

Evaluación de la calidad del suelo en núcleos poblados cercanos a la zona minera aurífera de Ponce Enríquez

(Soil quality assessment in populated areas near the gold mining zone of Ponce Enriquez)

Daniela Paz-Barzola¹, Kenny Escobar-Segovia², Samantha Jiménez-Oyola³

Resumen

El objetivo para llevar a cabo este estudio fue evaluar la calidad del suelo en los núcleos poblados cercanos a las áreas de explotación minera aurífera en el cantón Camilo Ponce Enríquez. Se analizó la concentración de metales pesados y metaloides (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, y Zn) en muestras del suelo recolectadas en áreas públicas, patios, jardines y zonas de cultivo. Como resultado, se identificó que la concentración de Ni y Cr superó el límite máximo permitido (LMP) establecido en el Texto Unificado de la Legislación Secundaria Medio Ambiental del Ecuador (TULSMA) en el 100 % de las muestras analizadas, mientras que la concentración de Cu y Zn fue superior al LMP en el 90 % de los sitios de los cuales se tomó la muestra. El Cd superó el LMP en 64 % de las muestras y el As y el Pb superaron el LMP en el 26 % y 21 % de las muestras, respectivamente. El Cd, As y Pb son elementos de especial preocupación debido a su elevada toxicidad y considerable presencia en la zona de estudio. En cuanto al análisis de pH, se obtuvo valores entre 3.31 y 8.21, lo cual indica condiciones ácidas en el 60 % de las muestras de suelo, posiblemente producto de la actividad antropogénica en el área. Se detectaron fuertes correlaciones positivas entre As-Cd, Cr-Ni, Cu-Ni y correlaciones moderadas entre Cr-Cu y Pb-Zn, lo que guarda relación con la mineralización del área. El análisis de conglomerados indicó que el clúster C1, caracterizado por un alto contenido de elementos potencialmente tóxicos, se encuentra mayoritariamente al sur del área de estudio. Estos resultados preliminares pueden servir como línea base para futuras investigaciones en la zona, pues remarcan la importancia de la evaluación en la calidad de los suelos en núcleos poblados en áreas mineras.

Palabras clave

Minería, metales pesados, correlación de Spearman, análisis de conglomerados, calidad de los suelos.

Abstract

The objective of the study was to evaluate soil quality in population centers near gold mining areas. The concentration of heavy metals and metalloids (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, and Zn) was analyzed in soil samples collected in public areas, yards, gardens, and cultivation areas. As a result, it was identified that the concentration of Ni and Cr exceeded the maximum permissible limit (MPL) established in the Unified Text of Secondary Environmental Legislation of Ecuador (TULSMA) in 100 % of the samples analyzed, while the concentration of Cu and Zn was higher than the MPL in 90 % of the sites sampled. Cd exceeded the MPL in 64 % of the samples, and As and Pb exceeded the MPL in 26 % and 21 % of the samples, respectively. Cd, As and Pb are elements of special concern due to their high toxicity and significant presence in the study area. Regarding pH analysis, values between 3.31 and 8.21 were obtained, indicating acidic conditions in 60 % of the soil samples, possibly as a result of anthropogenic activity in the area. Strong positive correlations were detected between As-Cd, Cr-Ni, Cu-Ni, and moderate correlations between Cr-Cu and Pb-Zn, which is related to the mineralization of the area. Cluster analysis indicated that cluster C1, characterized by a high content of potentially toxic elements, is mostly located south of the study area. These preliminary results can serve as a baseline for future research in the area, highlighting the importance of soil quality assessment in mining areas.

Keywords

Mining; heavy metals; Spearman correlation; cluster analysis; soil quality.

- 1 Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Guayaquil - Ecuador [dpaz@espol.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-9966-6632>].
- 2 Universidad Espíritu Santo, UEES, Samborombón - Ecuador [kescobar@espol.edu.ec, [kescobar5@uees.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-1278-7640>].
- 3 Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Guayaquil - Ecuador [sjimenez@espol.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-3538-6754>].

1. Introducción

La minería es una actividad indispensable para el desarrollo de las sociedades, sin embargo, es una de las actividades antropogénicas más contaminantes cuando no se ejecuta de forma adecuada (Bundschuh et al., 2012; Peng et al., 2022). Esta actividad contamina el medio ambiente cuando se liberan y transportan los elementos potencialmente tóxicos (EPT) al entorno, porque afectan al ecosistema y a la población (Kamunda et al., 2016; Ramappa & Muniswamy, 2017).

La acumulación de metales pesados en el suelo es una vía directa para que se introduzcan los EPT en el medio ambiente (Pernía Santos et al., 2018; Susunaga Miranda et al., 2021), los cuales afectan a la flora y fauna (Hernández-Baranda et al., 2019; Londoño Franco et al., 2016), y, consecuentemente, a la cadena alimenticia de los seres humanos (Lozano et al., 2022; Peng et al., 2022). Asimismo, la contaminación puede llegar al sistema hídrico a través de la escorrentía y contaminar el agua superficial y/o subterránea no solo en la zona minera, sino en una región más amplia (Escobar-Segovia et al., 2021; Wu et al., 2017).

En países en vías de desarrollo, la contaminación por actividad minera es latente y provoca un impacto en la situación cultural, física y socioeconómica de las poblaciones (Harish & David, 2015), pues en algunos casos los controles aplicados sobre el sector minero son ineficientes e inadecuados, y en otros, dichos controles no existen (Tarras-Wahlberg et al., 2001). Además, el incremento de la minería ilegal ha producido una grave contaminación ambiental en lo que respecta a los vertidos de los EPT. En Taltal, Chile, por ejemplo, se registraron valores altos de concentraciones de As, Cd, Cu, Zn y Pb relacionadas con los vertidos de una mina abandonada al noroeste de la ciudad (Reyes et al., 2020). Además, muchos casos de contaminación de los suelos en las áreas mineras han sido reportados en Latinoamérica y otras partes del mundo (Harish & David, 2015; Zelenkovskiy et al., 2021).

En Ecuador, la situación no es diferente y en casi todas las regiones mineras metálicas del país se han ido depositando a lo largo del tiempo volúmenes considerables de residuos que provienen de la actividad minera (Peña-Carpio & Menéndez-Aguado, 2016). En el país, la minería artesanal, pequeña, mediana y a gran escala es una actividad económica, en la cual el oro, la plata y el cobre son los principales productos del sector minero metálico (Ministerio de Energía y Recursos Natural No Renovables & Viceministerio de Minas, 2020). La extracción del oro en el sector de minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) es una de las principales fuentes de ingreso, pues representa el 94 % del oro producido en Ecuador (Ministerio del Ambiente, Fondo para el Medio Ambiente Mundial, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial & Artisanal Gold Council, 2020); sin embargo, en ciertas áreas mineras hay una gestión inadecuada de residuos, lo que ha producido la contaminación ambiental y, a su vez, la imagen negativa de la industria minera (Tarras-Wahlberg et al., 2001).

La zona de estudio de esta investigación se ubicó en el cantón de Ponce Enríquez, sector donde se asientan varias minas dedicadas a la extracción de material aurífero. Los investigadores que han desarrollado estudios en la zona han reportado altos contenidos de metales pesados y metaloides en las aguas superficiales y los sedimentos (Appleton et al., 2001; Carling et al., 2013; Prodeminca, 1998; Tarras-Wahlberg et al., 2000), además del riesgo potencial que supone para la salud de la población expuesta a los sedimentos contaminados en los ríos de la zona (Jiménez-Oyola et al., 2021); sin embargo, hay escasa información sobre la calidad de los suelos en las comunidades del sector. En este contexto, el objetivo para este estudio fue

evaluar la calidad del suelo en los núcleos poblados cercanos a las zonas de explotación minera aurífera de cara a una futura evaluación de riesgos para la salud de los habitantes del sector.

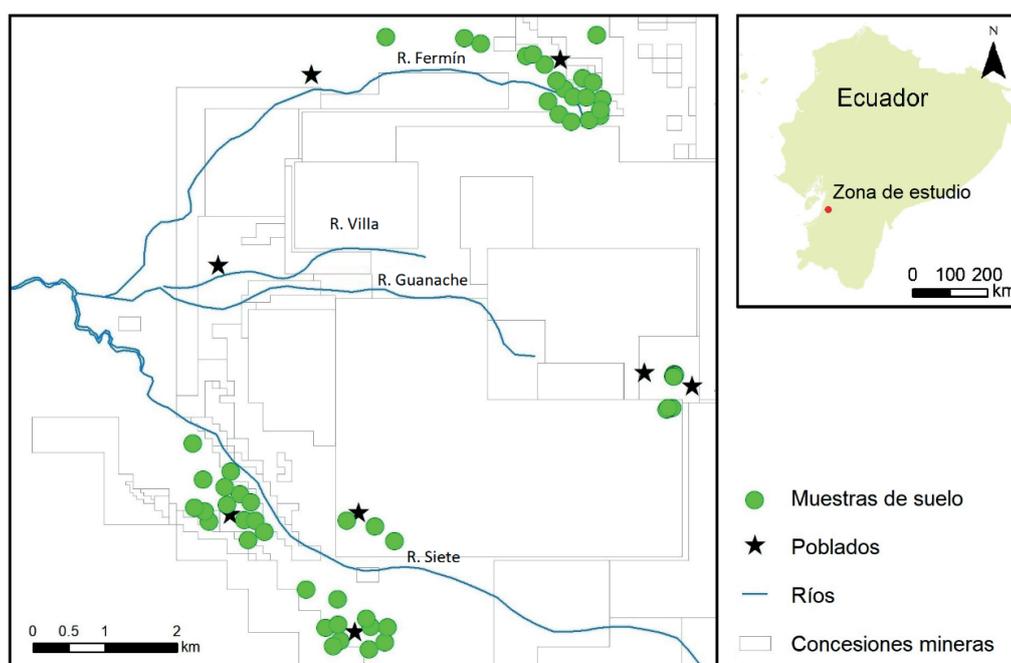
2. Metodología

2.1. Zona de estudio

El campo minero Ponce Enríquez está ubicado al suroeste del país en la provincia de Azuay. La geología de este distrito minero es parte de la Unidad geológica Pallatanga que limita la Cordillera Occidental, por lo que las formaciones datan del cretácico al cuaternario (Cuervas-Mons et al., 2017). Las actividades de exploración de la zona comenzaron en 1973 y la minería a pequeña escala se empezó a desarrollar a partir de la década de los 80 (Appleton et al., 2001).

Ponce Enríquez es una de las áreas mineras auríferas más importantes de Ecuador. En el campo minero Ponce Enríquez, según el catastro minero del país, hay un total de 352 concesiones mineras: 111 de pequeña minería, 233 de minería artesanal y 8 de libre aprovechamiento (ARCOM, 2017). Sin embargo, esta zona se ha caracterizado por escenarios de contaminación debido a la mala gestión de los residuos mineros (Appleton et al., 1996; Appleton et al., 2001; Escobar-Segovia et al., 2021; Ministerio del Ambiente de Ecuador & Programa de Reparación Ambiental y Social, 2015; Peña Carpio & Menendez-Aguado, 2016). El 60 % de ellas cuentan con instalaciones de relaves que por lo general están construidas sin las normas de seguridad que garanticen su estabilidad física y química (Jordá et al., 2017, julio 19–21), lo que ha ocasionado diversos escenarios de contaminación por la rotura de dichas instalaciones y la descarga de relaves a los ríos (Ruiz, 2020).

Figura 1. Localización de los sitios de muestreo



2.2. Muestreo y análisis de laboratorio

La campaña de muestreo se hizo en 2018, donde se recogieron 58 muestras del suelo (Figura 1). Las muestras fueron recolectadas con una pala en áreas públicas, patios, jardines y zonas de cultivo, a una profundidad de entre 5 y 20 cm. Después, fueron desagregadas, homogeneizadas, molidas y tamizadas (tamiz de 2 mm) para su posterior almacenamiento y análisis. La concentración de As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, y Zn se determinó mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Además, para asegurar la calidad de los resultados, se empleó material de referencia certificado NIST San Joaquin soil (2709a). Se obtuvo valores de desviación estándar menores al 5 %. La determinación de pH se estableció con un medidor multiparamétrico Orion Star A215 Thermo Scientific.

2.3. Procesamiento de los datos

Los datos se analizaron estadísticamente utilizando el *software* libre R (R Core Team, 2019). Se utilizó estadística descriptiva para evaluar la tendencia de los datos; además, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar las relaciones entre los elementos estudiados, dicho coeficiente se apoya en valores jerarquizados de cada variable, mas no en los datos que no estén procesados. La correlación de Spearman se emplea para evaluar la relación monótona que cambia al mismo tiempo entre dos variables continuas u ordinales; asimismo, permite evaluar relaciones en las que intervienen variables ordinales (Restrepo & Gonzáles, 2007). En este caso se evaluó la relación entre los metales y metaloides.

De igual forma, se hizo un análisis de conglomerados, o análisis clúster, multivariante utilizando el método de Ward, para estudiar las similitudes entre las observaciones en las muestras de los suelos y sus ubicaciones. El análisis de conglomerados es ampliamente aplicado para clasificar un conjunto de individuos en diferentes grupos bajo algún criterio de homogeneidad (López, 2018). Para este caso, el análisis de conglomerados se hizo en el lenguaje de programación R y los conglomerados se catalogaron de acuerdo con el contenido de los metales y metaloides en el suelo. A partir de los datos obtenidos, se elaboró un mapa con la distribución espacial de los conglomerados y se analizó el grado de contaminación según el contenido de metales y metaloides. Este proceso se llevó a cabo mediante el *software* ArcMap 10.8.1.

3. Resultados y discusión

3.1. Concentración de metales y metaloides en los suelos

El resumen estadístico de la concentración de metales pesados y metaloides en las muestras analizadas se presenta en la Figura 2, mientras que en la Figura 3 constan los patrones de distribución espacial de los elementos analizados en comparación con los lineamientos de calidad establecidos por la legislación ecuatoriana en el TULSMA (Decreto Ejecutivo 3516, 2015). En cuanto al LMP, se observó que

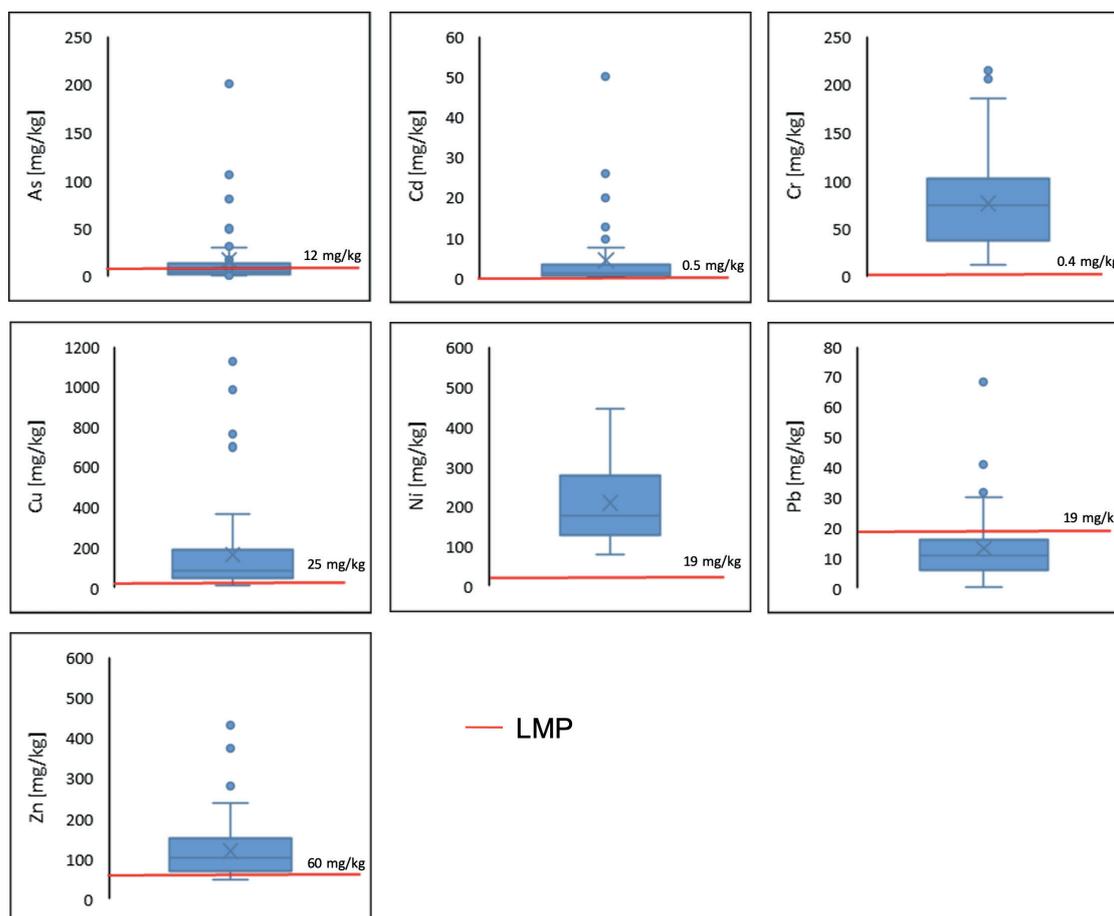
- El LMP para el As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn fue de 12, 0.5, 0.4, 25, 19, 19 y 60 mg/kg, respectivamente.
- La concentración de Ni y Cr en el 100 % de las muestras del suelo se encontraba por encima del LMP.

- Para el Cu y Zn, en el 90 % de las muestras superaron el LMP.
- Para el Cd, As y Pb, el 64 %, 26 % y 21 % de las muestras presentaron concentraciones por encima del LMP, respectivamente.

En cuanto al percentil 50, los contenidos de metales y metaloides siguen el orden decreciente Ni>Zn>Cu>Cr>Pb>As>Cd. De manera general, se observó una amplia variabilidad en los contenidos de Cu (14.5-1125.51 mg/kg), Zn (47.86-430.43 mg/kg), Ni (78.77-442.96 mg/kg) y Cr (12.06 – 214.28 mg/kg), donde el Cu fue el metal que presentó mayores contenidos en las muestras analizadas, mientras que el Pb y Cd tuvieron los contenidos más bajos en la zona estudiada.

Cabe destacar que el As, un metaloide considerado de alta peligrosidad por sus efectos en la salud de las personas que están expuestas a este contaminante (Martin & Griswold, 2009) se presentó en las muestras analizadas en el orden de 0.68-200.27 mg/kg; los mayores contenidos detectados en la zona correspondieron a localizaciones puntuales al sur y norte de la zona de estudio.

Figura 2. Diagramas de caja de la concentración de metales y metaloides en las muestras del suelo (mg/kg) comparadas con el LMP



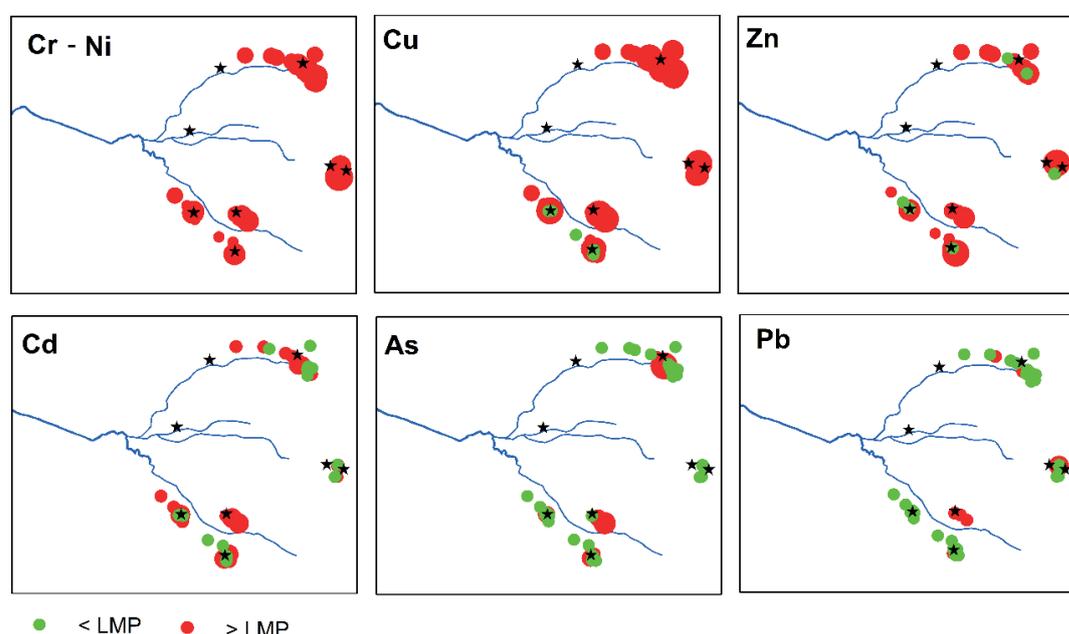
Nota: Línea de color rojo según la normativa ecuatoriana (Decreto Ejecutivo 3516, 2015).

Con respecto a la distribución espacial de los EPT en el área de estudio, no se observó una tendencia definida para los parámetros analizados y su ubicación (Figura 3), ya que existían mues-

tras con altos contenidos de metales y/o metaloides (>LMP) en toda la zona de estudio. Finalmente, el pH en los suelos varió entre 3.31 y 8.21; el 60 % de las muestras indicaban condiciones ácidas.

Los resultados fueron comparados con otros estudios hechos en otras zonas de explotación minera en el mundo. Como resultado, los valores de Ponce Enríquez fueron más altos que los de las áreas de extracción minera en Baiyin y Guangdong en China (Li et al., 2006; Sun et al., 2018), pero considerablemente más bajos que los reportados por Pavilonis et al. (2017) en los Andes bolivianos. Con base en los resultados, es recomendable hacer estudios detallados que permitan determinar los contenidos naturales de los elementos de interés, dado que no se cuenta con valores de fondo local para hacer evaluaciones más concluyentes.

Figura 3. Distribución espacial del contenido de metales pesados y metaloides (mg/kg) en las muestras del suelo en comparación con los LMP de la legislación ecuatoriana



Nota: Círculo verde indica punto de muestreo donde valor registrado fue inferior al LMP; círculo rojo valor superior al LMP; las estrellas representan los poblados.

3.3. Correlación de Spearman y análisis clúster

La Tabla 1 y la Figura 4 presentan los resultados de la correlación de Spearman y el análisis de conglomerados, respectivamente. Se detectaron fuertes correlaciones positivas entre As-Cd, Cr-Ni y Cu-Ni y correlaciones positivas moderadas entre Cr-Cu y Pb-Zn. Esto guarda relación con la geología y mineralización de la zona, que corresponde a un yacimiento rico en sulfuros, esto incluye a la pirrotina, la arsenopirita y la calcopirita como los minerales más comunes. Otros minerales encontrados en la zona fueron epidota, galena, hematita, molibdenita, cuprita y malaquita (Vega Oyola, 2013; Escobar-Segovia et al., 2020). En este contexto, la explotación y extracción de metales puede haber producido la liberación y transporte de estos elementos, además de la generación de residuos al medio y, en particular, a los suelos del entorno.

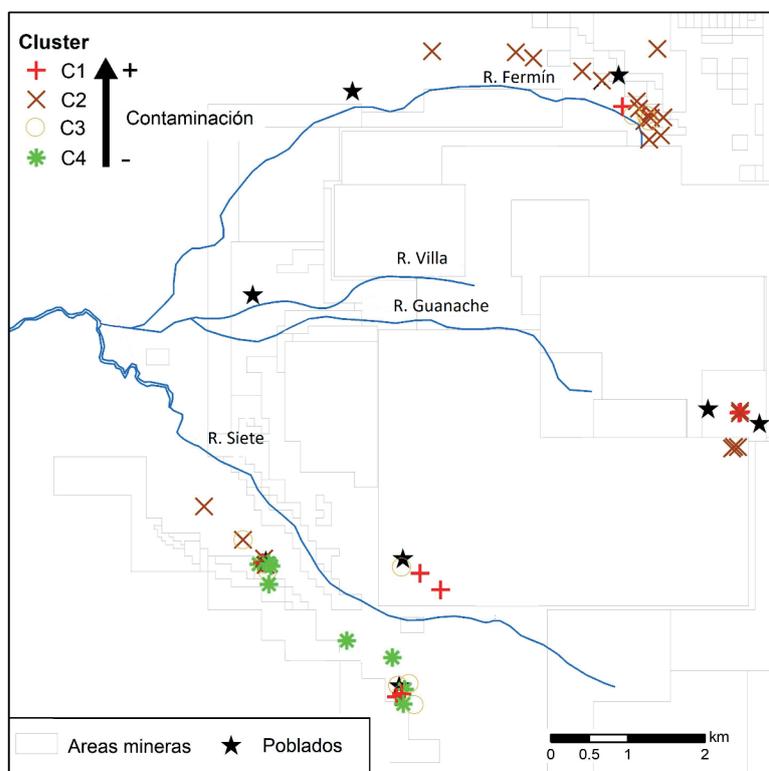
Tabla 1. Correlación de Spearman

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1						
Cd	0.97	1					
Cr	0.23	0.14	1				
Cu	0.50	0.47	0.76	1			
Ni	0.22	0.16	0.93	0.82	1		
Pb	0.46	0.52	-0.14	0.20	-0.06	1	
Zn	0.44	0.49	-0.06	0.40	0.08	0.65	1

En el análisis de conglomerados se identificó 4 grupos: C1, C2, C3 y C4. El grupo C1 presentó un mayor nivel de contaminación debido a los altos contenidos de los EPT. A continuación, se describen las características de cada uno de los conglomerados.

- C1: altos contenidos de As, Cd, Cu, Pb y Zn
- C2: contenidos bajos de Cr y Ni, alto contenido de Zn
- C3: altos contenidos de Ni y Cr
- C4: bajos contenidos de As, Cd y Cr; alto contenido de Ni

Especialmente, los conglomerados no presentaron patrones definidos, sin embargo, los suelos con mayores contenidos de los EPT (C1) se encontraban al sur del área de estudio (Figura 4).

Figura 4. Análisis de conglomerados

Nota: Estrellas representan los poblados.

4. Conclusiones

El estudio reveló una alta concentración de metales pesados en los suelos de los núcleos poblados cercanos a las áreas de explotación minera aurífera del campo minero Ponce Enríquez. Se detectaron concentraciones de metales pesados y metaloides que sobrepasan el LMP según la normativa ecuatoriana; el Cr y Ni está por encima del límite en todas las muestras analizadas, seguido del Cu, Zn, Cd y Pb en menor proporción y sin un patrón definido.

En cuanto al análisis estadístico, se identificó una correlación positiva entre As-Cd, Cr-Ni, Cu-Ni y moderada entre Cr-Cu, Pb-Zn, lo que puede estar relacionado con factores geológicos y mineros que inciden en la liberación de estos elementos a los suelos. Con respecto al análisis de conglomerados, no se presentaron patrones definidos, sin embargo, la zona sur del área de estudio es la que tiene mayores contenidos de elementos potencialmente tóxicos en las muestras de suelo analizadas.

Este estudio preliminar demuestra la alta concentración de elementos potencialmente tóxicos en los suelos de las zonas pobladas aledañas a las áreas de explotación minera.

Se llegó a registrar concentraciones de Cr de 214.28 mg/kg y 442.96 mg/kg para el Ni, cuando el LMP es de 0.4 y 0.38, respectivamente. En el 100 % de las muestras del suelo se registraron valores de Cu y Ni por encima del LMP, en el 90 % de Cu y Zn y en 64 %, 26 % y 21 % de Cd, As y Pb, respectivamente.

Referencias

- Appleton, J. D., Carrasco, M., Maldonado, R., & Orbea, H. (1996). Assessment of mercury contamination in the Ponce Enríquez artisanal gold mining area, Ecuador. British Geological Survey. <https://delvedatabase.org/uploads/resources/Assessment-of-Mercury-Contamination-in-the-Ponce-Enriquez-Artisanal-Gold-Mining-Area-Ecuador.pdf>
- Appleton, J. D., Williams, T. M., Orbea, H., & Carrasco, M. (2001). Fluvial contamination associated with artisanal gold mining in the Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma and Nambija areas, Ecuador. *Water, Air, and Soil Pollution*, 131(1-4), 19-39. <https://doi.org/10.1023/A:1011965430757>
- ARCOM. (2017). *Catastro minero*. <https://crtwrs6520i4uvrd.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=839155ec91ea43cdb604f2fdef4972db>
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J. S., Liu, C. W., López, D., Armienta, M. A., Guilherme, L. R. G., Cuevas, A. G., Cornejo, L., Cumbal, L., & Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2-35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Carling, G. T., Diaz, X., Ponce, M., Perez, L., Nasimba, L., Pazmino, E., Rudd, A., Merugu, S., Fernandez, D. P., Gale, B. K., & Johnson, W. P. (2013). Particulate and dissolved trace element concentrations in three southern Ecuador rivers impacted by artisanal gold mining. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(2), artículo 1415. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1415-y>
- Cuervas-Mons, J., Jordá-Bordehore, L., Nazareno, J. A., & Escobar, K. F. (2017). Evaluación de la estabilidad de excavaciones mineras de pequeño diámetro mediante clasificaciones geomecánicas y análisis empíricos: El caso de la mina de San Juan, Ecuador. *Trabajos de Geología*, 35, 19-28. <https://doi.org/10.17811/tdg.35.2015.19-28>
- Decreto Ejecutivo 3516. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental. Ministerio del Ambiente de Ecuador. Registro Oficial Suplemento 2, 31 de marzo de 2003. Última modificación 4 de noviembre de 2015. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- Escobar-Segovia, K., Jiménez-Oyola, S., Garcés-León, D., Paz-Barzola, D., Navarrete, E. C., Romero-Crespo, P., & Salgado, B. (2021). Heavy metals in rivers affected by mining activities in Ecuador: Pollution

- and human health implications. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 250, 61–72. <https://doi.org/10.2495/WRM210061>
- Escobar-Segovia, K., Loy-Benitez, J., Mariño-Garzón, D., & Cuervas-Mons, J. (2020). Alteration and mineralization in mining works in the sector Bella Rica: Distrito Minero Ponce Enríquez. *GEO Latitud*, 3(1), 1–14. <http://geolatitud.geoinvestigacion.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/download/47/74/>
- Harish, E. R., & David, M. (2015). Assessment of potentially toxic cyanide from the gold and copper mine ore tailings of Karnataka, India. *The International Journal of Science & Technology*, 3(7), 171–178. <https://bit.ly/30eVE46>
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Meriño-Hernández, Y., & Cartaya-Rubio, O. (2019). Toxicidad del cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3) <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Jiménez-Oyola, S., García-Martínez, M.-J., Ortega, M., Chavez, E., Romero, P., García-Garizabal, I., & Boloño, D. (2021). Ecological and probabilistic human health risk assessment of heavy metal(loids) in river sediments affected by mining activities in Ecuador. *Environmental Geochemistry and Health*, 63, 4459–4474. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00935-w>
- Jordá, R., Romero, P., Peña, E., Jiménez, S., Garcés, D., & Chang, R. (2017, julio 19–21). *Análisis preliminar de la estabilidad de escombreras y balsa de relaves en el Distrito Minero Ponce Enríquez, Ecuador* [Conference Paper]. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global partnerships for development and engineering education”, Boca Raton, FL, United States. <http://laccei.org/LACCEI2017-BocaRaton/meta/FP350.html>
- Kamunda, C., Mathuthu, M., & Madhuku, M. (2016). Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand gold mining basin, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), 663–674. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070663>
- Li, Y., Wang, Y., Bin, Gou, X., Su, Y. B., & Wang, G. (2006). Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China. *Journal of Environmental Sciences*, 18(6), 1124–1134. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60050-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60050-8)
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- López, A. M. (2018). Análisis de conglomerados (Cluster Analysis). <https://personal.us.es/analopez/ac.pdf>
- Lozano, M., Murcia, M., Soler-Blasco, R., Casas, M., Zubero, B., Riutort-Mayol, G., Gil, F., Olmedo, P., Grimalt, J. O., Amorós, R., Lertxundi, A., Vrijheid, M., Ballester, F., & Llop, S. (2022). Exposure to metals and metalloids among pregnant women from Spain: Levels and associated factors. *Chemosphere*, 286(Part 2), 131809. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131809>
- Martin, S., & Griswold, W. (2009). Human health effects of heavy metals. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens*, 15, 1–6. <https://bit.ly/3yMVvza>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador & Programa de Reparación Ambiental y Social. (2015). *Programa de Reparación Integral de la Zona de Estudio Tenguel-Camilo Ponce Enríquez* (Vol. 1). http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/737569/PRI_Tenguel.pdf/58596e7c-d3aa-4380-b0c8-dfe9fde6ff2b
- Ministerio de Energía y Recursos Natural No Renovables & Viceministerio de Minas. (2020). *Plan Nacional de Desarrollo del Ecuador del Sector Minero, 2020-2030*. <https://bit.ly/3PsVM0w>
- Ministerio del Ambiente, Fondo para el Medio Ambiente Mundial, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial & Artesanal Gold Council. (2020). *Línea de base nacional para la minería artesanal y en pequeña escala de oro en Ecuador, conforme la Convención de Minamata sobre Mercurio*. <https://bit.ly/3yMnbEi>
- Pavilonis, B., Grassman, J., Johnson, G., Diaz, Y., & Caravanos, J. (2017). Characterization and risk of exposure to elements from artisanal gold mining operations in the Bolivian Andes. *Environmental Research*, 154, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.12.010>

- Peng, C., Zhang, K., Wang, M., Wan, X., & Chen, W. (2022). Estimation of the accumulation rates and health risks of heavy metals in residential soils of three metropolitan cities in China. *Journal of Environmental Sciences*, *115*, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.07.008>
- Peña Carpio, E., & Menendez-Aguado, J. M. (2016). Environmental study of gold mining tailings in the Ponce Enriquez mining area (Ecuador). *DYNA*, *83*(195), 237–245. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.51745>
- Pernía Santos, B. M., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez-Prado, N., Ramírez, L., Bravo, K., López, D., Muñoz, J., & 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>
- Prodeminca. (1998). *Monitoreo ambiental de las áreas mineras en el sur del Ecuador*. Ministerio de Energía y Minas. <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=24905>
- R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. <https://www.R-project.org/>
- Ramappa, H. E., & Muniswamy, D. (2017). Spatial distribution of heavy metals around the gold mine ore tailings of Hatti, Karnataka State, India. *Landscape & Environment*, *11*(1), 35–44. <https://doi.org/10.21120/le/11/1/4>
- Restrepo, L., & Gonzáles, J. (2007). From Pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, *20*(2), 183–192. <https://bit.ly/30b9LYj>
- Reyes, A., Thiombane, M., Panico, A., Daniele, L., Lima, A., Di Bonito, M., & De Vivo, B. (2020). Source patterns of potentially toxic elements (PTEs) and mining activity contamination level in soils of Taltal city (northern Chile). *Environmental Geochemistry and Health*, *42*(8), 2573–2594. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00404-5>
- Ruiz, V. (2020, julio 5). Ecuador reports tailings dam breach in Azuay province. *Mining.com*. <https://www.mining.com/ecuador-reports-tailings-dam-breach-in-azuay-province/>
- Sun, Z., Xie, X., Wang, P., Hu, Y., & Cheng, H. (2018). Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a polymetallic mine in South China. *Science of the Total Environment*, *639*, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.176>
- Susunaga Miranda, M. A., Estévez Garrido, B. M., Ortíz Muñiz, B., & Susunaga Estévez, R. M. (2021). Remoción de metales pesados (Cr+6, Ni, Zn) de lixiviados del relleno sanitario de la Ciudad de Veracruz, México con barreras reactivas permeables de arena sílica. *Enfoque UTE*, *12*(3), 65–78. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.756>
- Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Fredriksson, G., Lane, S., Lundberg, B., & Sangfors, O. (2000). Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, *29*(8), 484–491. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.8.484>
- Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Lane, S. N., & Sangfors, O. (2001). Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: The Puyango River basin, southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, *278*(1–3), 239–261.
- Vega Oyola, A. G. (2013). *Calculo de reservas de la veta "paraíso": Mina Paraíso-Distrito Ponce Enriquez [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]*. Dspace en ESPOL. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24770>
- Wu, Y., Zhou, X., Lei, M., Yang, J., Ma, J., Qiao, P. wei, & Chen, T. bin. (2017). Migration and transformation of arsenic: Contamination control and remediation in realgar mining areas. *Applied Geochemistry*, *77*, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.05.012>
- Zelenkovskiy, P., Solovieva, E., Dubrova, S., Sikorsky, I., & Evenkova, T. (2021). Geochemical specifics and patterns of the distribution of heavy metals in the Opuksky Sanctuary, Republic of Crimea [Paper]. International Science and Technology Conference "Earth science", Vladivostok, Russian Federation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *666*, 052019 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052019>