

Modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales

Geometallurgical model for the exploration of mineral resources

Miguel Ángel Álvarez Castillo¹, Daniel Florencio Lovera Dávila²

Recibido: 6/09/2022 – Aprobado: 14/10/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo geometalúrgico para la exploración minera integrando la información geológica, geoquímica y metalúrgica de una zona con potencial minero ubicada en la provincia de Imbabura al NW del Ecuador. El procesamiento estadístico de la base de datos geoquímicos conformada por 37 elementos provenientes de 448 muestras de sedimentos fluviales se realizó aplicando la técnica de análisis composicional con las transformaciones log-cociente clr e ilr mediante el software CodaPack, y se definieron cuatro asociaciones multielementales: pathfinders de pórfidos de Cu-Au, pathfinders de vetas de Au-Ag, y elementos perjudiciales en los procesos metalúrgicos de flotación y lixiviación respectivamente. Asimismo, mediante la evaluación geoestadística y la estimación del kriging ordinario se obtuvieron los planos de anomalías geoquímicas para cada asociación multielemental; consecuentemente, los resultados anómalos fueron espacialmente coherentes con las ocurrencias de minerales mapeadas, así como también con los datos petrominerográficos y los datos de recuperación metalúrgica de los yacimientos pórfido de Cu-Au de Cascabel-Alpala y de la mina de Au La Merced de Buenos Aires. Además, en base al comportamiento anómalo presente al SE de los cuatro planos geoquímicos, se ha definido un target con alto potencial prospectivo denominado "mineralización inferida Río San Gerónimo".

Palabras claves: análisis composicional, exploración, geología, geoquímica, metalurgia, modelo geometalúrgico.

ABSTRACT

The objective of this research is to develop a geometallurgical model for mining exploration integrating geological, geochemical, and metallurgical information of an area with mining potential located in the province of Imbabura in the NW of Ecuador. The statistical processing of the geochemical dataset made up of 37 elements from 448 fluvial sediment samples was carried out by applying the compositional analysis technique with the clr and ilr log-ratio transformations using the CodaPack software, and four multi-elemental associations were defined: pathfinders of Cu-Au porphyries, Au-Ag vein pathfinders, and harmful elements in the metallurgical processes of flotation and leaching, respectively. Likewise, through the geostatistical evaluation and the estimation of the ordinary kriging, the geochemical anomaly maps were obtained for each multielemental association; Consequently, the anomalous results were spatially consistent with mapped mineral occurrences, as well as with petromineragraphic data and metallurgical recovery data from the Cascabel-Alpala porphyry Cu-Au deposits and from the La Merced de Buenos Aires Au mine. Furthermore, based on the anomalous behavior present to the SE of the four geochemical maps, a target with high prospective potential denominated "Saint Geronimo River inferred mineralization" has been defined.

Keywords: compositional analysis, exploration, geology, geochemistry, metallurgy, geometallurgical model.

1 Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental. Quito, Ecuador. Universidad Nacional Mayor San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú. Estudiante de posgrado en Geometalurgia.

Autor para correspondencia: maalvarezc1@uce.edu.ec, miguel.alvarez8@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9288-7486>

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

Docente principal de Ingeniería Metalúrgica. E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2815-0716>

I. INTRODUCCIÓN

Los recursos minerales en la corteza terrestre son una fuente agotable, por lo cual, su búsqueda es cada vez más prominente (Lishchuk & Pettersson, 2021) de tal forma que, la fase de exploración implica un alto riesgo de las inversiones mineras, ya que una de cada 100 zonas exploradas se desarrolla como yacimiento para su explotación (Pachas Pérez, 2014). De acuerdo con (Balaram & Sawant, 2022), más del 70% de yacimientos minerales se han descubierto mediante la geoquímica; por consiguiente, dentro de la exploración geoquímica se cuenta con avanzados métodos geoestadísticos de análisis de datos que se basan en la estadística determinista y estocástica, no obstante, estos estudios se limitan a la definición de targets mediante elementos y asociaciones pathfinders y su correlación con la geología.

En este contexto, en países con gran potencial minero como Perú y Ecuador se ha evidenciado que en la etapa de exploración en zonas de brownfield y greenfield no es relevante el concepto geometalúrgico (Chuquiruna Chávez & Chira Fernandez, 2018), (Manrique-Carreño & Guamán-Jaramillo, 2020), por lo que no se integran o analizan datos metalúrgicos dentro de los modelos geoestadísticos para previsualizar ciertas asociaciones de elementos perjudiciales en los procesos de recuperación, penalizantes de concentrados (Gulley et al., 2018) y la correlación existente entre la geoquímica y datos minero-metalúrgicos de yacimientos conocidos; ya que se conoce que la metalurgia influye directamente en la rentabilidad y el desarrollo de un proyecto minero (Ghasemzadeh et al., 2019), (Habib et al., 2019), (Halder, 2013) Además, también se manifiestan impasses políticos y socioambientales, que incrementan el grado de incertidumbre y el riesgo.

Aitchison (1983), introdujo a la estadística tradicional el enfoque log-cociente con las transformaciones clr e ilr para disminuir la problemática referente a las correlaciones espúrea de un conjunto de datos. La técnica del análisis composicional de los datos geoquímicos se basa en el análisis de vectores representados mediante coordenadas clr e ilr en un espacio muestral o simplex de D partes; lo que permite reducir la dimensionalidad del conjunto de datos con un porcentaje mínimo de pérdida de la información para obtener una distribución normal. Mediante el análisis de sus componentes principales PC (*Principal Components*) en el simplex y la transformación ilr es posible conformar asociaciones multielementales que no necesariamente guardan correlación entre sí.

En el estudio realizado por Zhou et al. (2020), se denota la importancia de la aplicación del análisis composicional en la exploración geoquímica, donde los autores han definido targets potenciales de exploración de Au a partir de datos geoquímicos del distrito mineralizado de Xinjiang-China. Las asociaciones de elementos pathfinders se han definido mediante sus PC, y los resultados de las estimaciones de anomalías geoquímicas se han validado con la superposición de yacimientos de Au conocidos. Por otra parte, Chuquiruna Chávez & Chira Fernandez (2018), han determinado anomalías geoquímicas de Au a partir de muestras geoquímicas provenientes de Ayahuanca-Puno. Los resultados evidencian las limitaciones de la estadística

tradicional al basarse únicamente en correlaciones bivariantes de elementos pathfinders; además, no se ha considerado la geología y ocurrencias mineralógicas y datos metalúrgicos, como herramientas de validación.

El aporte de esta investigación consiste en exponer técnicas estadísticas avanzadas para el análisis y procesamiento de datos geoquímicos y la integración de datos metalúrgicos (Recuperaciones) dentro de los modelos geoestadísticos de prospección geoquímica, complementado con la información geológica y metalúrgica previa; lo que constituirá una metodología con un enfoque geometalúrgico aplicable a otros estudios de exploración minera. Esto beneficiará a empresas mineras en la toma de decisiones más acertadas, al disminuir el riesgo y la incertidumbre geológica.

Por lo cual, el objetivo de esta investigación consiste en desarrollar un modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales a partir del análisis composicional de los datos geoquímicos de 37 elementos provenientes de 448 muestras de sedimentos fluviales, y la integración de datos geológicos-estructurales, y datos petromineralógicos y metalúrgicos de yacimientos metalíferos del área de estudio ubicada al NW del Ecuador entre los poblados de La Merced de Buenos Aires y Río Verde, provincia de Imbabura. Además, cabe mencionar que un modelo geometalúrgico influirá en la exploración de recursos minerales en esta zona, donde se destaca un ambiente geológico favorable para la prospección mineral, ya que, al ubicarse sobre la Cordillera Occidental del Ecuador, presenta litologías de rocas volcánicas, volcanosedimentarias y sedimentarias con una significativa actividad tecto-magmática, lo que ha dado origen a grandes depósitos de Cu-Au-Ag como Cascabel-Alpala.

II. MétodoS

2.1. Tipo y diseño de la investigación

El presente estudio corresponde a un tipo de investigación aplicada, ya que se han considerado técnicas estadísticas avanzadas, tal como el análisis composicional para la evaluación de la base de datos geoquímicos de 37 elementos (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, Ni, Co, Cd, Fe, Mn, Te, Ba, Cr, V, Sn, W, La, Al, Mg, Ca, Na, K, Sr, Y, Ga, Li, Nb, Sc, Ta, Ti, Zr, As, Sb, Hg, Pt y Pd) provenientes de 448 muestras de sedimentos fluviales de la zona de estudio ubicada al NW del Ecuador, provincia de Imbabura, entre los poblados de La Merced de Buenos Aires al S y Río Verde al N.

El diseño es no experimental-transversal correlacional; dado que se ha analizado directamente la base de datos geoquímicos obtenida de Cogidem (2000), y no se han realizado mediciones de concentraciones de elementos. Asimismo, los resultados geoestadísticos se han correlacionado con datos geológicos y de recuperación metalúrgica de yacimientos mineros conocidos.

2.2. Técnicas de Recolección de Datos

Documentación y análisis bibliográfico: prospección y obtención de información metalúrgica mediante tablas de asociaciones elementales que influyen en los procesos de recuperación metalúrgica, e información teórica a partir de

bases de datos como Scopus, Web of Science y Science Direct, y la plataforma de Google Académico.

Obtención de la base topográfica: imagen DEM de la zona de estudio con una resolución de 12.5m, recuperada de EarthData-NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS>).

2.3. Etapas de la Investigación

En la Figura 1 se describe de manera concisa los procedimientos aplicados en cada una de estas etapas de investigación. La **primera etapa** consistió en la definición del estudio mediante la recopilación de la información disponible, la base de datos geoquímicos, datos geológicos/estructurales y datos metalúrgicos de recuperación; además, se interpretó fallas y lineamientos en la imagen DEM de relieve topográfico.

En la **segunda etapa** se realizó la normalización de los datos dividiendo el Mn (derivado del MnO_2) para el Zn, Ni, Ti, Ba, Cd, Co y la ΣREE (sumatoria de tierras raras, Y+Sc); y el Fe (derivado del $FeOOH$) para el Pb, Hf, Th, Te, Mo, U y la ΣREE ; considerando el alto grado de oxidoredox del Mn y Fe en la naturaleza, por lo tanto, pueden absorber iones metálicos produciendo anomalías erráticas

Chao & Theobald (1976); Hein et al. (2013), en la **tercera etapa** se ejecutó el análisis composicional de los datos basados en los algoritmos de las transformaciones log-cociente clr e ilr con el software CodaPack para conformar clústeres multielementales mediante dendogramas y sus

componentes principales, de esta forma se obtuvo como resultado una base de datos de grupos multielementales, asimismo, cada uno de los 37 elementos fueron transformados mediante log-cociente clr a una distribución normal.

La **cuarta etapa** consistió en el análisis geoestadístico de la nueva base de datos considerando la estadística descriptiva, la Variografía y la estimación Kriging para definir los planos de anomalías con el software Isatis. Finalmente se ha realizado la validación mediante los resultados geoestadísticos y la integración de la información geológica-estructural, petrominerográfica, y la información metalúrgica (Recuperaciones) de yacimientos minerales del área de estudio, para lo cual, se utilizó los softwares ArcGIS y Qgis; cuando algunos resultados no cumplieron con las condiciones de validación, se realizó nuevamente el análisis composicional.

III. RESULTADOS

3.1. Entorno Geológico-estructural y Petrominerográfico de la Zona de Estudio

Esta área litológicamente se constituye de un basamento de terrenos de origen marino acrecionados al continente, por lo tanto, existen lavas basálticas, rocas volcanosedimentarias y sedimentarias; posteriormente se tiene la presencia de rocas volcánicas y sedimentarias marino-continetales sobreyacidas por volcánicos de arco continental, y cuerpos intrusivos y subvolcánicos producto de dicho volcanismo. Sobre estas litologías se manifiestan depósitos cuaternarios

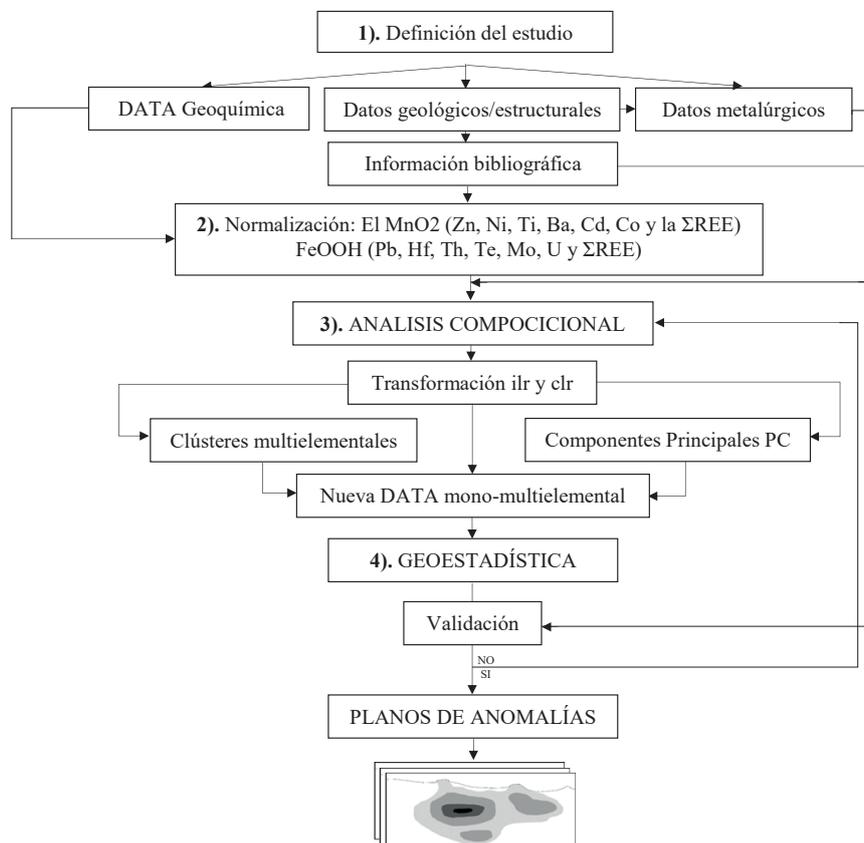


Figura 1. Modelo o esquema de trabajo.

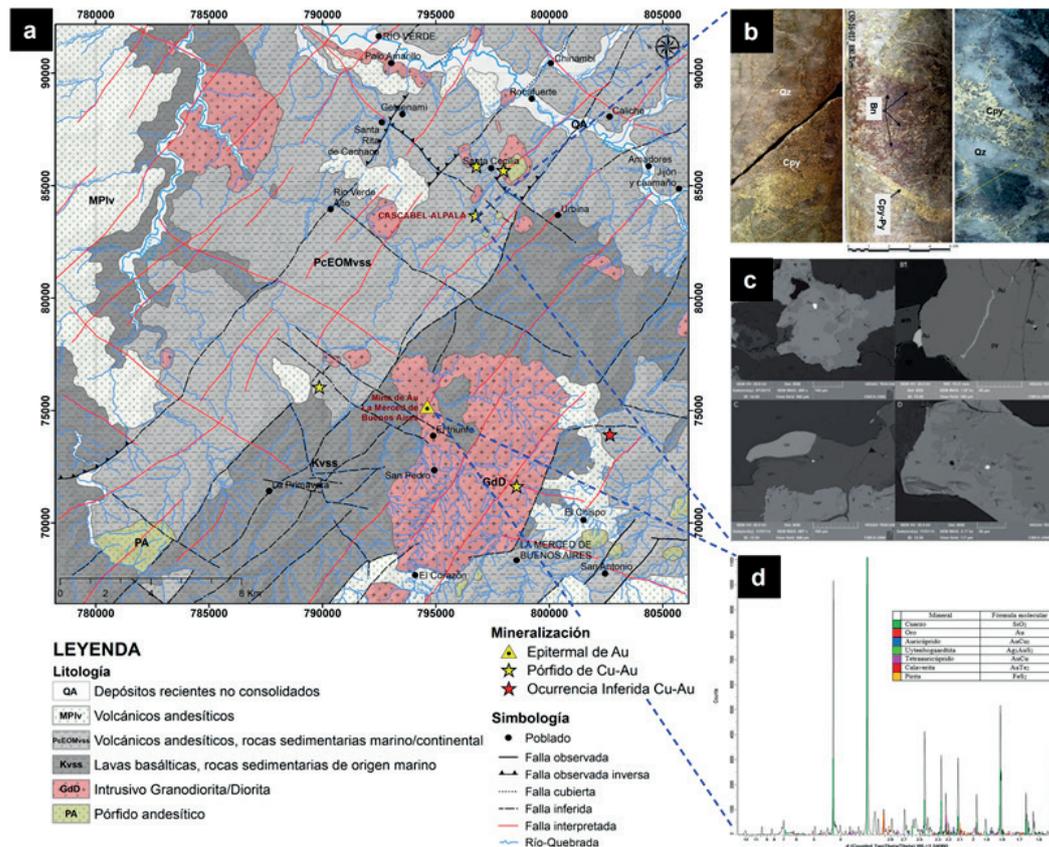


Figura 2. Información geológica-estructural y petromineralográfica del área de estudio. **a)** Mapa de la litología simplificada del área de estudio. **b)** Núcleos de perforación del yacimiento Cascabel-Alpala donde destaca la presencia de sulfuros de Cu como la calcopirita (Cpy) y la bornita (Bn). **c)** Imágenes de microscopía electrónica de barrido SEM-BSE, nótese la presencia de Au eléctrico asociado a cuarzo y sulfuros. **d)** Representación gráfica del espectro “counts” o intensidad en función del ángulo 2θ obtenida por difracción de rayos X, donde se resalta la presencia de minerales de Au.

Fuente: (INIGEMM, 2017a, 2017b; SolGold, 2019).

no consolidados (ver Figura 2a); asimismo, se tiene un tren estructural de sistemas de fallas con dirección predominante NE-SW y sistemas menores perpendiculares, los cuales están relacionados directamente con zonas mineralizadas.

Las ocurrencias mineralógicas pertenecientes al pórfido de Cu-Au de Cascabel-Alpala son evidentes en la Figura 2b con la presencia de sulfuros de Cu contenidos en núcleos de perforación, y en la Figura 2c con la ocurrencia de Au eléctrico asociado a sulfuros y cuarzo visibles en imágenes de microscopía electrónica de barrido SEM-BSE. En la Figura 2d se tiene un Difractograma producto del análisis de difracción de rayos X en una muestra de roca de la mina de Au La Merced de Buenos Aires, donde se manifiesta la presencia de minerales de Au como la Calaverita (AuTe₂; 43.56% Au) y Tetraauricuprido (AuCu₂; 75.61% Au), entre otros. Lo que sugiere un alto potencial prospectivo en toda la zona de estudio.

3.2. Análisis de Datos Metalúrgicos

Se tiene un Flowsheet de flotación de sulfuros correspondiente al depósito mineral de Cascabel-Alpala, el cual ha sido realizado en función de los datos geometalúrgicos del mismo. Se ha definido un circuito de molienda mediante molinos SAG y una sección de molienda

secundaria para reducir las partículas a P80 de 25µm. El circuito de flotación cuenta con celdas rougher, cleaners y agotativas o scavengers. Las partículas deprimidas pasan a tanques espesadores de relaves y el producto flotado pasa a tanques espesadores de concentrado. El concentrado de Cu-Au-Ag es filtrado y almacenado, y el agua producto de la decantación del concentrado y relaves es tratada y recirculada al circuito. Los resultados de este proceso metalúrgico han evidenciado cantidades importantes de Au en el relave contenido en Pirita, por ello, es importante el análisis de la factibilidad de tratar estos relaves para la recuperación de este metal. Por otra parte, SolGold (2019), indican que la cantidad de elementos penalizantes en el concentrado es baja.

En este contexto, Chacha Palango & Ichau Espinosa (2019) realizaron una caracterización mineralógica para optimizar el proceso de extracción de Au refractario por lixiviación con NaCN en una muestra proveniente de la mina La Merced de Buenos Aires. Las variables de investigación fueron: el tamaño de partícula (600, 500 y 200µm), porcentaje de sólidos (30, 35 y 40%) y la concentración de NaCN para tres niveles (0.5, 1.0 y 1.5g/L); posteriormente se ha realizado el análisis de la curva de % de recuperación en función del tiempo. Los

mejores resultados obtenidos fueron: para un tamaño de partícula de 500µm la recuperación fue del 98.13%; para un % de sólidos del 35%, la recuperación obtenida fue del 94.76%; y para una concentración de NaCN de 1.5g/L, la recuperación fue de un 90.5% (Figura 3). Sin embargo, no se ha tomado en cuenta tanto la presencia como la interacción de elementos penalizantes o perjudiciales en el proceso de lixiviación.

3.3 Análisis Composicional de los Datos

Se analizó los datos de 37 elementos de 448 muestras de sedimentos fluviales para la conformación de grupos multielementales de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación, aplicando las transformaciones log-cociente *ilr* y *clr* mediante el software de CodaPack. Con este análisis se ha realizado la apertura de los datos y se ha obtenido una distribución normal para aprovechar toda la información geoquímica en la evaluación geoestadística.

Con un biplot de los elementos se ha definido los vectores que aportan con más información y tienen una mejor correlación entre sí, y mediante el análisis de componentes principales PC se ha obtenido asociaciones y relaciones multielementales. De la misma manera con el Dendrograma se ha conformado clústeres o grupos de elementos como: Au-Ag-Cu, lo que sugiere la presencia de mineralización de tipo pórfido de Cu-Au; Zn-Pb que se relacionan con depósitos polimetálicos; Ni-Mo, como pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au-Mo; Hg-Sb y As, los cuales corresponden a elementos pathfinders, penalizantes, y perjudiciales que afectan los procesos metalúrgicos de recuperación de metales. Con estos análisis y la información científica disponible se ha conformado 4 asociaciones multielementales desde la perspectiva de pathfinders y de la metalurgia extractiva para el análisis estadístico, los mismos que se resumen en la Tabla 1. Sin embargo, desde un enfoque económico, no se ha conformado asociaciones de elementos de REE, por

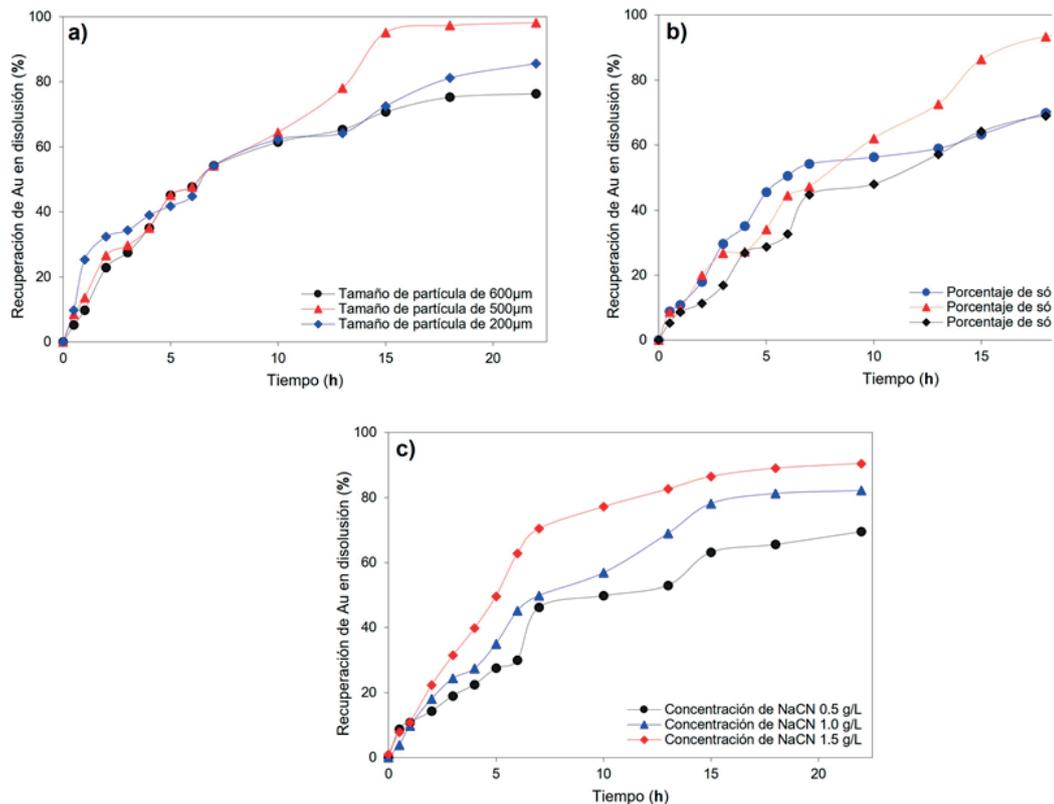


Figura 3. Curvas de % de recuperación en función del tiempo para las respectivas variables de estudio.
 Fuente: datos tomados de Chacha Palango & Ichau Espinosa (2019)

Tabla 1. Asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en la recuperación metalúrgica

Clasificación	Asociación multivariable	Descripción
Pathfinders de Pórfido de Cu-Au	Ag, As, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, W y Zr	Existen anomalías mapeadas en la zona de estudio para depósitos de pórfido de Cu-Au, como Cascabel.
Pathfinders de vetas de metales preciosos Au-Ag	As, Hg, Cu, Ni, Ag, Zn, Pb, Sb, Mo, Te, y Ba	Vectores para la exploración de metales preciosos de carácter epitermal.
Perjudiciales en el proceso de flotación	Pb, As, Sb, Hg, Cd, Ni y Co	Afectan el proceso de flotación y penalizan los concentrados por costos de refinamiento y su toxicidad.
Perjudiciales en el proceso de lixiviación	Pb, Cd, Hg, As, Sb y Te	Afectan los procesos metalúrgicos ya sea de lixiviación en PADs o lixiviación dinámica referente a la recuperación de Au-Ag.

ejemplo, los grupos monacita, debido a que sus resultados no son representativos.

3.4. Evaluación Estadística

Con los datos de los cuatro grupos multielementales obtenidos del análisis composicional: pathfinders de pórfidos de Cu-Au (Ag, As, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, W y Zr); pathfinders para vetas de metales preciosos Au-Ag (As, Hg, Cu, Ni, Ag, Zn, Pb, Sb, Mo, Te, y Ba); perjudiciales en el proceso de flotación (Pb, As, Sb, Hg, Cd, Ni y Co); y perjudiciales en el proceso de lixiviación (Pb, Cd, Hg, As, Sb y Te). Se ha realizado la evaluación de la estadística descriptiva resumida en la Tabla 2; además, mediante el análisis de los histogramas de frecuencia se ha definido una

buena distribución de los intervalos de clase de los datos, lo que ha sido favorable para el análisis geoestadístico.

3.5. Variografía

Los variogramas se realizaron para los cuatro grupos multivariados mediante el software Isatis; la anisotropía para cada grupo multielemental se analizó en dos direcciones, es decir, una dirección predominante sobre el plano variográfico y una dirección perpendicular a esta para definir la dirección tentativa del variograma experimental como se aprecia en la Figura 4, donde los planos variográficos presentan un sector angular en dirección predominante NE-SW, lo que tiene relación con el rumbo del tren de fallas principales de la zona de estudio.

Tabla 2. Datos estadísticos de las asociaciones multivariadas de elementos geoquímicos

Medida	Pathfinder-pórfido de Cu-Au	Pathfinder-vetas de metales preciosos Au-Ag	Perjudiciales-proceso de flotación	Perjudiciales-proceso de lixiviación de Au-Ag
Conteo	448	448	448	448
Media	-4.212	-5.120	-8.714	-7.489
Error estándar	0.007	0.009	0.018	0.019
Mediana	-4.208	-5.142	-8.755	-7.541
Desv. estándar	0.153	0.200	0.374	0.410
Varianza	0.024	0.040	0.140	0.168
Coef. de asimetría	0.598	0.686	1.349	1.593
Mínimo	-4.600	-5.571	-9.587	-8.171
Máximo	-3.379	-4.263	-6.480	-4.915

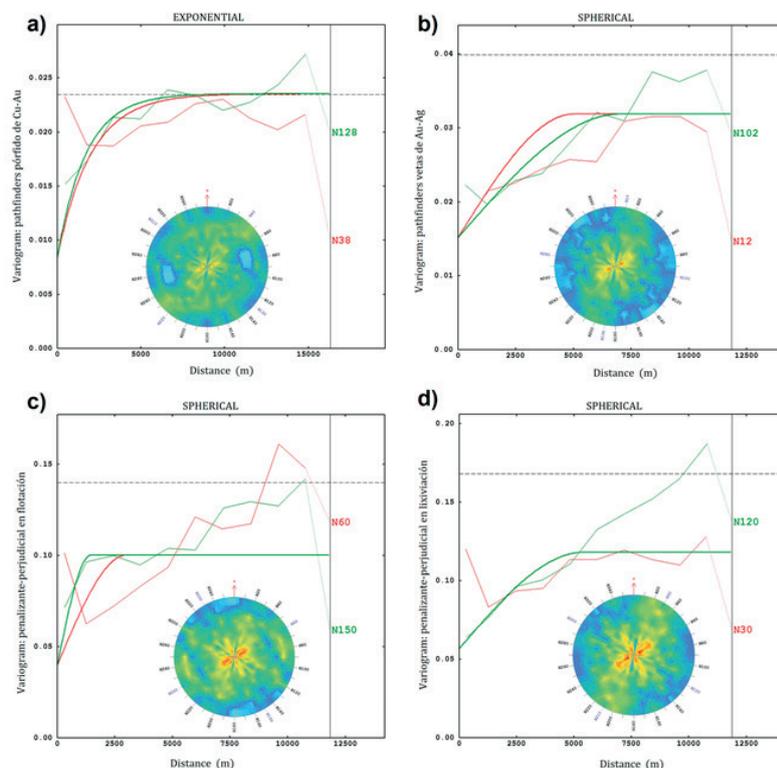


Figura 4. Planos variográficos y modelos de variogramas de las asociaciones multivariadas de elementos geoquímicos.

Fuente: elaboración propia.

El variograma para elementos pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au es de tipo exponencial con una dirección de anisotropía N128° (ver Figura 4a), lo que se relaciona con el sistema de fallas secundario. El modelo de variograma para pathfinders de vetas de metales preciosos (Au-Ag) representado en la Figura 4b es de tipo esférico con una dirección predominante N102°; y los dos variogramas correspondientes a los grupos de elementos multivariantes que penalizan y perjudican los procesos metalúrgicos de flotación y lixiviación son de tipo esférico con una dirección N150° y N120° respectivamente (ver Figura 4c y 4d), lo que sugiere una tendencia anisotrópica similar a los variogramas de elementos pathfinders.

3.6. Modelos de Distribución de los Grupos Multielementales mediante Kriging

El análisis del Kriging se ha realizado en base a los resultados de los modelos variográficos definidos para cada grupo, donde se ha considerado la anisotropía del variograma cruzado que presenta un mejor ajuste con respecto al modelo del variograma teórico. Para la validación de la estimación de kriging ordinario se ha tomado en cuenta el coeficiente de correlación de las observaciones o valores reales (Z) y los valores estimados (Z*) (ver Tabla 3), producto de la validación cruzada y la correlación con ocurrencias mineralógicas existentes en el área de estudio.

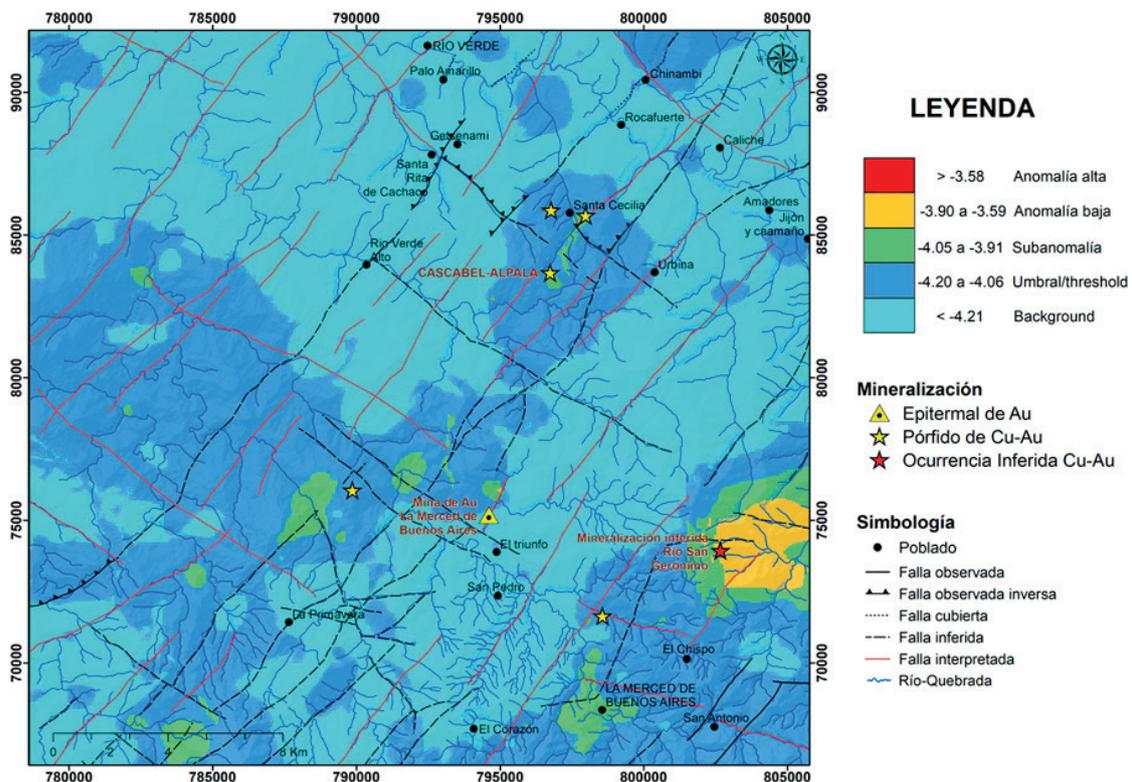


Figura 5. Plano de anomalías geoquímicas de elementos pathfinders para pórfidos de Cu-Au

Tabla 3. Resumen de las características variográficas de cada grupo multielemental

Característica	Pathfinder-pórfido de Cu-Au	Pathfinder-vetas de metales preciosos Au-Ag	Perjudiciales-proceso de flotación	Perjudiciales-proceso de lixiviación de Au-Ag
Modelo	Exponencial	Esférico	Esférico	Esférico
Meseta	0.023	0.033	0.101	0.118
Meseta parcial	0.015	0.017	0.061	0.061
Efecto pepita	0.008	0.016	0.040	0.057
Anisotropía	N128°	N102°	N150°	N120°
Lag (m)	1650	1200	1200	1200
Alcance (m)	7000	6000	1600	5000
Coefficiente de correlación-validación cruzada (Z/Z*)	0.5	0.7	0.6	0.7

Abreviaturas: la Z representa los valores reales y la Z* los valores estimados.

Se obtuvieron cuatro planos de anomalías, el plano de la Figura 5 corresponde a pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au, en el cual, lo más prominente son las subanomalías relacionadas a zonas mineralizadas como se evidencia en la parte NE cerca del poblado de Santa Cecilia, donde se ubica el yacimiento tipo pórfido de Cu-Au-Ag de Cascabel. La Figura 6 corresponde a la asociación multivariable de elementos pathfinders para depósitos de vetas de metales preciosos (Au-Ag), en el que, lo más sobresaliente es la subanomalía en las cercanías del poblado El Triunfo sobre la parte central de la zona de estudio; en esta área existen cuerpos vetiformes con altas leyes de Au, tal como afirman Chacha Palango & Ichau Espinosa (2019), han definido una ley de 57.45 Au g/ton en muestras provenientes de la mina de Au La Merced de Buenos Aires.

El plano de la Figura 7 pertenece a la estimación kriging de la asociación de elementos perjudiciales en el proceso de flotación, donde es evidente una subanomalía en la parte N de dicho plano, la cual se relaciona con el circuito de flotación definido por SolGold (2019), para la explotación del depósito de Cu-Au de Cascabel-Alpala; además, se tiene una anomalía alta en la parte central y al SE de la zona de estudio.

El plano de anomalías de la asociación multivariable de elementos geoquímicos que afectan el proceso de lixiviación de metales preciosos (ver Figura 8) presenta una subanomalía en la parte central, lo que coincide con los cuerpos vetiformes de Au de la mina informal de la

Merced de Buenos Aires. Por otra parte, en la parte SE de la zona de estudio se tiene una anomalía baja sobre la microcuenca del Río San Gerónimo, la misma que se manifiesta en todos los planos de anomalías, por lo cual, se ha inferido una ocurrencia de Cu-Au con un alto potencial prospectivo denominada “Mineralización Inferida Río San Gerónimo”.

IV. DISCUSION

Según Aitchison (1983), el análisis composicional de los datos es una técnica geoestadística que se basa en las transformaciones log-cociente $\ln r$ e $\ln l$, lo cual, permite hacer un análisis de un conjunto de datos para su transformación a distribución normal, asimismo, posibilita la conformación de asociaciones de variables mediante sus componentes principales y el análisis de clústeres. Por lo cual, al aplicar este método para la evaluación de la base de datos de 37 elementos geoquímicos en la presente investigación, se ha obtenido como resultados asociaciones multielementales, por ejemplo: la asociación Au-Ag-Cu que se relaciona con la presencia de mineralización de tipo pórfido de Cu-Au, Zn-Pb que pertenece a depósitos polimetálicos y la asociación Hg-Sb-As que tiene relación con pathfinders y elementos penalizantes. Además, se ha conformado una base de datos de 4 asociaciones elementales desde el punto de vista de pathfinders y de elementos perjudiciales en los procesos de recuperación metalúrgica (Tabla 1).

Estos resultados son coherentes con lo obtenido por Zhou et al, (2020), quienes definieron asociaciones

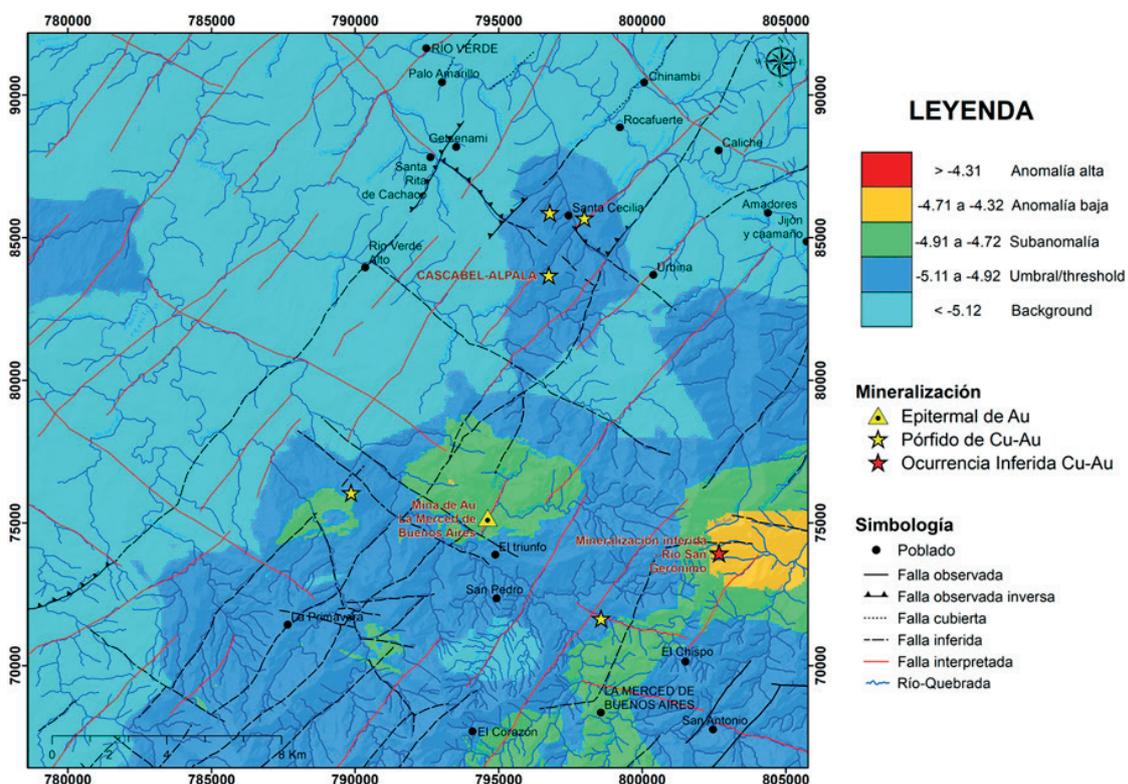


Figura 6. Plano de anomalías geoquímicas de elementos pathfinders para vetas de metales preciosos (Au-Ag).

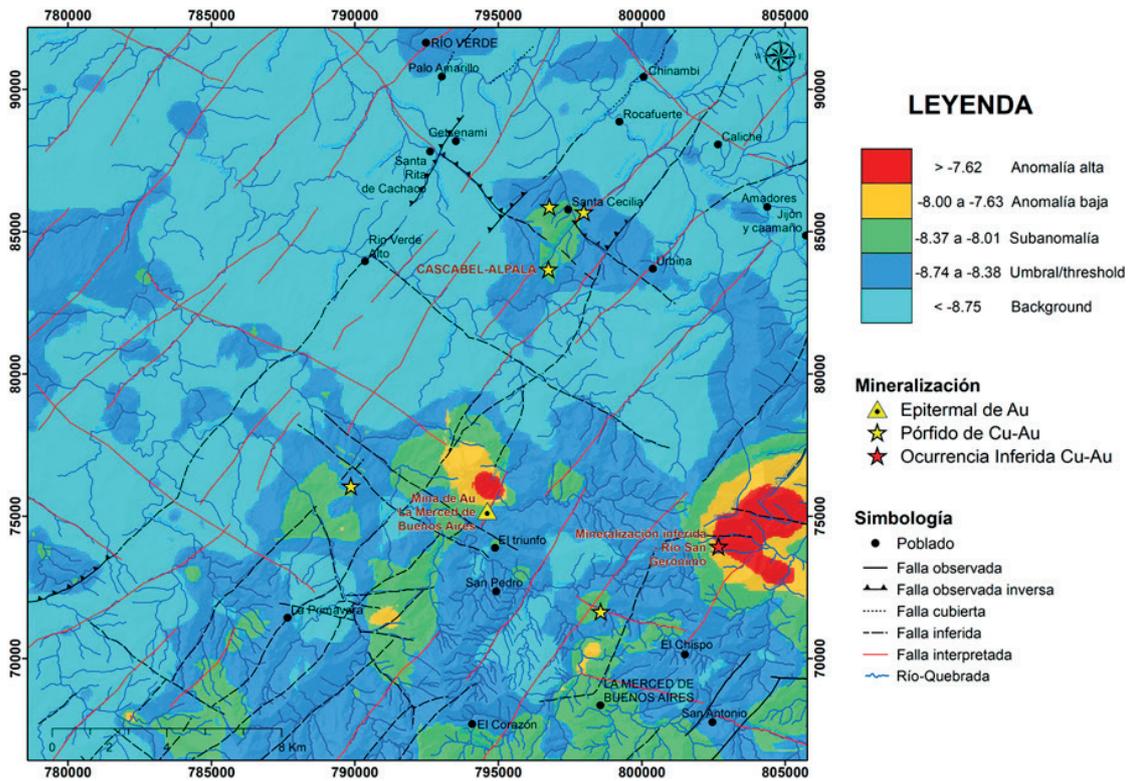


Figura 7. Plano de anomalías geoquímicas para elementos que perjudican la flotación mineral de sulfuros.

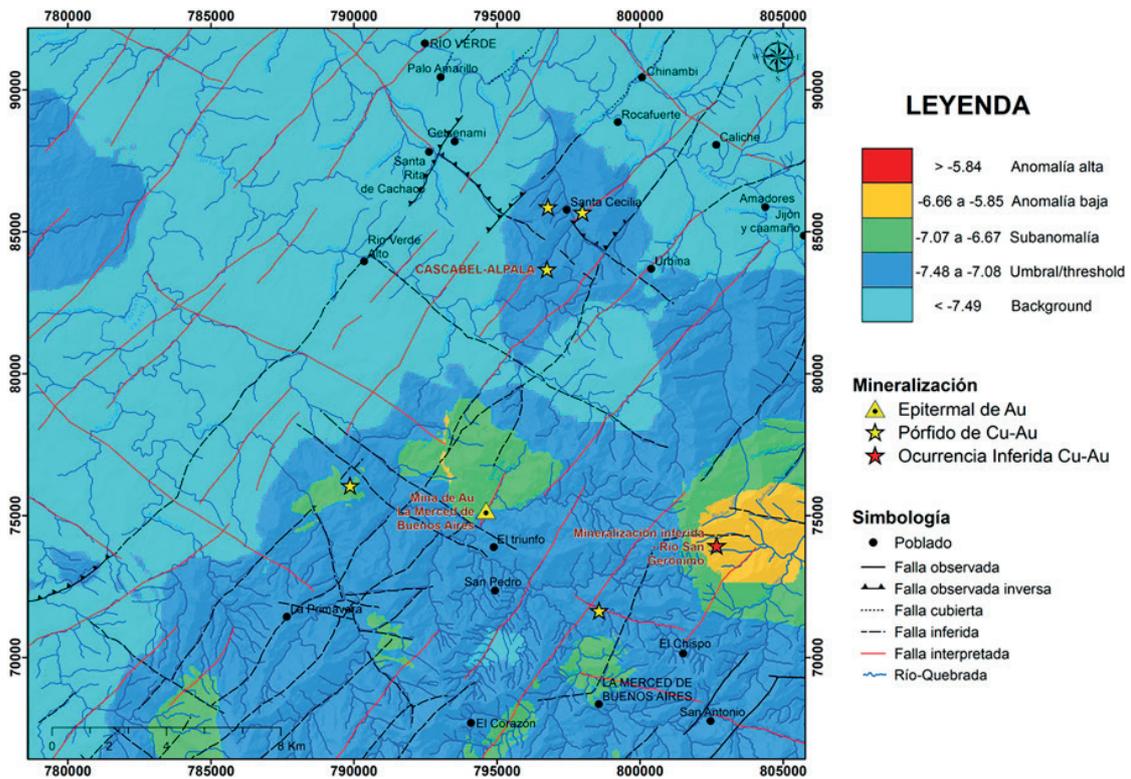


Figura 8. Plano de anomalías de la asociación de elementos que perjudican la lixiviación de metales preciosos (Au-Ag).

de elementos pathfinders de Au a partir de una base de datos de 39 elementos geoquímicos correspondientes a 1444 muestras del distrito mineralizado de Xinjiang-China, mediante el respectivo análisis composicional de los datos.

El análisis geoestadístico comprendió la estadística descriptiva, la variografía, y la estimación del kriging ordinario para las 4 asociaciones multielementales. Las medidas estadísticas de la Tabla 2 evidencian una distribución normal en los 4 grupos evaluados, lo que pone de manifiesto el potencial de la aplicación de las transformaciones log-cociente clr e ilr en la apertura de datos geoquímicos. Los planos de anomalías se han realizado mediante la variografía y la estimación de kriging, los cuales, se han clasificado en categorías de background y anomalías en términos de la media y la desviación estándar; los resultados de la distribución de isovalores en cada plano multielemental han permitido interpretar anomalías importantes a lo largo de la zona de estudio. Todo esto coincide con los resultados de la investigación realizada por Chuquiruna Chávez & Chira Fernandez (2018), donde definieron un plano de anomalías de Au mediante el kriging ordinario en base a asociaciones de elementos bivariantes, sin embargo, no han considerado atributos relacionados con la metalurgia.

Por otra parte, a pesar de la escala regional del estudio, las zonas anómalas definidas en los planos de elementos pathfinders se relacionan con la geología-sistemas de fallas, así como también con las ocurrencias de minerales mapeadas y con los datos petrominerales del yacimiento de Cu-Au de Cascabel-Alpala. Asimismo, las anomalías de los planos de elementos perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación coinciden espacialmente con los datos metalúrgicos de recuperaciones del yacimiento Cascabel-Alpala (recuperación por flotación) y de la mina de Au La Merced de Buenos Aires (recuperación por lixiviación con NaCN). De acuerdo con Zhou et al. (2020), la condición más representativa de validación de los resultados en estudios de exploración es la superposición de la información y datos de yacimientos conocidos sobre los planos de anomalías. Por lo tanto, todo esto sugiere que la aplicación de un modelo geometalúrgico influye en la exploración de recursos minerales.

V. CONCLUSIONES

El modelo geometalúrgico establecido en la presente investigación integra información detallada de la litología y de los sistemas estructurales de fallas, así como también datos de asociaciones de elementos geoquímicos y datos de recuperación metalúrgica y petrominerales de yacimientos conocidos. Lo más sobresaliente es la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas para el tratamiento y análisis de datos geoquímicos, como el análisis composicional de los datos que implica las transformaciones log-cociente clr e ilr , componentes principales y clústeres jerárquicos. Además, el algoritmo log-cociente ilr a diferencia de las técnicas estadísticas tradicionales, no se basa en la correlación entre dos o más variables, lo que ha permitido conformar asociaciones

multielementales de acuerdo con criterios de exploración de recursos minerales y de la metalurgia extractiva.

Mediante el análisis composicional de los datos geoquímicos normalizados aplicando las transformaciones log-cociente ilr , se ha definido cuatro grupos multielementales para el análisis geoestadístico, tales como: pathfinders de pórfidos de Cu-Au (Ag, As, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, W y Zr); pathfinders de vetas de metales preciosos Au-Ag (As, Hg, Cu, Ni, Ag, Zn, Pb, Sb, Mo, Te, y Ba); perjudiciales en el proceso de flotación (Pb, As, Sb, Hg, Cd, Ni y Co); y elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación (Pb, Cd, Hg, As, Sb y Te). Además, en la evaluación de elementos de interés desde un enfoque económico, lo más relevante es la asociación Cu-Au-Ag definida mediante clústeres jerárquicos, la relación de metales base Pb/Zn, y los grupos Au-Ni y Ni-Mo; lo que sugiere un gran potencial de mineralización en toda el área de estudio. Por otra parte, no se ha conformado asociaciones de los grupos monacita ya que elementos REE como el Y y el Sc, no se asocian con elementos como el Ln; sin embargo, no se descarta la presencia de estos elementos asociados a fosfatos ($-PO_4$) en las zonas mineralizadas y depósitos tipo placer, considerando la presencia de litologías de origen marino acrecionadas hacia el continente y la alta actividad tecto-magmática posterior.

Los planos de anomalías geoquímicas definidos mediante la estimación de kriging ordinario para cada grupo de elementos multivariantes son coherentes con el análisis comparativo de ocurrencias mineralógicas y los datos metalúrgicos correspondientes a yacimientos ubicados en la zona de estudio, lo que sugiere que la aplicación de un modelo geometalúrgico en la fase de exploración inicial permite previsualizar y definir posibles targets de exploración y el comportamiento metalúrgico de ciertas asociaciones de elementos presentes. Por lo tanto, todo esto disminuye el riesgo asociado a los altos índices de incertidumbre geológica presente en la fase de exploración, además, es un aporte relevante para la toma de decisiones más acertadas.

Los resultados de los planos establecidos han permitido definir una zona potencial de ocurrencias de minerales de Cu-Au denominada "Mineralización Inferida Río San Gerónimo", la cual es evidente tanto en los planos de elementos pathfinders y de elementos perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación, por lo cual es importante las investigaciones de campo, dado que no se han realizado estudios en esta zona.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la unidad de posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica (FIGMMG) de la Universidad Nacional Mayor De San Marcos, a mi asesor Mg. Daniel Florencio Lovera Dávila por las sugerencias y aportes en esta investigación, y al Instituto de Investigación (IIGEO) por las oportunidades y la incentivación a la investigación científica aportando al desarrollo del conocimiento en Latinoamérica y en el mundo.

VII. REFERENCIAS

- Aitchison, J. (1983). Principal component analysis of compositional data. *Biometrika*, 70(1), 57–65. <https://doi.org/10.2307/2335943>
- Balaram, V., & Sawant, S. (2022). Indicator Minerals, Pathfinder Elements, and Portable Analytical Instruments in Mineral Exploration Studies. *Minerals*, 12(4), 394. <https://doi.org/10.3390/min12040394>
- Chacha Palango, S., & Ichau Espinosa, M. A. (2019). *Caracterización mineralógica y optimización del proceso en la extracción de oro en una muestra de mina del sector Buenos Aires de la provincia de Imbabura* [Tesis, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19853>
- Chao, T. T., & Theobald, P. K. (1976). The significance of secondary iron and manganese oxides in geochemical exploration. *Economic Geology*, 71(8), 1560–1569. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.71.8.1560>
- Chuquiruna Chávez, W., & Chira Fernandez, J. E. (2018). Análisis Geoestadístico Multivariable para identificación de anomalía del oro, Ayahuanca – Puno. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 21(41), 91–98. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v21i41.14997>
- Cogidem. (2000). *Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 0°00' and 1°00'N / CODIGEM - British Geological Survey*. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental 10. <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=42891>
- Ghasemzadeh, S., Maghsoudi, A., Yousefi, M., & Mihalasky, M. J. (2019). Stream sediment geochemical data analysis for district-scale mineral exploration targeting: Measuring the performance of the spatial U-statistic and C-A fractal modeling. *Ore Geology Reviews*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103115>
- Gulley, A. L., Nassar, N. T., & Xun, S. (2018). China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16), 4111–4115. https://doi.org/10.1073/PNAS.1717152115/SUPPL_FILE/PNAS.1717152115.SD01.XLSX
- Habib, A., Bhatti, H. N., & Iqbal, M. (2019). Metallurgical Processing Strategies for Metals Recovery from Industrial Slags. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 234(2), 201–231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/zpch-2019-0001>
- Halder, S. K. (2013). Exploration Geochemistry. *Mineral Exploration Principles and Applications*, 55–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416005-7.00004-0>
- Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A., & Conrad, T. A. (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1. – 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- INIGEMM. (2017a). *Hoja Geológica Jijón y Caamaño, escala 1: 50 000*. Instituto Nacional de Investigación Geológica Minero Metalúrgico. https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/MAPA-3-2_compressed.pdf
- INIGEMM. (2017b). *Hoja Geológica La merced de Buenos Aires, escala 1: 50 000*. Instituto Nacional de Investigación Geológica Minero Metalúrgico. https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/MAPA-3-3_compressed.pdf
- Lishchuk, V., & Pettersson, M. (2021). The mechanisms of decision-making when applying geometallurgical approach to the mining industry. *Mineral Economics*, 34(1), 71–80. <https://doi.org/10.1007/S13563-020-00220-9/FIGURES/3>
- Manrique-Carreño, J. L., & Guamán-Jaramillo, G. A. (2020). Estudio de prospección geoquímica en sedimentos de las microcuencas Chirimoyo y Guineo, Ecuador. *Boletín de Geología*, 42(1), 39–55. <https://doi.org/doi:http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v42n1-2020002>
- Pachas Pérez, D. (2014). La Exploración Minera en el Perú: Un Breve Alcance sobre las Principales Autorizaciones para el Desarrollo de un Proyecto de Exploración en el Perú. *Derecho & Sociedad*, 42, 321–328. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechosociedad/article/view/12487>
- SolGold. (2019). *NI 43-101 Technical Report on Preliminary Economic Assessment*. Cascabel Project, Northern Ecuador Alpala Copper-Gold-Silver Deposit. https://cornerstoneresources.com/i/pdf/Cascabel_PEA_1119.pdf
- Zhou, S., Zhou, K., & Wang, J. (2020). Geochemical metallogenic potential based on cluster analysis: A new method to extract valuable information for mineral exploration from geochemical data. *Applied Geochemistry*, 122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104748>

Contribución de Autoría

Conceptualización: M.A.A.C, Curación de datos: M.A.A.C; Análisis formal: M.A.A.C; Adquisición de fondos: M.A.A.C Investigación: M.A.A.C y D.F.L.D; Metodología M.A.A.C y D.F.L.D; Administración del Proyecto: M.A.A.C; Recursos: M.A.A.C; Software: M.A.A.C; Supervisión: M.A.A.C y D.F.L.D; Validación: M.A.A.C y D.F.L.D; Visualización M.A.A.C; Redacción - borrador original: M.A.A.C; Redacción - Revisión y edición: M.A.A.C y D.F.L.D.