



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Modelo geometalúrgico para la exploración de
recursos minerales**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geometalurgia

AUTOR

Miguel Angel ALVAREZ CASTILLO

ASESOR

Mg. Daniel Florencio LOVERA DÁVILA

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Alvarez, M. (2023). *Modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Miguel Angel Alvarez Castillo
Tipo de documento de identidad	Pasaporte
Número de documento de identidad	EC / 1724739865
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9288-7486
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06450640
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2815-0716
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Andrés Yparraguirre Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10293400
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Alberto Terrones Alvarado
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08994472
Datos de investigación	
Línea de investigación	Geometalurgia y Recursos Mineros
Grupo de investigación	TECMETS – II GEO – VRIP - UNMSM

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Área comprendida entre los poblados de la Merced de Buenos Aires y Río Verde. País: Ecuador Provincia: Imbabura Latitud: 0.719°N Longitud: 78.370°E
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los tres días del mes de julio del año dos mil veintitres, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000384-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 22 de junio del 2023, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«MODELO GEOMETALÚRGICO PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES»

Presentado por el Bach. **MIGUEL ANGEL ALVAREZ CASTILLO**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA**.

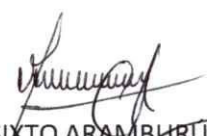
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20210081516, de fecha 03 de noviembre del 2021, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

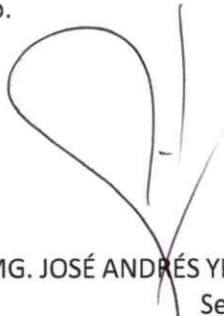
Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

BUENO (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA** al Bach. **MIGUEL ANGEL ALVAREZ CASTILLO**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURU ROJAS
Presidente


MG. JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN
Secretario


MG. JOSÉ ALBERTO TERRONES ALVARADO
Miembro


MG. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Asesor

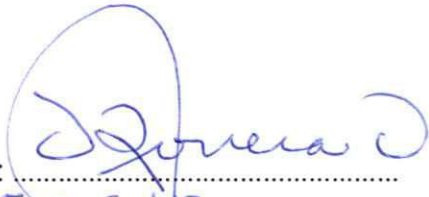


UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Mg. Daniel Florencio Lovera Dávila en mi condición de asesor acreditado con el Número de Dictamen N° 000165-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «MODELO GEOMETALÚRGICO PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES» presentado por el Bachiller Miguel Angel Alvarez Castillo para optar el grado de Magister en Geometalurgia CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabaos Académicos, de investigación y producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 03 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Firma del Asesor: 
DNI: 06450640
Nombres y apellidos del asesor:
DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA

Huella Digital



DEDICATORIA

Este trabajo de Tesis le dedico a Dios, a mi persona y a mi familia.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
LISTA DE TABLAS.....	IV
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	2
1.3. Justificación por Conveniencia.....	3
1.4. Justificación Práctica.....	3
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Hipótesis	4
1.6.1. Hipótesis General.....	4
1.6.2. Hipótesis Específicas	4
1.7. Identificación de variables	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación.....	6
2.2. Antecedentes Referenciales	7
2.2.1. Antecedentes Internacionales	7
2.2.2. Antecedentes Locales	10
2.3. Bases Teóricas	12
2.3.1. Marco Geológico y Estructural de la Zona de Estudio	12
2.3.2. Exploración de Recursos Minerales	13
2.3.2.1. Dispersión elemental.....	14
2.3.2.2. Elementos pathfinders.....	15
2.3.2.3. Valores de background-fondo, threshold-umbral y anomalía geoquímica.	16
2.3.3. Evaluación de Datos Geoquímicos.....	16
2.3.4. Estimación Geoestadística.....	18

2.3.5. Estimación Geoestadística Multivariable	19
2.3.5.1. Análisis de componentes principales.....	19
2.3.6. Geometalurgia.....	20
2.3.6.1. Variables Geometalúrgicas.....	21
2.3.7. Metalurgia Extractiva.....	22
2.3.8. Elementos Penalizantes y Perjudiciales en los Procesos Metalúrgicos	23
2.4. Marco Conceptual	26
2.5. Operacionalización de Variables	28
2.6. Matriz de Consistencia.....	29
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	30
3.1. Tipo y Diseño de la Investigación.....	30
3.2. Unidad de Análisis	31
3.3. Población de Estudio	31
3.4. Tamaño de Muestra.....	32
3.5. Selección de Muestra.....	32
3.6. Técnicas de Recolección de Datos	32
3.7. Análisis e Interpretación de la Información.....	33
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1. Presentación de resultados.....	34
4.1.1. Estudio geológico	34
4.1.2. Estudio petromineragráfico.....	36
4.1.3. Estudio geoestadístico	40
4.1.3.1. Análisis composicional de los datos.	40
4.1.3.2. Estadística descriptiva.....	45
4.1.3.3. Variografía.....	47
4.1.4. Análisis de datos metalúrgicos	54
4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados	58
4.3. Pruebas de Hipótesis	60
4.3.1. Supuestos de Normalidad para la Hipótesis Específica 1	60
4.3.2. Validación de la Hipótesis H.E.1.....	62
4.3.3. Evaluación de la Hipótesis General de Investigación	63
4.3.4. Supuestos de Normalidad de la Hipótesis General de Investigación	65
4.3.5. Prueba de la Hipótesis General de Investigación H.G	66
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXOS	77

Anexo 1. Base de datos geoquímicos de la zona de estudio	77
Anexo 2. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson	78
Anexo 3. Clasificación de Componentes Principales.....	79
Anexo 4. Modelo o esquema de trabajo propuesto	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Elementos principales y pathfinders asociados a algunos tipos de depósitos minerales	15
Tabla 2. Clasificación de las variables geometalúrgicas	21
Tabla 3. Síntesis de los procesos metalúrgicos de flotación y lixiviación	23
Tabla 4. Límites máximos permitidos de elementos penalizantes en concentrados de Cu	24
Tabla 5. Sistemas de lixiviación selectiva para algunos elementos penalizantes de Cc de Cu	24
Tabla 6. Efectos de los elementos perjudiciales en la cianuración y adsorción (Recuperación de Au)	25
Tabla 7. Variables, subvariables e indicadores	28
Tabla 8. Matriz de consistencia	29
Tabla 9. Categorización de asociaciones y relaciones multielementales	44
Tabla 10. Asociaciones multivariadas de elementos mediante criterios de exploración y metalúrgicos	44
Tabla 11. Comportamiento estadístico de los datos multivariados	45
Tabla 12. Resumen de las características variográficas de cada grupo multielemental	50
Tabla 13. Datos obtenidos de las pruebas de flotación de ciclo cerrado (locked cycle test en inglés)	55
Tabla 14. Estimación del grado de concentrado de Cu-Au-Ag de Alpala	56
Tabla 15. Datos metalúrgicos obtenidos de las pruebas de lixiviación de Au con NaCN	57
Tabla 16. Pruebas de Normalidad para H0 y H1 correspondientes a la Hipótesis Específica H.E.1	61
Tabla 17. Coeficientes de correlación de Spearman entre las asociaciones multielementales	63
Tabla 18. Peso en porcentaje asignado a los atributos de validación para GCR y NAEM	64
Tabla 19. Pruebas de normalidad para GCR y NAEM	65
Tabla 20. Coeficiente de correlación de Pearson y significancia p para GCR y NAEM	66
Tabla 21. Base de datos geoquímicos	77
Tabla 22. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre los 37 elementos	78
Tabla 23. Componentes principales PC de las 10 primeras clases de los elementos geoquímicos	79

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Mapa Geológico de la zona de Estudio.</i>	12
<i>Figura 2. Ambientes de dispersión primaria y secundaria de un depósito mineral.</i>	14
<i>Figura 3. Representación de la metalurgia extractiva y su relación con otras ciencias.</i>	22
<i>Figura 4. Ubicación del área de estudio.</i>	31
<i>Figura 5. Mapa litológico y estructural simplificado del área de estudio.</i>	35
<i>Figura 6. Estructuras locales definidas al rededor del yacimiento de Cascabel-Alpala.</i>	36
<i>Figura 7. Muestras de núcleos de perforación del cuerpo mineralizado Cascabel-Alpala.</i>	37
<i>Figura 8. Imagen SEM-BSE de mineralización de sulfuros, Au eléctrum y minerales ganga.</i>	38
<i>Figura 9. Difractograma de una muestra de roca pulverizada de la mina La Merced de Buenos Aires.</i>	39
<i>Figura 10. Biplot de los elementos geoquímicos producto de las transformaciones clr e ilr.</i>	41
<i>Figura 11. Gráfica de clases de Componentes Principales acumulados.</i>	42
<i>Figura 12. Dendograma de clústeres del balance de los datos geoquímicos de los 37 elementos.</i>	43
<i>Figura 13. Histogramas de frecuencia de las asociaciones multivariables de elementos geoquímicos.</i>	46
<i>Figura 14. Planos variográficos de las asociaciones multivariables de elementos geoquímicos.</i>	47
<i>Figura 15. Modelos de variogramas definidos para las asociaciones multielementales.</i>	49
<i>Figura 16. Plano de anomalías geoquímicas de elementos pathfinders para pórfidos de Cu-Au.</i>	51
<i>Figura 17. Plano de anomalías geoquímicas de elementos pathfinders para vetas de metales preciosos.</i>	52
<i>Figura 18. Plano de anomalías geoquímicas para elementos perjudiciales en el proceso de flotación.</i>	53

<i>Figura 19. Plano de anomalías de elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación de Au-Ag.</i>	54
<i>Figura 20. Flowsheet simplificado del proceso de recuperación mineral (proyecto de Cascabel-Alpala).</i>	55
<i>Figura 21. Curvas de % de recuperación en función del tiempo para las variables de estudio.</i>	57
<i>Figura 22. Gráficos Q-Q normal para los grupos multielementales.</i>	62
<i>Figura 23. Gráficos Q-Q normal para las variables de validación GCR y NAEM.</i>	66

LISTA DE NOMENCLATURAS

Cc: Concentrado de minerales metálicos

g: Gramos

ha: Hectáreas

Kg: Kilogramos

Km: Kilómetro

m: Metros

μm : Micrones

P: Presión

%: Porcentaje

pH: Potencial de Hidrógeno

ppm: Partes por millón

t: Tonelada

T: Temperatura

wt%: Porcentaje en peso

RESUMEN

La exploración de recursos minerales está limitada por la incertidumbre geológica derivada de las complejidades geológicas, técnicas tradicionales de procesamiento de datos y aspectos políticos y socioambientales; lo que incrementa el grado de riesgo. Por lo cual, se desarrolló un modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales, integrando la información geológica, geoquímica y metalúrgica disponible del área de interés ubicada en la provincia de Imbabura al NW del Ecuador. Se evaluaron los datos geoquímicos de 37 elementos provenientes de 448 muestras de sedimentos fluviales aplicando la técnica estadística de Análisis Composicional con el software CoDaPack, la cual se basa en las transformaciones log-cociente clr e ilr para el análisis de componentes principales PC y de clústeres jerárquicos; esto permitió definir cuatro asociaciones multielementales: 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); elementos 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). Posteriormente, se realizó el análisis geoestadístico de dichas asociaciones con el software Isatis, y mediante la estimación de kriging ordinario se obtuvieron los planos de anomalías. El análisis comparativo entre los planos resultantes y los datos mineralógicos y metalúrgicos de yacimientos de la zona de estudio, permitió constreñir que las subanomalías de elementos perjudiciales en el proceso de flotación coinciden con el depósito de Cu-Au de Cascabel-Alpala, esto se relaciona con los resultados metalúrgicos de recuperación por flotación de este depósito con una ley del alimento de 1.17% Cu y 2.29g/t Au, y una recuperación de 93.2% y 79.3% respectivamente; asimismo, las subanomalías de pathfinders de Au-Ag se sobreponen sobre la mina La Merced de Buenos Aires, lo que se relaciona con la ley de alimento de 57.45 g/t Au definida en una muestra proveniente de dicha mina. Además, se determinó un target potencial de exploración al SE del área de estudio denominado “Mineralización Inferida Río San Gerónimo”. La metodología definida en la presente investigación es atractiva como punto de partida para la disminución del riesgo en las fases iniciales de la minería para la toma de decisiones más acertadas.

Palabras clave: Análisis composicional, Componentes principales, Exploración, Geología, Geoquímica, Metalurgia, Modelo geometalúrgico.

ABSTRACT

The exploration of mineral resources is limited by geological uncertainty derived from geological complexities, traditional data processing techniques, and political and socio-environmental aspects, which increases the risk grade. Therefore, a geometallurgical model was implemented for the exploration of mineral resources, integrating the geological, geochemical, and metallurgical information available from the area of interest located in the province of Imbabura in the NW of Ecuador. The geochemical data of 37 elements from 448 fluvial sediment samples were evaluated by applying the Statistical Technique of Compositional Analysis using CoDaPack software, which is based on the clr and ilr log-ratio transformations for the principal components analysis and hierarchical clusters; which allowed defining four multi-elemental associations: Cu-Au porphyry pathfinders (Ag, As, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, W and Zr); Au-Ag precious metal veins pathfinders (As, Hg, Cu, Ni, Ag, Zn, Pb, Sb, Mo, Te, and Ba); flotation process harmful elements (Pb, As, Sb, Hg, Cd, Ni and Co); and leaching process harmful elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb and Te). Subsequently, the geostatistical analysis of these associations was carried out using Isatis software, and the anomaly maps were obtained through ordinary kriging estimation. The comparative analysis between the resulting maps and the mineralogical and metallurgical data of deposits in the study area, allowed us to determine that the sub-anomalies of harmful elements in the flotation process coincide with the Cu-Au deposit of Cascabel-Alpala, this is related with the metallurgical results of flotation recovery from this deposit with a feed grade of 1.17% Cu and 2.29g/t Au, and a recovery of 93.2% and 79.3% respectively; likewise, the Au-Ag pathfinders sub-anomalies are superimposed on La Merced de Buenos Aires mine, which is related to the feed grade of 57.45 g/t Au defined in a sample from said mine. Furthermore, a potential exploration target to the SE of the study area called "Saint Geronimo River inferred mineralization" was determined. The methodology defined in this research is attractive as a starting point for reducing risk in the mining initial stages for making more accurate decisions.

Keywords: Compositional analysis, Principal components, Exploration, Geology, Geochemistry, Metallurgy, Geometallurgical model.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

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, 2014). Además, también se manifiestan impasses políticos y socioambientales, lo que incrementa el grado de incertidumbre y el riesgo. Por otra parte, los grandes avances tecnológicos aportan con datos indirectos de la composición química del suelo, como, la teledetección, sin embargo, esto solo provee de datos previos o complementarios para las labores prospectivas in situ (Aponte, 2021; Xiong & Zuo, 2020).

Por lo cual, de acuerdo a 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 (Aryafar & Roshanravan, 2020; Wang & Zuo, 2018), 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 & Chira, 2018; Manrique & Guamán, 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, y la correlación existente entre la geoquímica y datos minero-metalúrgicos de yacimientos conocidos (Gulley et al., 2018).

Asimismo, se conoce que la metalurgia influye directamente en la rentabilidad y el desarrollo de un proyecto minero (Ghasemzadeh et al., 2019; Habib et al., 2020; Haldar, 2013), por ejemplo, proyectos con altas leyes de metales asociados a minerales con elementos nocivos, como As, Hg, Cd, Sb, entre otros, no son rentables debido a los altos costos de procesamiento en la recuperación metalúrgica. Todo esto genera mayores inversiones en tecnologías recuperativas adecuadas, el estancamiento de proyectos a la espera del desarrollo de nuevas tecnologías o el abandono definitivo de dichos proyectos.

Delgado et al. (2020), Frækaland Vangsnes (2018) and Rivera-Parra et al. (2021), sugieren que el no desarrollo de estos proyectos mineros, motiva la continuación de la minería informal y artesanal en Ecuador, lo que causa graves daños ambientales. Considerando estas problemáticas se cree que el planteamiento de un modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales a partir de la información geológica-estructural, datos geoquímicos de 37 elementos provenientes de 448 muestras de sedimentos fluviales, y los datos petrominerográficos y metalúrgicos de recuperación mineral 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; permitirá disminuir la incertidumbre y los riesgos financieros presentes en estas etapas iniciales, además, mejorará el proceso de toma de decisiones.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

P.G ¿En qué medida influye un modelo geometalúrgico en la exploración de recursos minerales?

1.2.2. Problemas Específicos

P.E.1 ¿Qué asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación se pueden determinar a partir de datos geoquímicos?

P.E.2 ¿Cuál es el modelo geometalúrgico planteado en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) para la exploración de recursos minerales?

1.3. Justificación por Conveniencia

El presente trabajo es conveniente, considerando que la exploración de recursos minerales es una etapa de alto riesgo financiero, y es la base para el estudio y desarrollo de las etapas mineras posteriores (Zuo, 2021). Por lo cual, se busca promover la importancia de la aplicación del concepto geometalúrgico, específicamente adicionando información metalúrgica (recuperaciones) a la geología para definir zonas potencialmente anómalas para la ocurrencia de mineralización; tomando en cuenta que la metalurgia puede condicionar la continuidad o abandono de proyectos mineros.

Esto beneficiará a empresas e instituciones públicas y privadas encargadas de la evaluación del potencial minero del Ecuador, evitando la pérdida de capital en zonas o proyectos con ocurrencia de leyes altas pero que no representan un beneficio económico, específicamente por las concentraciones de elementos penalizantes y perjudiciales en los procesos metalúrgicos, garantizando la eficiencia de la exploración minera.

1.4. Justificación Práctica

El valor práctico de la presente investigación radica en el desarrollo de un modelo geometalúrgico en base a la información geológica-estructural, geoquímica y metalúrgica correspondientes a zonas de brownfield y greenfield. Las técnicas geoestadísticas consideradas y el flujo de trabajo definido proveerán de nuevas estrategias de exploración, y serán aplicables a cualquier estudio orientado a la definición de planos de anomalías que pongan en evidencia las ocurrencias mineralógicas y el potencial minero de una zona determinada. Además, permitirá previsualizar y correlacionar elementos de interés económico, metalúrgico y

ambiental. Todo esto contribuirá a la disminución de la problemática asociada al alto grado de incertidumbre en las primeras etapas de la minería; lo que permitirá la toma de decisiones de manera más acertada, y un mayor aprovechamiento y desarrollo de los recursos mineros a nivel local y regional.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

O.G Proponer un modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales.

1.5.2. Objetivos Específicos

O.E.1 Determinar asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación a partir de datos de análisis geoquímicos.

O.E.2 Plantear un modelo geometalúrgico en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) para la exploración de recursos minerales.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

H.G Un modelo geometalúrgico influirá en la exploración de recursos minerales.

1.6.2. Hipótesis Específicas

H.E.1 Las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación se determinarán a partir de datos de análisis geoquímicos.

H.E.2 El modelo geometalúrgico planteado en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) mejorará la exploración de recursos minerales.

1.7. Identificación de variables

Variable independiente: Modelo geometalúrgico

Variable dependiente: Exploración de recursos minerales

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación

La exploración o búsqueda de recursos minerales y su explotación es una de las prácticas más antiguas e importantes del ser humano y que van de la mano con su evolución, por lo cual, el desarrollo de la minería no ha sido accidental si no que ha surgido por la necesidad de la mejora de vida y la búsqueda incesante del conocimiento y nuevas tecnologías, tal como lo evidencian los primeros indicios de las prácticas mineras y metalúrgicas de hace 9000 años (Wertime, 1964). La curiosidad del hombre lo ha llevado a plantearse interrogantes, por ejemplo ¿Qué hay debajo del subsuelo? Y como respuesta a aquello se tienen algunas técnicas indirectas de exploración, tales como la geofísica y la geoquímica.

Las limitaciones relacionadas al agotamiento de recursos cada vez son más prominentes a medida que la industria se dispara con el crecimiento de la población en todo el mundo. En este entorno, surge otra interrogante ¿Se agotarán los recursos minerales en la Tierra? Donde lo más probable es que sí, específicamente los recursos metalíferos, lo que significaría un estancamiento de la industria en general, por lo cual, esto implicaría la búsqueda de otras alternativas y nuevas tecnologías y conocimiento.

Actualmente, el objetivo de las empresas mineras y la academia es hacer que las labores exploratorias sean más eficientes, dada la gran demanda de los recursos minerales y la incertidumbre geológica presente en todo momento de las etapas mineras; en este contexto, Garcia del Real et al. (2020), Hickson et al. (2020) and Wouters et al. (2021) afirman que existen intereses de algunos países y empresas transnacionales en la exploración de la minería espacial para una explotación venidera de recursos del espacio, lo que aliviaría en gran medida la demanda de minerales metálicos en el futuro y los problemas socioambientales que traen consigo las labores mineras.

Este trabajo se enfoca en una epistemología basada en la tecnología ya que se busca integrar procesos, métodos y técnicas que rigen el desarrollo tecnológico

adaptativo afines a la exploración de recursos minerales en conjunto con la metalurgia extractiva para conformar un modelo o procedimiento que permita estudiar, localizar, definir y desarrollar yacimientos metalíferos, en la cual, sea evidente un aporte positivo en el ámbito socioeconómico a nivel local y regional, en función de una actividad minera amigable con el medioambiente; además, de una visión humanista, ecologista y futurista considerando que a corto plazo, la única fuente de estos recursos es nuestro planeta.

2.2. Antecedentes Referenciales

2.2.1. Antecedentes Internacionales

Ghasemzadeh et al. (2019), realizaron un artículo científico titulado: “**Stream sediment geochemical data analysis for district-scale mineral exploration targeting: Measuring the performance of the spatial U-statistic and C-A fractal modeling**”. El objetivo de este estudio consistió en realizar un análisis comparativo en un contexto espacial entre el método de la estadística-U espacial y el modelado fractal (C-A) de concentración de área para medir sus rendimientos y definir anomalías de Cu en un caso de estudio ubicado en Urumieh-Dokhtar al Sureste de Irán. Los autores realizaron la normalización de los datos de concentraciones de elementos (Cu, Mo, Au, Ag, As, Sb, Zn y Pb) aplicando la transformación log-cociente ilr , y evaluaron las correlaciones multielementales en los datos transformados. Luego procesaron los datos con la transformación clr para reducir la desviación estándar de valores atípicos en el análisis estadístico robusto posterior, obteniéndose como resultado 2 conjuntos de datos robustos RPC1 y RPC2. RPC1 representó valores positivos para Cu-Mo, donde se realizó un análisis variográfico.

Las anomalías geoquímicas se definieron aplicando el modelo fractal (que obedece a la no linealidad de los procesos de mineralización) y el modelo estadístico-U espacial. En ambos casos se ha obtenido como resultado un plano de concentraciones o anomalías, y la validación se ha realizado mediante gráficos de área

de predicción (P-A); donde se ha determinado que en términos espaciales el modelo fractal representa mejores resultados.

Aryafar & Roshanravan (2020), realizaron un trabajo titulado: **“Improved index overlay mineral potential modeling in brown- and green-fields exploration using geochemical, geological and remote sensing data”**. El objetivo del estudio consistió en definir zonas potencialmente explotables de cromita a partir de datos geológicos, geoquímicos y de teledetección en el distrito mineralizado de Birjand–Irán. Los autores propusieron una metodología de superposición de índices modificada, la cual consistió en la asignación de ponderadores geológicos, de densidad de fallas y de concentraciones geoquímicas de elementos mediante el método de Entropía de Shannon Modificado; este procedimiento a diferencia del método convencional de superposición de índices no necesita del juicio de expertos y de datos de ocurrencias conocidas, por lo cual, es aplicable a la etapa de greenfield. Los resultados se validaron con los datos de una zona mineralizada conocida, luego esta metodología se aplicó a una zona no estudiada y se obtuvieron planos que indican zonas prometedoras para una exploración más detallada de un probable depósito de cromita.

Xiong & Zuo (2020), presentaron: **“Computers and Geosciences Recognizing multivariate geochemical anomalies for mineral exploration by combining deep learning and one-class support vector machine”**. En este artículo los autores plantearon un modelo híbrido que combina redes confiables profundas no supervisadas (DBN) y un mecanismo de soporte de vector de clase única (OCSVM) para la definición de anomalías relacionadas a depósitos de Fe en el distrito de Fujian-China. El análisis de los datos se realizó en muestras geoquímicas de 39 elementos; primero se implementó el algoritmo del DBN para la reducción de dimensionalidad, y luego se elaboró la salida del DBN utilizado como entrada de OCSVM. El resultado fue un plano de anomalías multivariantes de alta dimensión, el mismo que fue comparado con los resultados de tres métodos alternativos, por lo que en términos de los valores del área bajo la curva (AUC), se determinó que el algoritmo o modelo híbrido DBN y OCSVM reconoció de manera eficiente las anomalías geoquímicas

relacionadas con la mineralización de Fe, y estas anomalías coinciden con los cuerpos intrusivos de Yanshanian-China indicando zonas con potencial de prospección.

Zhou et al. (2020), realizaron un artículo científico titulado: “**Geochemical metallogenic potential based on cluster analysis: A new method to extract valuable information for mineral exploration from geochemical data**”. El objetivo del estudio fue desarrollar targets potenciales de exploración de Au a partir de datos geoquímicos de sedimentos fluviales en el distrito mineralizado de Xinjiang-China. El análisis se realizó en 39 elementos correspondientes a 1444 muestras, aplicando el método de agrupaciones de elementos denominado (GMPPM-CA) para eliminar la subjetividad existente en los métodos tradicionales de definición de anomalías mediante desviaciones estándar (MPSDA) y análisis exploratorio de datos (EDA).

Primeramente, se realizó la interpolación espacial y se conformó un conjunto de datos D1, luego a D1 se aplicó la transformación log-cociente clr y se conformó D2. Al conjunto transformado D2 se dividió en grupos o clases C1, C2, C3 y C4 de acuerdo a los elementos pathfinders. Cada conjunto se analizó mediante el algoritmo Q (algoritmo k-medias aritméticas) y se clasificó cada clase entre 2 y 5 subclases, por ejemplo, C1 se dividió en 3 subclases tomando la notación C11, C12 y C13. Finalmente, se superpusieron las subclases para obtener nuevos valores y conformar agrupaciones R (por ejemplo, L1 se generó para C1), con estos datos se conformaron los planos con potencial metalogénico. Los resultados fueron planos de anomalías asociadas a Au, los cuales se han validado superponiendo depósitos de Au conocidos, los mismos que coincidieron con las zonas anómalas definidas.

Zuo (2021), presentó el artículo científico titulado: “**Mineral Exploration Using Subtle or Negative Geochemical Anomalies**”. El objetivo de este trabajo consistió en definir zonas de anomalías para la prospección potencial de depósitos de Cu y Sn en las provincias de Yunnan y Fujian-China. La normalización de los datos geoquímicos de sedimentos fluviales de las dos zonas de interés se ha realizado mediante la transformación log-cociente ilr, posteriormente, para definir las anomalías se aplicó el modelo de análisis multifractal de área de concentración (SA), donde primeramente se convirtieron los patrones de dominios espaciales en dominios de

frecuencia mediante la transformación de Fourier. Luego en la gráfica logarítmica de la densidad del espectro (S) en función de las áreas (A), se han ajustado líneas rectas para conformar componentes de fondo.

Finalmente, los planos o mapas de anomalías de correlaciones positivas y negativas se han obtenido mediante la transformación inversa de Fourier de los datos de los componentes de fondo. Se han generado planos de anomalías potencialmente prospectivos de Cu y Sn en función de anomalías positivas y negativas, y se han comparado con depósitos conocidos, por lo tanto, los autores concluyeron que esta metodología es aplicable para la definición e interpretación de mineralización magmático-hidrotermal.

2.2.2. Antecedentes Locales

Se han recuperado varios trabajos de tesis, reportes y artículos científicos relacionados a la prospección geoquímica en casos de estudio a nivel local para la definición de anomalías, donde aplican los métodos tradicionales mencionados por Xiong & Zuo (2020), tales como: la media más 2 o 3 veces la desviación estándar, gráficos de probabilidad, análisis exploratorio de datos (como, histogramas, gráficos de caja o box), la geoestadística multivariable, y los modelos fractales/multifractales. Todos estos métodos buscan la correlación entre la geoquímica de elementos pathfinders del yacimiento objetivo con el entorno geológico; sin embargo, en ningún estudio tanto a nivel internacional y nivel local incluyen un modelo geometalúrgico en esta etapa de exploración, como herramienta fundamental de previsualización de asociaciones de elementos que pueden afectar la rentabilidad de un prospecto minero.

En este contexto, se ha considerado de forma representativa el trabajo presentado por **Chuquiruna & Chira (2018)**, titulado: “**Análisis Geoestadístico Multivariable para identificación de anomalía del oro, Ayahuanca – Puno**”. Esta investigación tuvo como objetivo, determinar anomalías geoquímicas de Au a partir de elementos pathfinders de muestras geoquímicas provenientes de Ayahuanca-Puno. Se han evaluado 53 elementos definidos mediante espectrometría de absorción atómica en 5799 muestras; luego se ha realizado un estudio geoestadístico y

considerando los coeficientes de correlación de Pearson entre 2 elementos se ha definido los pathfinders que tienen mayor correlación con el Au, tales como, Cu, Pb, Zn, As y Ba. El análisis anisotrópico se ha enfocado en los 53 elementos, donde la anisotropía predominante fue 100 y 120° con su respectiva dirección perpendicular, lo que ha permitido la evaluación variográfica.

El plano de anomalías de Au se ha obtenido mediante kriging ordinario y progresión geométrica basados en los variogramas simples y cruzados para correlacionar 2 variables, específicamente entre el Bi, Hg y Sb que presentaron una correlación $>0,6$ con el Au. Se ha identificado 262 hectáreas (ha) de anomalía media y 13 ha de anomalía alta como targets potenciales de exploración, sin embargo, no se ha realizado la superposición de yacimientos y ocurrencias mineralógicas de la zona de estudio para la validación final del modelo de distribución geoquímica.

Asimismo, **Manrique & Guamán (2020)**, presentaron un trabajo titulado: **“Estudio de prospección geoquímica en sedimentos de las microcuencas Chirimoyo y Guineo, Ecuador”**. El objetivo de este trabajo científico fue realizar un análisis geoestadístico de los datos geoquímicos como, óxidos de Si, Al, Ca, K, Fe, Mn, Ti, P y de los elementos S, V, U, Ni, Cu, Zn, Co, Cr, Zr, Rb y S para determinar valores anómalos de prospectos de U en las microcuencas Chirimoyo y Guineo (Puyango-provincia de Loja). Los análisis Químicos se obtuvieron mediante FRX y los mineralógicos por DRX en 41 muestras, posteriormente se realizó el análisis estadístico de los datos y se evaluaron las posibles correlaciones entre elementos y/o minerales; finalmente en base a los cálculos geoestadísticos se ha definido los valores de background, threshold, subanomalías y anomalías.

Los resultados se representaron en planos de anomalías de las microcuencas correspondientes a este estudio, donde se evidenció que en la zona de La Sota existen posibles mineralizaciones de V, U y Zn, asociadas a rocas sedimentarias con contenido orgánico, así como también, la presencia de otros elementos metálicos como el Cu y el Ni.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. Marco Geológico y Estructural de la Zona de Estudio

La zona de estudio corresponde a la parte Norte de la Cordillera Occidental del Ecuador, donde es prominente un basamento oceánico acrecionado y sobreyacido por las secuencias volcánicas y volcanosedimentarias del arco volcánico desarrollado en el Terciario (Boland et al., 2000; Vallejo et al., 2019). El basamento (Kvs) presenta rocas volcánicas de composición basáltica de arco oceánico y sedimentos turbidíticos de edad Cretácica, así como también unidades sedimentarias (Ks) con la presencia de grauvacas, limolitas, lutitas y cherts (ver Figura 1). Posteriormente, se manifiesta la presencia de rocas volcanosedimentarias (PcEvs) como tobas andesíticas, areniscas de matriz tobácea del Paleoceno-Eoceno, correspondientes a un arco volcánico insular, y la presencia de unidades sedimentarias (Es) conformadas por lutitas, areniscas calcáreas y calizas de origen marino depositadas en el Eoceno (Boland et al., 2000).

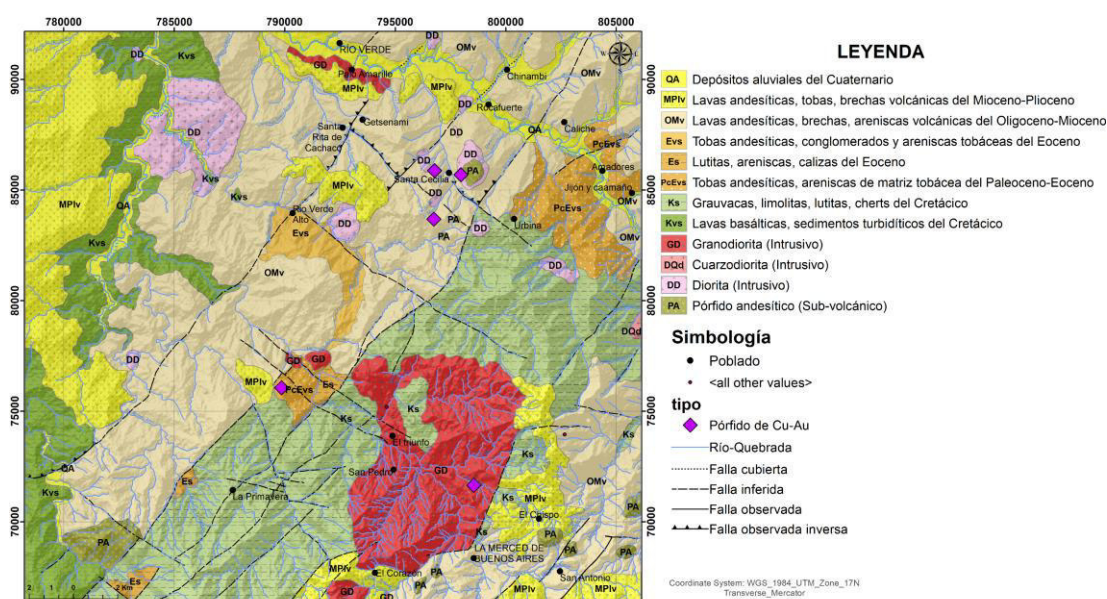


Figura 1. Mapa Geológico de la zona de Estudio.

Fuente. Modificado de INIGEMM (2017a) and INIGEMM (2017b).

De la Figura 1 se tiene también, la presencia de rocas volcanosedimentarias como, lavas andesíticas, brechas y areniscas provenientes del arco continental del Oligoceno-Mioceno, asimismo, la continuación de la actividad volcánica durante el Mioceno-Plioceno ha conformado unidades volcánicas (MPlv), con una litología de lavas andesíticas, tobas y brechas volcánicas (Boland et al., 2000). Estas unidades están sobreyacidas por depósitos aluviales y coluviales no consolidados del Cuaternario (QA).

Además, existe la presencia de cuerpos intrusivos de composición granodiorítica (GD), cuarzodiorítica (DQd), diorítica (DD), y cuerpos subvolcánicos andesíticos (PA) (ver Figura 1). La zona está afectada por un sistema de fallas principal con dirección preferencial N-NE y S-SW, así como también por sistemas menores con dirección NW-SE. El sistema de fallas primario afecta a unidades Cretácicas y evidencian reactivación, por lo que también afectan a unidades más jóvenes (Boland et al., 2000). A lo largo de fallas e intrusiones existe la presencia de mineralización de Cu-Au, asociada a la actividad magmática e hidrotermal del Terciario.

2.3.2. Exploración de Recursos Minerales

De acuerdo a Zuo (2021), la exploración de recursos minerales es la fase inicial de la actividad minera, la cual, permite definir zonas potenciales para la localización de yacimientos minerales. Dentro de las geociencias la exploración es una de las actividades más importantes, y su evolución va desde la prospección empírica que se basa en las observaciones en campo y la experiencia de expertos; la exploración científica se basa en datos geocientíficos con modelos de yacimientos para el estudio del potencial geológico de mineralización; y la exploración de información, la cual integra datos de mineralización directa o indirecta mediante varias técnicas de análisis.

La prospección geoquímica se deriva de la exploración de información, y se fundamenta en el análisis del enriquecimiento/agotamiento de elementos químicos en las proximidades de depósitos minerales. Las mediciones sistemáticas de los elementos (traza) se realizan en muestras tomadas en la corteza terrestre en un entorno natural, y provienen de rocas, suelo, sedimentos de arroyos o lagos, agua subterránea,

vegetación, seres vivos, y demás. Los resultados permiten identificar patrones anormales o anomalías geoquímicas, como indicadores directos de la presencia de depósitos minerales cercanos a la superficie o alojados a profundidad (Haldar, 2013). Esta técnica es una de las más eficientes tal como lo afirma Balaram & Sawant (2022), por ejemplo, en China el 71% de los depósitos metalíferos en el periodo de 1981-2000 han sido descubiertos mediante la geoquímica.

2.3.2.1. Dispersión elemental. Está definida por un patrón de dispersión en un entorno superficial, debido al proceso de formación de minerales de las rocas, o por la migración y redistribución de elementos en solución como producto de la oxidación, meteorización, y la erosión del depósito mineralizado (Haldar, 2013).

Las condiciones de alteración y zonificación que rodean a los yacimientos metálicos conforman los halos de dispersión primaria que son idénticos a la geoquímica de rocas y minerales no meteorizados, y los halos de dispersión secundaria conformados de residuos de mineralización a causa de los procesos superficiales de meteorización fisicoquímica, por lo que se presentan en cualquier material de la superficie (ver Figura 2), y van de metros a decenas de kilómetros. El grado de concentración de elementos disminuye logarítmicamente desde el depósito hasta alcanzar el valor de background de la roca adyacente (Haldar, 2013).

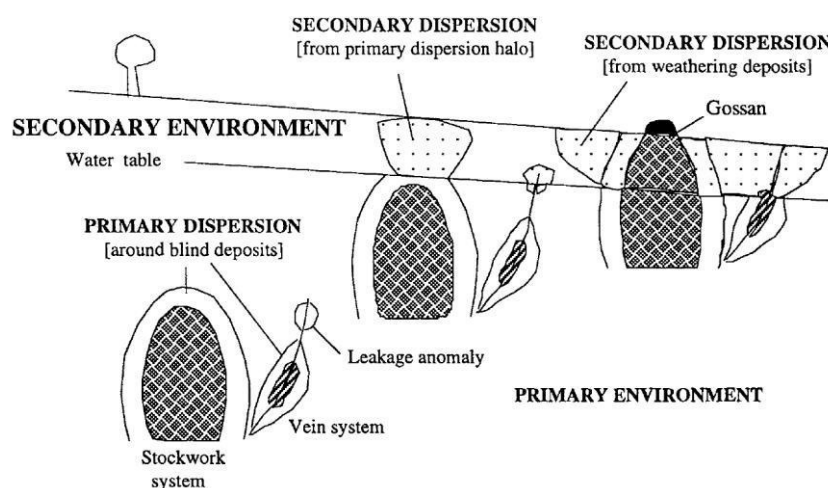


Figura 2. Ambientes de dispersión primaria y secundaria de un depósito mineral.
Fuente. Tomado de Tonui (1998, p. 30).

2.3.2.2. Elementos pathfinders. Según Haldar (2013), se trata de elementos móviles que se encuentran en las soluciones o volátiles a ciertas condiciones fisicoquímicas. Las ocurrencias de estos elementos están estrechamente relacionadas con los minerales principales objetivo, y conforman halos más extensos alrededor del depósito mineral, por lo cual, su detección es asequible con métodos simples y de bajo costo. En consecuencia, son los parámetros esenciales en la prospección geoquímica para localizar yacimientos ocultos.

Las asociaciones de elementos pathfinders deben tener correlación con los elementos principales de búsqueda (ver Tabla 1), por ejemplo, la asociación de Cu, Ni y Cr es útil para la exploración de depósitos minerales del grupo Pt (Pt, Pd, Os, Ir y Ru). Por otra parte, los elementos pathfinders también se derivan del elemento padre por desintegración radiactiva, como es el caso del Rn (producto de la desintegración del Ra), el cual permite localizar yacimientos de U (Haldar, 2013).

Tabla 1. Elementos principales y pathfinders asociados a algunos tipos de depósitos minerales

Tipo de depósito	Elementos principales	Elementos pathfinders	Fuente
Vetas de metales preciosos	Au, Ag	As, Cu, Hg, Ni, Ag, Zn, Pb, Se, Sb, Mo, Bi, Te, Ba, F	(Korshunova & Charykova, 2019)
Pórfido de Cu-Au-Mo	Cu, Au, Mo	Ag, As, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, F, W, Zr	(Lu et al., 2016; Kidder et al., 2022; Shewchuk et al., 2020)
Skarn	Cu, Zn, Mo	Sb, As, Te, Hg, I, F, Bi, Co, Se, Tl	(Meinert et al., 2005)
VMS	Cu, Pb, Zn, Au, Ag	As, Bi, Cd, Ga, Ge, Hg, In, Sb, Se, Sn, Tl	(McClenaghan & Peter, 2016)
Ultramáficos de Au	Pt, Cr, Ni	Cu, Co, Pd	(Siegel, 1992)
Inconformidad de U (Sedimentario)	U, Rn, Se, Mo	Se, Mo, As, Cu, Pb, V, REE	(Siegel, 1992; Balaram & Sawant, 2022)

2.3.2.3. Valores de background-fondo, threshold-umbral y anomalía geoquímica. El valor de fondo o background corresponde al rango normal de concentración de un elemento en particular o conjunto de elementos en los materiales de la corteza terrestre, dicho valor está sujeto a variaciones en función de la composición de la roca u otro material superficial en que se da la ocurrencia del elemento. En este contexto, los valores entre muestras varían significativamente, y la media aritmética está sesgada por los valores atípicos dispersos. (Haldar, 2013).

El valor de umbral o threshold es el límite superior o inferior probable del valor de fondo con un grado de confianza definido con la estadística, y las muestras con valores que superen el threshold se pueden considerar como anomalías. Este umbral varía para cada elemento o grupo de elementos de una área específica, por el tipo de roca y tipos de muestras; cuando el umbral anómalo es negativo, indica la fluctuación del background sobre límite inferior (Haldar, 2013).

Por otra parte, la anomalía geoquímica se define como las concentraciones de uno o más elementos que presentan una desviación con respecto a las áreas circundantes y que pueden indicar mineralización (Siegel, 1992). Se puede caracterizar mediante tres aspectos: concentración (alta/baja), tamaño (grande/pequeña) y por la asociación de elementos (elemento único/multielemental), y tradicionalmente se define con la geoestadística y se representan en planos de exploración (Zuo, 2021).

2.3.3. Evaluación de Datos Geoquímicos

Comprende un análisis de la estadística descriptiva de los datos geoquímicos (Z_i), tales como, las medidas de tendencia central como la media aritmética ($m = \sum Z_i / N$) y la mediana; las medidas de dispersión como la desviación estándar (σ) y la varianza $\{\sigma^2 = E(Z_i - m)^2, \text{ donde la esperanza matemática } E[Z(x)] = m\}$, para conocer las características de la distribución estadística. En tal sentido, la distribución normal o logarítmica facilita la interpretación de los datos, sin embargo, en la naturaleza la mayoría de elementos no siguen una distribución normal, lo que probablemente se deba a la diversidad de procesos geológicos de mineralización y alteración que ocurrieron en la zona específica (Ghasemzadeh et al., 2019).

La presencia de valores atípicos afecta el análisis e interpretación de los datos geoquímicos, por lo cual, es esencial la aplicación de técnicas de normalización de datos para realizar la evaluación e interpretación espacial de anomalías. Para ello, existen algunos métodos de transformación, tales como las transformaciones log-cociente:

Transformación log-cociente aditiva (alr): cuando una composición pasa de $x \in \mathbb{S}^D$ a $z \in \mathbb{R}^{D-1}$ se define como:

$$z = \text{alr}(x) = \left[\ln \frac{x_1}{x_D}, \dots, \ln \frac{x_{D-1}}{x_D} \right] = \frac{\ln(x)}{D} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & \dots & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

su inversa es la siguiente: $\text{alr}(z)^{-1} = \mathcal{C}[\exp(z; 0)] \quad (2)$

donde: $\mathbb{S}^D$ es el espacio muestral o simplex; $\mathbb{R}^D$ es el espacio real, y $\mathcal{C}$ corresponde al operador clausura (Aitchison, 1986).

Transformación log-cociente centrada (clr): cuando una composición pasa de $x \in \mathbb{S}^D$ a $y \in \mathbb{R}^{D-1}$ se define como:

$$y = \text{clr}(x) = \left[\ln \frac{x_1}{g(x)}, \dots, \ln \frac{x_D}{g(x)} \right] = \frac{\ln(x)}{D} \cdot \begin{bmatrix} D-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & D-1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & \dots & D-1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde la función $g(x) = \sqrt[D]{x_1 \dots x_D}$ corresponde a la media geométrica de las D partes de (x) (Aitchison, 1986), además, su inversa es la siguiente:

$$\text{clr}(y)^{-1} = \mathcal{C}[\exp(y)] \quad (4)$$

Transformación log-cociente isométrica (ilr): las transformaciones anteriores presentan ciertas limitaciones en la asociación de la métrica del espacio real con la métrica euclidiana, por lo tanto, la transformación ilr estudiada por Egozcue et al. (2003) se define como:

$$\text{ilr}(x) = [(x, e_1), \dots, (x, e_{D-1})] \quad (5)$$

donde $e_1, \dots, e_{D-1}$ es la base ortonormal obtenida a partir de la ecuación de un producto interior en $\mathbb{S}^D$, por lo que los componentes del vector ilr corresponden a las coordenadas de x en relación a la base ortonormal $e_1, \dots, e_{D-1}$; por lo cual, los valores ilr transformados se representan en los ejes ortonormales, esto permite evaluar enfoques estadísticos complejos y se define como (Egozcue et al., 2003):

$$ilr(x) = y = [y_1, \dots, y_{D-1}] \in \mathbb{R}^{D-1}, \text{ donde } y_i = \frac{1}{\sqrt{i(i+1)}} \ln \left[\frac{\prod_{j=1}^i x_j}{(x_{i+1})^i} \right] \quad (6)$$

su inversa es la siguiente:

$$x = ilr^{-1}(y) = \bigoplus_{j=1}^{D-1} y \otimes e_j \quad (7)$$

2.3.4. Estimación Geoestadística

De acuerdo a Rossi y Deutsch (2013), la estimación geoestadística determinista se basa en el krigeaje, que define el estimador (Zv^*):

$$Zv^* = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_N Z(x_N)$$

condición de insesgado: $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N = 1$ y $E(Z^* - Z^R) = 0$

donde: λ es el peso asignado, Z^* es el valor estimado, y Z^R equivale al valor real.

Este análisis permite estimar el valor de la variable regionalizada (Z_i) en puntos del espacio no muestreados, en base a estimadores lineales ponderados (λ_i) con un peso definido de la correlación espacial entre las muestras cercanas disponibles, y representados en el variograma (γ), por lo cual, si se tiene dos puntos en el espacio x y $x+h$, se cumple la expresión: $\gamma^*(h) = 0.5 E [Z(x+h) - Z(x)]^2$, y el modelo de estimación más común es:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (8)$$

donde $N(h)$ es el número de pares separados a una distancia h .

El método de estimación más aplicado es el Kriging Ordinario, que considera la existencia de la varianza y de una media desconocida en condiciones de estacionalidad. La varianza equivale al error de estimación, por ello, cumple con la condición de insesgado para minimizar este error; además, se considera la distribución y la continuidad espacial de la variable regionalizada mediante la ecuación del variograma.

2.3.5. Estimación Geoestadística Multivariable

Consiste en el análisis, evaluación y estimación de una o más variables a partir de un conjunto de dos o más variables primarias. Una de las técnicas geoestadísticas es el Co-kriging, el cual consiste en la estimación de variables aleatorias bajo el supuesto de normalidad multivariada, es decir se basa en el krigeaje conjunto (co-kriging) de dos o más variables de un fenómeno que guardan correlación o dependencia entre sí (Bogaert et al., 1995).

No obstante, la limitante de este método es la relación de dependencia entre variables, por ello, la presente investigación se basa en la técnica de Análisis Composicional que se fundamenta en las transformaciones log-cociente alr, clr e ilr; de dicha técnica, se deriva el análisis de componentes principales (PC - *Principal Components*), que permite la reducción de la dimensionalidad de un conjunto multivariable con un porcentaje mínimo de pérdida de la información de las muestras (Aitchison, 1983).

2.3.5.1. Análisis de componentes principales. Consiste en la transformación de las variables originales en sus componentes principales o factores mediante una combinación lineal de dichas variables, las cuales serán linealmente independientes.

Al considerar dos vectores composicionales fila $x = [x_1, \dots, x_D]$ e $y = [y_1, \dots, y_D]$ en el espacio muestral o simplex $\mathbb{S}^D$, que representan un conjunto de

partes de un total, se clausura las composiciones a una sumatoria constante. Sea $k \in \mathbb{R}$ un valor escalar real constante, se convierte el simplex a una estructura de espacio euclidiano mediante las operaciones de perturbación que definen un producto directo entre componentes de los dos vectores, y la potenciación por k y el producto escalar de Aitchinson (Aitchison & Ng, 2005; Egozcue et al., 2003). La representación del vector en el espacio euclidiano se realiza a través de sus coordenadas respecto a un determinado sistema de referencia ortonormal, lo cual, es inmediato mediante la transformación *ilr* indicada en la siguiente ecuación (Aitchison, 1983),

$$ilr(y) = \ln(y) * V^t = v; \quad ilr^{-1}(v) = \mathcal{C}[\exp(v * V)], \quad (9)$$

donde la matriz de contraste está representada por V y su transpuesta V^t , lo que equivale a $(D - 1) * D$ elementos, por lo cual:

$$V * V^t = I_{D-1}, \quad y \quad V * V^t = 0^t \quad (10)$$

Es decir, el sistema de vectores ortonormales está conformado por $(D - 1)$ filas que suman cero, y la matriz resultante es cuadrada ya que el número de componentes principales PC (*del inglés Principal Components*) es igual al número de variables. Por otra parte, el primer CP contiene la mayor información, en consecuencia, se pierde cierto porcentaje de dicha información con el aumento de los CPs (Aitchison, 1983).

2.3.6. Geometalurgia

De acuerdo a Coward et al. (2009), la geometalurgia es una actividad interdisciplinaria que integra la geología con la ingeniería minera y geotécnica, metalurgia extractiva, valorización de minerales y parámetros geoambientales en todas las fases de la minería para maximizar el valor económico del proyecto (por ejemplo, el valor actual neto - VAN), reducir el riesgo, generar resiliencia y proyectar una buena gestión del recurso mineral.

2.3.6.1. Variables Geometalúrgicas. Coward et al. (2009), definen como variables geometalúrgicas a cualquier tipo de atributo de la roca que genere un impacto positivo o negativo sobre el valor económico del proyecto minero y se clasifican en dos tipos: variables primarias y variables de respuesta (ver siguiente Tabla).

Tabla 2. Clasificación de las variables geometalúrgicas

Tipo	Definición	Variables o atributos	Pertenencia
Variables primarias	Hace referencia a los atributos de la roca que se pueden medir directamente y son independientes del proceso de medición empleado.	- Masa (Kg) - Densidad de la roca (Kg/m³) - Textura - Tamaño de grano (cm Ø) - Alteraciones - Leyes de elementos de interés económico (% , g/ton) - Concentración de elementos perjudiciales (%)	Propiedades primarias o intrínsecas de la roca
Variables de respuesta	Son atributos de la roca (geología) que miden las respuestas a los procesos fisicoquímicos dentro de la metalurgia extractiva.	- Dureza (Mohs, MPa) - Peso (N) - RQD - Fractura	Energía y procesos
		- Rendimiento (%) - Recuperación metalúrgica (%) - Capacidad de procesamiento (TPH) - Consumo de reactivos (g/ton) - Leyes en el concentrado (% , g/ton) - Moliendabilidad (Bwi: Kw.h/ton) - Grado de liberación - Densidad de partícula (g/mL)	Propiedades de respuesta de la roca

Fuente. Tomado de Coward et al. (2009, p. 110).

Las variables geometalúrgicas en su mayoría afectan directamente la evaluación económica de un yacimiento minero y dependen de su variabilidad espacial; por lo cual, la evaluación de los recursos está sujeta a la incertidumbre geológica. El grado de confianza de las estimaciones de los modelos geometalúrgicos, está condicionado por la calidad y equiprobabilidad de las muestras y las técnicas y métodos de tratamiento y análisis de los datos. Por lo tanto, conocer los grados de incertidumbre y de confianza desde las primeras fases, es importante para la toma de decisiones.

2.3.7. Metalurgia Extractiva

Se define como el arte y la ciencia que integra la mineralogía, la química y la ingeniería (ver Figura 3A) para extraer selectivamente metales o especies de sus minerales o material mineralizado mediante un conjunto de procesos, precedidos por un proceso de beneficio como se aprecia en la Figura 3B (Habashi, 2018).

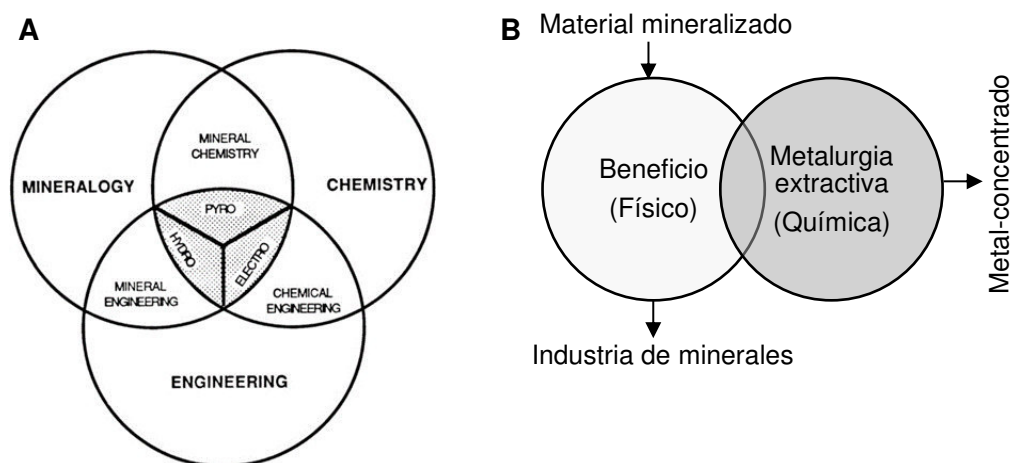


Figura 3. Representación de la metalurgia extractiva y su relación con otras ciencias.

A) representa la integración de la ciencias con las áreas de procesos metalúrgicos. **B)** Notese la correlación de los procesos en la industria de minerales.

Fuente. Modificado de Habashi (2018, p. 1, 3).

La metalurgia extractiva se clasifica en tres áreas principales: hidrometalurgia que comprende los procesos húmedos realizados a condiciones ambientales o de presión (P) y temperatura (T); pirometalurgia son los métodos secos realizados a alta T; electrometalurgia comprende los procesos que usan corriente eléctrica para llevar a cabo una transformación química para la recuperación o refinación de los metales (Habashi, 2018).

Dentro de estas áreas los procesos fisicoquímicos más importantes de recuperación metalúrgica son: flotación y lixiviación de minerales, los mismos que se resumen en la Tabla 3; además, estos procesos pueden complementarse entre sí, definiendo métodos mixtos.

Tabla 3. Síntesis de los procesos metalúrgicos de flotación y lixiviación

Proceso	Características
Flotación	Es el proceso de concentración de especies minerales mediante tratamientos fisicoquímicos para modificar la tensión superficial, lo que permite que las partículas hidrofóbicas (de poca mojabilidad con el agua) como los sulfuros y otros, se adhieran a las burbujas finas de aire para enriquecer la espuma; los minerales hidrofílicos (mojables con el agua) tales como óxidos, sulfatos, silicatos y carbonatos tienden a deprimirse clasificándose generalmente como ganga. Además, se utilizan reactivos que permiten una mayor eficiencia, como: modificadores, depresores, activadores, colectores y espumantes. Por lo cual, es un proceso óptimo para la recuperación de mineralización polimetálica con predominio de minerales de metales base como: Pb, Zn, Cu, Ni, Mo, Sn, y W. (Woods, 1981; Xie et al., 2021).
Lixiviación	Proceso de separación de uno o varios solutos (iones metálicos) de un sólido o material mineralizado, empleando un disolvente líquido, el cual, mediante el fenómeno de difusión, disuelve el mineral en la solución acuosa; de acuerdo a Bosecker (1997), se tiene las siguientes técnicas: - Lixiviación in situ: aplicada en mineral de baja ley como Cu y U, en yacimientos con profundidad <300m, minas abandonadas, etc. - Lixiviación en botaderos: aplicada en desmontes de baja ley o en sobrecarga de labores de minado. - Lixiviación en pilas: proceso óptimo para material mineralizado oxidado de baja ley extraído de la mina y apilado en pilas, tras el proceso de molienda. - Lixiviación en bateas: se realiza en tanques para minerales de alta ley y cuando se requiere menor tiempo de disolución. - lixiviación dinámica: se realiza para minerales de grano fino o en solución sólida y alta ley, la agitación puede ser por inyección de aire o mecánica, generalmente se realiza en tanques. - lixiviación a presión: se realiza a condiciones de P y T y pH controladas en autoclaves, óptima para oxidar sulfuros en mineralización de alta ley.

2.3.8. Elementos Penalizantes y Perjudiciales en los Procesos Metalúrgicos

Los elementos penalizantes aparecen como subproductos o trazas en los productos o concentrados de la industria minera, y tienen efectos en los procesos de refinación, en la salud humana y en el ambiente. Uno de los elementos más comunes es el As, en particular aparece en los concentrados de metales base y metales preciosos,

proveniente de la arsenopirita, enargita o la tenantita (Long et al., 2012). A tal efecto, China y Japón han impuesto límites máximos para elementos en los concentrados de Cu como: Pb, As, Bi, Cl, Sb, Hg, F, Ni+Co (ver Tabla 4) (Lane et al., 2016), tanto para importación y cargos de fundición respectivamente.

Tabla 4. Límites máximos permitidos para algunos elementos penalizantes en concentrados de Cu

Elemento penalizante	Límite máximo permitido para importar Cc de Cu en China (%)	Límite máximo para imposición de cargos en la Fundición de Cc de Cu en Japón (wt% en el feed)
As	0.500	0.200
Bi	-	0.050
Cl	-	0.050
F	0.100	0.033
Hg	0.010	0.001
Pb	6.000	1.000
Sb	-	0.100
Cd	0.005	-
Zn	-	3.000
Ni + Co	-	0.500

Fuente. Datos tomados de Lane et al. (2016, p. 111).

Por otra parte, existen algunos procesos de lixiviación para la extracción selectiva de elementos penalizantes para el refinamiento de concentrados de Cu, los cuales se representan en la Tabla 5. No obstante, debido a la complejidad y el costo de estos procesos metalúrgicos, se imponen las penalizaciones (Lane et al., 2016).

Tabla 5. Sistemas de lixiviación selectiva para elementos penalizantes de Cc de Cu

Sistema de lixiviación	Elementos penalizantes lixiviados
Lixiviación alcalina de sulfuros	As, Sb, Hg, Bi ^a , Te ^a
Lixiviación de hipoclorito	As, Te ^a
Lixiviación de ácido sulfúrico diluido con sulfato de aluminio	F
Lixiviación oxidante a presión/lixiviación por precipitación de cobre	Bi, Cd, Co, Ni, Pb, Te, Tl, Zn, 238U, 230Th, 226Ra, 210Pb, 210Po

^aNo se ha encontrado procesos metalúrgicos para estos elementos.

Fuente. Datos tomados de Lane et al. (2016, p. 112).

Los elementos tóxicos traza como el Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te; causan efectos negativos en el proceso de lixiviación de Au, tanto en PADs de lixiviación o lixiviación dinámica en tanques ya que tienden a formar hidróxidos complejos y cianatos; por lo tanto, consumen O_2 y CN^- que contaminan las soluciones ricas de Au o se desechan como precipitados, lo que se detalla en la Tabla 6, y los procesos metalúrgicos se tornan más complejos en el tratamiento de Au refractario (Kyle et al., 2011). Asimismo, en la minería artesanal y pequeña minería cuando se obtiene el oro por amalgamación, todos estos elementos son liberados a la atmosfera y al medio circundante (Kyle et al., 2012).

Tabla 6. Efectos de los elementos perjudiciales en la cianuración y adsorción (Recuperación de Au)

Elementos perjudiciales	Comportamiento en la cianuración	Capacidad de adsorción en Carbón Activado
Pb, Cd y Hg	El Pb presenta baja solubilidad en un pH de cianuración entre 9 y 10,5; precipita como sólidos insolubles por lo que va al relave. El Cd y el Hg tienen alta solubilidad a $pH > 9$ y forman complejos de CN^- estables, sus minerales pueden pasar al menos parcialmente a la fase de solución durante la cianuración.	Los complejos Ciano-neutros de Cd y Hg se adsorben fuertemente sobre el carbón activado, por lo tanto, se transfieren potencialmente al circuito de recuperación de Au
As, Sb y Bi	No tienden a formar complejos de CN^- . El As y el Sb forman oxianiones y/o tioaniones que consumen O_2 , lo que retarda o evita la disolución del Au y están presentes en altos % en las soluciones ricas y de relaves. El Bi es más estable en la cianuración y permanece como óxido o sulfuro,	El As tiene una capacidad de adsorción débil en el carbón activado (hasta 5 mg/g de carbón), generalmente como arseniato que como ion arsenito en un pH de 5-6, lo que sugiere que el ion más adsorbido es $H_2AsO_4^-$. No se encontró información precisa de la adsorción de As y Sb.
Se y Te	Dependiendo de las condiciones termodinámicas Redox de las soluciones de CN^- , el Se y Te forman los oxianiones selenita y telurita o selenato y telurato. El Se forma selenocianato ($SeCN^-$) y es más estable que el selenita y	El potencial de adsorción del Se o Te sobre carbón activado, está poco estudiado. Sin embargo, pueden estar en la solución rica.

selenato. El telurocianato (TeCN^-) es menos estable, por lo tanto, su formación no es representativa.

Fuente. Información tomada de Kyle et al. (2011), Kyle et al. (2012) and Lorenzen et al. (1995).

2.4. Marco Conceptual

A continuación, se tiene algunos términos geomineros que se han considerado en el desarrollo del presente trabajo:

Anomalía: concentraciones anómalas de uno o más elementos indicadores con respecto a los valores de fondo y de umbral de una área específica en la superficie terrestre, y que vectorizan zonas de mineralización (Ghasemzadeh et al., 2019).

Exploración: técnica preliminar que comprende labores orientadas a la búsqueda de minerales, tales como: prospección, muestreo, campañas de perforación diamantina, entre otras actividades; se clasifica en exploración empírica, científica y de información (Bureau, 2019; Zuo, 2021).

Explotación: comprende las labores mineras desde la estimación de recursos y reservas económicamente recuperables hasta las labores de producción comercial (Bureau, 2019).

Incertidumbre: es el grado de ignorancia relacionado a la representatividad de la información geológica y la caracterización mineralógica del recurso minero, por lo cual, la incertidumbre condiciona los procesos de estimación de leyes y de toma de decisiones (Dowd, 1994).

Ley: es una medida de la concentración de metales o minerales valiosos presentes en las rocas o material mineralizado de un yacimiento, y se expresa como la relación en % de contenido fino si se trata de minerales metalíferos, y en gramos por toneladas, cuando se trata de metales preciosos (Ministerio de Minería de Chile, 2021).

Mineralización: es la ocurrencia de uno o más minerales sobre un depósito de roca, y que representan un potencial económico (Bereau, 2019).

Modelo: es una representación idealizada de manera gráfica o esquemática de una realidad, que permite organizar y difundir de manera clara y concisa los elementos, procedimientos y formulismos matemáticos que involucran un todo (Dominy et al., 2018).

Penalizante: elemento traza asociado a la mineralización de interés económico y que causa efectos negativos desde el punto de vista metalúrgico, ambiental y económico (Lane et al., 2016).

Plano: en exploración es un mapa de isógradas que muestra los patrones de distribución geoquímica espacial de elementos químicos y sus asociaciones a lo largo de la superficie terrestre (Haldar, 2013).

Prospecto: es una concentración anómala de uno o más minerales de interés definida en la etapa inicial de la exploración geológica, lo que sugiere la realización de estudios a detalle (Bereau, 2019).

Proyecto: es un prospecto definido mediante un programa de perforación inicial, que evidencia la existencia de un depósito mineral y que requiere de la evaluación mediante extensos programas de perforación (Bereau, 2019).

Recuperación: es un parámetro metalúrgico que mide la fracción de metal que es recuperado con respecto a la cantidad de metal contenido en el material de entrada a la planta de procesamiento de minerales (Bustamante et al., 2008).

Recurso: ocurrencia de uno o más minerales de interés económico intrínseco en o sobre la corteza terrestre, en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica (USGS, 1976).

Reservas: son una parte de los recursos identificados que pueden extraerse económicamente (USGS, 1976).

2.5. Operacionalización de Variables

Tabla 7. Variables, subvariables e indicadores

VARIABLE		DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	SUBVARIABLE	INDICADORES	SOFTWARE Y HERRAMIENTA GEOESTADÍSTICA
Independiente	Modelo geometalúrgico	Representación idealizada de manera gráfica o esquemática de una realidad, que permite organizar y difundir de manera clara y concisa los elementos, procedimientos y formulismos matemáticos que involucran un todo. Se emplea para estudiar fenómenos complejos, como los procesos geológicos de mineralización (Dominy et al., 2018).	Consiste en una representación esquemática para integrar la litología característica de cada unidad geológica, sistemas de fallas y elementos traza de análisis geoquímicos, lo que involucra formulismo de geoestadística determinística para definir anomalías de elementos pathfinders y elementos perjudiciales en los procesos de recuperación metalúrgica.	Geología	Unidades litológicas.	ArcGIS y CoDaPack
				Sistemas de fallas	- . Fallas cartografiadas. - . Fallas definidas mediante teledetección.	ArcGIS
				Elementos geoquímicos	37 elementos químicos (ppm).	CoDaPack: transformación log-cociente clr, la cual se fundamenta en la expresión $clr(x) = \left[\ln \frac{x_1}{g(x)}, \dots, \ln \frac{x_D}{g(x)} \right]$, donde la función $g(x) = \sqrt[D]{x_1 \dots x_D}$ corresponde a la media geométrica de las D partes de los elementos geoquímicos (x) (Aitchison, 1986).
				Metalurgia	- . Elementos perjudiciales en planta de procesos (ppm). - . Elementos de interés económico (ppm).	
Dependiente	Exploración de recursos minerales	Es la fase inicial de la actividad minera, la cual, permite definir zonas potenciales para la localización de yacimientos minerales. Se clasifica en la prospección empírica, la exploración científica y la exploración de información (Zuo, 2021).	Este trabajo se basa en la prospección geoquímica que se deriva de la exploración de información, y se fundamenta en el análisis del enriquecimiento/agotamiento de elementos químicos en las proximidades de depósitos minerales, por lo tanto, las anomalías definidas de las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales están representadas en planos de isógradas y la geología.	Información integrada	- . Correlación geológica con los elementos geoquímicos. - . Asociaciones y relaciones de elementos de interés económico (ppm). - . Asociaciones multivariantes de elementos pathfinders (ppm). - . Asociaciones multivariantes de elementos perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación (ppm).	CoDaPack, Isatis y ArcGIS: Transformación log-cociente ilr e interpolación mediante Kriging Ordinario.

2.6. Matriz de Consistencia

Tabla 8. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	SUBVARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
General	General	General	Independiente: Modelo geometalúrgico	Geología	Unidades litológicas	Tipo y diseño de la investigación. Tipo: investigación aplicada Enfoque: Cuantitativo Alcance: Correlacional Diseño: No experimental Unidad de Análisis Zona prospectiva ubicada al NW del Ecuador, entre los poblados de La Merced de Buenos Aires al S y Río Verde al N. Población: Conjuntos de 37 elementos geoquímicos en ppm. Tamaño de muestra: 448 muestras de sedimentos fluviales. Selección de muestra: no probabilístico, juicio de expertos Técnicas de recolección de datos: la documentación y Sistemas de Información Geográfica. Etapas: 1. Recolección de datos. 2. Normalización de los datos geoquímicos respecto al Mn y el Fe. 3. Procesamiento y análisis composicional de los datos. 4. Análisis geoestadístico, validación, interpretación y discusión de resultados (ver Anexo 4).
¿En qué medida influye un modelo geometalúrgico en la exploración de recursos minerales?	Proponer un modelo geometalúrgico para la exploración de recursos minerales.	Un modelo geometalúrgico influirá en la exploración de recursos minerales.		Sistemas de fallas	- . Fallas cartografiadas - . Fallas definidas mediante teledetección	
				Elementos geoquímicos	37 elementos (ppm).	
				Metalurgia	Elementos perjudiciales en la planta de procesos. Elementos de interés económico.	
Específicos	Específicos	Específicas	Dependiente: Exploración de recursos minerales	Información integrada	Correlación geológica-estructural con los elementos geoquímicos.	
- ¿Qué asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación se pueden determinar a partir de datos geoquímicos? - ¿Cuál es el modelo geometalúrgico planteado en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) para la exploración de recursos minerales?	- Determinar asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación a partir de datos de análisis geoquímicos. - Plantear un modelo geometalúrgico en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) para la exploración de recursos minerales.	- Las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación se determinarán a partir de datos de análisis geoquímicos. - El modelo geometalúrgico planteado en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) mejorará la exploración de recursos minerales.			Asociaciones multivariantes de indicadores Pathfinders. Asociaciones de elementos de interés económico. Asociaciones multivariantes de elementos penalizantes y perjudiciales en los procesos metalúrgicos.	

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y Diseño de la Investigación

El presente trabajo de tesis corresponde a un tipo de investigación aplicada, en el cual, se han considerado conocimientos teóricos y metodologías estadísticas sistemáticas para disminuir las problemáticas relacionadas al procesamiento de datos y que afectan la exploración de yacimientos minerales.

Además, considerando la naturaleza de la información y datos disponibles, el enfoque que más se adapta a las características de este trabajo es el cuantitativo; de acuerdo a Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), este enfoque implica datos numéricos producto de mediciones o estimaciones, y provee la posibilidad de repetición de procesos y facilita la comparación entre resultados de trabajos de investigación similares. Por lo cual, se ha evaluado cuantitativamente la base de datos de elementos geoquímicos mediante técnicas geoestadísticas, adicionalmente, se ha tratado datos geológicos y metalúrgicos de zonas mineralizadas conocidas para validar los resultados de las estimaciones multielementales mediante un riguroso análisis comparativo.

En este contexto, se ha recurrido a un diseño de investigación no experimental, por lo cual, la información geológica, los datos geoquímicos de 448 muestras de sedimentos fluviales y los datos metalúrgicos de recuperación no se han modificado, si no que se evaluaron tal como se obtuvieron de las fuentes de origen. El nivel es correlacional, ya que se busca una correlación entre las dos variables de estudio, teniendo como fin estudiar la influencia de la geometalurgia en las labores de exploración de recursos minerales. Además, la investigación es transversal debido a que la información (o datos) del objeto o fenómeno de estudio se obtuvieron por única vez en un lapso determinado; en tal sentido, se ha buscado determinar evidencias a favor o en contra de la hipótesis planteada en función a la problemática de investigación. Lo antes descrito concuerda por lo dicho por Hernández-Sampieri y Mendoza (2018).

3.2. Unidad de Análisis

La unidad de análisis de esta investigación corresponde a una zona mineralizada ubicada al N de la Cordillera Occidental del Ecuador en la provincia de Imbabura, donde destacan los poblados de La Merced de Buenos Aires al S y Río Verde al N (ver siguiente Figura).

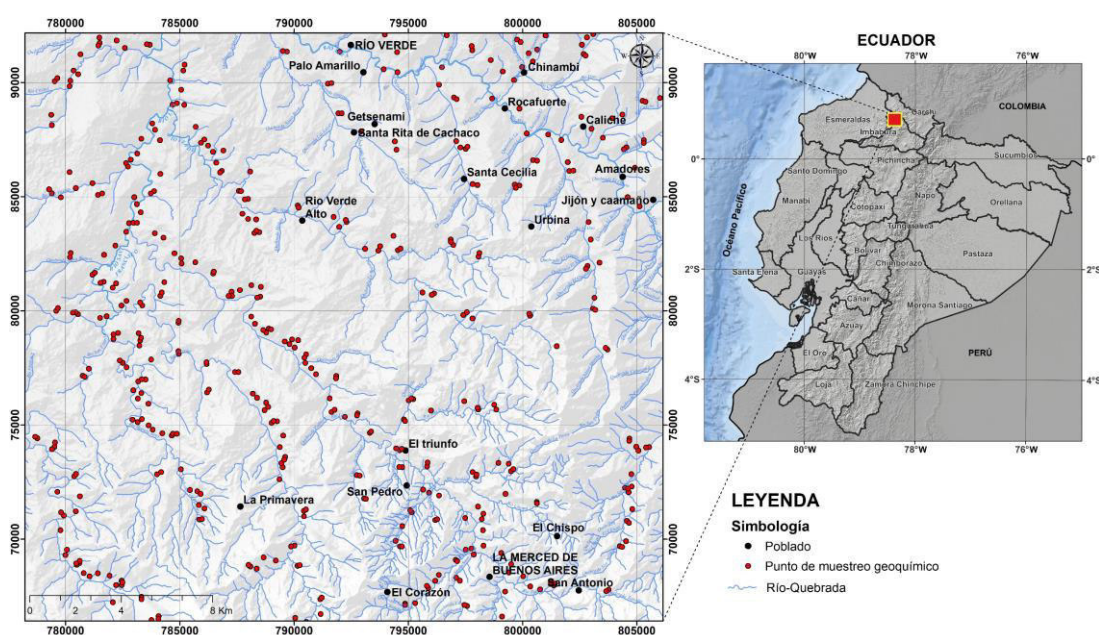


Figura 4. Ubicación del área de estudio. Los puntos de color rojo representan la distribución espacial de las muestras de sedimentos fluviales tomadas a lo largo de la zona de estudio.

3.3. Población de Estudio

Corresponde a un conjunto 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. Los cuales pertenecen a las mediciones geoquímicas realizadas en muestras de sedimentos fluviales provenientes de la zona de estudio ubicada al NW del Ecuador entre los poblados La Merced de Buenos Aires y Río Verde. Los datos geoquímicos se han obtenido de CODIGEM & BGS (2000).

3.4. Tamaño de Muestra

El tamaño de la muestra para la presente investigación fue de 448 muestras de sedimentos fluviales correspondientes a los afluentes de las microcuencas principales de la zona de estudio ubicada al NW del Ecuador, la distribución espacial de cada muestra se aprecia en la Figura 4.

3.5. Selección de Muestra

La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico, es decir a conveniencia del juicio de expertos. A continuación, se describen los criterios de selección:

- Exclusión de valores atípicos de los resultados de laboratorio de las 448 muestras mediante la evaluación estadística, así como también de algunos elementos con el mismo valor de concentración en todos los puntos del espacio.
- Inclusión de información litológica a cada muestra a partir de la cartografía geológica escala 1: 50 000 de la zona de estudio.

3.6. Técnicas de Recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos fueron, la documentación y Sistemas de Información Geográfica:

- Documentación y análisis bibliográfico: prospección y obtención de información metalúrgica mediante tablas de asociaciones de elementos que influyen en los procesos de recuperación metalúrgica; así como también, la adquisición de datos geológicos y metalúrgicos de yacimientos minerales de la zona de estudio, y la obtención de información teórica a partir de bases de datos como Scopus, Web of Science, 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>).

3.7. Análisis e Interpretación de la Información

El análisis y procesamiento estadístico de los datos geoquímicos se realizó con Excel y el software estadístico CoDaPack, y la evaluación geoestadística se efectuó con el software Isatis. Los resultados se interpretaron mediante los criterios teóricos y empíricos sobre los planos de anomalías correspondientes a elementos o asociaciones de elementos pathfinders de yacimientos metalíferos, y planos de anomalías de asociaciones de elementos perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación; para ello, también ha sido fundamental la aplicación de softwares de Información Geográfica (ArcGIS y Qgis). En resumen, en el Anexo 4 se tiene un esquema concreto del procesamiento y análisis de los datos, y validación de resultados.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Estudio geológico

La litología de la zona de estudio se ha constreñido de acuerdo al tipo de roca sin mayor relevancia en dataciones o edades geológicas, con la finalidad de asociar cada punto de muestreo geoquímico a las Unidades Litológicas establecidas. Por lo cual, en la Figura 5 se tiene: lavas basálticas, y rocas sedimentarias de origen marino (Kvss); volcánicos andesíticos, y rocas sedimentarias marino/continentales (PcEOMvss); volcánicos andesíticos (MPlv); depósitos resientes no consolidados (QA); cuerpos de pórfido andesítico (PA) e intrusivos granodioríticos/dioríticos (GdD). Por otra parte, también se cuenta con un tren estructural con dirección predominante NE-SW, con fallas y fracturas en sentido NW-SE; asimismo, se ha interpretado lineamientos y fallas a partir del relieve topográfico obtenido de una imagen DEM con 12.5m de resolución, por lo cual, se infiere la existencia de una alta actividad tectónica.

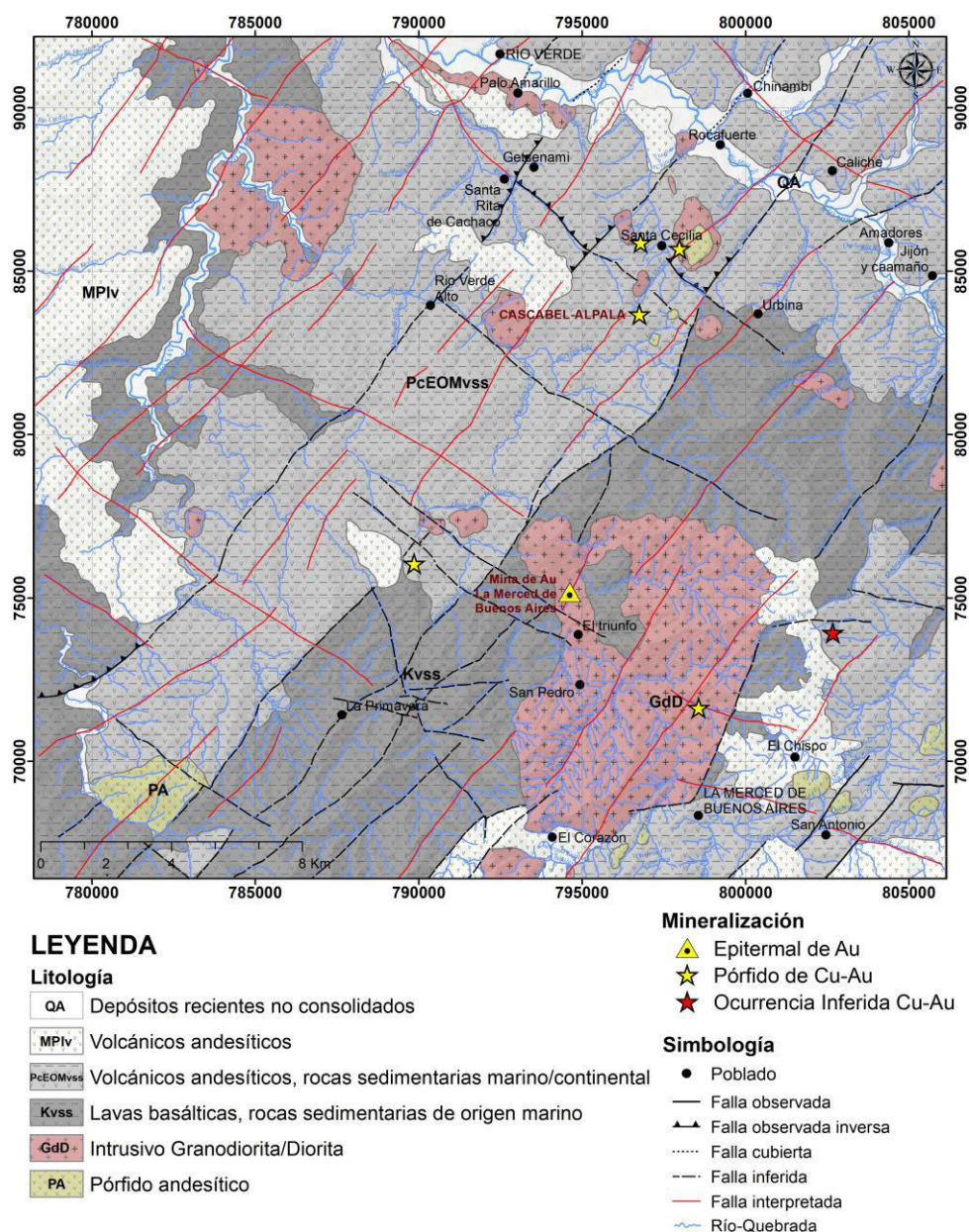


Figura 5. Mapa litológico y estructural simplificado del área de estudio.

En el sector Alpala (ver Figura 6), se tiene un comportamiento estructural similar al sistema de fallas principal del área de estudio con un rumbo N60°. Adicionalmente, con los resultados del análisis estereográfico de las concentraciones de las mediciones estructurales de fracturas en afloramientos de superficie y en núcleos de perforación realizadas en el depósito tipo pórfido de Cu-Au de Cascabel-Alpala por parte de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2021), se ha definido dos

trenes estructurales secundarios con dirección N17° y N150°. Este comportamiento estructural, probablemente ha sido fundamental en el origen y evolución de las ocurrencias de mineralización, específicamente en los cruces entre estructuras tecto-magmáticas en presencia de cuerpos intrusivos, porfiríticos y vetiformes. Por lo cual, también destaca la presencia de la mina de Au La Merced de Buenos Aires (ver Figura 5); lo que evidencia un gran potencial minero.

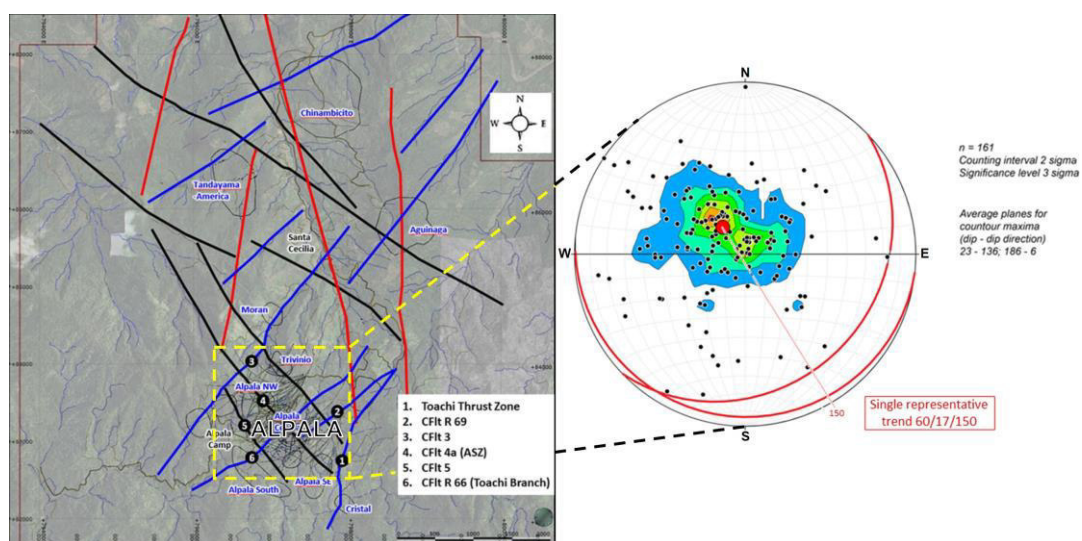


Figura 6. Estructuras locales definidas al rededor del yacimiento de Cascabel-Alpala. En la parte izquierda de la imagen, se tiene el plano de estructuras y sistemas de fallas del Yacimiento de Cascabel-Alpala; las líneas rojas tienen una dirección aproximada N-S, las líneas azules presentan una dirección NE-SW y el rumbo de las líneas negras va en sentido NW-SE. En la parte derecha nótese el análisis estereográfico de 161 mediciones, donde es prominente el rumbo de los trenes individuales más representativos 60/17/150°. *Fuente.* Modificado de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2021).

4.1.2. Estudio petrominerográfico

Los resultados geológicos y estructurales evidencian zonas potenciales de ocurrencias minerales, las cuales se relacionan espacialmente con yacimientos ubicados en la zona de estudio; por ello, se ha considerado la evaluación de datos petrominerográficos de muestras de rocas y la información disponible del yacimiento tipo pórfido de Cu-Au de Cascabel-Alpala, y de la mina de Au La Merced de Buenos Aires. Esto ha permitido hacer la correlación entre la información de la mineralización

de estos yacimientos y los resultados de los planos geoquímicos de pathfinders y elementos perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación.

El cuerpo mineralizado Cascabel-Alpala ha sido estudiado de manera detallada previo a la etapa de construcción por SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2021), por ello, se cuenta con una caracterización litológica y mineralógica definida. En la Figura 7 se tiene tres muestras de núcleos de perforación, en la Figura 6a y 6c es prominente la mineralización de Calcopirita (Cpy); en la Figura 6b se tiene sulfuros de Cu como Calcopirita y Bornita (Bn) asociados a Pirita (Py).

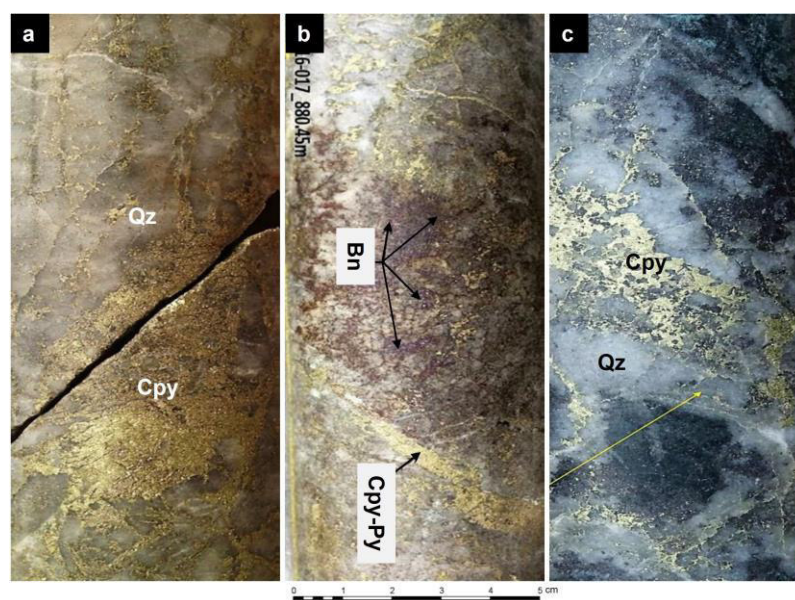


Figura 7. Muestras de núcleos de perforación del cuerpo mineralizado Cascabel-Alpala. a) núcleo de perforación con mineralización de Cpy y Cuarzo (Qz). b) Muestra de un núcleo con presencia de sulfuros de Cu como, Cpy y Bn asociados a Py. c) Núcleo de roca con mineralización de Cpy y Qz. Fuente. Modificado de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2019).

Mediante Técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), se ha definido una mineralización primaria de Cpy y Bn, además, se tiene Py en todas las muestras provenientes del pórfido. De acuerdo a SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2021), la Magnetita (Mgn) primaria ha sido transformada a Hematita y Py debido a eventos de alteración por la evolución del sistema, y la mineralización de Au eléctrum (con contenido de Au entre 65 y 80%, Ag >20%) se presenta en granos

discretos con diámetros desde 1 a 50 μ m asociados a sulfuros, Silicatos (Qz), Anhidrita (Anh) y Rutilo (Rtl) (ver Figura 8).

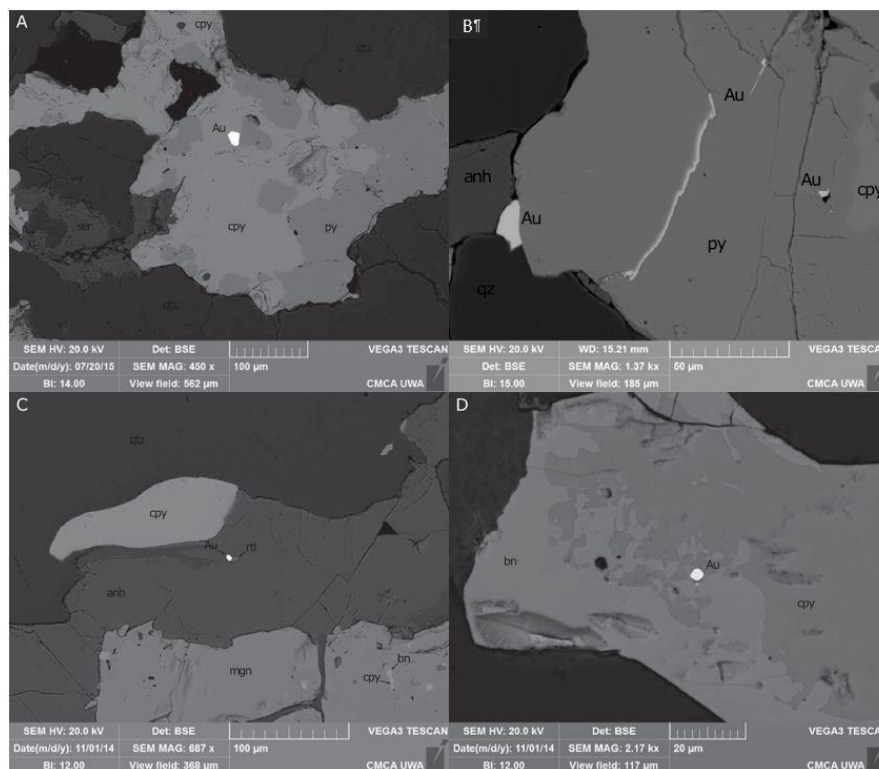


Figura 8. Imagen SEM-BSE de mineralización de sulfuros, Au electrum y minerales ganga. A) grano de Au electrum (tamaño de 18 μ m) contenido en Calcopirita (cpy) en contacto con Pirita (py), sobre una matriz de Cuarzo (qz). B) Au electrum (tamaño de 15 μ m) asociado a Anhidrita (anh) y qz, Au contenido en una microfractura sobre la py. C) Au electrum (tamaño de 5 μ m) formado sobre la anh asociado a Rutilo (rtl), también se presentan de forma adyacente cpy, Bornita (bn), Magnetita (mgn) y qz. D) Au (tamaño de 3.5 μ m) contenido en cpy, con minerales adyacentes como, bn y qz. BSE se refiere a imágenes de composición química mediante electrones retrodispersados. Fuente. Tomado de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2021, p. 126).

Por otra parte, Ichau (2019) ha realizado un análisis de muestras de roca de la mina de Au La Merced de Buenos Aires mediante Difracción de Rayos X (DRX); en la cual, se evidencia la presencia de minerales de Au (Figura 9), y Au nativo; consecuentemente, esto implica el manejo de Au refractario o fino en la planta de procesos, donde la forma metalúrgica más adecuada de tratar estos minerales para su recuperación, es la lixiviación. Sin embargo, para la definición clara y precisa de

minerales auríferos es necesario un estudio semicuantitativo mediante microscopía electrónica de barrido con analizador de energías (SEM/ESEM-EDS).

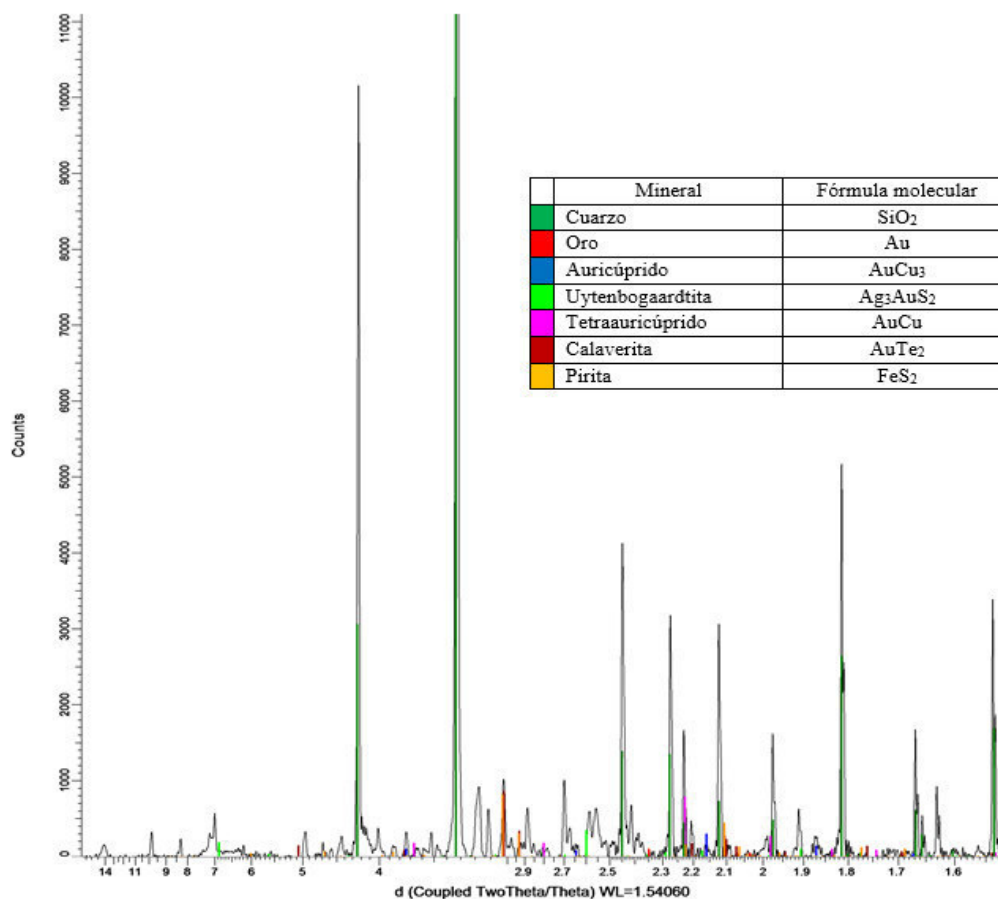


Figura 9. Difractograma de una muestra de roca pulverizada de la mina La Merced de Buenos Aires. Representación gráfica del espectro “counts” o intensidad en función del ángulo 2θ obtenida con un equipo de DRX, donde se resalta la presencia de minerales de Au tales como la Calaverita y el Tetraauricúprido, entre otros. *Fuente.* Tomado de Ichau (2019, p. 58).

4.1.3. Estudio geoestadístico

4.1.3.1. Análisis composicional de los datos. Se analizaron los 37 elementos correspondientes a las 448 muestras de sedimentos fluviales, con la finalidad de normalizar los datos para la evaluación estadística y la conformación de grupos multivariantes de elementos *pathfinders* y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación.

La normalización de los datos se realizó en función del Fe (derivado del FeOOH) y del Mn (producto del MnO₂), considerando el alto potencial de Óxido-redox de estos elementos, por lo tanto, cuando estos compuestos químicos precipitan en la naturaleza, tienden a atrapar otros cationes presentes generando concentraciones anómalas erráticas (Chao & Theobald, 1976; Hein et al., 2013). El Mn representa el divisor para el Zn, Ni, Ti, Ba, Cd, Co y la Σ REE (conformada por la sumatoria de Y y Sc), mientras que los elementos Pb, Hf, Th, Te, Mo, U y Σ REE han sido divididos para el Fe. Los resultados de las transformaciones *clr* e *ilr* han permitido definir vectores de los elementos que guardan mayor correlación entre sí, representados gráficamente en un biplot; además, se ha integrado las unidades litológicas dentro del análisis vectorial de los elementos para establecer correlaciones en el espacio tridimensional *ilr*.

En la Figura 10a se visualiza el comportamiento de los vectores de cada elemento, en donde los vectores con mayor longitud aportan con más información al estudio, y los vectores de elementos perpendiculares entre sí tienen una mayor correlación. El vector del Au y el Zr son los más representativos, y elementos como el Cu, Cd, Pb, Nb y el Mn tienen una buena correlación con el Au. En la Figura 10b se ha relacionado la litología con los vectores elementales, sin embargo, no se tiene clústeres de puntos litológicos representativos, esto ha limitado la asociación de vectores de elementos con la geología.

Con los datos del biplot se ha definido las correlaciones de clases o elementos principales (PC) (ver Anexo 3); en tal sentido, la curva de la Figura 11 indica que las 10 primeras agrupaciones de PC, aportan con mayor información; por lo cual, en base a los criterios de elementos pathfinders y elementos perjudiciales en los procesos de recuperación metalúrgica, se definieron las siguientes relaciones: PC1: (Pb+Au+As)/Zr, PC2: Ni/Au, PC3: Ni/Hg, PC7: Pb/As y PC10: Pb/Hg; donde PC1 y PC2 tienden a asociarse como pathfinders de depósitos auríferos; PC7 y PC10 corresponden a relaciones de elementos perjudiciales en los procesos de recuperación metalúrgica, y PC3 se ha interpretado como una relación de elementos exploratorios o nocivos en dichos procesos recuperativos.

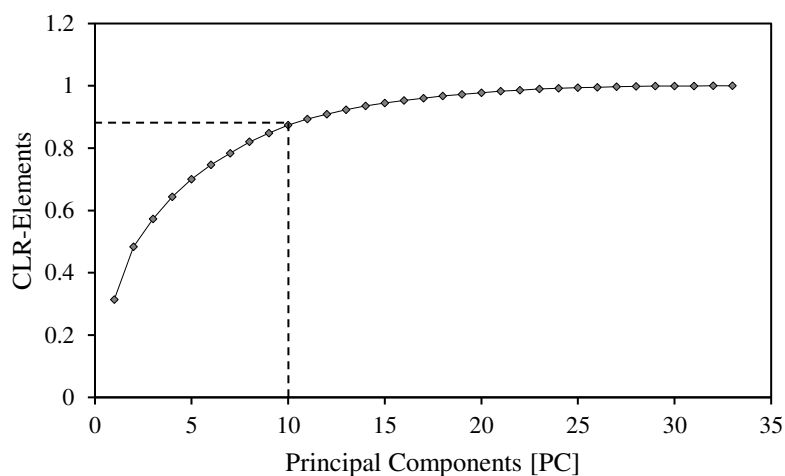


Figura 11. Gráfica de clases de Componentes Principales acumulados. En la curva de PC en función de los elementos clr se interpreta que la información más representativa está entre PC1 y PC10, debido a que de PC10 en adelante dicha curva manifiesta un comportamiento asintótico.

En el Análisis de Clústeres del Dendograma de la Figura 12, se evidencia la asociación de 4 grupos de elementos, el primero contiene a los elementos principales de Au-Ag estrechamente relacionados con el Cu, lo que sugiere la presencia de mineralización de tipo pórfido de Cu-Au; el segundo grupo se conforma de Zn-Pb que se relacionan con depósitos polimetálicos de metales base; el tercer grupo presenta los elementos Ni-Mo, como pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au-Mo; el cuarto grupo se conforma de los clústeres Hg-Sb y As-Zr, los cuales corresponden a elementos pathfinders y perjudiciales que afectan los procesos metalúrgicos de recuperación, y pueden penalizar los concentrados. Además, el subgrupo de K y Na es un importante indicador de mineralización de Cu.

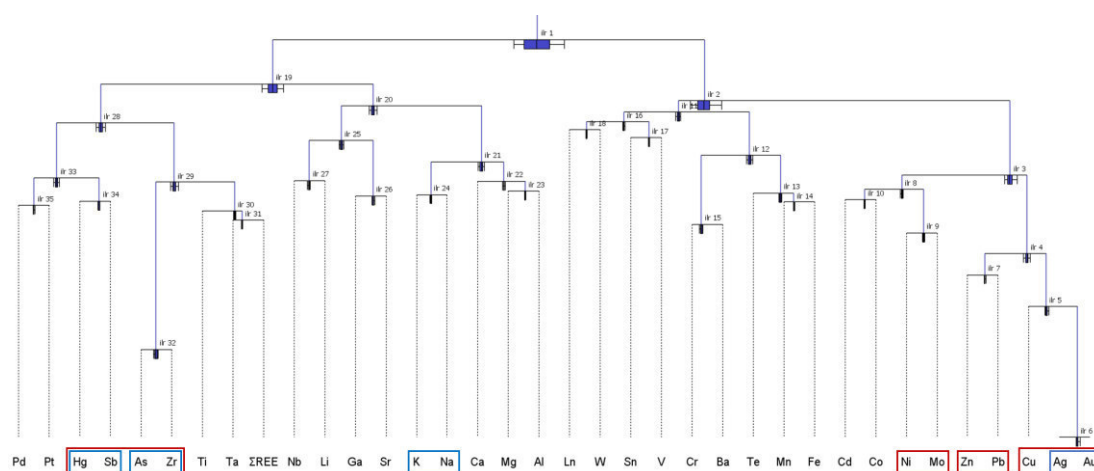


Figura 12. Dendrograma de clústeres del balance de los datos geoquímicos de los 37 elementos. Los clústeres conformados son coherentes con los datos bibliográficos de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos de recuperación metalúrgica, además, son importantes vectores del tipo de mineralización de la zona de estudio. Los rectángulos de color azul corresponden a los subgrupos y los de color rojo contienen a los grupos de elementos evaluados.

Boatner (2002), afirma que los elementos de REE como el Y y Sc pueden estar contenidos en los fosfatos conformando los grupos monacita o xenotima, por lo cual, se ha evaluado posibles asociaciones desde una perspectiva económica, sin embargo, con los resultados de los análisis anteriores no se ha encontrado correlaciones o clústeres representativos.

Por otra parte, considerando los datos de todos los elementos geoquímicos normalizados mediante la transformación clr, se obtuvo los coeficientes de correlación de Pearson (Rho), los mismos que toman valores entre -1 y 1 (ver Anexo 2). Los valores >0.5 entre dos elementos representan una mejor correlación, por ejemplo, la relación Pb/Zn (Rho: 0.6) como pathfinders de metales preciosos/base, y Pb/Cd (Rho: 0.6) como elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación de Au (Tabla 9). En este estudio no se han considerado coeficientes con valores negativos, sin embargo, estos valores pueden ser importantes vectores de mineralización en estudios de exploración. De acuerdo con los análisis anteriores, los resultados se han clasificado en grupos y relaciones multielementales, los cuales se resumen en la siguiente Tabla.

Tabla 9. Categorización de asociaciones y relaciones multielementales

Herramienta de análisis	Asociación y/o relación de elementos	Categorización
CP-clr	(Pb+Au+As)/Zr	Pathfinders-pórfido de Cu, Au
CP-clr	Ni/Au	Principales o pathfinders
CP-clr	Ni/Hg	Pathfinders/perjudiciales
CP-clr	Pb/As	Pathfinders/perjudiciales
CP-clr	Pb/Hg	Pathfinders/perjudiciales
Dendograma-ilr	Cu, Au, Ag	Principales o económicos
Dendograma-ilr	Zn, Pb	Pathfinders/perjudiciales
Dendograma-ilr	Ni, Mo	Pathfinders/principales
Dendograma-ilr	Hg, Sb, As, Zr	Pathfinders
Pearson's Rho (0.6)*	Pb/Zn	Pathfinders-metales preciosos/base
Pearson's Rho (0.6)*	Pb/Cd	Perjudiciales/penalizantes
Pearson's Rho (0.6)*	Pb/Te	Perjudiciales-lixiviación de Au
Pearson's Rho (0.7)*	Ag/Sb	Pathfinders

CP-clr indica el análisis de los Componentes Principales mediante la transformación clr de los datos. **Dendograma-ilr** se refiere al análisis jerárquico de clústeres de elementos con la transformación ilr. **Pearson's Rho** representa el coeficiente de correlación entre dos elementos.

(--)* Contiene el valor de correlación Rho de Pearson entre 0.5 y 1 (ver Tabla 22).

Considerando los resultados del análisis composicional anterior, datos de estudios con bases científicas y un enfoque de pathfinders y elementos nocivos que perjudican los procesos metalúrgicos de recuperación, se definió 4 grupos de elementos (ver Tabla 10). Con el algoritmo de la transformación ilr multivariable aplicado a cada asociación multielemental mediante el software de CodaPack, se obtuvo la base de datos para el análisis geoestadístico.

Tabla 10. Asociaciones multivariantes de elementos mediante criterios de exploración y metalúrgicos

Clasificación	Asociación multivariable	Descripción
Pathfinders de Pórfido de Cu-Au	Ag, As, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, W y Zr	Existen anomalías cartografiadas 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.

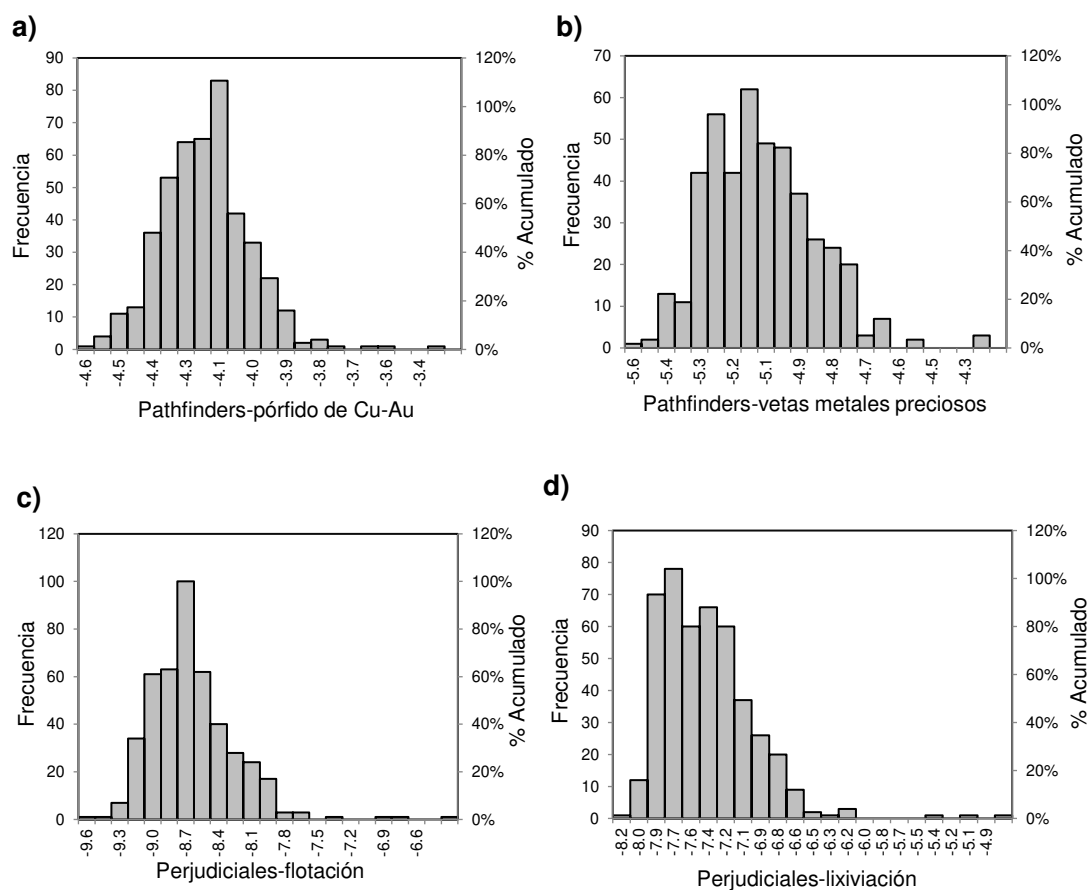
4.1.3.2. Estadística descriptiva. Se ha realizado el análisis estadístico a la base de datos conformada por las cuatro asociaciones multielementales (ver Tabla 10) mediante las herramientas de los softwares ISATIS y Excel, en tal sentido, se ha obtenido las respectivas medidas estadísticas representadas en la siguiente Tabla.

Tabla 11. Comportamiento estadístico de los datos multivariantes

Medida	Pathfinders- pórfido de Cu-Au	Pathfinders- 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

El histograma de cada grupo multielemental se ha realizado en base a los datos estadísticos, y de acuerdo con el conteo de 448 muestras se tiene un rango de 21 clases. El análisis de cada histograma evidencia una buena distribución de los datos (ver Figura 13), lo que indica la importancia de la normalización mediante la transformación multivariable *ilr*. Los histogramas de la Figura 13a y 13c correspondientes a los grupos de elementos pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au y perjudiciales en los procesos de flotación respectivamente, presentan poca variabilidad respecto a la media aritmética. Por otra parte, el histograma de la

asociación de elementos pathfinders para vetas de metales preciosos (Figura 13b) y de elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación (Figura 13d), evidencian un comportamiento bimodal, no obstante, la variabilidad no es representativa, por lo que ha sido factible el análisis geoestadístico en un solo conjunto.



4.1.3.3. Variografía. Los variogramas para cada asociación multivariable de elementos provenientes de datos geoquímicos, se realizaron con el software Isatis. La anisotropía se analizó en dos direcciones, es decir, una dirección predominante sobre el plano variográfico y una dirección perpendicular a esta; lo que ha permitido definir la dirección tentativa del variograma experimental. Los planos de las 4 secciones de la Figura 14 sugieren un sector angular en dirección NE-SW con su respectivo plano perpendicular; no obstante, el plano principal de la Figura 14b tiene un ángulo menor con respecto al N, esta dirección es similar al rumbo del sistema de fallas secundario representado en la Figura 6, por lo cual, puede existir cierta correlación entre las asociaciones multielementales y la parte estructural.

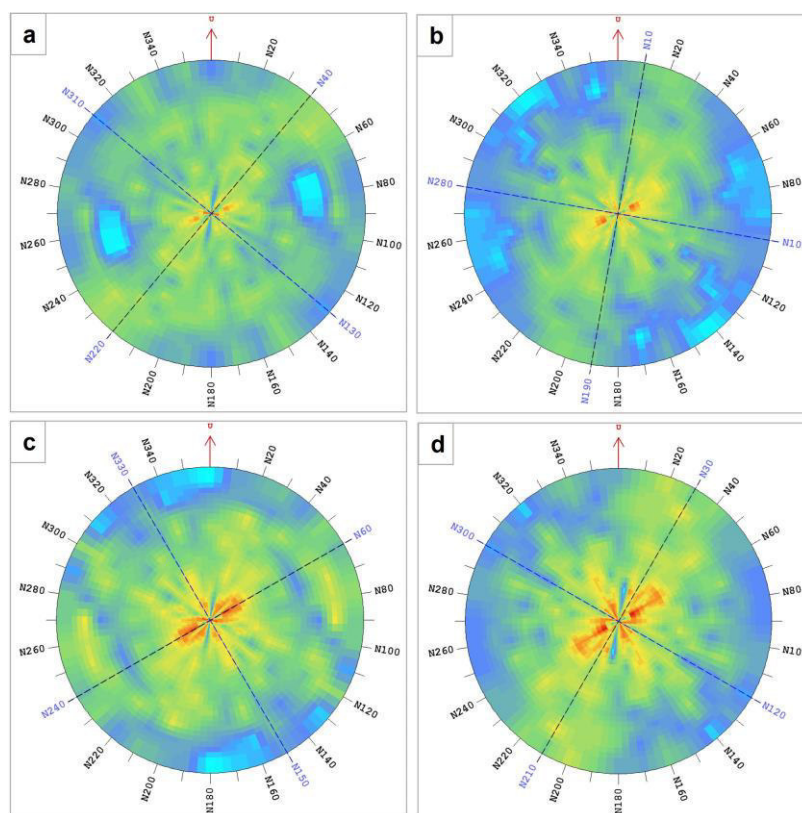


Figura 14. Planos variográficos de las asociaciones multivariables de elementos geoquímicos. Las secciones de la Figura a, c y d presentan planos con tendencias anisotrópicas similares en sentido NE-SW, el plano b tiene una tendencia cercana a la dirección N-S. Nótese que en todos los casos se presenta sus respectivos planos perpendiculares. Los planos representativos están remarcados con líneas entrecortadas de color negro.

El variograma experimental se ha ajustado a un variograma teórico para cada grupo multielemental, de esta forma se ha obtenido un modelo de variograma exponencial para elementos pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au con una dirección de anisotropía N128° (ver Figura 15a), el cual es perpendicular al sistema de fallas principal con dirección NE-SW. El modelo de variograma para pathfinders de vetas de metales preciosos (Au-Ag) representado en la Figura 15b es de tipo esférico con una dirección predominante N102°, y presenta un comportamiento similar al variograma anterior. 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 15c y 15d), lo que sugiere una tendencia similar a los variogramas de elementos pathfinders antes descritos.

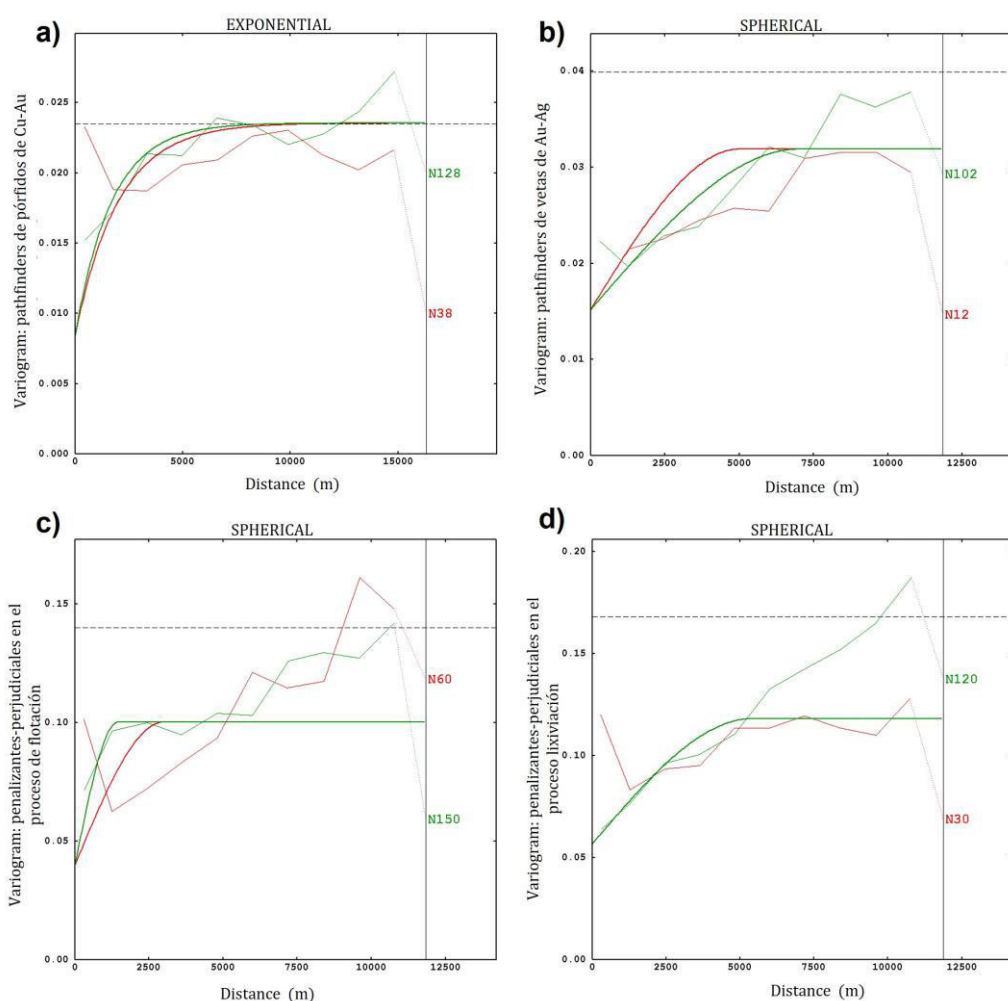


Figura 15. Modelos de variogramas definidos para las asociaciones multielementales. La parte **a)** corresponde a un modelo de variograma teórico de tipo exponencial, y toma una dirección N128°. **b)** Nótese el variograma de tipo esférico con dirección preferencial N102°. **c)** Se tiene un variograma teórico tipo esférico con dirección N150°. **d)** El variograma que se ajusta al modelo experimental es de tipo esférico con dirección principal N120°. En los cuatro casos de estudio los variogramas ajustados de color verde son los más representativos.

En la Tabla 12 se resumen las características y los datos variográficos más importantes para los cuatro modelos propuestos, además, de acuerdo al análisis de ajuste entre el variograma experimental y el variograma teórico se ha definido el modelo de variograma de cada grupo multielemental para realizar la estimación de Kriging Ordinario. Asimismo, dentro de la validación de los resultados, se ha tomado en cuenta el coeficiente de correlación producto de la validación cruzada entre las observaciones o valores reales (Z) y los valores estimados (Z^*).

Tabla 12. Resumen de las características variográficas de cada grupo multielemental

Característica	Pathfinders- pórfido de Cu-Au	Pathfinders-vetas de metales preciosos Au-Ag	Perjudiciales- s-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

Nota: para definir la dirección anisotrópica del modelo de variograma final para cada grupo multielemental, se ha considerado el plano que mejor se ajusta a un modelo teórico. (Z) Representa los valores reales y (Z*) indica los valores estimados.

Mediante la estimación de Kriging Ordinario en función de los modelos variográficos se ha obtenido los planos de anomalías para las asociaciones multivariantes de elementos geoquímicos, los cuales han sido clasificados de acuerdo con la media y la desviación estándar para definir los rangos de background, umbral, subanomalía y anomalía (baja/alta). En la Figura 16 se tiene el plano de anomalías correspondiente a pathfinders de depósitos tipo pórfido de Cu-Au, y lo más prominente son las subanomalías relacionadas a zonas mineralizadas tal 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. En la parte SE de la zona de estudio en la microcuenca del Río San Gerónimo sobresale una anomalía baja, lo que sugiere posiblemente la ocurrencia de este tipo de mineralización con potencial prospectivo.

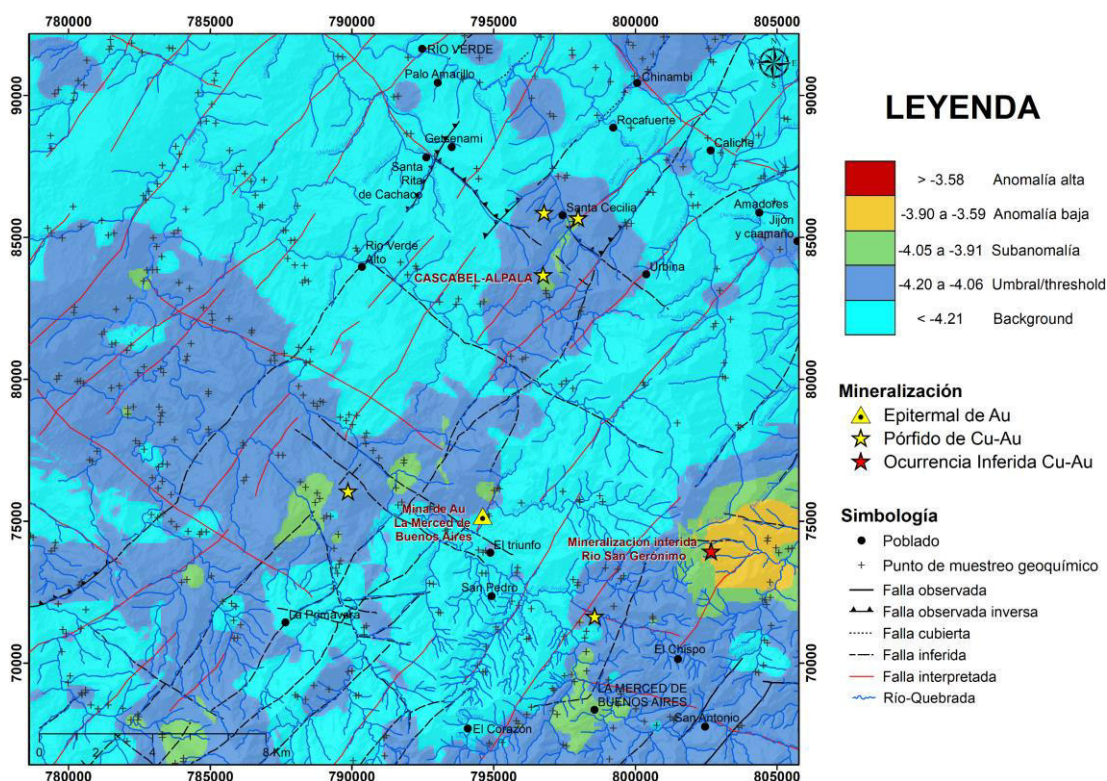


Figura 16. Plano de anomalías geoquímicas de elementos pathfinders para pórfidos de Cu-Au. A lo largo del área de estudio sobresalen subanomalías correspondientes a pathfinders de pórfidos de Cu-Au. El análisis comparativo con la información petromineraográfica del depósito Cascabel-Alpala es coherente con las subanomalías. En la parte inferior derecha del plano geoquímico es prominente la presencia de una anomalía baja.

La Figura 17 corresponde a la asociación multivariable de elementos pathfinders para depósitos de vetas de metales preciosos (Au-Ag), donde se resalta la presencia de una subanomalía en la parte central de la zona de estudio en las cercanías del poblado El Triunfo. Ichau (2019) ha estimado leyes de hasta 57.45 Au g/ton mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (EF-EAA) en muestras de roca provenientes de cuerpos vetiformes cercanos a dicho poblado, donde se ubica la mina informal de Au La Merced de Buenos Aires; esto corrobora la existencia de mineralización de Au-Ag que representa un interés económico. Además, en la parte SE del plano geoquímico se tiene una anomalía baja sobre la microcuenca del Río San Gerónimo, esta característica es similar al plano de la Figura 16.

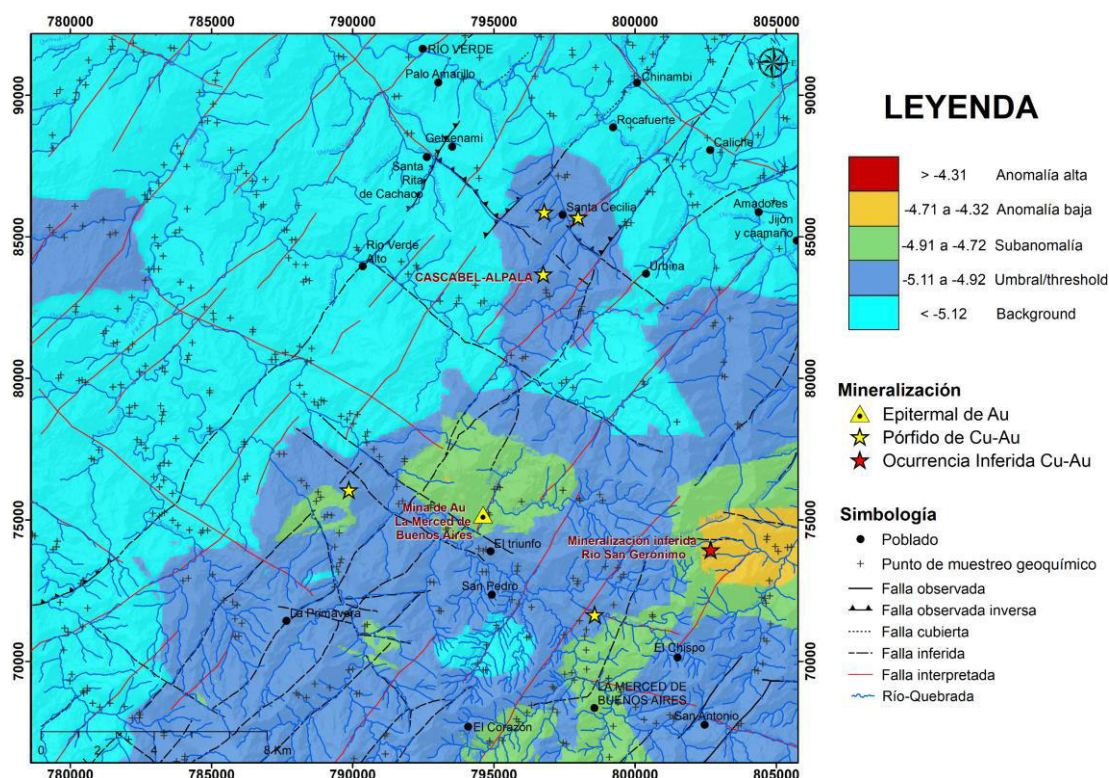


Figura 17. Plano de anomalías geoquímicas de elementos pathfinders para vetas de metales preciosos. El plano geoquímico presenta subanomalías y anomalías representativas desde la parte central hacia el SE, donde una parte subanómala coincide con la presencia de la mina de Au La Merced de Buenos Aires. Además, se tiene una anomalía baja en la cuenca del Río San Gerónimo al SE de la zona de estudio.

En el plano de la Figura 18 concerniente a la asociación de elementos perjudiciales en el proceso de flotación, se tiene una anomalía alta de estos elementos en la parte central y al SE de la zona de estudio, sin embargo, no existen datos bibliográficos que respalden esta interpretación. En consecuencia, toma relevancia la subanomalía presente sobre el poblado de Santa Cecilia, la cual está relacionada directamente con el depósito de Cu-Au-Ag de Cascabel; este depósito se encuentra en la etapa de factibilidad, por consiguiente, SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2019), han definido un Flowsheet (ver Figura 20) que implica la recuperación mineral mediante concentración por flotación.

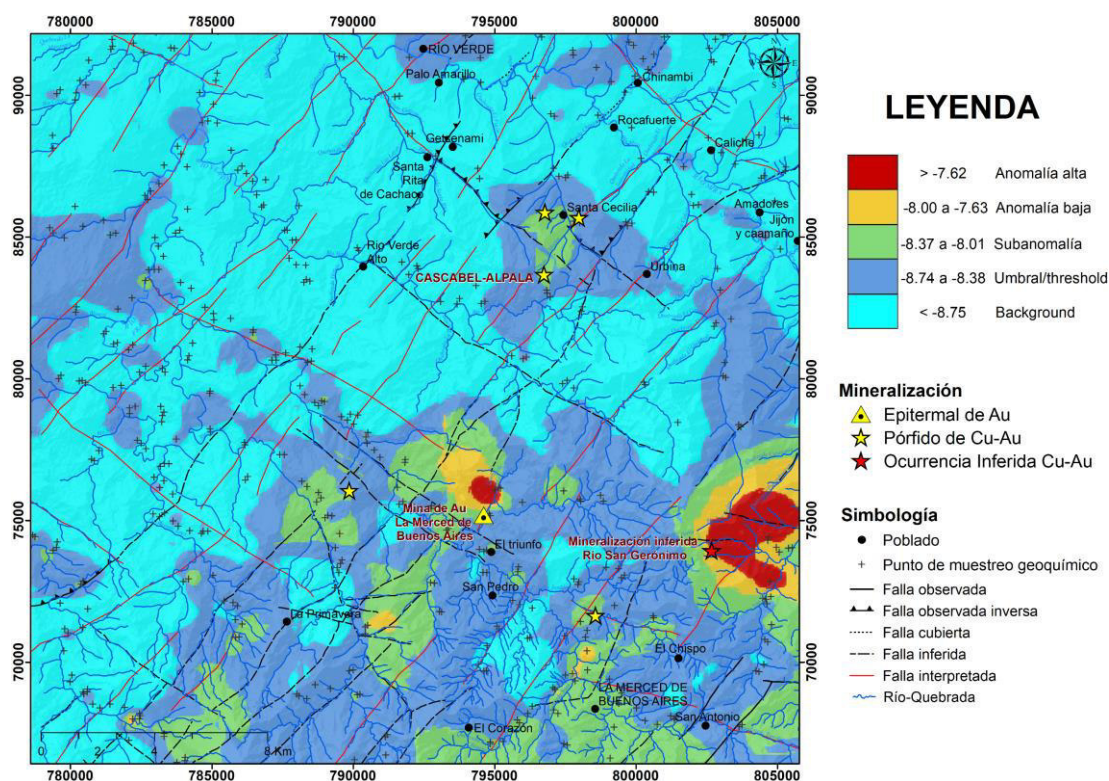


Figura 18. Plano de anomalías geoquímicas para elementos perjudiciales en el proceso de flotación. En la parte central y al SE del plano sobresalen anomalías altas de elementos que perjudican el proceso de flotación, no obstante, en estos puntos no se cuenta con información metalúrgica de yacimientos mineros. En consecuencia, toma relevancia la subanomalía cercana al poblado de Santa Cecilia, donde se localiza el depósito de Cu-Au de Cascabel-Alpala.

El plano de anomalías de la asociación multivariable de elementos geoquímicos que afectan al proceso metalúrgico de lixiviación de metales preciosos (ver Figura 19) 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”.

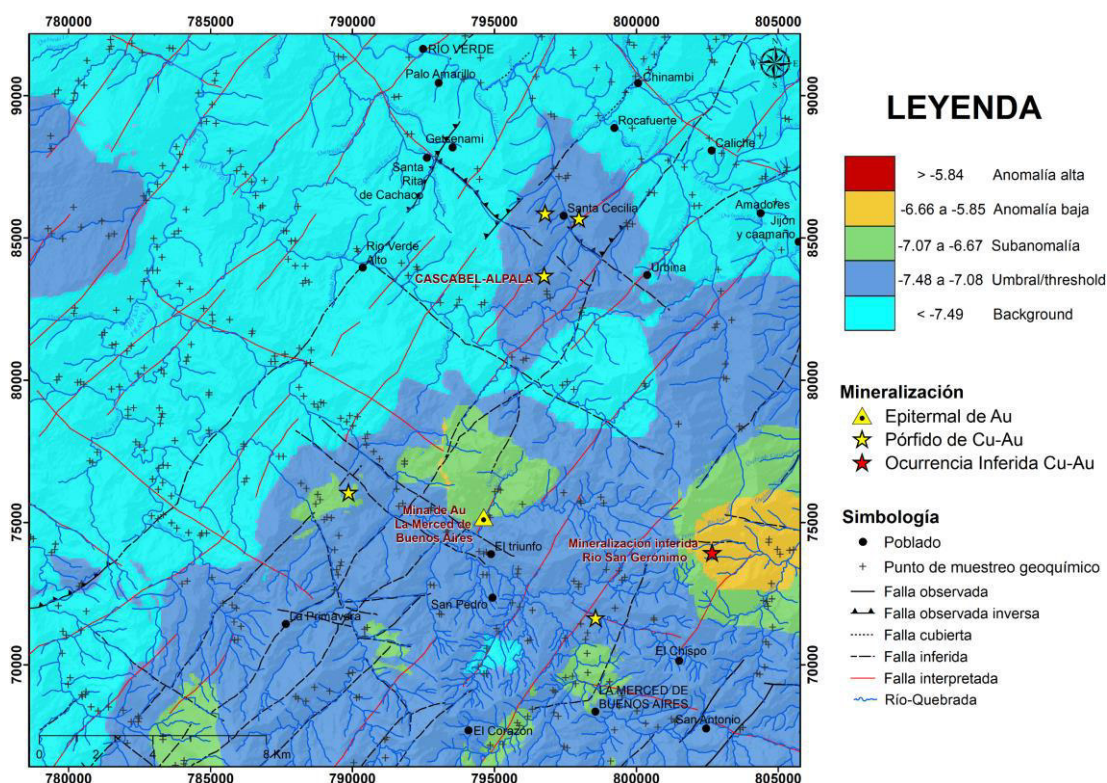


Figura 19. Plano de anomalías de elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación de Au-Ag. En la parte central del plano geoquímico se tiene la presencia de una subanomalía que involucra a la mina de Au La Merced de Buenos Aires. Asimismo, al SE de la zona de estudio sobresale una anomalía baja; este comportamiento anómalo se manifiesta en todos los planos anteriores, lo que sugiere una ocurrencia mineralógica potencialmente prospectiva.

4.1.4. Análisis de datos metalúrgicos

El Flowsheet de flotación de sulfuros de la Figura 20 corresponde al depósito mineral de Cascabel-Alpala, el cual ha sido diseñado para una capacidad de 50 Mt/año considerando tres compósitos definidos en base a la ley de Cu y Au (ver Tabla 13) para proyectar un balance metalúrgico. Se tiene un circuito de molienda mediante molinos SAG y de bolas, y una sección de molienda secundaria para reducir las partículas de P80: 150 μ m a P80: 25 μ m. 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 es filtrado y almacenado, asimismo, el agua producto de la decantación de dicho concentrado y de los relaves es tratada y recirculada al circuito.

Tabla 13. Datos obtenidos de las pruebas de flotación de ciclo cerrado (locked cycle test en inglés)

Parámetro	Unidades	Compósito LC-LG	Compósito IC-HG	Compósito HC-HG
Ley de Cu (Alimento)	% Cu	0.79	1.17	2.03
Ley de Au (Alimento)	g/t Au	0.80	2.29	2.97
Recuperación de Cu	%	86.0	93.2	93.0
Concentrado de Cu	% Cu	28.8	27.6	30.5
Recuperación de Au	%	79.4	79.3	85.2
Au contenido en el concentrado	g/t Au	28.3	46.2	41.0
Cu en el relave	%Cu	0.05	0.04	0.09
Au en el relave (Pirita)	g/t Au	0.07	0.14	0.21

Nota: se ha proyectado un balance metalúrgico en base a 3 compósitos: LC-LG (bajo en Cu-bajo en Au), IC-HG (intermedio en Cu-alto en Au) y HC-HG (alto en Cu - alto en Au). *Fuente.* Información tomada de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2019, p. 39).

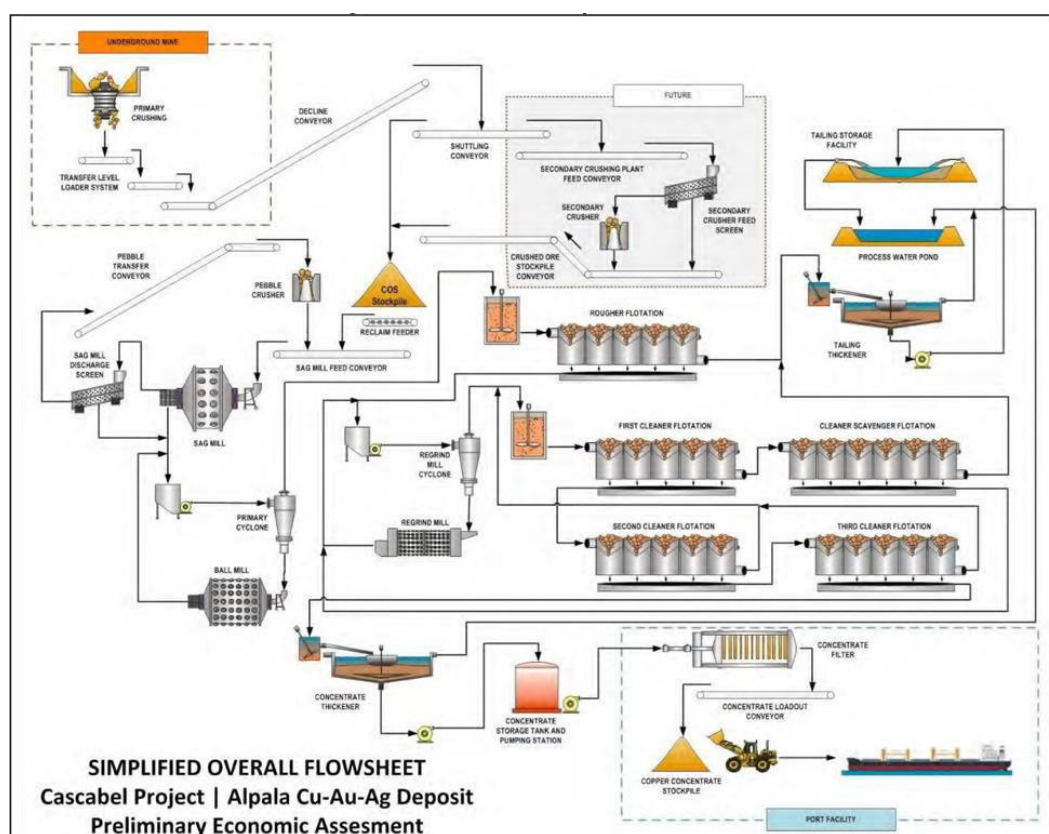


Figura 20. Flowsheet simplificado del proceso de recuperación mineral (proyecto de Cascabel-Alpala).

Fuente. Tomado de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2019, p. 45).

En la Tabla 13 se evidenció cantidades importantes de Au en el relave de Pirita, por ello, es importante el análisis de la factibilidad para el tratamiento de estos relaves con un beneficio económico, asimismo, la mayor recuperación de Cu (93.20%) se obtuvo en el Compósito IC-HG (con leyes en el alimento: 1.17% Cu y 2.29g/t Au). Además, en base a las pruebas metalúrgicas realizadas se ha definido el Grado de Concentrado para los periodos de 1 a 5 y de 1 a 15 años, y para la Vida de la Mina (LOM, *del inglés Life Of Mine*) representados en la Tabla 14, lo que pone de manifiesto la rentabilidad del proyecto en el tiempo.

Tabla 14. Estimación del grado de concentrado de Cu-Au-Ag de Alpala

Producto	De 1 a 5 años	De 1 a 15 años	LOM (55 a 60 años)
Cu (%)	29.0	28.2	26.0
Au (g/t)	26.5	22.1	13.2
Ag (g/t)	67.6	65.7	49.2
Sulfuro (%)	29.3	28.5	26.2

Fuente. Información tomada de SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2019, p. 377).

Adicionalmente, SolGold Plc & Cornerstone Capital Resources Inc (2019) destaca un concentrado de alta calidad sin la presencia significativa de elementos penalizantes, lo que tiene un impacto económico positivo. Sin embargo, es importante tener en cuenta la presencia de dichos elementos considerando las zonas subanómalas definidas en los planos de anomalías de elementos perjudiciales en el proceso de flotación de la Figura 18; asimismo, la posible existencia de otros minerales tales como el Talco que por su flotabilidad natural tiende a contaminar los concentrados, y/o la presencia de arcillas expansivas que pueden atrapar cationes metálicos entre sus espacios intersticiales y causar efectos negativos en la recuperación por flotación.

Asimismo, Ichau (2019) realizó una caracterización mineralógica para optimizar el proceso de extracción de Au 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). Los resultados

más representativos del análisis de la curva % de recuperación en función del tiempo fueron (Figura 21): para el tamaño de partícula de 500 μm , la recuperación fue 98.13%; para un % de sólidos de 35%, se obtuvo una recuperación del 94.76%; y para la concentración de NaCN de 1.5g/L, la recuperación fue 90.5%. Los datos metalúrgicos más importantes se resumen en la Tabla 15; sin embargo, no se ha tomado en cuenta la presencia de elementos perjudiciales en este proceso de lixiviación.

Tabla 15. Datos metalúrgicos obtenidos de las pruebas de lixiviación de Au con NaCN

Parámetro	Resultado-Compósito
Ley de Au (Alimento)	57.45 g/t Au
Recuperación de Au	93.86 %
Contenido de Au (FRX) en lenteja	91.57 %
Relave	1.85 g/t Au

Nota: la cuantificación del contenido de Au en la lenteja del metal resultante se ha realizado por fluorescencia de difracción de rayos X (FRX). *Fuente.* Datos tomados de Ichau (2019).

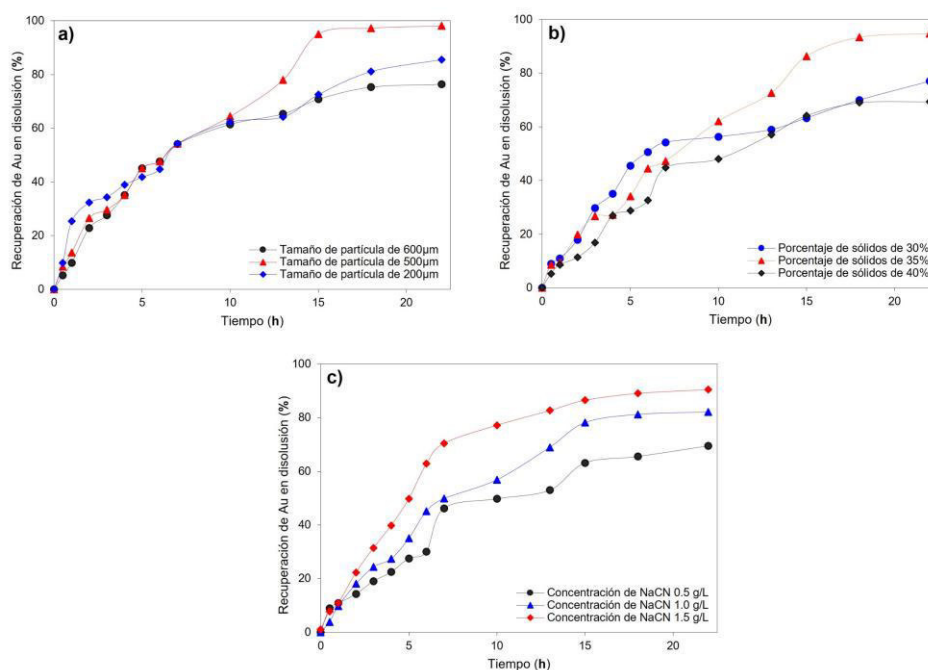


Figura 21. Curvas de % de recuperación en función del tiempo para las variables de estudio. Nótese que las curvas de color rojo indican los mejores resultados con respecto al análisis de las variables de estudio. **a)** Con el tamaño de partícula de 600 μm se obtiene un mayor % de recuperación de Au. **b)** El porcentaje de sólidos del 35% ha producido una mejor recuperación de Au en un tiempo de lixiviación de 22h. **c)** Curva de recuperación de Au con respecto a la concentración de NaCN, en la cual, los mejores resultados se dan a una concentración de 1.5g/L. *Fuente.* Datos tomados de Ichau (2019).

Mediante las pruebas metalúrgicas de lixiviación con NaCN se ha obtenido una recuperación de 93.86% con un contenido de Au del 91.57%, por lo que estos resultados son representativos y se correlacionan con las subanomalías de elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación representadas en el plano de la Figura 19. Además, la ley de cabeza de 57.45 g/t Au es congruente con las zonas anómalas del plano de elementos pathfinders para vetas de Au-Ag de la Figura 17, lo que evidencia zonas potencialmente prospectivas para depósitos vetiformes de metales preciosos. Por lo cual, se asume que los resultados de los planos de anomalías antes descritos son coherentes con los datos de estudios mineros y metalúrgicos de los depósitos metalíferos localizados en el área de estudio.

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados

Según Aitchison (1983), el análisis composicional de los datos es una técnica geoestadística que se basa en las transformaciones log-cociente clr e ilr, lo cual, permite hacer un análisis de un conjunto de datos para su transformación a distribución normal, asimismo, esto posibilita la conformación de asociaciones de variables mediante sus componentes principales y el análisis de clústeres sin relación de dependencia. 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 resultado 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 (metales base), y la asociación Hg-Sb-As que se ha categorizado como pathfinders y/o elementos perjudiciales.

Además, se ha conformado una base de datos de cuatro asociaciones multielementales desde el punto de vista de pathfinders y de elementos perjudiciales en los procesos de recuperación metalúrgica (ver Tabla 10). Estos resultados son coherentes con lo obtenido por Zhou et al. (2020), quienes definieron asociaciones 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 cuatro asociaciones multielementales. Las medidas estadísticas de la Tabla 11 evidencian una buena distribución de los datos en los 4 grupos evaluados, lo que pone de manifiesto el potencial de la aplicación de las transformaciones log-cociente clr e ilr para la normalización y apertura de datos geoquímicos. Los planos de anomalías de las Figuras 16, 17, 18 y 19 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 & Chira (2018), donde definieron un plano de anomalías de Au mediante el kriging ordinario en base a asociaciones de elementos bivariantes, sin embargo, los autores 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 cartografiadas y con los datos petromineralógicos 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 los resultados de los trabajos realizados por Aryafar & Roshanravan (2020), Xiong & Zuo (2020), Zhou et al. (2020) and Zuo (2021), 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, de acuerdo a los resultados de este trabajo de investigación se deduce que la aplicación de un modelo geometalúrgico influye en la exploración de recursos minerales, asimismo, esto permite previsualizar aspectos

fundamentales relacionados con los altos índices de incertidumbre presentes en la etapa de exploración, lo que disminuye el riesgo y aporta en la toma de decisiones.

4.3. Pruebas de Hipótesis

En la presente investigación se cuenta con datos numéricos u observaciones correspondientes a la base de datos geoquímicos de muestras de sedimentos fluviales en el área de estudio, por lo cual, se realizó el análisis de prueba de hipótesis con el software estadístico SPSS a los datos de las cuatro asociaciones multielementales de la Tabla 10, las mismas que pertenecen a la hipótesis específica H.E.1 **“Las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación se determinarán a partir de datos de análisis geoquímicos”**, por lo tanto, los siguientes enunciados implican datos estadísticos.

- **Hipótesis nula H.E.1₀:** Las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación NO se determinarán a partir de datos de análisis geoquímicos.
- **Hipótesis alternativa H.E.1₁:** Las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos metalúrgicos de recuperación se determinarán a partir de datos de análisis geoquímicos.

4.3.1. Supuestos de Normalidad para la Hipótesis Específica 1

Las pruebas de normalidad se realizaron mediante el método estadístico de Kolmogorov-Smirnov (Tabla 16), considerando que el número de datos $N=448$ es ≥ 50 . Los supuestos de normalidad son los siguientes:

- **H₀:** Los datos de las cuatro asociaciones multielementales tienen una distribución normal.
- **H₁:** Los datos de las cuatro asociaciones multielementales difieren de la distribución normal.

Para este análisis se ha considerado por conveniencia un nivel de significancia (α) de 0.05 o del 5%, además, la validación o rechazo de H_0 se ha realizado mediante la comparación entre el valor de probabilidad condicional o significancia (p) y α bajo las siguientes condiciones: si $p \geq \alpha \Rightarrow H_0$ se acepta, si $p < \alpha \Rightarrow H_0$ se rechaza.

Tabla 16. Pruebas de Normalidad para H_0 y H_1 correspondientes a la Hipótesis Específica H.E.1

Variable	Parámetros estadísticos normales			Kolmogorov-Smirnov*	
	N	Media	Desviación estándar	Estadístico	Significancia (p)
Pathfinders de pórfidos de Cu-Au	448	-4.212	0.153	0.048	0.015
Pathfinders de vetas de Au-Ag	448	-5.120	0.200	0.047	0.019
Perjudiciales - proceso de flotación	448	-8.714	0.374	0.089	0.000
Perjudiciales - proceso de lixiviación de Au	448	-7.489	0.410	0.072	0.000

*Corrección de significación de Lilliefors.

El estadístico de prueba de Kolmogorov-Smirnov presenta un nivel de significancia p menor que $\alpha = 0.05$ en todos los casos, consecuentemente, se rechazó la hipótesis nula H_0 y se aceptó la hipótesis alternativa H_1 ; además, en todos los gráficos Q-Q normal de la Figura 22 se aprecia que los valores observados no se superponen a la recta esperada bajo el supuesto de normalidad, lo que confirma la conclusión anterior. Por lo tanto, no se tiene una distribución normal para todas las variables analizadas; en este contexto, para la validación de los enunciados derivados de H.E.1 se aplicó las pruebas no paramétricas y el análisis de correlación de Spearman.

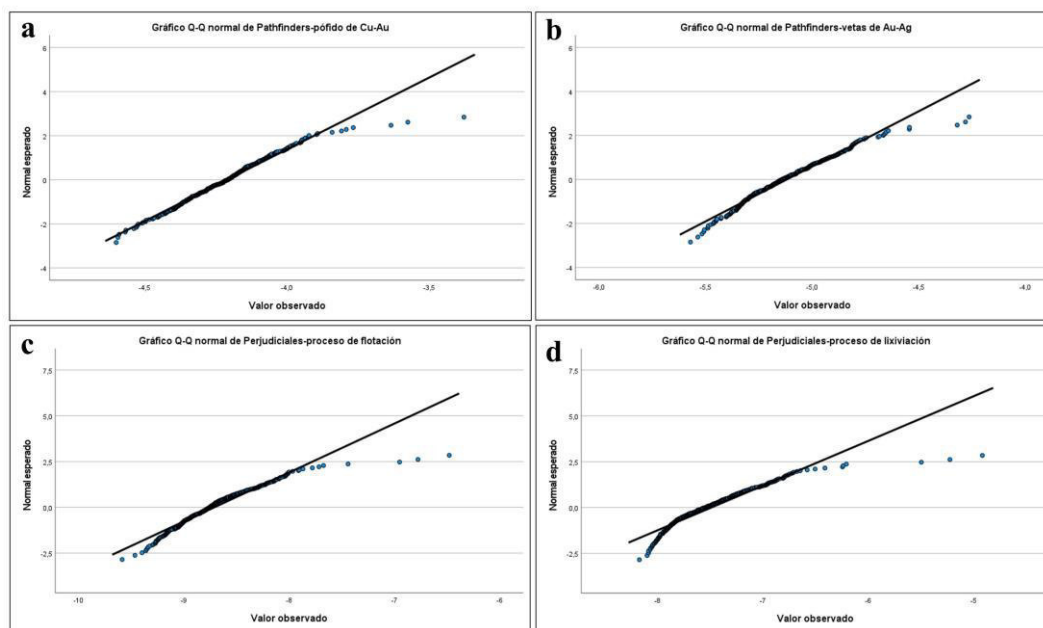


Figura 22. Gráficos Q-Q normal para los grupos multielementales. a) corresponde al gráfico Q-Q normal de elementos pathfinders de pórfidos de Cu-Au, nótese que los valores observados no se disponen sobre la recta bajo el supuesto de normalidad. b) Pertenece al gráfico Q-Q normal de elementos pathfinders de vetas de Au-Ag, los valores observados no se sobrepone a la recta de valores normales esperados. c) Representa el gráfico Q-Q normal de elementos perjudiciales en el proceso de flotación, el cual evidencia que los valores observados no forman una recta con los valores normales esperados. d) Gráfico Q-Q normal de elementos perjudiciales en el proceso de lixiviación, donde se aprecia un comportamiento de los valores normales respecto a la recta bajo el supuesto de normalidad similar a los gráficos anteriores.

4.3.2. Validación de la Hipótesis H.E.1

En base a la evaluación de los supuestos de normalidad, se ha aplicado el análisis de correlación de Spearman (Rho). De la Tabla 17 se interpreta una correlación moderada directa entre Pathfinders de pórfidos de Cu-Au y Perjudiciales-flotación ($Rho=0.465$, $p<0.001$). De la correlación entre Pathfinders de vetas de Au-Ag y Perjudiciales-lixiviación de Au se tiene una correlación directa muy alta ($Rho=0.946$, $p<0.001$). Por lo tanto, se concluye que las asociaciones multielementales definidas mediante el análisis composicional se correlacionan entre sí, además, en todos los casos $p < \alpha$, por lo cual, se rechazó la H.E.1₀, en consecuencia, se aceptó H.E.1₁ **“Las asociaciones de elementos pathfinders y perjudiciales en los procesos**

metalúrgicos de recuperación se determinarán a partir de datos de análisis geoquímicos”.

Tabla 17. Coeficientes de correlación de Spearman entre las asociaciones multielementales

Rho-Spearman	Pathfinders de pórfidos de Cu-Au	Pathfinders de vetas de Au-Ag	Perjudiciales-proceso de flotación	Perjudiciales-proceso de lixiviación de Au	p*
Pathfinders de pórfidos de Cu-Au	1				0.000
Pathfinders de vetas de Au-Ag	0.629	1			0.000
Perjudiciales-flotación	0.465	0.888	1		0.000
Perjudiciales-procesos de lixiviación de Au	0.574	0.946	0.931	1	0.000

Nota: los valores marcados en negrita representan la relevancia de los métodos de recuperación metalúrgica de acuerdo con el tipo de yacimientos, por lo tanto, se ha tomado en cuenta la correlación entre los pórfidos y la recuperación por flotación, y de las vetas de metales preciosos y la recuperación por lixiviación respectivamente.

*La correlación es significativa en un nivel de significancia de $\alpha=0.01$

4.3.3. Evaluación de la Hipótesis General de Investigación

La hipótesis general de la presente investigación H.G “Un modelo geometalúrgico influirá en la exploración de recursos minerales”, implica una valoración en función de la información disponible y la correlación con los resultados obtenidos, además, de la influencia de la integración de dicha información en la exploración minera. Por lo tanto, se ha asignado valores o pesos a los atributos de validación en función de las variables Grado de Correlación con los Resultados de la presente investigación (**GCR**) y Nivel de Aporte en la Exploración Minera (**NAEM**) (Tabla 18). En tal sentido, Mendiola (2017) resalta la importancia de los criterios de asignación de pesos y ponderación de forma ordinal mediante categorías de escalas numéricas, no obstante, en la presente investigación se ha asignado pesos por

conveniencia considerando valores en porcentaje (Javier & Alcántara, 2018), donde el 1% (0.01) es el menor peso y 100% (1.00) corresponde al mayor peso, tal como se resume en la siguiente Tabla.

Tabla 18. Peso en porcentaje asignado a los atributos de validación para GCR y NAEM

Atributos de validación de la hipótesis de investigación	GCR (x100%)	NAEM (x100%)
Datos de estudios internacionales	0.60	0.80
Datos de investigaciones a nivel local	0.20	0.40
Unidades litológicas	0.80	1.00
Cuerpos intrusivos y subvolcánicos	1.00	0.80
Sistemas de fallas cartografiadas	0.80	0.80
Fallas definidas mediante teledetección	0.80	0.60
Ocurrencias mineralógicas cartografiadas	1.00	1.00
Datos petromineragráficos de yacimientos conocidos	0.80	0.80
Datos de recuperación metalúrgica de yacimientos conocidos	0.60	0.80
Ley mineral de yacimientos ubicados en la zona de estudio	0.60	0.40

Para la evaluación de la prueba de hipótesis de investigación primeramente se ha planteado la hipótesis nula ($H.G_0$) en función de la hipótesis general o alternativa ($H.G_1$):

- **Hipótesis nula $H.G_0$:** Un modelo geometalúrgico NO influirá en la exploración de recursos minerales.
- **Hipótesis alternativa $H.G_1$:** Un modelo geometalúrgico influirá en la exploración de recursos minerales.

El nivel de significancia (α) fue de 0.05 o del 5% y los criterios de aceptación o rechazo de H_0 fueron: si $p \geq \alpha \Rightarrow H_0$ se acepta, si $p < \alpha \Rightarrow H_0$ se rechaza.

4.3.4. Supuestos de Normalidad de la Hipótesis General de Investigación

El número de datos fue de $N=10$ para GCR y NAEM, de tal forma que $N<50$, por lo tanto, se ha aplicado la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Tabla 19). Además, se ha planteado los siguientes supuestos de normalidad:

- **H₀:** Los porcentajes de pesos asignados al Grado de Correlación con los Resultados de la presente investigación (GCR) y al Nivel de Aporte en la Exploración Minera (NAEM) tienen una distribución normal.
- **H₁:** Los porcentajes de pesos asignados al Grado de Correlación con los Resultados de la presente investigación (GCR) y al Nivel de Aporte en la Exploración Minera (NAEM) difieren de una distribución normal.

Tabla 19. Pruebas de normalidad para GCR y NAEM

Variable	Parámetros estadístico-normales			Shapiro-Wilk	
	N	Media	Desviación estándar	Estadístico	Significancia (p)
GCR	10	0.720	0.234	0.873	0.108
NAEM	10	0.740	0.212	0.846	0.051

De la Tabla 19 se tiene que p (GCR=0.108 y NAEM=0.051) $> \alpha=0.05$, en consecuencia, se acepta la hipótesis nula H_0 ; además, los gráficos Q-Q normal de la Figura 23 correspondiente a las dos variables de análisis, evidencian que los valores observados se disponen sobre la recta esperada bajo el supuesto de normalidad, lo que ratifica la afirmación anterior. Asimismo, el estadístico de Shapiro-Wilk para GCR=0.873 y NAEM=0.846 son cercanos a la unidad, por lo tanto, se asume que las observaciones son correlacionables y presentan una distribución normal; todo esto indica la aplicación de pruebas paramétricas mediante el análisis de correlación de Pearson (Rho).

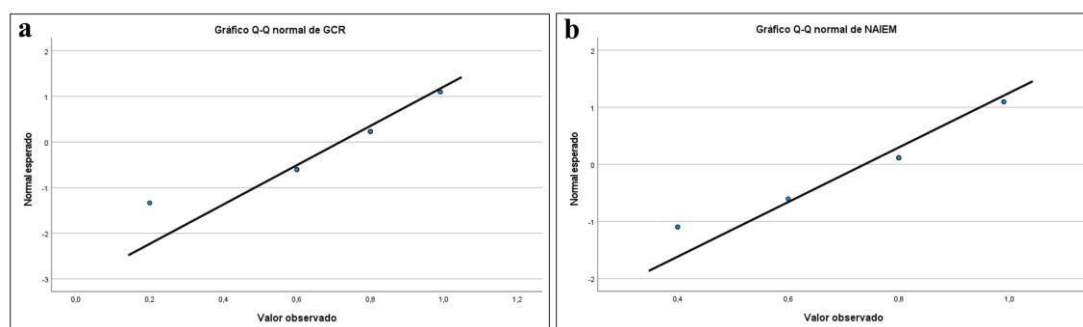


Figura 23. Gráficos Q-Q normal para las variables de validación GCR y NAEM. a) corresponde al gráfico Q-Q normal de la variable de validación GCR, en la cual se aprecia que los valores observados se disponen sobre la recta bajo el supuesto de normalidad. b) Representa el gráfico Q-Q normal de la variable de validación NAEM, nótese que los valores observados forman una recta con los valores normales esperados.

4.3.5. Prueba de la Hipótesis General de Investigación H.G

Se ha aplicado el análisis de correlación de Pearson (Rho). De la Tabla 20 se interpreta una correlación alta directa entre el Grado de Correlación con los Resultados de la presente investigación (GCR) y el Nivel de Aporte en la Exploración Minera (NAEM) ($Rho=0.697$) respecto a los atributos de validación. Además, considerando que $p=0.025 < \alpha=0.05$, se rechaza la hipótesis nula de investigación $H.G_0$: “Un modelo geometalúrgico NO influirá en la exploración de recursos minerales” y se acepta la hipótesis alternativa $H.G.1$: “Un modelo geometalúrgico influirá en la exploración de recursos minerales”.

Tabla 20. Coeficiente de correlación de Pearson y significancia p para GCR y NAEM

Modelo Geometalúrgico	Exploración de recursos minerales (NAEM)		
	N	Rho-Pearson	p*
Grado de Correlación con los Resultados (GCR)	10	0.697	0.025

*La correlación es significativa en un nivel de significancia $\alpha= 0.05$.

Finalmente, mediante las pruebas de las hipótesis **H.E.1** y **H.G**, y los resultados obtenidos en la presente investigación se rechazó la hipótesis nula correspondiente a

la segunda hipótesis específica H.E.2₀ **“El modelo geometalúrgico planteado en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) NO mejorará la exploración de recursos minerales”**, y se aceptó la hipótesis alternativa H.E.2₁ **“El modelo geometalúrgico planteado en base a la geología (litología, sistemas de fallas y la correlación multielemental de datos de análisis geoquímicos) y la metalurgia (Recuperaciones) mejorará la exploración de recursos minerales”**; por lo cual, se concluye que es fundamental integrar un enfoque metalúrgico desde la exploración minera, lo que solidifica la importancia de la geometalurgia en todos los ámbitos de la minería.

CONCLUSIONES

- El modelo geometalúrgico establecido en la presente investigación integra información litoestructural, datos de asociaciones de elementos geoquímicos y datos de recuperación metalúrgica y petromineragráfica de yacimientos conocidos de la zona de estudio. Lo más relevante 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 lineal entre dos o más variables, lo que ha permitido conformar asociaciones multielementales de acuerdo a criterios de exploración de recursos minerales y de la metalurgia extractiva; por lo cual, es una potente herramienta para el estudio de procesos.
- Mediante el análisis composicional de los datos geoquímicos normalizados aplicando las transformaciones log-cociente clr e ilr y la evaluación de Componentes Principales, se ha conformado cuatro grupos multielementales para el tratamiento 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 perjudiciales en el proceso de lixiviación de Au (Pb, Cd, Hg, As, Sb y Te).
- También se han obtenido asociaciones y relaciones de elementos metalíferos desde un enfoque de interés económico, como, la asociación Cu-Au-Ag y Ni-Mo, y las relaciones Pb/Zn y Ni/Au; lo que sugiere un gran potencial de mineralización en el área de estudio. Por el contrario, no se han 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 conformando grupos minerales Xenotima) 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.

- Mediante el análisis comparativo se concluyó que los planos de anomalías geoquímicas definidos para cada grupo de elementos son coherentes con la superposición de los datos de ocurrencias mineralógicas y metalúrgicos correspondientes a yacimientos ubicados en la zona de estudio, por ejemplo, subanomalías de pathfinders de Au-Ag se sobreponen sobre la mina La Merced de Buenos Aires, donde las muestras provenientes de dicha mina arrojaron una ley del alimento de 57.45 g/t Au; además, las subanomalías de elementos perjudiciales en el proceso de flotación coinciden con el depósito de Cu-Au de Cascabel-Alpala, esto se relaciona con los resultados metalúrgicos de recuperación por flotación de este depósito con una ley del alimento de 1.17% Cu y 2.29g/t Au, y una recuperación de 93.2% y 79.3% respectivamente.
- Todo esto sugiere que la aplicación de un modelo geometalúrgico en la fase de exploración inicial es muy importante para previsualizar y definir posibles targets de exploración, y el comportamiento de ciertas asociaciones de elementos geoquímicos en el proceso de recuperación metalúrgica. Por lo tanto, se 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 anómalos de los planos multielementales han permitido definir una zona potencial de ocurrencias de minerales al SE del área de estudio 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 tanto, esto es un punto de partida para las investigaciones de campo en el futuro, dado que no se ha encontrado información relevante de estudios exploratorios realizados en esta zona.

RECOMENDACIONES

- En base a la coherencia existente entre los resultados de la estimación geoestadística de las anomalías de los grupos multielementales y los datos petrominerográficos y metalúrgicos de yacimientos conocidos, se sugiere la aplicación del Análisis Composicional para la evaluación y procesamiento de datos geoquímicos en las labores exploratorias, específicamente las transformaciones log-cociente clr e ilr mediante el software de CoDaPack para la normalización de los datos dentro de los estudios geoestadísticos con diferentes enfoques.
- Con respecto a la pérdida de Au contenido en Pirita producto de los relaves de flotación del circuito del Yacimiento de Cascabel-Alpala, las formas más recomendadas de tratar estos relaves es la lixiviación con autoclaves, a condiciones de presión y temperatura con la inyección de aire (aireación) o de otras sustancias como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2); así como también la aplicación de la pirometalurgia (tostación). Estos tratamientos permiten oxidar el sulfuro, lo que facilita la disolución del Au en presencia de la solución de NaCN. Para ello, es fundamental la evaluación económica de la aplicación de estos procesos para determinar su factibilidad y rentabilidad.
- Considerando la anomalía geoquímica presente en todos los planos de asociaciones multielementales, se recomienda realizar estudios de exploración a lo largo de la Cuenca del Río San Gerónimo ubicado al SE de la zona de estudio; donde se asume una ocurrencia de mineralización relacionada a un depósito de Cu-Au-Ag.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitchison, J. (1983). Principal Component Analysis of Compositional Data. *Biometrika*, 70(1), 57. <https://doi.org/10.2307/2335943>
- Aitchison, J. (1986). *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman & Hall, Ltd.
- Aitchison, J., & Ng, K. W. (2005). The role of perturbation in compositional data analysis. *Statistical Modelling*, 5(2), 173–185. <https://doi.org/10.1191/1471082X05st091oa>
- Aponte, J. (2021). Identification of patterns associated with areas of epithermal alteration, through responses spectral using ASTER images. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 353–360. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.06.005>
- Aryafar, A., & Roshanravan, B. (2020). Improved index overlay mineral potential modeling in brown- and green-fields exploration using geochemical, geological and remote sensing data. *Earth Science Informatics*, 13(4), 1275–1291. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00509-x>
- 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>
- Bereau, J. (2019). “Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona [Tesis de postgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/11500>
- Boatner, L. A. (2002). Synthesis, Structure, and Properties of Monazite, Pretulite, and Xenotime. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1), 87–121. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.4>
- Bogaert, P., Mahau, P., & Beckers, F. (1995). *The spatial interpolation of agro-climatic data: Cokriging software and source code: user's manual*. FAO, Roma.
- Boland, M., Pilatasig, L., Ibadango, E., McCourt, W., Aspden, J., Hughes, R., & Beate, B. (2000). *Geology of the Western Cordillera between 0°-1°N* (Informe No. 10 CODIGEM/BGS). Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental. Program a de Información cartográfica y geológica.
- Bosecker, K. (1997). Bioleaching: metal solubilization by microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 20(3–4), 591–604. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1997.tb00340.x>
- Bustamante, M., Gaviria, A., & Restrepo, O. (2008). *Notas de concentración de minerrales*. I M CIMEX- Universidad Nacional de Colombia.
- 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, W., & Chira, J. (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-UNMSM*, 21(41), 91–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v21i41.14997>
- CODIGEM, & BGS. (2000). *Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental (PRODEMINCA)*.
- Coward, S., Vann, J., Dunham, S., & Stewart, M. (2009). *The primary-response framework for geometallurgical variables*. Seventh international mining geology conference.
- Delgado, A., Jiménez, J., Ochoa, L., Mendiola, L., Alvarado, A., & Huamaní, E. (2020). *Applying grey systems to analyze water quality on the river Chira watershed*. 8(7).
- Dominy, S., O'Connor, L., Parbhakar-Fox, A., Glass, H., & Purevgerel, S. (2018). Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations [Geometalurgia—Una ruta hacia operaciones mineras mas resilientes]. *Minerals*, 8(12), 560. <https://doi.org/10.3390/min8120560>
- Dowd, P. A. (1994). *Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning [Evaluación del riesgo en la estimación de reservas y en la planificación en open pit]*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section A: Mining Industry).
- Egozcue, J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barceló-Vidal, C. (2003). Isometric Logratio Transformations for Compositional Data Analysis. *Mathematical Geology*, 35(3), 279–300. <https://doi.org/10.1023/A:1023818214614>
- Frækaland Vangsnes, G. (2018). The meanings of mining: A perspective on the regulation of artisanal and small-scale gold mining in southern Ecuador. *The Extractive Industries and Society*, 5(2), 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.01.003>
- Garcia del Real, J., Barakos, G., & Mischo, H. (2020). SPACE MINING IS THE INDUSTRY OF THE FUTURE... OR MAYBE THE PRESENT? *Mining Engineering*, 72(2), 40–48. <https://www.proquest.com/trade-journals/space-mining-is-industry-future-maybe-present/docview/2358405757/se-2?accountid=12268>
- 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(September). <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>
- Habashi, F. (2018). Extractive Metallurgy. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11324-4>
- Habib, A., Bhatti, H. N., & Iqbal, M. (2020). Metallurgical Processing Strategies for Metals

- Recovery from Industrial Slags. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 234(2), 201–231. <https://doi.org/10.1515/zpch-2019-0001>
- Haldar, S. K. (2013). Exploration Geochemistry. In *Mineral Exploration* (pp. 55–71). Elsevier. <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/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN, Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1st ed.). McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Hickson, D. C., Boivin, A. L., Tsai, C. A., Daly, M. G., & Ghent, R. R. (2020). Modeling the Dielectric Properties of Minerals From Crystals to Bulk Powders for Improved Interpretation of Asteroid Radar Observations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(7). <https://doi.org/10.1029/2019JE006141>
- Ichau, M. (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 de pregrado]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19853>
- INIGEMM. (2017a). *Hoja Geológica Jijón y Caamaño, escala 1: 50 000*. Instituto Nacional de Investigación Geológico 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 Geológico Minero Metalúrgico. https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/MAPA-3-3_compressed.pdf
- Javier, L., & Alcántara, F. (2018). Modelo cartográfico para determinar áreas óptimas para la expansión urbana del distrito de Huánuco como aporte para la planificación. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 21(42), 3–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v21i42.15783>
- Kidder, J. A., McClenaghan, M. B., Leybourne, M. I., McCurdy, M. W., Pelchat, P., Layton-Matthews, D., & Voinot, A. (2022). Hydrogeochemistry of porphyry-related solutes in ground and surface waters; an example from the Casino Cu–Au–Mo deposit, Yukon, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 22(2), geochem2021-058. <https://doi.org/10.1144/geochem2021-058>
- Korshunova, V., & Charykova, M. (2019). Mobile Forms of Gold and Pathfinder Elements in Surface Sediments at the Novye Peski Gold Deposit and in the Piilola Prospecting Area (Karelia Region). *Minerals*, 9(1), 34. <https://doi.org/10.3390/min9010034>
- Kyle, J. H., Breuer, P. L., Bunney, K. G., & Pleysier, R. (2012). Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. *Hydrometallurgy*, 111–112(1), 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.09.005>

- Kyle, J. H., Breuer, P. L., Bunney, K. G., Pleysier, R., & May, P. M. (2011). Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. Part 1: Mineralogy, aqueous chemistry and toxicity. *Hydrometallurgy*, 107(3–4), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.01.010>
- Lane, D. J., Cook, N. J., Grano, S. R., & Ehrig, K. (2016). Selective leaching of penalty elements from copper concentrates: A review. *Minerals Engineering*, 98, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.006>
- 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>
- Long, G., Peng, Y., & Bradshaw, D. (2012). A review of copper – arsenic mineral removal from copper concentrates. *Minerals Engineering*, 36–38, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.032>
- Lorenzen, L., van Deventer, J. S. ., & Landi, W. . (1995). Factors affecting the mechanism of the adsorption of arsenic species on activated carbon. *Minerals Engineering*, 8(4–5), 557–569. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(95\)00017-K](https://doi.org/10.1016/0892-6875(95)00017-K)
- Lu, Y.-J., Loucks, R. R., Fiorentini, M., McCuaig, T. C., Evans, N. J., Yang, Z.-M., Hou, Z.-Q., Kirkland, C. L., Parra-Avila, L. A., & Kobussen, A. (2016). Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. In J. P. Richards (Ed.), *Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt* (Vol. 19, p. 0). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.19.13>
- Manrique, J. L., & Guamán, G. A. (2020). Estudio de prospección geoquímica en sedimentos de las microcuencas Chirimoyo y Guineo, Ecuador. *Revista Boletín de Geología*, 42(1), 39–55. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n1-2020002>
- McClenaghan, M. B., & Peter, J. M. (2016). Till geochemical signatures of volcanogenic massive sulphide deposits: an overview of Canadian examples. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 16(1), 27–47. <https://doi.org/10.1144/geochem2014-315>
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. In *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>
- Mendiola, V. (2017). Criterios de diseño para la toma de decisiones en la evaluación de alternativas de minado en Empresas Mineras de la Región Central del Perú. *Prospectiva Universitaria*, 9(1), 55. <https://doi.org/10.26490/uncp.1990-7044.2012.1.293>
- Ministerio de Minería de Chile. (2021). *Ley de mineral*. <https://www.minmineria.cl/glosario-minero-l/ley-de-mineral/>
- Pachas, 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*, 0(42), 321–328.

<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoysociedad/article/view/12487>

- Rivera-Parra, J. L., Beate, B., Diaz, X., & Ochoa, M. B. (2021). Artisanal and Small Gold Mining and Petroleum Production as Potential Sources of Heavy Metal Contamination in Ecuador: A Call to Action. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 2794. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062794>
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2013). Mineral Resource Estimation [Estimación de recursos minerales]. In *Springer Science & Business Media*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>
- Shewchuk, C., Ferbey, T., & Lian, O. (2020). *oxides and path fi nder elements in subglacial till , Highland Valley mine area , south-central British Columbia*.
- Siegel, F. (1992). *Geoquímica Aplicada*. (OEA (ed.)). Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C.
- SolGold Plc, & Cornerstone Capital Resources Inc. (2019). *NI 43-101 Technical Report on Preliminary Economic Assessment*. https://cornerstoneresources.com/i/pdf/Cascabel_PEA_1119.pdf
- SolGold Plc, & Cornerstone Capital Resources Inc. (2021). *Cascabel Property NI 43-101 Technical Report, Alpala Porphyry Copper-Gold-Silver Deposit - Mineral Resource Estimation*. https://cornerstoneresources.com/i/pdf/Cascabel_MRE_0520.pdf
- Tonui, E. (1998). *Regolith mineralogy and geochemistry at Goonumbla Parkes, NSW*. [Tesis doctoral, Australian National University]. <http://hdl.handle.net/1885/144604>
- USGS. (1976). *Principles of the mineral resource classification system of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey* (No. 1450-A). U. S. Bureau of Mines and U. S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/b1450A>
- Vallejo, C., Spikings, R. A., Horton, B. K., Luzieux, L., Romero, C., Winkler, W., & Thomsen, T. B. (2019). Late cretaceous to miocene stratigraphy and provenance of the coastal forearc and Western Cordillera of Ecuador: Evidence for accretion of a single oceanic plateau fragment. In *Andean Tectonics* (pp. 209–236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00010-1>
- Wang, J., & Zuo, R. (2018). Identification of geochemical anomalies through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis. *Computers and Geosciences*, 118, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.05.010>
- Wertime, T. A. (1964). Man's First Encounters With Metallurgy. *Science*, 146(3649), 1257–1267. <https://doi.org/10.1126/science.146.3649.1257>
- Woods, R. (1981). Mineral Flotation. In *Comprehensive Treatise of Electrochemistry* (pp. 571–595). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3785-0_11
- Wouters, M., Rahman, S., Myamoto, H., Tran, N. N., & Hessel, V. (2021). Continuous microfluidic solvent extraction of cobalt from mimicked and real asteroid leaching

solutions. *Separation and Purification Technology*, 260(July 2020), 118238. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118238>

Xie, L., Wang, J., Lu, Q., Hu, W., Yang, D., Qiao, C., Peng, X., Peng, Q., Wang, T., Sun, W., Liu, Q., Zhang, H., & Zeng, H. (2021). Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*, 295, 102491. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102491>

Xiong, Y., & Zuo, R. (2020). Computers and Geosciences Recognizing multivariate geochemical anomalies for mineral exploration by combining deep learning and one-class support vector machine. *Computers and Geosciences*, 140(July 2019), 104484. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104484>

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*, 104748. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104748>

Zuo, R. (2021). Mineral Exploration Using Subtle or Negative Geochemical Anomalies. *Journal of Earth Science*, 32(2), 439–454. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1079-2>

ANEXOS

Anexo 1. Base de datos geoquímicos de la zona de estudio

Tabla 21. Base de datos geoquímicos

Nota: Base de Datos de las 448 muestras de sedimento para un conjunto de 37 elementos geoquímicos. *Fuente.* Tomado de CODIGEM & BGS (2000). La DATA completa está disponible en: <https://github.com/GeologicalSciences/NORTHWESTERN-ECUADOR-GEOCHEMICAL-DATASETS>

Anexo 2. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson

Tabla 22. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre los 37 elementos

	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo	Ni	Co	Cd	Fe	Mn	Te	Ba	Cr	V	Sn	W	Ln	Al	Mg	Ca	Na	K	Sr	Ga	Li	Nb	REE	Ta	Ti	Zr	As	Sb	Hg	Pt	Pd	
Au	1.0																																				
Ag	-0.1	1.0																																			
Cu	0.2	-0.3	1.0																																		
Pb	0.2	0.4	-0.3	1.0																																	
Zn	0.2	0.4	-0.5	0.6	1.0																																
Mo	0.0	0.5	-0.4	0.7	0.5	1.0																															
Ni	-0.2	-0.3	-0.4	0.0	0.1	0.0	1.0																														
Co	-0.1	0.1	-0.5	0.1	0.4	0.2	0.7	1.0																													
Cd	0.1	0.5	-0.6	0.6	0.8	0.6	0.2	0.6	1.0																												
Fe	0.0	0.0	0.4	-0.6	-0.3	-0.6	-0.4	-0.2	-0.5	1.0																											
Mn	-0.2	0.0	0.6	-0.3	-0.6	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	0.6	1.0																										
Te	-0.1	0.6	-0.6	0.6	0.5	0.8	0.1	0.3	0.7	-0.7	-0.4	1.0																									
Ba	0.1	0.3	-0.6	0.5	0.6	0.6	0.1	0.5	0.8	-0.5	-0.7	0.7	1.0																								
Cr	-0.2	-0.4	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	0.7	0.3	-0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	1.0																							
V	0.0	-0.1	0.2	-0.5	-0.2	-0.6	-0.3	-0.2	-0.4	0.9	0.4	-0.7	-0.4	0.1	1.0																						
Sn	-0.2	0.9	-0.4	0.4	0.4	0.5	-0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.7	0.4	-0.3	-0.1	1.0																					
W	-0.2	0.9	-0.4	0.4	0.4	0.5	-0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.7	0.4	-0.3	-0.1	1.0	1.0																				
Ln	-0.2	0.1	0.0	0.0	-0.2	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	0.0	0.3	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0																			
Al	-0.3	-0.2	0.5	-0.5	-0.7	-0.4	-0.2	-0.4	-0.7	0.3	0.6	-0.3	-0.5	0.0	0.1	-0.2	-0.2	0.1	1.0																		
Mg	-0.2	-0.4	0.5	-0.6	-0.6	-0.5	0.0	-0.3	-0.7	0.3	0.6	-0.5	-0.7	0.2	0.1	-0.4	-0.4	-0.1	0.7	1.0																	
Ca	-0.3	-0.4	0.3	-0.6	-0.7	-0.5	0.0	-0.4	-0.6	0.2	0.5	-0.4	-0.7	0.1	0.3	-0.4	-0.4	0.0	0.5	0.7	1.0																
Na	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.2	0.1	-0.1	0.0	0.4	1.0															
K	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	-0.4	-0.1	0.3	-0.1	-0.2	0.1	0.3	-0.4	-0.1	0.2	0.2	0.0	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	1.0														
Sr	-0.3	-0.3	0.1	-0.4	-0.5	-0.4	-0.1	-0.4	-0.5	0.2	0.4	-0.4	-0.5	0.1	0.4	-0.3	-0.3	0.3	0.3	0.4	0.8	0.5	-0.2	1.0													
Ga	-0.2	-0.1	0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	-0.2	-0.3	0.1	0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	-0.2	-0.2	0.1	0.4	0.1	0.1	-0.1	-0.2	0.0	1.0												
Li	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.2	-0.1	-0.3	0.3	-0.3	0.2	1.0											
Nb	0.0	-0.2	0.2	-0.4	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	0.7	0.2	-0.6	-0.3	0.1	0.9	-0.2	-0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.4	-0.1	-0.3	1.0										
REE	-0.3	-0.2	0.2	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.2	-0.2	0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.6	0.5	0.3	-0.2	-0.2	0.0	0.2	0.3	-0.1	1.0									
Ta	-0.2	0.9	-0.4	0.4	0.4	0.5	-0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.7	0.4	-0.3	-0.1	1.0	1.0	0.1	-0.2	-0.4	-0.4	-0.2	0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	1.0								
Ti	-0.1	0.0	-0.5	-0.1	0.3	0.0	0.3	0.5	0.4	-0.1	-0.5	0.1	0.4	0.1	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.1	0.3	0.0	0.0	-0.3	-0.3	0.2	0.0	0.2	1.0							
Zr	-0.4	-0.4	0.2	-0.5	-0.6	-0.5	0.1	-0.2	-0.6	0.1	0.4	-0.4	-0.4	0.2	0.1	-0.4	-0.4	0.1	0.6	0.5	0.5	0.1	-0.5	0.4	0.2	0.0	0.1	0.5	-0.4	-0.1	1.0						
As	0.2	0.0	-0.1	0.4	0.4	0.3	0.0	0.0	0.3	-0.2	-0.2	0.1	0.3	-0.2	-0.3	0.0	0.0	-0.1	-0.6	-0.3	-0.3	0.0	0.3	-0.3	-0.3	0.2	-0.2	-0.5	0.0	-0.2	-0.4	1.0					
Sb	0.0	0.7	-0.2	0.4	0.4	0.5	-0.2	0.0	0.4	-0.1	0.0	0.4	0.2	-0.3	-0.2	0.5	0.5	0.0	-0.3	-0.3	-0.4	-0.1	0.2	-0.3	-0.1	0.0	-0.2	-0.3	0.5	-0.1	-0.4	0.3	1.0				
Hg	0.0	0.2	-0.1	0.2	0.1	0.3	-0.2	-0.1	0.1	-0.2	0.0	0.3	0.2	-0.2	-0.3	0.2	0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.1	-0.3	0.0	0.1	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.3	0.2	0.3	1.0			
Pt	-0.2	-0.1	0.1	-0.2	-0.3	-0.2	0.1	0.0	-0.2	0.1	0.2	-0.1	-0.3	0.2	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	-0.1	-0.1	0.2	-0.2	-0.1	-0.1	1.0		
Pd	0.0	-0.3	0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.2	-0.3	-0.6	0.3	0.4	-0.5	-0.5	0.1	0.2	-0.4	-0.4	-0.1	0.4	0.5	0.4	-0.2	-0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	-0.4	-0.3	0.4	-0.3	-0.3	-0.2	0.3	1.0	

Intervalo	Correlación
0.0 0.5	Baja
0.5 0.7	Media
0.7 1.0	Alta

Nota: La matriz de correlaciones se ha realizado mediante la base de datos de elementos geoquímicos normalizada mediante la transformación log-cociente clr.

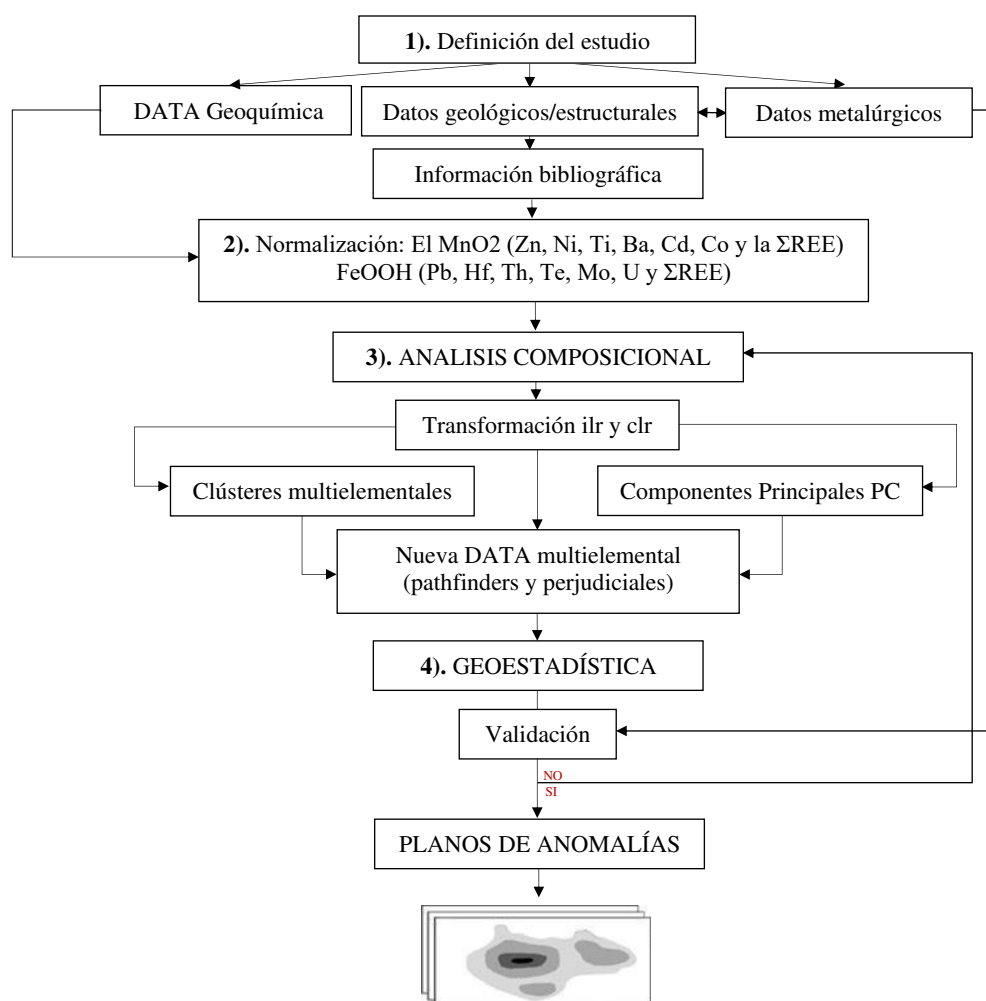
Anexo 3. Clasificación de Componentes Principales

Tabla 23. Componentes Principales PC de las 10 primeras clases de los elementos geoquímicos

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
clr.Ca	-0.2375	-0.0609	0.0261	0.1268	-0.1931	-0.1465	0.1564	-0.1002	0.3043	-0.2199
clr.K	0.1306	-0.0508	-0.1122	0.1821	0.025	0.021	-0.1304	0.109	0.2792	-0.0165
clr.Mg	-0.1831	-0.0892	-0.057	-0.08	-0.1467	0.0758	0.0452	0.1033	0.2536	-0.0714
clr.Na	-0.0497	0.0886	0.1573	0.1925	-0.0928	-0.1997	0.0782	-0.2368	0.2124	-0.1244
clr.REE	-0.0849	0.0291	-0.042	-0.1355	0.1308	0.0309	-0.0699	0.1619	0.1828	-0.0898
clr.Li	0.004	0.004	-0.1786	-0.0898	-0.0532	0.0866	-0.3129	0.1354	0.172	-0.0426
clr.Sr	-0.1993	-0.0251	0.0879	0.2947	-0.1056	-0.2005	0.2219	-0.2226	0.1664	-0.0121
clr.Cu	-0.0899	-0.233	-0.1546	0.0014	-0.0426	0.1571	-0.0133	0.0621	0.1491	0.0781
clr.Cd	0.207	0.1765	0.0829	-0.0242	0.1155	-0.0307	0.0139	0.0745	0.0884	0.0192
clr.Ni	-0.0179	0.2308	0.3904	-0.3396	-0.2292	0.1942	-0.0438	-0.134	0.0846	-0.0671
clr.Ga	-0.1118	-0.0008	-0.2799	-0.228	0.2517	0.2645	-0.2807	-0.6512	0.0809	0.1272
clr.Al	-0.1784	-0.0425	-0.1498	-0.1093	0.1111	0.0173	0.0403	0.0144	0.0726	-0.0272
clr.Te	0.1158	0.1716	-0.087	-0.0678	0.0466	-0.1199	0.216	0.0685	0.066	-0.0074
clr.Ti	0.034	0.1513	0.3342	0.1195	0.258	-0.1202	-0.1485	0.0842	0.0631	-0.1909
clr.Mo	0.1648	0.1459	-0.1397	-0.0662	0.0043	-0.0918	0.2131	-0.0197	0.0595	0.0273
clr.Co	0.0406	0.0978	0.1312	-0.0719	0.0586	0.0828	-0.0672	0.0652	0.0582	-0.0204
clr.Ba	0.2436	0.2313	0.0103	-0.0837	0.2155	-0.121	-0.1904	0.1353	0.0292	-0.0616
clr.Au	0.4175	-0.7612	0.2288	-0.2804	0.0778	-0.1751	0.0565	-0.1052	0.0241	-0.1226
clr.Sn	0.0266	0.0419	-0.0369	0.0389	0.0672	0.0035	0.0514	0.0419	-0.0154	0.0338
clr.W	0.0266	0.0419	-0.0369	0.0389	0.0672	0.0035	0.0514	0.0419	-0.0154	0.0338
clr.Ta	0.0266	0.0419	-0.0369	0.0389	0.0672	0.0035	0.0514	0.0419	-0.0154	0.0338
clr.Ag	0.031	0.0343	-0.0474	0.0414	0.0548	0.007	0.0611	0.0317	-0.0258	0.0478
clr.Pd	-0.1663	-0.1735	-0.0304	-0.0493	-0.0687	0.2133	0.1318	0.4007	-0.0354	0.0613
clr.Zn	0.1933	0.1056	0.0527	0.0498	0.0664	-0.0102	-0.0818	0.0196	-0.0537	0.1531
clr.Sb	0.0486	0.0301	-0.0715	0.0493	0.0014	0.0055	0.0456	0.0173	-0.0634	0.0276
clr.As	0.2487	-0.0061	-0.1204	0.1511	-0.6893	-0.072	-0.4514	0.0311	-0.0766	0.1042
clr.Pt	-0.0776	0.0039	0.0046	-0.0956	0.0092	0.2652	0.2054	0.2657	-0.0771	0.0857
clr.Ln	-0.0249	0.0222	-0.0618	0.0714	0.0178	-0.0735	0.061	-0.1506	-0.0994	0.112
clr.Fe	-0.065	-0.088	0.0143	0.1512	0.0888	0.1279	-0.1141	0.0222	-0.1011	0.0796
clr.Mn	-0.1326	-0.123	-0.1893	0.1074	-0.0324	0.0399	0.1372	-0.0205	-0.1449	0.1105
clr.Pb	0.2827	0.1082	-0.1528	-0.0678	-0.0947	-0.1422	0.3585	-0.1352	-0.1564	0.3852
clr.V	-0.0902	-0.1097	0.143	0.3006	0.1598	0.0878	-0.1472	-0.0223	-0.1641	0.0911
clr.Cr	-0.0906	0.0721	0.4182	-0.1765	-0.2444	0.3143	0.1289	-0.1386	-0.2404	0.0352
clr.Nb	-0.0883	-0.1238	0.2174	0.3675	0.1599	0.0207	-0.1408	-0.0122	-0.2944	0.0997
clr.Zr	-0.4449	-0.0001	-0.0154	-0.391	-0.0094	-0.6162	-0.2127	0.1075	-0.3101	0.0879
clr.Hg	0.0911	0.0586	-0.2987	0.0332	-0.0525	0.097	0.0799	-0.0861	-0.4574	-0.7602

Nota: los valores resaltados con negrita corresponden a los elementos que conforman las agrupaciones o clústeres y las relaciones, el color negro representa valores del numerador y el color gris del denominador, los cuales conforman las relaciones elementales.

Anexo 4. Modelo o esquema de trabajo propuesto



Nota: Resumen de las etapas y procedimientos aplicados en el desarrollo de la presente investigación, que constituye un esquema sistemático de procesos.