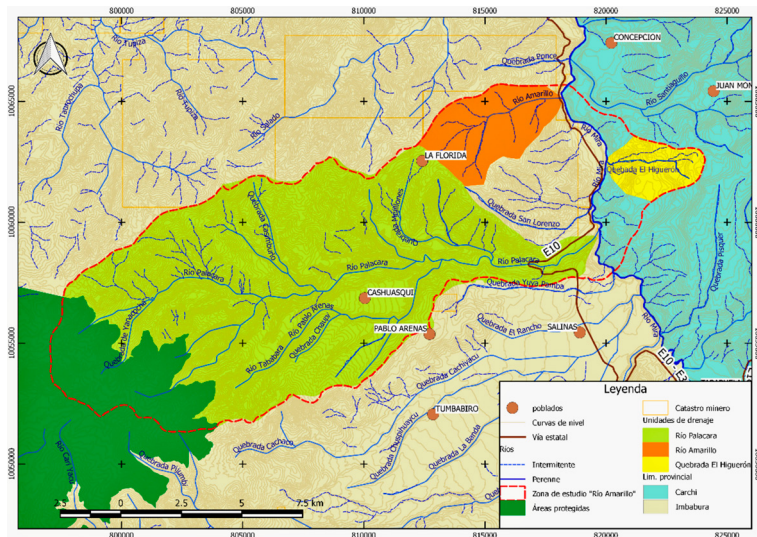


Figura 2. Cuerpos hídricos del área de estudio.

Figure 2. Water bodies in the study area.

2.2. Metodología

2.2.1. Recopilación y sistematización de información geoquímica

Se emplearon datos geoquímicos generados por el “Proyecto de Asistencia Técnica para el Desarrollo Minero y el Control Ambiental” en el año 1998, y publicados en el 2000 (PRODEMINCA, 2000), los cuales fueron reenumerados secuencialmente y organizados por unidad hidrográfica. La información fue sistematizada en un proyecto de sistemas de información geográfica (SIG) de código abierto, QGIS, para la elaboración de mapas temáticos, a partir de los cuales se planificaron los puntos de muestreo considerando criterios de accesibilidad, representatividad espacial y seguridad.

En este contexto se identificaron un total de 74 puntos de muestreo que se encuentran dentro del área de estudio de la presente investigación. La distribución de estos puntos es la siguiente: 2 en la quebrada El Higuierón, 4 en el río Amarillo, 62 en el río Palacara y 2 en la quebrada San Lorenzo.

Dentro de la organización de muestreo de la presente investigación, se identificó coincidencia espacial entre cinco puntos planificados (SJU-1, AMA-4, PAL-3, HIG-2 y SLO-2) con los históricos registrados por PRODEMINCA, correspondientes a los códigos 9494, 9906, 10178, 11090 y 11978, respectivamente. Esta correspondencia permite establecer una base comparativa para el análisis temporal de la calidad hidroquímica en el área de estudio.

2.2.2. Descripción morfométrica general

La delimitación hidrológica se efectuó con base en divisorias de aguas derivadas de curvas de nivel 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM) y análisis morfométrico en QGIS. Se calcularon parámetros como coeficiente de compacidad, elongación y factor de forma, empleando fórmulas estándar (Strahler, 1957), (Singh et al., 2014). Datos climáticos (temperatura, precipitación) fueron obtenidos de fuentes oficiales (INAMHI, 2000-2017).

2.2.3. Muestreo de agua superficial y sedimentos fluviales

La campaña de campo se realizó en marzo de 2017, durante la estación lluviosa, cuando se intensifican procesos como la escorrentía y el transporte de solutos disueltos (Neal et al., 2006). Aunque un único muestreo limita la caracterización temporal del sistema (Meybeck et al., 2006), se priorizó una recolección intensiva y representativa, ajustada a restricciones operativas. Considerando que el objetivo fue diseñar un protocolo de caracterización hidrogeoquímica replicable en distintas condiciones climáticas, proporcionando además una línea base robusta para análisis comparativos y futuros monitoreos.

El muestreo se efectuó conforme al protocolo interno del ex INIGEMM, ahora Instituto de Investigación Geológico y Energético, IIGE, (INIGEMM, 2016b). Se recolectaron muestras de agua superficial en frascos de polietileno: una destinada al análisis de elementos traza, acidificada con HNO_3 suprapur al 65 % (Merck) hasta alcanzar un $\text{pH} < 2$; y otra para análisis de aniones. Las muestras fueron conservadas en una nevera, asegurando una temperatura inferior a 4 °C mediante termómetro ambiental.

Se midieron in situ parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura (t), y turbidez (T), mediante sondas multiparamétricas In-Situ Troll 9500 y Hanna HI 9829. El caudal (Q) se determinó por dos métodos: en cuerpos de agua de bajo caudal, como el río Amarillo y la quebrada El Higuierón, se aplicó la técnica de secciones transversales con molinete de hélice para calcular velocidades medias por franja (FAO, 1997); además, para reforzar la estimación hidrométrica y ampliar la representatividad temporal, se utilizó la curva de gasto calibrada para el sitio, relacionando niveles medidos, con caudales observados, lo que permitió estimar el Q en condiciones hidrológicas variables. Mientras que en ríos de mayor caudal, como el Mira y el Palacara, se emplearon los datos más recientes de estaciones hidrológicas cercanas, correspondientes al mes de muestreo (INAMHI, 2014-2015).

El muestreo de sedimentos fluviales se realizó en los mismos puntos que las aguas. Se recogieron muestras compuestas de 500 g (pesadas con balanza técnica), mediante una pala de PVC, en el intervalo superficial de 0 a 15 cm de profundidad, tamizadas a través de acero N° 200 (75 μm) y almacenadas en bolsas de polietileno

herméticas y anóxicas. Cada muestra fue codificada, georreferenciada (GPS Garmin Oregon 550T; WGS84/UTM 17S) y documentada con fotografías y croquis en fichas técnicas.

Se recolectaron un total de 20 muestras de agua y 22 muestras de sedimentos fluviales en 22 puntos distribuidos a lo largo de los ríos Amarillo, Mira, Palacara, y las quebradas El Higuierón y San Lorenzo (ver Anexo 1). La ubicación geográfica de los puntos de muestreo, así como la codificación asignada en el gabinete, se detallan en el Anexo 2 y en la Figura 3. Durante la etapa de campo, se observó que la quebrada San Lorenzo se encontraba seca, por lo que únicamente se obtuvieron muestras de sedimentos en los puntos con código SLO-1 y SLO-2.

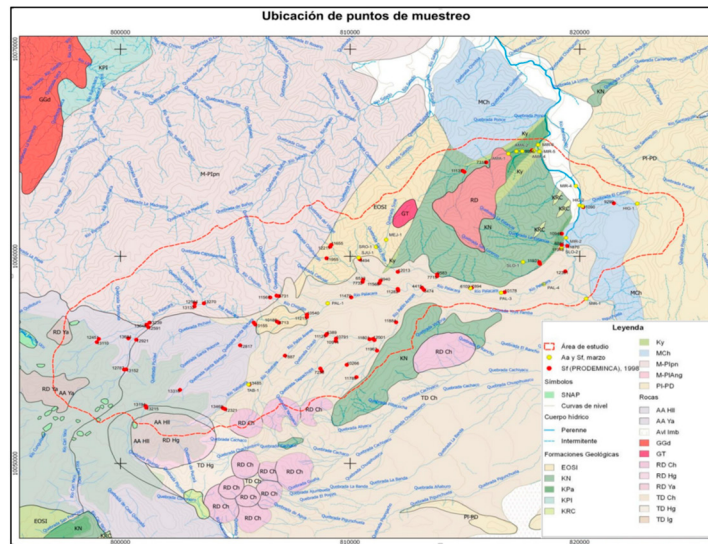


Figura 3. Ubicación de puntos de muestreo y datos PRODEMINCA.

Figure 3. Sampling point locations and PRODEM-INCA data.

Para validar la precisión del muestreo y la calidad de las determinaciones analíticas, se recolectaron muestras duplicadas, independientes, en varios puntos, conforme a los criterios de fiabilidad establecidos para la verificación mediante pares duplicados (Long, 2000). La exactitud se cuantificó mediante la Diferencia Relativa Porcentual:

$$\% DRP = \left\{ \frac{|S-D|}{\frac{S+D}{2}} \right\} \times 100 \% \quad (\text{Eq. 1})$$

donde:

S = Valor determinado para la muestra

D = valor del duplicado.

Valores de % DRP inferiores al umbral aceptable garantizan la consistencia del procedimiento de campo y laboratorio.

2.2.4. Análisis de laboratorio

Los ensayos se efectuaron en el laboratorio del IIGE; en aguas, los elementos traza fueron analizados por espectrometría de masas ICP-MS (método EPA 6020), los aniones por cromatografía iónica (método EPA 300), y titulaciones para alcalinidad (SM 2320 B); los metales de los sedimentos fluviales se determinaron por espectrometría de masas ICP-MS (Digestión dos ácidos). Los resultados bajo el límite de cuantificación del método (LCM) se trataron conforme a prácticas estándar (Instituto de Hidrología, 2019).

En aguas y sedimentos se determinaron las concentraciones de: Ag, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, V y Zn. Los aniones analizados en aguas fueron: F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, Br⁻, NO₂⁻, PO₄⁻, SO₄⁻ y también se obtuvo la Alcalinidad Total.

2.2.5. Caracterización hidroquímica de aguas superficiales

La caracterización se realizó mediante el diagrama de Piper (1944), para determinar facies hidroquímicas, que incluye la composición aniónica (HCO₃⁻ + CO₃⁼, SO₄⁼ y Cl⁻ + NO₃⁻) y catiónica (Na⁺ + K⁺, Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺) de forma simultánea (Hernández, et al., 2017; Moratilla y Yélamos, 2000). Se empleó el Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI) para calificar las cualidades del agua a partir del valor promedio de los índices de conductividad, alcalinidad total y dureza total, en un rango de 0 a 1. Los índices próximos a cero (0) reflejan muy baja contaminación e índices cercanos a uno (1), lo contrario (Ramírez, et al., 1997). Para detectar valores anómalos se utilizó el método estadístico de (Lepeltier, 1969), basado en el umbral:

$$Z \geq \bar{Z} + 2 \cdot \sigma_Z \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde:

$\bar{Z}$ = promedio

σ_Z = desviación estándar de la variable Z

La normativa de referencia fue el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULSMA (MAE, 2015), en su Anexo 1. Se aplicaron los criterios establecidos en las tablas: 2, relativa a la preservación de la vida acuática en aguas dulces, marinas y estuarinas; 1, referente al uso para consumo humano y doméstico (empleada para parámetros no contemplados en la tabla anterior, como turbidez, fluoruros y sulfatos); y la Tabla 4, correspondiente a calidad del agua para riego, utilizada para conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y cloruros.

La clasificación de la alcalinidad total se realizó siguiendo los rangos propuestos por Kevern (1989). Para la dureza total se aplicó la fórmula y constantes definidas por la American Public Health Association (APHA, 1995), con sus respectivas categorías de interpretación.

En los cuadros de resultados, los valores que excedieron los rangos normativos fueron destacados en negrita. Esta misma convención se empleó para identificar valores atípicos en parámetros sin regulación específica, pero que mostraron concentraciones que se desviaron de forma evidente respecto al conjunto de datos analizados.

2.2.6. Caracterización geoquímica de sedimentos

Se aplicó un análisis estadístico a los datos geoquímicos generados por PRODEMINCA, utilizando el diagrama de caja y bigotes (Turkey, 1977), con el fin de identificar valores anómalos. Se clasificaron los datos en límites atípicos o extremos superiores e inferiores, en función de su desviación respecto a la mediana. Para cumplir con los requisitos del método, los valores por debajo del límite de cuantificación fueron sustituidos por la mitad de dicho valor. Las expresiones matemáticas empleadas son las propuestas por Leys et al., 2013.

Los valores atípicos determinados a partir de la base de datos de PRODEMINCA sirvieron como referencia para la interpretación de las muestras recolectadas en esta investigación. Adicionalmente, los resultados fueron contrastados con los umbrales establecidos por la Norma Canadiense de Calidad de Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática (CCME, 2001), que clasifica las concentraciones según su probabilidad de generar efectos biológicos adversos: ISQG (efectos raros), PEL (efectos frecuentes) y un rango intermedio con efectos ocasionales. En las tablas de resultados, los valores críticos por encima del PEL fueron destacados en negrita y rojo, siguiendo un criterio de representación similar al aplicado para los análisis de agua.

3. Resultados y discusión

3.1. Descripción morfométrica general

En la Tabla 1 se presentan las variables e índices morfométricos correspondientes a cada unidad de drenaje. En esta descripción, no se incluyeron los afluentes adicionales del río Mira, ya que se trató de corrientes intermitentes que se encontraron secas durante la campaña de muestreo.

Tabla 1. Variables e índices morfométricos.
Table 1. Variables and morphometric indices.

Variable			Unidad de drenaje		
Nombre	Símbolo	Unidad	Quebrada El Higuérón	Río Amarillo	Río Palacara
Superficie	S	km ²	11,085	14,831	145,128
Perímetro	P	km	12,852	15,805	59,411
Longitud axial	L	km	4,576	6,152	23,267
Longitud del curso principal	L _b	km	2.786,063	3.555,724	22.648,648
Longitud de corrientes	$\sum L_i$	km	10.091,674	19.146,782	232.357,657
Amplitud	W	km	2,422	2,411	6,238
Razón de elongación	R _e		0,821	0,707	0,585
Coefficiente de compacidad	C		1,089	1,158	1,391
Factor de forma	R _f		0,529	0,392	0,268
Densidad de drenaje	D _d	km/km ²	910,390	1.290,997	1.601,053

La unidad de drenaje correspondiente al río Palacara presenta la mayor superficie en comparación con las otras dos unidades analizadas (Figura 2). Este patrón se replica en otras variables de medición directa, lo que sugiere que una mayor extensión de cuenca podría estar asociada con una mayor generación de escorrentía superficial y, en consecuencia, con volúmenes de caudal superiores durante eventos de precipitación. Adicionalmente, tanto el perímetro como la longitud del cauce principal influyen directamente en el tiempo de concentración del escurrimiento, afectando la dinámica hidrológica de la cuenca (Gisbert, 2005).

En cuanto al índice de compacidad (C), que permite estimar la lobulación de las unidades, los resultados para la quebrada El Higuérón y el río Amarillo fueron cercanos a 1, indicando que se trata de drenajes con una forma ovalada o redonda. En contraste, el río Palacara presentó un valor de C de 1,39, lo que sugiere que esta unidad tiene una forma más irregular, entre ovalada y ovalada oblonga. Esto también implica que el río Palacara tiene un mayor tiempo de concentración, lo que conlleva a una mayor magnitud de escorrentía durante las precipitaciones (Gaspari, et al., 2012).

En términos de densidad de drenaje, se observaron los siguientes valores: 910,39 km/km² para la quebrada El Higuérón, 1.290 km/km² para el río Amarillo, y 1.601,05 km/km² para el río Palacara. Estos valores permiten caracterizar cuantitativamente las unidades de drenaje en función del material predominante, que en este caso son suelos impermeables con baja cobertura vegetal y montañas escarpadas. Es particularmente relevante el caso del río Palacara, que presenta la mayor densidad de drenaje, lo que refleja un fuerte escurrimiento que responde casi inmediatamente a la precipitación (Henaos, 1988; Gaspari, et al., 2012).

3.2. Validación del muestreo de agua superficial y sedimentos fluviales

Los resultados obtenidos para el porcentaje de la diferencia relativa porcentual fueron generalmente inferiores al 10 % (ver Anexo 3), con la excepción del punto MIR-6, donde el valor de níquel alcanzó aproximadamente un 21 %. No obstante, este valor se considera dentro del rango aceptable para los fines del estudio. Estos resultados indican una alta precisión en el muestreo de campo y una confiabilidad significativa en los análisis realizados en el laboratorio.

3.3. Caracterización hidroquímica de aguas superficiales

Las proporciones de los diferentes iones en las muestras de agua superficial, utilizadas para identificar patrones o tendencias en su composición, se visualizan en el Diagrama de Piper (Figura 4).

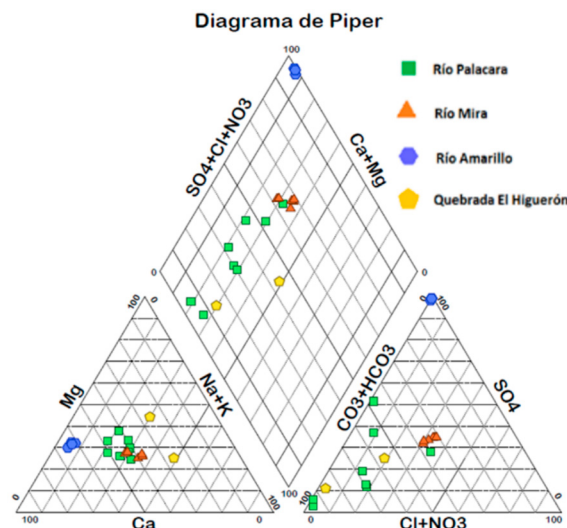


Figura 4. Diagrama de Piper del sector de ocurrencias minerales Río Amarillo.
Figure 4. Piper diagram of the Río Amarillo mineral occurrence area.

En la quebrada El Higuérón, se observa una predominancia de la facie Bi-carbonatada Cálcica-Magnésica, lo que está relacionado con la presencia de feldespatos alcalinos en las areniscas y granitoides, así como con el carbonato de calcio presente en las lutitas, todos ellos minerales característicos de la Formación Chota.

Por otro lado, el río Amarillo muestra una predominancia hacia la facie Hiper Sulfatada-Cálcica, lo cual se atribuye al aporte de sulfatos, derivados de la oxidación de sulfuros presentes en las rocas volcano-sedimentarias, sedimentarias y metamórficas que conforman los terrenos geológicos de la zona de estudio.

La caracterización hidroquímica del río Mira, en la sección correspondiente a la zona de ocurrencias minerales Río Amarillo, revela una predominancia hacia la facie Sulfatada Cálcica. Este comportamiento se explica por la composición geológica de la región, dominada por rocas que contribuyen a la liberación de iones de calcio y sulfatos.

Finalmente, el río Palacara presenta una facie Bi-carbonatada Cálcica-Magnésica; característica de las unidades geológicas dominadas por andesitas piroxénicas y dacitas hornbléndicas de afinidad calc-alcalina. Estas unidades, que ocupan vastas zonas atravesadas por el río (INIGEMM, 2015), contribuyen a la composición química del agua, particularmente a la presencia predominante de los iones relacionados con las facies de bicarbonato.

3.4. Caracterización geoquímica de sedimentos fluviales

El diagrama de caja de las 74 muestras de sedimentos recolectadas por PRODEMINCA mostró la presencia de valores atípicos superiores (LS) y valores extremos superiores (LSE). Sin embargo, no se registraron concentraciones atípicas inferiores (LI) ni inferiores extremas (LIE), como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores atípicos de las muestras de sedimentos de PRODEMİNCA (2000).

Table 2. Outliers from PRODEMİNCA sediment samples (2000).

Símbolo	As mg/kg	Ba mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sr mg/kg	Tl mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg
LI	-22,12	-46,06	-1,5	-19,56	-40,38	-400,5	-14,38	-4,68	-43,56	-0,04	-64,69	-25,88
LS	35,2	208,31	31,5	124,81	99,88	1354	54,38	10,01	150,31	0,3	346,44	163,88
LIE	-45,56	-150,13	-15	-78,63	-97,75	-1118,25	-42,5	-10,69	-122,88	-0,18	-232,88	-103,5
LSE	58,64	312,38	45	183,88	157,25	2071,75	82,5	16,02	229,63	0,44	514,63	241,5

Valores atípicos: superiores (LS), superiores extremos (LSE), inferiores (LI)

e inferiores extremas (LIE) 3.5. *Análisis e interpretación de resultados**Outliers: upper (LS), extreme upper (LSE), lower (LI), and extreme lower (LIE).*

3.5. *Análisis e interpretación de resultados*

3.5.1. *Quebrada El Higuierón – aguas*

El potencial hidrógeno (pH) del agua de la quebrada El Higuierón presenta una fluctuación desde ligeramente alcalino hasta alcalino, y en el punto de muestreo HIG-2, este valor supera el límite establecido por el TULSMA. Este comportamiento puede estar relacionado con la presencia de bases en las lutitas y areniscas aflorantes en la Formación Geológica Chota (Tabla 3).

La conductividad eléctrica muestra un aumento significativo en la parte baja del río, un patrón que se observa también en los niveles de turbidez. Estos incrementos pueden estar vinculados a las formaciones geológicas presentes en la región: en la parte superior predominan las rocas Mio-Pliocénicas, caracterizadas por estratovolcanes andesíticos de dimensiones moderadas a grandes, mientras que en la parte baja se encuentran terrenos pertenecientes a la Formación Chota, compuesta principalmente por areniscas grises masivas y conglomerados con una matriz que contiene clastos de lutitas, cherts y granitoides débilmente foliados.

En cuanto a la dureza del agua, se clasifica como dura en la parte alta, alcanzando 161,02 mg/l de CaCO₃, mientras que en la parte baja se considera muy dura, con un valor de 324,606 mg/l de CaCO₃.

El cálculo del índice ICOMI indica niveles de contaminación medio-altos (0,71) en la zona superior de la quebrada, que aumentan a 0,80 en la zona baja, reflejando un incremento en los niveles de contaminación hacia el curso inferior del río.

En cuanto a los nitratos, su concentración es baja, con un valor de 1,306 mg/l en la parte alta y 1,154 mg/l en la parte baja, lo que sugiere que las aguas, no están significativamente afectadas por actividades agrícolas.

Los sulfatos se encuentran por debajo de los límites establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana. No obstante, se observa un ligero aumento en la concentración de sulfatos en el punto de muestreo HIG-2, lo cual podría estar asociado con los procesos de erosión observados en los recorridos, que favorecen la disolución de sulfuros y bases, contribuyendo a la generación de sulfatos.

Tabla 3. Parámetros físico químicos y concentraciones de metales en aguas, quebrada El Higuierón.

Table 3. Physicochemical parameters and metal concentrations in waters, El Higuierón stream.

Código	Parámetros fisicoquímicos						Concentración de Metales					
	pH 6,5-9*	CE μS/cm 700*	SDT mg/l 450*	Temp. °C	Turb. NTU 100*	AT mg/l de CaCO ₃	Q l/s	As mg/l 0,050*	Cu mg/l 0,005*	Mn mg/l 0,1*	Ni mg/l 0,025*	Zn mg/l 0,03*
HIG-1	8,19	488	247	20,3	0	74,80	4,00	0,027	<0,005	<0,071	<0,004	<0,016
HIG-2	9,15	1.099	594	20,6	1.230	131,75	6,67	0,151	0,050	1,492	0,055	0,046

Límites del TULSMA; pH (potencial de hidrógeno); CE (Conductividad eléctrica); SDT (Sólidos disueltos totales); Temp. (Temperatura); Turb. (Turbidez); AT (Alcalinidad Total); Q (Caudal)

TULSMA limits; pH (potential of hydrogen); EC (electrical conductivity); TDS (total dissolved solids); Temp. (temperature); Turb. (turbidity); TA (total alkalinity); Q (discharge)

El análisis estadístico reveló anomalías metálicas en el punto de muestreo HIG-2, correspondientes a arsénico (As), cobre (Cu), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn), cuyas concentraciones superan los límites establecidos en los criterios de calidad del agua definidos por la normativa ambiental ecuatoriana (Tabla 3).

La geología predominante de la zona está compuesta mayoritariamente por rocas sedimentarias, especialmente lutitas y areniscas, en las cuales el arsénico tiende a concentrarse en arcillas, óxidos, sulfuros y fosfatos de hierro y manganeso hidratados (Ure y Berrow, 1997). Dado que el uso de arsénico como plaguicida está prohibido en el Ecuador (Agrocalidad, 1999), se descarta esta fuente antrópica. En consecuencia, la presencia de arsénico y otros metales/metaloideos en el agua puede atribuirse a procesos de disolución geoquímica asociados a la intensa erosión de las formaciones rocosas locales.

En particular, las rocas clásticas de grano fino, como las lutitas presentes en la formación geológica de la zona, presentan un enriquecimiento natural de cobre (Cu) (McLennan y Murray, 1999). La erosión y disociación mineral de estas rocas podrían explicar las concentraciones elevadas de cobre detectadas en el punto HIG-2.

En cuanto al níquel (Ni), su presencia en medios acuáticos puede derivarse de fuentes antrópicas, tales como actividades mineras, fabricación de aleaciones, procesos de galvanoplastia y uso en industrias de colorantes o bebidas. Sin embargo, durante el trabajo de campo no se evidenció la presencia de tales actividades en el área de estudio. Por lo tanto, se atribuye su origen a la meteorización natural de las rocas sedimentarias aflorantes en la zona.

El zinc (Zn), elemento abundante en la corteza terrestre, presenta una concentración media de 65 mg/kg en rocas ígneas (Adriano, 2001). En este contexto, las concentraciones registradas podrían estar relacionadas con la liberación natural de este metal desde las rocas tipo granito que conforman parte de la Formación Chota.

3.5.2. Quebrada El Higuerón – sedimentos

Las concentraciones de arsénico (As) y cromo (Cr) registradas en la parte baja de la quebrada, específicamente en el punto de muestreo HIG-2 (Tabla 4), se encuentran dentro del rango comprendido entre los valores guía de calidad sedimentaria ISQG (Interim Sediment Quality Guideline) y PEL (Probable Effect Level). En este intervalo, los elementos son considerados como potencialmente asociados a efectos biológicos adversos ocasionales sobre organismos acuáticos. No obstante, dichas concentraciones presentan variaciones poco significativas en comparación con los valores obtenidos por PRODEMINDA, e incluso se sitúan por debajo de los valores atípicos definidos para cada elemento.

Estos resultados son consistentes con las fuentes de concentración previamente identificadas en las aguas superficiales del sistema de drenaje. La tendencia al incremento de As y Cr en la zona baja de la quebrada podría atribuirse a procesos de erosión intensos, observados durante el trabajo de campo en las áreas adyacentes al cauce, los cuales favorecen la movilización y acumulación de estos metales en los sedimentos fluviales.

Tabla 4. Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos fluviales, quebrada El Higuerón.
Table 4. Concentrations of metals and metalloids in fluvial sediments, El Higuerón Stream.

Código	Cuerpo hídrico	As mg/kg 5,9 - 17*	Cd mg/kg 0,6 - 3,5*	Cr mg/kg 37,3 - 90*	Cu mg/kg 35,7 - 197*	Pb mg/kg 35 - 91,3*	Zn mg/kg 123 - 315*
HIG-1	Quebrada El Higuerón	4,51	< 2,12	58,96	19,06	<7,74	28,50
HIG-2	Quebrada El Higuerón	6,18	< 2,12	79,51	23,30	< 7,74	40,14

*Límites del CCME (2023)

3.5.3. Río Amarillo – aguas

El potencial de hidrógeno (pH) del agua presenta una ligera tendencia hacia la basicidad, atribuible principalmente al alto contenido de calcio y magnesio disueltos, elementos abundantes en las rocas basálticas de la Unidad Pallatanga y en los basaltos calco-alcalinos de la Unidad Río Cala (INIGEMM, 2015).

La conductividad eléctrica registrada en todos los puntos de muestreo supera en más de tres veces los límites establecidos por la normativa ecuatoriana. Este comportamiento se asocia a la elevada concentración de iones disueltos, especialmente de calcio y magnesio, presente en el agua. La persistencia de estos valores elevados sugiere una anomalía de origen natural, vinculada a la geología calco-alcalina que caracteriza la cuenca del río (ver Tabla 5).

La dureza del agua del río Amarillo se clasifica como “muy dura”, con concentraciones superiores a 1 000 mg/L de CaCO_3 . Este resultado se explica por las altas concentraciones de calcio, magnesio y sodio detectadas en los análisis. Dado que no se evidencian presiones antrópicas significativas en el sector alto de la cuenca, se infiere que dichas concentraciones tienen un origen predominantemente natural.

A lo largo del curso del río Amarillo, el Índice de Contaminación por Minerales (ICOMI) se mantuvo constante en un valor de 0,67, lo que corresponde a un nivel de contaminación medio-alto por mineralización, atribuible a procesos naturales.

Las concentraciones de nitratos fueron bajas, con un valor máximo de 0,263 mg/L registrado en la zona alta del río, lo cual respalda la hipótesis de escasa influencia antrópica, en particular por actividades agropecuarias.

En cuanto al contenido de sulfatos, los niveles medidos exceden ampliamente los límites establecidos por el TULSMA, lo cual constituye un claro indicador de la influencia de procesos naturales de meteorización, específicamente la descomposición de minerales sulfurados. Esta interpretación se ve reforzada por la ausencia de fuentes antrópicas que justifiquen un incremento en la carga de sulfatos en el agua del río.

Tabla 5. Parámetros físico químicos y concentraciones de metales en aguas, río Amarillo.

Table 5. Physicochemical parameters and metal concentrations in waters, Amarillo River.

Código	Parámetros físicoquímicos							Concentración de Metales			
	pH 6,5 -9*	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ 700*	SDT mg/l 450*	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Turb. NTU 100*	AT mg/l de CaCO_3	Q l/s	Cu mg/l 0,005*	Mn mg/l 0,1*	Ni mg/l 0,025*	Zn mg/l 0,03*
AMA-1	8,21	2.129	1.128	23,0	26,0	12,75	4,620	0,067	1,664	0,090	0,350
AMA-2	8,39	2.134	1.143	21,5	56,6	15,30	4,600	0,137	1,712	0,099	0,641
AMA-3	8,23	3.094	1.49	32,6	11,9	46,75	0,003	<0,005	0,604	<0,004	<0,016
AMA-4	8,35	2.362	1.177	29,4	22,1	19,55	4,650	0,037	0,374	0,038	0,187

*Límites del TULSMA; pH (potencial de hidrógeno); CE (Conductividad eléctrica); SDT (Sólidos disueltos totales); Temp. (Temperatura); Turb. (Turbidez); AT (Alcalinidad Total); Q (Caudal)

El análisis estadístico descriptivo reveló que no se identificaron anomalías metálicas en los puntos de muestreo evaluados, ya que las concentraciones de los metales disueltos en el agua se mantuvieron dentro de un rango homogéneo y presentaron una tendencia consistente (ver Figura 5). Este comportamiento sugiere que los procesos geoquímicos de disociación, oxidación y precipitación actúan de manera similar para los metales analizados, lo que refuerza la hipótesis de un control hidroquímico natural uniforme en el sistema evaluado.

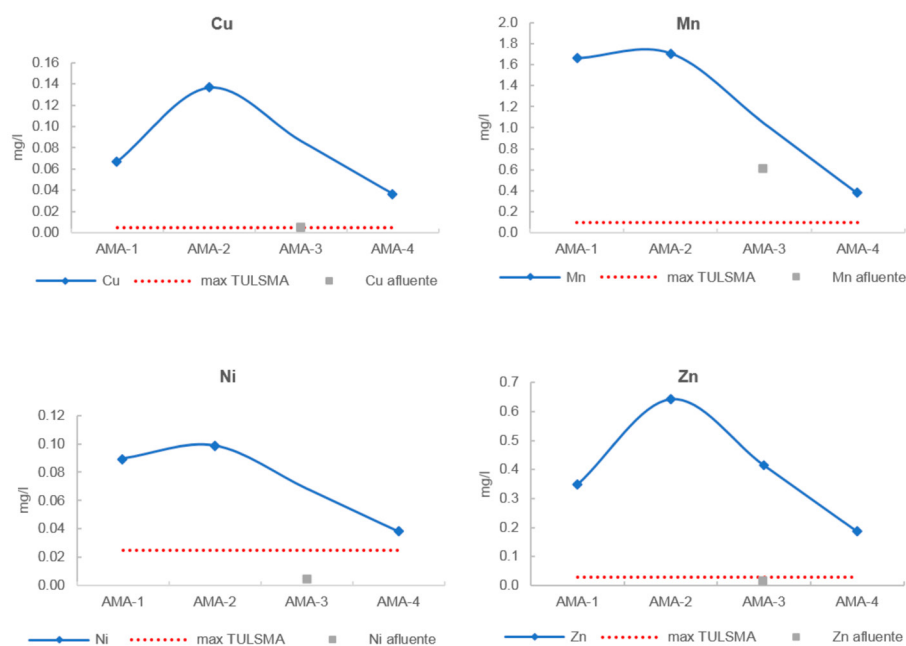


Figura 5. Concentraciones de metales y metaloides en aguas superficiales del río Amarillo.
 Figure 5. Concentration of metals and metalloids in surface waters of the Amarillo River.

Es importante destacar que las concentraciones de Cu-Mn-Ni-Zn superan ampliamente los límites establecidos por la normativa ambiental vigente (ver Tabla 5), así como los niveles registrados en los otros cuerpos de agua analizados en este estudio. Este comportamiento sugiere que el tramo del río Amarillo bajo evaluación atraviesa una zona con anomalías hidroquímicas naturales. En este contexto, (INIGEMM, 2016a) reporta la presencia de anomalías geoquímicas asociadas a una compleja mineralización compuesta por Cu-Mo-Pb-Zn, Ni y As-Hg-Sb en el río Amarillo.

3.5.4. Río Amarillo – sedimentos

Los resultados del análisis de sedimentos fluviales del río Amarillo evidencian concentraciones elevadas de arsénico (As) y cromo (Cr), que superan ampliamente los valores guía del PEL en todos los puntos de muestreo (Tabla 6). En contraste, el cobre (Cu) presenta concentraciones relativamente estables, con valores que oscilan entre 50,93 y 57,46 mg/kg, ubicándose en el rango intermedio entre el ISQG y el PEL. Esta estabilidad sugiere una presencia moderada que podría estar relacionada con fuentes naturales, sin evidencia clara de acumulación anómala.

Tabla 6. Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos fluviales, río Amarillo.
 Table 6. Concentrations of metals and metalloids in fluvial sediments, Yellow River.

Código	Cuerpo Hídrico	As mg/kg 5,9 - 17*	Cd mg/kg 0,6 - 3,5*	Cr mg/kg 37,3 - 90*	Cu mg/kg 35,7 - 197*	Pb mg/kg 35 - 91,3*	Zn mg/kg 123 - 315*
AMA-1	Río Amarillo	163,35	<2,12	163,76	57,46	<7,74	97,69
AMA-2	Río Amarillo	152,71	<2,12	135,14	54,21	<7,74	117,73
AMA-3	Río Amarillo	107,64	<2,12	274,18	50,93	7,96	64,08
AMA-4	Río Amarillo	114,57	<2,12	114,10	54,09	8,49	121,34

*Límites del CCME (2023)

En el caso del arsénico, los niveles detectados son casi tres veces superiores al LSE, categorizando a todos los puntos evaluados como atípicos superiores para este metaloide. Particularmente, el punto AMA-4 presenta una concentración similar a la reportada previamente por PRODEMINTA, lo que refuerza la hipótesis de un origen natural. Esta interpretación concuerda con la clasificación de la cuenca como zona anómala primaria de arsénico, establecida por el (INIGEMM, 2016a). Además, es relevante señalar que el arsénico se encuentra comúnmente asociado al cobalto en la naturaleza (ATSDR, 2004), lo que explica que en el punto AMA-1, donde se reporta la mayor concentración de As, también se haya registrado el valor más alto de cobalto, el cual supera el LS.

Las concentraciones de cromo también muestran características anómalas, con un máximo de 274,18 mg/kg en el punto AMA-3 y un mínimo de 114,10 mg/kg en el punto AMA-4, ubicado en la parte baja del río (Tabla 6, Figura 6). La fuente más probable de este elemento es la cromita, un mineral común en rocas básicas como las que conforman la Unidad Pallatanga, compuesta por basaltos, lavas basálticas y sedimentos asociados (Aracil, et al., 2000), y que atraviesa el sector geológico del río Amarillo.

Asimismo, se identificaron anomalías significativas de níquel (Ni). En los puntos AMA-1 y AMA-3, las concentraciones superan el LSE (82,5 mg/kg), mientras que en los otros puntos se sitúan por encima del LS (Tabla 2). Si bien la literatura atribuye valores de hasta 80 mg/kg en sedimentos de agua dulce a descargas urbanas o industriales (Rosas, 2001), en este caso no se identifican fuentes antrópicas cercanas al área de estudio, lo cual sugiere que estas concentraciones de Ni también serían de origen geológico natural.

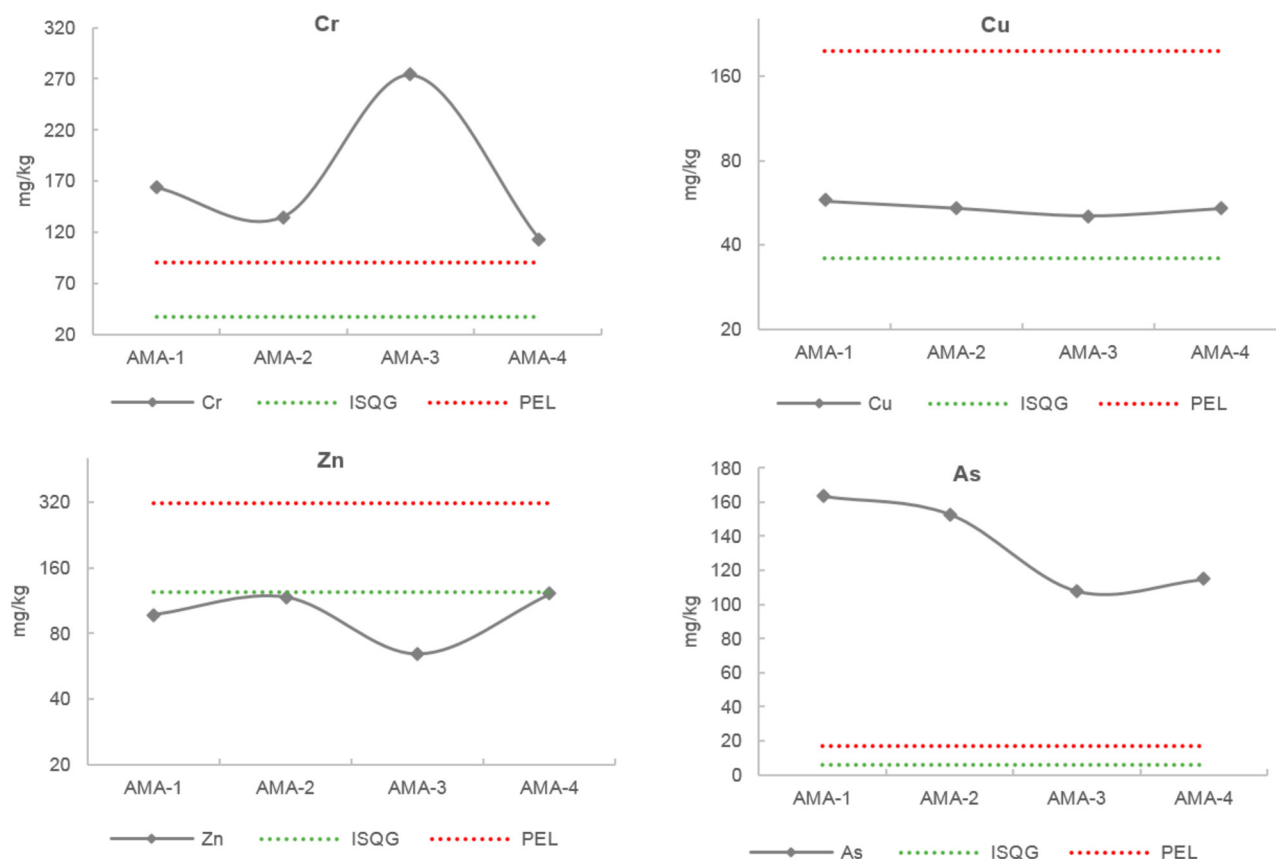


Figura 6. Concentración de metales y metaloides en sedimentos fluviales del río Amarillo.
Figure 6. Concentration of metals and metalloids in fluvial sediments of the Amarillo River.

3.5.5. Río Mira – aguas

Los valores de pH registrados en el río Mira se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental nacional, con un rango de 8,21 a 8,82, lo que clasifica sus aguas como levemente alcalinas. Este comportamiento es coherente con la presencia de materiales geológicos carbonatados o básicos en la cuenca, que favorecen una ligera tendencia a la basicidad.

La conductividad eléctrica, aunque no excede los valores permitidos por la normativa (ver Tabla 7), se considera relativamente elevada, lo cual puede estar asociado a la presencia de iones disueltos derivados de procesos de meteorización de las rocas en el entorno geológico. Sin embargo, se observa una disminución de este parámetro en los dos puntos ubicados en la zona baja del río, lo que podría atribuirse a procesos de dilución por el incremento del caudal o a una menor carga iónica en esa sección.

En cuanto a la dureza, los valores oscilan entre 91,93 y 109,47 mg/l CaCO_3 , lo que clasifica el agua del río Mira como moderadamente dura. Esta característica es típica de cuerpos de agua que fluyen sobre formaciones rocosas ricas en carbonatos o silicatos de calcio y magnesio.

El Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI) alcanzó un valor máximo de 0,59 en el punto MIR-3, lo que indica una leve contaminación por mineralización en el sistema. Este resultado sugiere una baja influencia de fuentes externas y una dominancia de procesos geoquímicos naturales.

Respecto a los nitratos, se registró una concentración promedio de 4,95 mg/l, con un valor máximo de 5,327 mg/l en la zona baja. Estos niveles son elevados en comparación con los afluentes del sistema, lo cual es notable considerando el caudal significativo del río en el momento del muestreo (promedio mensual de 135,9 m³/s en marzo, según INAMHI). Estas concentraciones podrían estar relacionadas con aportes difusos de origen antrópico, principalmente derivados de la actividad agrícola y pecuaria (haciendas, granjas avícolas y porcinas) presentes en la zona baja de la cuenca.

Por último, las concentraciones de sulfato en el agua fueron bajas en todos los puntos de muestreo, con un valor máximo de 41,216 mg/l en la zona media. Este comportamiento se explica, en parte, por el alto caudal del río, que favorece un elevado grado de dilución, característico del régimen hidrológico natural de este sistema.

Tabla 7. Parámetros físico químicos y concentraciones de metales en aguas, río Mira.

Table 7. Physicochemical parameters and metal concentrations in waters, Mira River.

Código	Parámetros físicoquímicos							Concentración de Metales				
	pH 6,5 -9*	CE μS/cm 700*	SDT mg/l 450*	T °C	Turb. NTU 100*	AT mg/l de CaCO_3	Q m ³ /s	Cu mg/l 0,005*	Mg mg/l	Mn mg/l 0,1*	Ni mg/l 0,025*	Zn mg/l 0,03*
MIR-1	8,82	402,6	199	20,0	111,5	41,65	135,9**	<0,005	9,263	0,158	<0,004	<0,016
MIR-2	8,33	432,7	211	21,6	99,1	42,50	135,9**	<0,005	9,400	0,127	<0,004	<0,016
MIR-3	8,55	426,9	233	21,4	258,7	37,40	135,9**	0,008	10,822	0,234	<0,004	0,042
MIR-4	8,31	448,0	228	21,0	144,9	43,35	135,9**	<0,005	9,557	0,143	<0,004	0,037
MIR-5	8,21	251,9	124	18,1	961,7	28,90	135,9**	0,027	9,722	0,762	0,009	0,021
MIR-6	8,40	275,8	142	19,5	960,9	28,90	135,9**	0,023	9,462	0,725	0,015	0,025

*Límites del TULSMA; pH (potencial de hidrógeno); CE (Conductividad eléctrica); SDT (Sólidos disueltos totales); Temp. (Temperatura); Turb. (Turbidez); AT (Alcalinidad Total); Q (Caudal)

** INAMHI (2016)

En los resultados del análisis hidroquímico de aguas superficiales, se identificaron dos valores anómalos en la concentración de metales disueltos. La primera anomalía corresponde al magnesio (Mg^{2+}), detectada en el tramo donde el río atraviesa la Formación Geológica Chota (MCh), compuesta principalmente por areniscas grises masivas (BGS y CDIGMM, 1993) y grauvacas. Estas últimas presentan una composición geoquímica característica, con predominancia de Fe^{2+} sobre Fe^{3+} y Mg^{2+} sobre Ca^{2+} (Universidad de Sonora, 2005), lo que sugiere que el magnesio detectado proviene de la disolución de estos minerales en contacto con el agua.

La segunda anomalía corresponde al níquel (Ni), registrado en el punto de muestreo MIR-6, ubicado aguas abajo de la confluencia con el río Amarillo. Este afluente presenta concentraciones elevadas de Cu-Mn-Ni-Zn, lo cual sugiere que la anomalía observada se debe al aporte directo del río Amarillo y a la disolución de minerales portadores de Ni presentes en las rocas basálticas de la unidad geológica Pallatanga (KPa), por donde fluye dicho río (ver Figura 7). En este contexto, (Mielke, 1979) reporta concentraciones típicas de níquel en rocas ígneas, con valores de hasta $2.000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en ultramáficas y $130 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en basaltos.

Cabe destacar que, en varios puntos de la zona de estudio, los valores de estos metales superan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental nacional vigente (ver Tabla 7), lo cual podría implicar un riesgo potencial para los ecosistemas acuáticos y el uso del recurso hídrico.

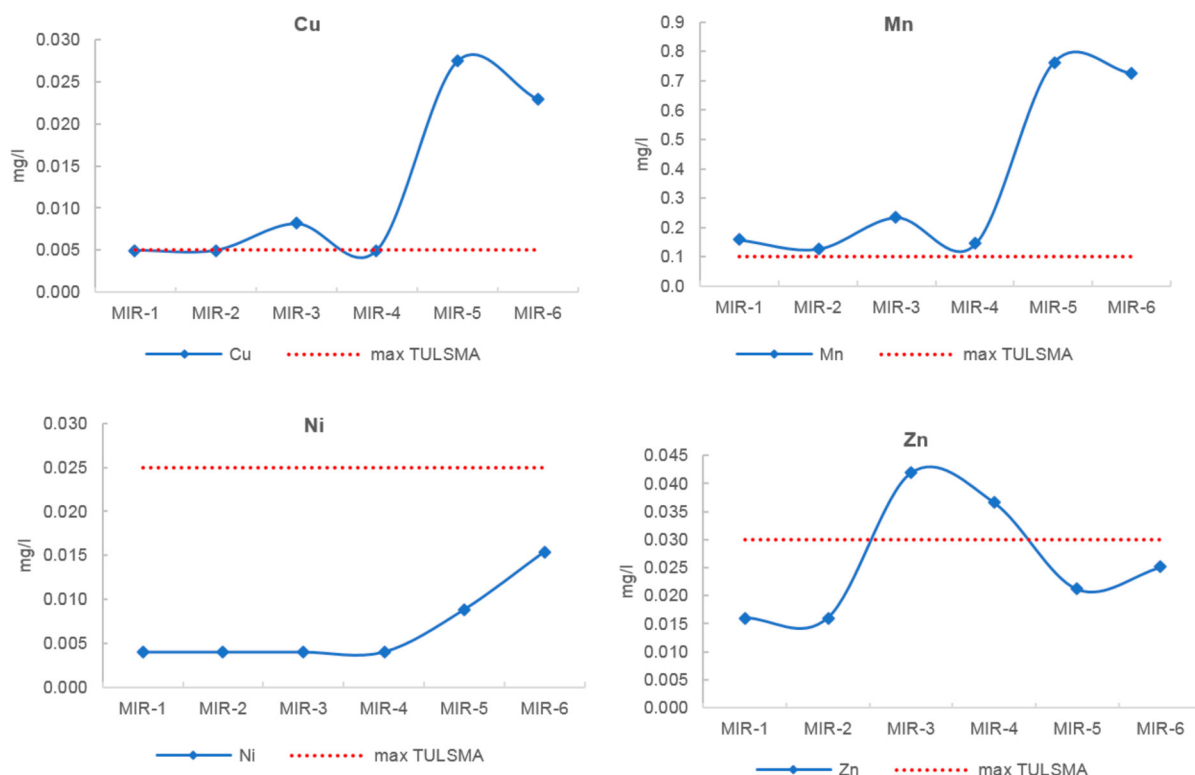


Figura 7. Concentraciones de metales y metaloides en aguas superficiales del río Mira.

Figure 7. Concentration of metals and metalloids in surface waters of the Mira River.

3.5.6. Río Mira – sedimentos

Para los elementos de relevancia ambiental, las concentraciones determinadas no presentan variaciones significativas entre los distintos puntos de muestreo. En todos los casos, los valores obtenidos se encuentran por debajo de los rangos definidos como anómalos y del ISQG establecido por la normativa canadiense.

Las concentraciones de As, Cu y Zn se mantienen relativamente constantes a lo largo del perfil de muestreo, lo que sugiere una dinámica de sedimentación estable, influenciada por el alto caudal del río. En el caso del Cr, su baja solubilidad en el agua puede estar relacionada con las condiciones de pH ligeramente alcalinas que caracterizan al sistema.

Sin embargo, el Cr presenta concentraciones superiores al límite del ISQG en todos los puntos del río Mira (véase Tabla 8). Esta tendencia podría atribuirse al arrastre y erosión de suelos tipo Mollisol ubicados en la parte alta de la cuenca. Estos suelos se desarrollan sobre rocas básicas, conocidas como una de las principales fuentes naturales de cromita (Sierra Aragón, 2005).

Tabla 8. Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos fluviales, río Mira.

Table 8. Concentrations of metals and metalloids in fluvial sediments, Mira River.

Código	Cuerpo hídrico	As mg/kg 5,9 - 17*	Cd mg/kg 0,6 - 3,5*	Cr mg/kg 37,3 - 90*	Cu mg/kg 35,7 - 197*	Pb mg/kg 35 - 91,3*	Zn mg/kg 123 - 315*
MIR-1	Río Mira	2,28	<2,12	66,13	16,38	<7,74	36,52
MIR-2	Río Mira	2,48	<2,12	72,44	15,20	<7,74	35,32
MIR-3	Río Mira	3,39	<2,12	71,14	16,09	<7,74	36,47
MIR-4	Río Mira	2,53	<2,12	76,29	15,22	<7,74	36,12
MIR-5	Río Mira	2,67	<2,12	56,38	16,20	<7,74	26,97
MIR-6	Río Mira	2,41	<2,12	64,30	15,54	<7,74	30,16

*Límites del CCME (2023)

Por su parte, el Cu mantiene concentraciones por debajo del umbral establecido por el ISQG. Su presencia puede estar asociada a la alteración hidrotermal de las lavas basálticas que constituyen la Unidad geológica Río Cala, la cual aflora en zonas próximas a los puntos de muestreo.

El Zn, con un valor promedio de 33,59 mg/kg (Figura 8), no muestra fluctuaciones abruptas a lo largo del área de estudio. Su origen podría estar relacionado con la descomposición del mineral esfalerita, presente en las tobas dacíticas de la Formación Chachimbiro, que cubren una amplia extensión de la zona evaluada.

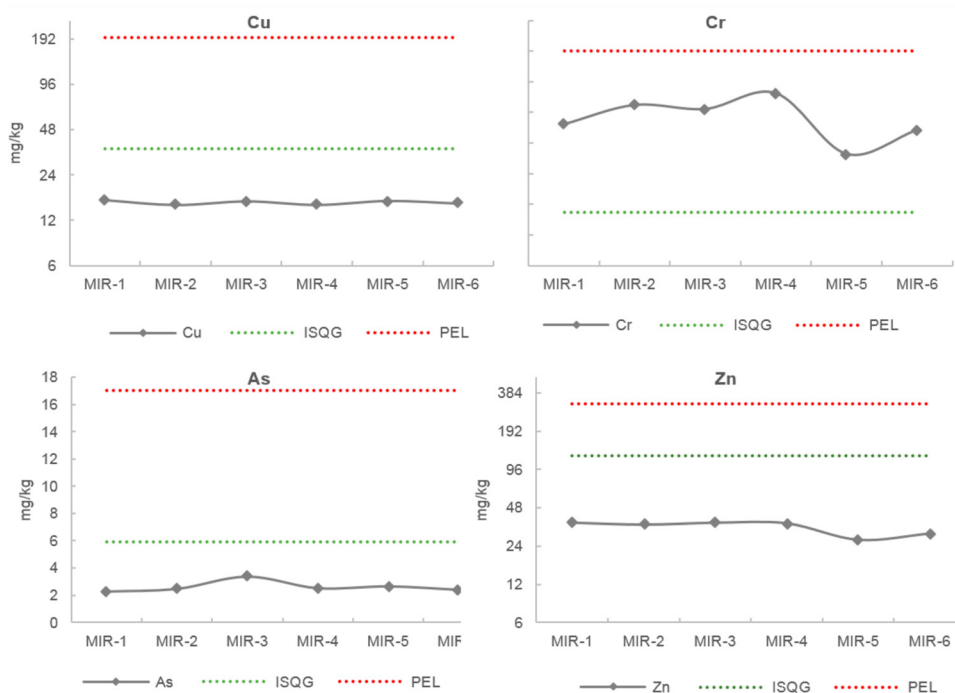


Figura 8. Concentración de metales y metaloides en sedimentos fluviales del río Mira.

Figure 8. Concentration of metals and metalloids in fluvial sediments of the Mira River.

3.5.7. Río Palacara – aguas

Los valores de pH registrados en el río Palacara y sus afluentes se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental nacional, con un rango que varía entre 7,8 y 8,6, lo cual indica características neutras a levemente alcalinas (Tabla 9).

La conductividad eléctrica muestra valores relativamente elevados en la zona alta de la unidad de drenaje, particularmente en los puntos de muestreo SJU-1, MEJ-1 y SRO-1, correspondientes a la Unidad Geológica Silante. No obstante, estas concentraciones no superan los límites permitidos por la normativa vigente.

En cuanto a la dureza del agua, la mayoría de las muestras corresponden a aguas blandas a moderadamente duras. Sin embargo, las muestras recolectadas en los puntos MEJ-1 y SRO-1 presentan durezas de 194,16 mg/L y 177,49 mg/L de CaCO_3 , clasificándose como muy dura y dura, respectivamente.

El Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI) no revela indicios de contaminación mineral en el cuerpo principal del río Palacara. En contraste, sus afluentes, las quebradas Santa Rosa y Mejillones, muestran los valores más elevados del área de estudio (0,90 y 0,91, respectivamente), lo que evidencia un alto grado de mineralización en estas corrientes.

La concentración promedio de nitratos es baja, con un valor medio de 0,506 mg/L y un máximo de 0,857 mg/L registrado en el punto PAL-4, ubicado en la parte baja del río, antes de su confluencia con el río Mira. Todos los valores se mantienen por debajo de los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana.

Finalmente, las concentraciones de sulfato también se encuentran considerablemente por debajo de los valores límite definidos en el TULSMA, con un rango que oscila entre 4,54 y 50,51 mg/L.

Tabla 9. Parámetros físico químicos y concentraciones de metales en aguas, río Palacara.
Table 9. Physicochemical parameters and metal concentrations in waters, Palacara River.

Código	Parámetros físicoquímicos							Concentración de Metales							
	pH 6,5 -9*	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ 700*	SDT mg/l 450*	T $^{\circ}\text{C}$	Turb. NTU 100*	AT mg/l de CaCO_3	Q l/s	As mg/l 0,050*	Co mg/l 0,2*	Cr mg/l 0,032*	Cu mg/l 0,005*	Mn mg/l 0,1*	Ni mg/l 0,025*	Sr mg/l	Zn mg/l 0,03*
TAB-1	8,37	175,20	107	13,3	0	20,4									
PAL-1	8,37	124,32	76	16,9	18,4	11,9									
SJU-1	8,31	416,30	226	14,5	4,5	54,4	3,00	<0,004	<0,004	<0,004	<0,005	<0,071	<0,004	0,272	<0,016
PAL-2	7,98	193,90	108	20,8	57,9	64,6		0,008	<0,004	<0,004	0,006	0,121	<0,004	0,112	<0,016
MEJ-1	8,63	351,40	125	16,7	5,4	193,3	0,80								
SRO-1	8,60	377,45	218	16,1	33,0	191,4	4,29								
PAL-3	7,80	182,80	216	18,5	127,0	61,3		0,009	<0,004	<0,004	0,010	0,208	<0,004	0,102	<0,016
PAL-4	8,29	266,20	308	19,9	225,6	23,0	4.510**	0,016	0,005	0,007	0,013	0,353	0,007	0,128	0,031

*Límites del TULSMA; pH (potencial de hidrógeno); CE (Conductividad eléctrica); SDT (Sólidos disueltos totales); Temp. (Temperatura); Turb. (Turbidez); AT (Alcalinidad Total); Q (Caudal)

Los resultados del análisis de metales (Tabla 9) revelan ocho valores anómalos, de los cuales el 87,5 % se localizan en la parte baja del río. Estas elevadas concentraciones no necesariamente constituyen anomalías geoquímicas puntuales, sino que podrían estar asociadas a procesos naturales de disolución y erosión intensificados en los tramos aguas arriba del punto de muestreo. Dichos mecanismos favorecerían el transporte y posterior acumulación de metales en los sectores bajos del sistema fluvial.

Además, esta tendencia ascendente en la concentración de metales hacia la parte baja del río puede estar influenciada por factores antrópicos. Durante los recorridos de campo se observó una intensa actividad agrícola en esta zona, lo cual concuerda con lo reportado en el mapa de Cobertura y Uso de la Tierra en el Ecuador continental, categoría “Cultivo”, escala 1:100.000, año 2013 - 2014 (MAGAP, 2016), que documenta la presencia de cultivos anuales de cereales y plantaciones semipermanentes de caña de azúcar industrial.

Una excepción relevante corresponde al punto SJU-1, ubicado en la parte alta de la unidad de drenaje, el cual presenta una concentración anómala de Sr. En esta zona no se identificaron fuentes antrópicas significativas aguas arriba, lo que sugiere un origen predominantemente geológico. El Sr podría estar presente en forma de celestina (SrSO_4), un mineral común en ambientes sedimentarios. En contraste, su

otra forma mineral, la estroncianita (SrCO_3), requiere condiciones específicas con concentraciones de bicarbonato superiores a 800 ppm para su formación, lo cual no se evidenció en este caso.

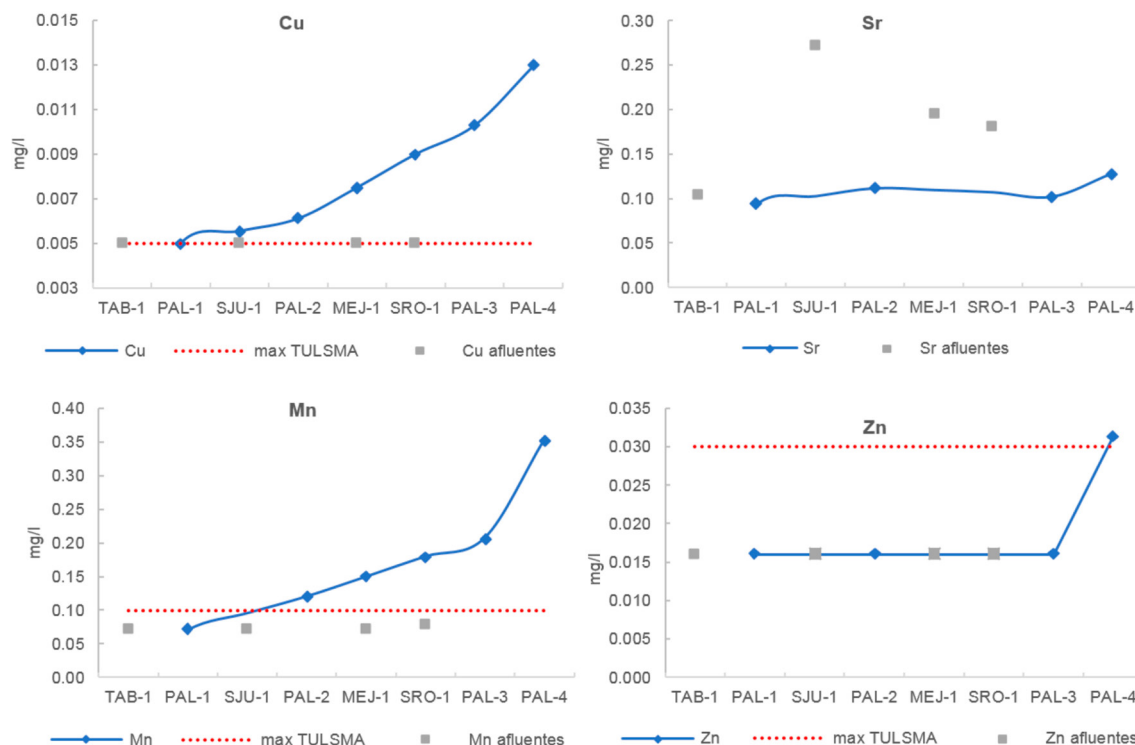


Figura 9. Concentraciones de metales y metaloides en aguas superficiales del río Palacará.
Figure 9. Concentration of metals and metalloids in surface waters of the Palacará River.

Aunque no todos los puntos de muestreo fueron clasificados como anómalos según el análisis estadístico, siete de ellos superan los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental nacional (Figura 9). En particular, los puntos PAL-2, PAL-3 y PAL-4, ubicados en el cauce del río Palacará, presentan un incremento casi lineal en las concentraciones de Cu y Mn. Además, en el punto PAL-4 se registró una concentración de Zn que excede el valor límite normativo.

Este comportamiento puede atribuirse a características geológicas locales. De acuerdo con el análisis geoestadístico elaborado por el componente de Ocurrencias Minerales del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM, 2016a), el río Palacará atraviesa formaciones geológicas que presentan anomalías naturales de Zn. Estas incluyen la Unidad Natividad, caracterizada por intrusivos dacíticos, así como depósitos volcánicos que rellenan el Valle Interandino. En este contexto, las concentraciones de Zn observadas en el presente estudio se interpretarían como resultado de la geología del área, lo que sugiere un origen predominantemente natural.

3.5.8. Río Palacará – sedimentos

Las concentraciones de As no evidencian anomalías, ya que se mantienen muy por debajo del límite superior establecido por la normativa ambiental y no superan los valores umbral para efectos biológicos adversos definidos por el ISQG canadiense. Los resultados obtenidos en los puntos muestreados durante la presente investigación son consistentes con los reportados en 1998, sin presentar variaciones significativas.

En cuanto al cromo (Cr), las concentraciones medidas en todos los puntos de muestreo se encuentran entre los valores de ISQG y PEL, con excepción del punto PAL-3, donde se supera el umbral del PEL. La principal fuente natural de este elemento en el área de estudio es la cromita (FeCr_2O_4), mineral común en los suelos tipo Mollisol predominantes en la región. La comparación con los datos históricos de PRODEMINCA sugiere que los niveles de Cr han permanecido estables, lo que refuerza la hipótesis de un origen geológico natural.

Respecto al Cu y al Zn, no se observaron diferencias significativas en sus concentraciones a lo largo de los puntos de muestreo. Ambos elementos se encuentran por debajo de los niveles establecidos por el ISQG (ver Tabla 10). Su presencia en los sedimentos está relacionada con los procesos de alteración hidrotermal y la presencia de minerales sulfurados, como calcopirita (CuFeS_2) y esfalerita (ZnS), en las Tobas Dacíticas Chachimbiro, que afloran ampliamente en el área de estudio.

Tabla 10. Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos fluviales, río Palacara.
Table 10. Concentrations of metals and metalloids in fluvial sediments, Palacara River:

Código	Cuerpo Hídrico	As mg/kg 5,9 - 17*	Cd mg/kg 0,6 - 3,5*	Cr mg/kg 37,3 - 90*	Cu mg/kg 35,7 - 197*	Pb mg/kg 35 - 91,3*	Zn mg/kg 123 - 315*
TAB-1	Río Tababara	1,87	<2,12	59,81	19,92	<7,74	39,49
PAL-1	Río Palacara	5,75	<2,12	64,34	25,43	<7,74	47,76
SJU-1	Quebrada San Juan	1,32	<2,12	43,94	32,57	<7,74	41,91
PAL-2	Río Palacara	5,66	<2,12	71,68	26,28	<7,74	47,01
MEJ-1	Quebrada Mejillones	2,34	<2,12	69,01	25,00	<7,74	34,61
SRO-1	Quebrada Santa Rosa	1,35	<2,12	58,44	34,08	<7,74	42,95
PAL-3	Río Palacara	5,10	<2,12	90,43	25,50	<7,74	59,41
PAL-4	Río Palacara	4,93	<2,12	64,81	24,84	<7,74	45,05

*Límites del CCME (2023)

En general, los perfiles de concentración de metales y metaloides a lo largo del río Palacara muestran una tendencia lineal. Sin embargo, el punto PAL-3 destaca por un incremento puntual de Cr y, en menor medida, de Zn (Figura 10). Esta anomalía podría atribuirse a la alta capacidad de arrastre de sedimentos desde las cabeceras, favorecida por la confluencia de múltiples cursos de agua, tanto perennes como intermitentes, en esta unidad de drenaje de considerable caudal.

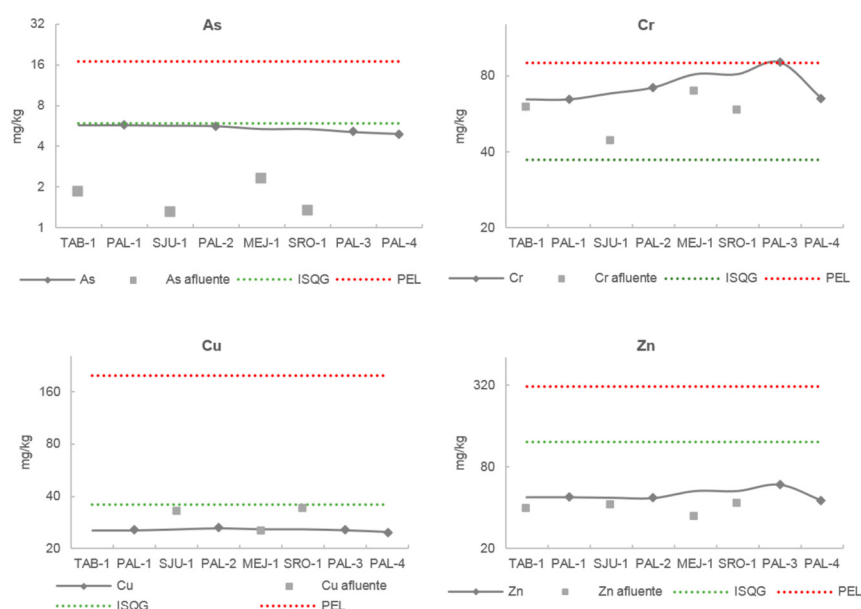


Figura 10. Concentración de metales y metaloides en sedimentos fluviales del río Palacara.
Figure 10. Concentration of metals and metalloids in fluvial sediments of the Palacara River.

Para apoyar la interpretación espacial de los niveles de alteración en los cuerpos de agua, se incluyen mapas temáticos (Figura 11) que ilustran la distribución geográfica de las concentraciones metálicas en

los sedimentos. Estos mapas permiten identificar zonas críticas de acumulación, así como los patrones de dispersión a lo largo del cuerpo hídrico, aportando una herramienta valiosa para la gestión ambiental del área.

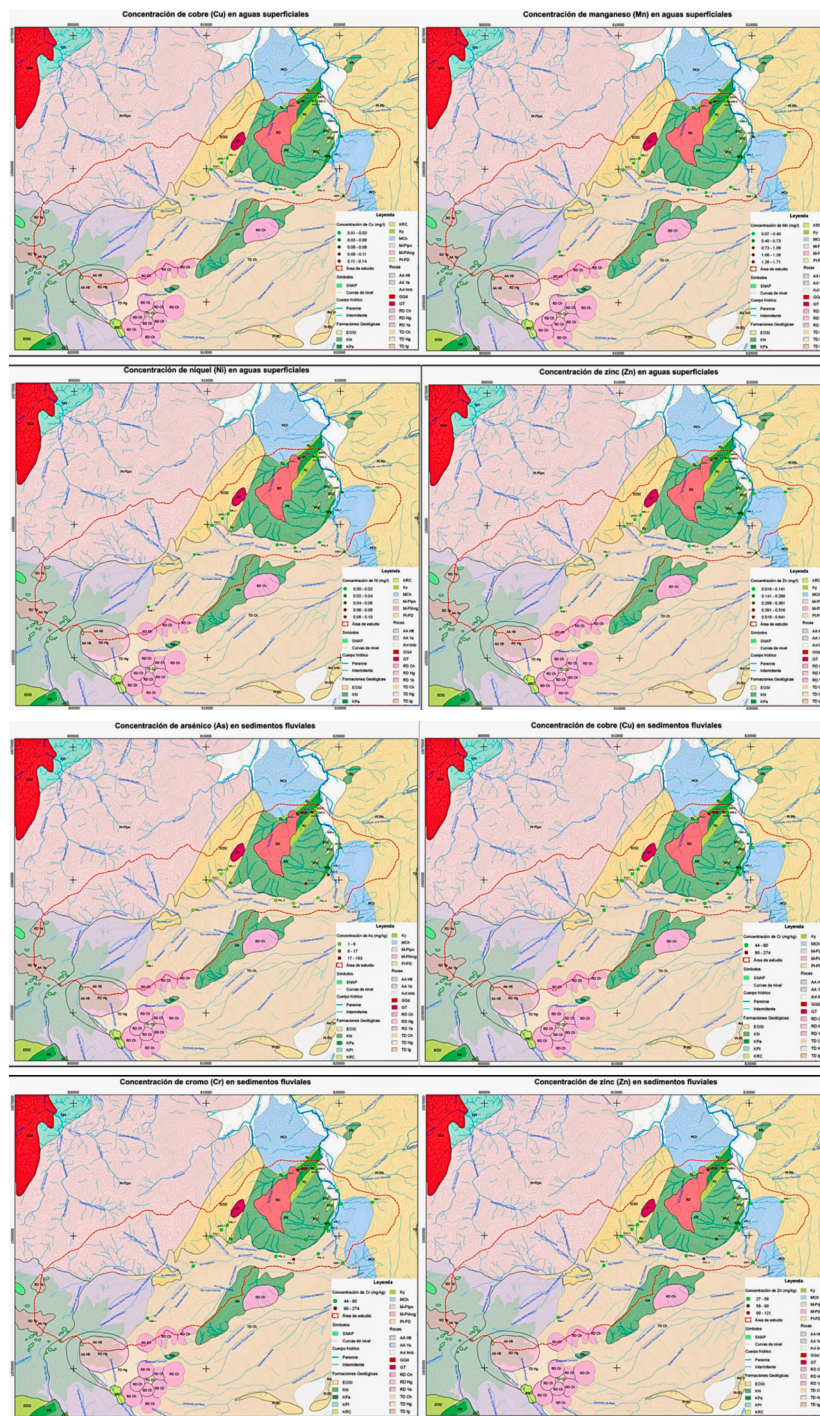


Figura 11. Mapa de concentración de metales en sedimentos fluviales.

Figure 11. Concentration of metals in fluvial sediments.

En la Figura 11 se puede evidenciar que, en la quebrada El Higuerón se evidenció concentraciones anómalas de arsénico (As), cobre (Cu), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn) en el punto HIG-2.

Estas anomalías se asocian principalmente a procesos naturales de disolución y erosión de las formaciones sedimentarias locales, compuestas por lutitas y areniscas, donde los metales tienden a concentrarse en minerales de arcilla, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso.

Así también se observa que el río Amarillo presenta anomalías metálicas significativas, con concentraciones de cobre (Cu), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn) que superan los valores observados en otros cuerpos de agua del estudio. Por la evidencia registrada se trata de una zona con anomalías hidroquímicas naturales y una mineralización compleja en el área. El análisis hidroquímico del río Mira reveló concentraciones elevadas principalmente de Ni, en el punto MIR-6, aguas abajo de la confluencia con el río Amarillo, atribuyéndose tanto al aporte de este afluente, como a la disolución de minerales portadores de Ni en las rocas basálticas de la unidad Pallatanga.

En este mismo sentido, en el río Palacara los puntos PAL-2, PAL-3 y PAL-4 mostraron un incremento progresivo en Cu y Mn, mientras que en PAL-4 el Zn excedió el valor máximo de la normativa; esto se asocia principalmente a la influencia geológica local, ya que el río atraviesa formaciones con mineralizaciones naturales de Zn, como la Unidad Natividad y depósitos volcánicos del Valle Interandino.

4. Conclusiones

El diagnóstico hidroquímico integral realizado incluyó el análisis morfométrico, la caracterización hidroquímica de aguas superficiales y el estudio geoquímico de sedimentos fluviales, permitió identificar áreas con diferentes grados de alteración ambiental, tanto de origen natural como antrópico, y en general esta propuesta metodológica es aplicable para otras zonas de ocurrencias minerales.

La quebrada El Higuérón mostró alteraciones en sus parámetros físico-químicos y concentraciones metálicas anómalas en la zona baja, asociadas principalmente a características geológicas locales. No obstante, debido a su bajo caudal, su influencia sobre la calidad del agua del río Mira es mínima. Se recomienda realizar muestreos complementarios en periodos de mayor caudal para una evaluación más representativa. En los sedimentos de esta quebrada no se registraron anomalías geoquímicas relevantes.

El río Amarillo presentó excedencias generalizadas de los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana en todos los puntos de muestreo, lo que evidencia un alto grado de alteración hidroquímica, atribuida principalmente a la descomposición natural de menas sulfuradas. En los sedimentos se identificaron valores anómalos de As, Co, Cr, Ni y Ba, lo que sugiere una zona de influencia geoquímica natural intensificada por actividades de minería artesanal no regulada.

En la confluencia del río Mira con sus afluentes —Palacara, Amarillo, El Higuérón y San Lorenzo— no se observaron alteraciones significativas en los parámetros físico-químicos del cuerpo principal, lo que se atribuye a la marcada diferencia de caudal. No obstante, se detectó un incremento puntual en las concentraciones de Ni en las inmediaciones de la desembocadura del río Amarillo, reforzando la caracterización de esta zona como un entorno polimetálico anómalo.

En cuanto al río Palacara, el análisis estadístico evidenció ocho puntos con concentraciones metálicas superiores a los valores guía para aguas, siete de los cuales se localizaron en el tramo bajo del río. Esta acumulación puede explicarse por el aporte combinado de fuentes naturales, vinculadas a la geología local, y fuentes antrópicas, relacionadas con actividades agrícolas intensivas y el desarrollo de centros poblados a lo largo de su cauce.

Los hallazgos de este estudio aportan información clave para la gestión integrada de recursos hídricos en la región, destacando la necesidad de monitoreos continuos y de estrategias de mitigación ambiental orientadas a reducir los aportes contaminantes de origen antrópico en zonas sensibles.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) por el respaldo técnico y financiero que hizo posible la realización de este estudio. Igualmente, se reconoce la colaboración del personal técnico y administrativo, así como de todas las personas que, de manera indirecta, contribuyeron al desarrollo exitoso de esta investigación.

Disponibilidad de datos

Los datos recopilados para la investigación se encuentran en el repositorio del Instituto de Investigación Geológico y Energético, IIGE, dentro del Banco de Información Geológica del Ecuador (BIGE), que es el sistema de gestión y administración de datos geológicos a nivel nacional que garantiza una adecuada generación, sistematización y administración de la información geológico, minera, metalúrgica y ambiental, para contribuir a un ordenamiento territorial orientado al desarrollo sustentable de los recursos minerales, así como, a la gestión preventiva ante amenazas geológicas.

El IIGE en cumplimiento con su compromiso de generar insumos para el desarrollo del sector geológico y minero, trabaja de manera constante en la generación de herramientas que permitan fortalecer la investigación y el conocimiento. La información recopilada en el BIGE está disponible mediante solicitud formal a la máxima autoridad institucional; una vez autorizado el acceso, los datos utilizados en la presente investigación se los puede localizar en el buscador colocando los códigos detallados en el anexo 2, ingresando mediante la siguiente dirección web: <https://bige.geoenergia.gob.ec/BIGE/login.xhtml?jsessionid=6A0425F9B205079635DA0BB66A22F64F>

Declaración de conflicto de interés

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

Fuentes de financiación

La investigación se realizó mediante el proyecto “Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en Territorio Ecuatoriano” ejecutado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético, IIGE.

Declaración de contribución de autoría

Marcelo Calderón Viveros: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Validación, Visualización, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición.

Amanda Viteri Nolivos: Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Redacción - revisión y edición.

Referencias bibliográficas

- Adriano, D. C., 2001. *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*. USA: Springer Science & Business Media.
- Aracil, E., Barandica, J.M., Cervera, A., et al., 2000. *Diccionario de ciencias de la tierra*. ilustrada, reimpresa ed. España: Editorial Complutense. Oxford University Press
- Agrocalidad, 1999. Coordinación General de Registro de Insumos Agropecuarios, *Listado de plaguicidas prohibidos en Ecuador: Acuerdo Ministerial No. 333, Registro Oficial No. 288, 30 de septiembre de 1999*. Quito, Ecuador.
- APHA, 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, USA: APHA/AWWA/WPCF.
- ATSDR, 2004. *Reseña Toxicológica del cobalto, CAS#: 7440-48-4, Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances & Disease Registry*, s.l.: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EEUU, Servicio de Salud Pública.
- BGS, CDIGMM, 1993. *Mapa Geológico de la República del Ecuador, escala 1:1000000*. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham: British Geological Survey y Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero-Metalúrgico.
- CEPAL, 2024. *Estudio Económico de América Latina y el Caribe*, 2024.
- CCME 2001. *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Summary Tables*. Winnipeg, Canada: Environment Canada.
- CCME, 2023. *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Freshwater and Marine ISQG/PEL*. Ontario, Canada: CCME.
- FAO, 1997. *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*. Capítulo 4 – Caudal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Departamento de Desarrollo Sostenible. <https://www.fao.org/4/t0848s/t0848s00.htm>

- GAD Imbabura, 2015. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Imbabura 2015-2035*. Ibarra, Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado de la provincia de Imbabura.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., et al., 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4:143-158.
- Gisbert, J. M., 2005. *Caracterización hidrológica y de los procesos erosivos en la cabecera del río Monachil (Granada)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- Henaos, J. E., 1988. *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá, Colombia: Universidad de Santo Tomás. Centro de enseñanza desescolarizada.
- Hernández, M. A., González, N., Hernández, L., 2017. Geohydrology. In *Hydrogeology of a Large Oil-and-Gas Basin in Central Patagonia*. La Plata, Argentina: Springer International Publishing, pp. 41-64.
- INAMHI, 2000-2017. Anuarios Meteorológicos del Ecuador. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología <https://www.serviciometeorologico.gob.ec>.
- INAMHI, 2014-2015. *Anuario Hidrológico Nro. 50-2012*, Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Gestión de la Información Hidrometeorológica.
- INAMHI, 2016. *Anuario Hidrológico*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Subproceso de estudios e investigaciones hidrológicas. <https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-hidrologicos/>.
- INIGEMM, 2015. *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° - 1° N, Escala 1:200000*. Quito, Ecuador: Proyecto Investigación Geológica y disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el territorio ecuatoriano.
- INIGEMM, 2016a. *Memoria Técnica – Informe Preliminar Ocurrencias Minerales en la Cordillera Occidental entre 0° a 1° N (Bloque 1): Hojas Topográficas Escala 1: 100.000 (Vargas Torres, Maldonado, Río San Juan, Zapallo, Cuellaje, Ibarra, Otavalo, Pacto)*. Quito, Ecuador: Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano.
- INIGEMM, 2016b. *Protocolo para la toma de muestras de agua y sedimentos fluviales en ríos superficiales, para estudios ambientales. DM-MET-A 03*, Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico.
- Instituto de Hidrología, 2019. *Instructivo de Confirmación o Validación de Métodos Analíticos*. Bogotá, Colombia: IDEAM. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/m-s-lc-i038_instructivo_de_confirmacion_o_validacion_de_metodos_analiticos_v3.pdf.
- Kevern, R. 1989. Alkalinity water, classification systems. Michigan, United States: Michigan State University.
- Knapp, J. L., Berghuijs, W. R., Floriatic, M. G. & Kirchner, J. W., 2024
- Lepeltier, C. 1969. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, 64(5), pp. 538–550. doi:10.2113/gsecongeo.64.5.538.
- Leys, C. et al. (2013) Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4): 764–766. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>.
- Long, S. D., 2000. *Assay Quality Assurance-Quality Control Program For Drilling Projects At The Pre-Feasibility To Feasibility Report Level (3rd Edition)*, San Mateo, USA: Mineral Resources Development Inc.
- MAE, 2015. *Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria, Registro Oficial 097-A*, Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.
- MAGAP, 2016. *Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Cultivo, escala 1:100.000, año 2013 - 2014*, Quito, Ecuador: Coordinación General del Sistema de Información Nacional.
- MAGAP-MAE, 2016. *Proyecto de Generación del Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental 2013-2014. Escala 1:1000 000*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/026b935f-aec7-47c4-abd9-3967d4491398> [Último acceso 8 octubre 2016].
- McLennan, S., Murray, R., 1999. *Geochemistry of Sediments*. Dordrecht, Germany: Kluwer Academic Publisher.
- Mielke, J., 1979. Composition of the Earth's crust and distribution of the elements. In: *Review of research on modern problems in geochemistry*. Paris: UNESCO Repots, pp. 13-37.
- Meybeck, M., Dürr, H.H. Vörösmarty, C.J. 2006. Global coastal segmentation and its river catchment contributors: A new look at land-ocean linkage. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(1): GB1S90. <https://doi.org/10.1029/2005GB002540>.
- Mitra, S. et al. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*, 34(3): 101865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.
- Moratilla, P. y Yélamos, J., 2000. Hidrogeoquímica de las aguas minerales de la Península Ibérica. *Geogaceta*, 28: 101-105.
- Neal, C. et al. (2006) Solute dynamics and transport in the Upper Hafren catchment: insights from high-frequency data. *Hydrological Processes*, 20(1): 1–16. <https://doi.org/10.1002/hyp.5931>.
- PRODEMINCA, 2000. Geoquímica de 15.175 de puntos de muestreo. Cordillera Occidental del Ecuador, con análisis para 38 elementos. CODIGEM-BGS- PRODEMINCA. Informe Técnico.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, *Transactions of the American Geophysical Union*, 25(6): 914–923. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G., 1997. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. CT&F. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3): 135-153.
- Rosas, H., 2001. *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Sierra Aragón, M., 2005. *Niveles de metales pesados y elementos asociados en suelos de la provincia de Almería, parámetros que los afectan y riesgos de contaminación*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- Singh, S.K., Sarangi, A. and Sharma, M.C. 2014. Morphometric analysis of watershed in India using GIS techniques. *Water Resources Management*, 28(8): 2171–2186. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0600-5>.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6): 913–920. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>.

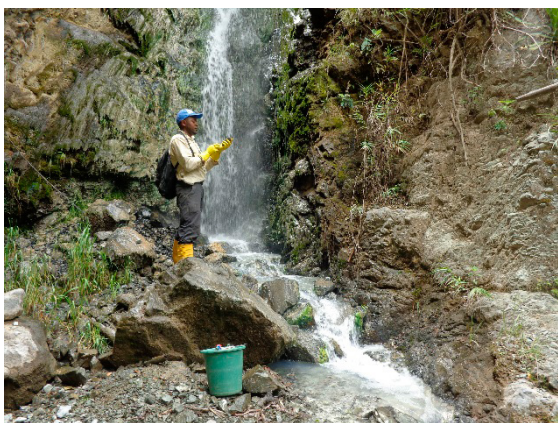
- Tchounwou, P.B. et al. 2012. Heavy Metal Toxicity and the Environment. In A. Luch (ed.) *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology: Volume 3: Environmental Toxicology*. Basel, Swizerland: Springer. 133–164 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Turkey, J., 1977. Exploratory data analysis. Massachussets, USA: Addison-Wesley
- Ure, A., Berrow, M., 1997. The elemental constituents of soil. *Studies in Environmental Science*, 70: 57-74.
- Yurkevich, N. et al. 2023. Hydrochemical Anomalies in the Vicinity of the Abandoned Molybdenum Ores Processing Tailings in a Permafrost Region (Shahtama, Transbaikal Region). *Water*, 15(8): 1476. <https://doi.org/10.3390/w15081476>.

Anexo 1. Muestreo de aguas superficiales y sedimentos fluviales.

Quebrada El Higuero



Río Amarillo



Río Mira



Río Palacara



Quebrada San Lorenzo



Anexo 2. Ubicación geográfica de los puntos muestreados.

Nº	Código muestra	Código de campo	Cuerpo hídrico	Coordenadas geográficas WGS84, UTM 17S		
				E	N	h
1	PAL-3	ÑII-D2-MC-Aa-0001	Río Palacara	816581	10058245	1592
2	PAL-2	ÑII-D2-MC-Aa-0003	Río Palacara	815239	10058465	1669
3	SRO-1	ÑII-D2-MC-Aa-0007	Quebrada Santa Rosa	811138	10060458	2356
4	MEJ-1	ÑII-D2-MC-Aa-0011	Quebrada Mejillones	811572	10060803	2401
5	SLO-2	ÑII-D2-MC-Aa-0013	Quebrada San Lorenzo	819211	10060387	1404
6	PAL-4	ÑII-D2-MC-Aa-0015	Río Palacara	818431	10058655	1485
7	MIR-3	ÑII-D2-MC-Aa-0017	Río Mira	819996	10062465	1328
8	HIG-2	ÑII-D2-MC-Aa-0019	Quebrada Higuérón	820134	10062424	1339
9	TAB-1	ÑII-D2-MC-Aa-0021	Río Tababara	805577	10053812	2825
10	PAL-1	ÑII-D2-MC-Aa-0023	Río Palacara	809024	10057733	2094
11	AMA-1	ÑII-D2-MC-Aa-0025	Río Amarillo	816896	10064958	1536
12	AMA-2	ÑII-D2-MC-Aa-0027	Río Amarillo	817244	10065075	1524
13	AMA-3	ÑII-D2-MC-Aa-0029	Río Amarillo	817498	10065077	1391
14	AMA-4	ÑII-D2-MC-Aa-0031	Río Amarillo	817998	10065099	1344
15	MIR-1	ÑII-D2-MC-Aa-0033	Río Mira	820283	10057955	1430
16	HIG-1	ÑII-D2-MC-Aa-0035	Quebrada Higuérón	822509	10062546	1845
17	MIR-4	ÑII-D2-MC-Aa-0037	Río Mira	819836	10063398	1322
18	MIR-2	ÑII-D2-MC-Aa-0039	Río Mira	819406	10060896	1358
19	SJU-1	ÑII-D2-MC-Aa-0041	Quebrada San Juan	810372	10059937	2347
20	SLO-1	ÑII-D2-MC-Aa-0043	Quebrada San Lorenzo	817533	10059729	1657
21	MIR-5	ÑII-D2-MC-Aa-0045	Río Mira	818247	10065059	1289
22	MIR-6	ÑII-D2-MC-Aa-0047	Río Mira	818189	10065385	1274

Anexo 3. Resultados del cálculo de % DRP.

Nº	Código	As %DRP	Ca %DRP	Cu %DRP	Mg %DRP	Mn %DRP	Ni %DRP	Zn %DRP
1	PAL3	0,449	4,807	1,059	1,721	0,128	-	-
2	PAL2	0,297	0,282	0,770	0,178	2,184	-	-
3	SRO1	-	0,324	-	0,390	1,429	-	-
4	MEJ1	-	1,487	-	1,328	-	-	-
5	PAL4	0,278	0,562	11,605	0,441	6,270	7,710	-
6	MIR3	0,430	1,617	1,911	0,050	0,120	-	-
7	HIG2	0,092	0,453	1,291	0,472	3,692	1,348	2,437
8	TAB1	-	4,806	-	0,020	-	-	-
9	PAL1	-	1,298	-	2,612	-	-	-
10	AMA1	-	7,931	0,750	1,423	0,724	0,379	0,542
11	AMA2	2,490	5,078	2,780	0,092	1,597	0,243	2,653
12	AMA3	0,748	0,419	-	1,240	0,177	-	-
13	AMA4	0,508	0,400	0,588	1,533	1,206	0,422	0,676
14	MIR1	2,716	0,842	-	3,619	3,111	-	-
15	HIG1	0,540	0,047	-	0,040	-	-	-
16	MIR4	0,066	2,596	-	2,944	0,058	-	-
17	MIR2	1,272	5,838	-	1,753	1,091	-	-
18	SJU1	-	0,896	-	7,147	-	-	-
19	MIR5	0,216	3,181	3,246	0,869	0,746	2,351	1,226
20	MIR6	0,857	1,426	0,692	1,484	0,164	21,385	9,431