

Geoquímica Multivariada en la Cuenca del Río Cofanes (Ecuador): Evidencias de Mineralización Hidrotermal y Potencial de Esmeraldas

Multivariate Geochemistry in the Cofanes River Basin (Ecuador): Evidence of Hydrothermal Mineralization and Emerald Potential

Iván Patricio Villarreal García¹, Edwin Fernando Gallardo Vargas²

¹ Profesional Independiente. Quito - Ecuador. E-mail: ipvg.593@gmail.com

² Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito - Ecuador.
E-mail: edwin.gallardo@geonergia.gob.ec

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: : 24-07-2025

Fecha de aceptación: 25-09-2025

Resumen

Este estudio aplica análisis geoquímico multivariado para evaluar el potencial de mineralización hidrotermal en la cuenca del Río Cofanes (Sucumbíos, Ecuador), en el marco del “Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano”, desarrollado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). El proyecto busca caracterizar áreas con potencial mineral aún no evaluado mediante técnicas geoquímicas avanzadas. Se analizaron 74 muestras de sedimentos de corriente mediante ICP-MS, abarcando 53 elementos. Se eliminaron variables con baja variabilidad y se aplicaron controles estadísticos a valores atípicos. El Análisis de Componentes Principales (ACP) y el agrupamiento jerárquico permitieron identificar patrones geoquímicos. Se detectaron agrupaciones de Be, Au, Mo, Zn, Pb y tierras raras (REE, por sus siglas en inglés), concentradas en zonas estructuralmente controladas. Los resultados sugieren un ambiente favorable para mineralización hidrotermal y presencia potencial de esmeraldas. Se propone un modelo preliminar de zonación geoquímica como base para futuras investigaciones. Este es el primer estudio que plantea evidencia geoquímica preliminar de un ambiente propicio para esmeraldas en Ecuador, lo que abre una línea novedosa de investigación geológica en la región.

Palabras clave: Berilio, Esmeraldas, Mineralización hidrotermal, Multivariado, Pegmatitas graníticas.

Abstract

This study applies multivariate geochemical analysis to evaluate the hydrothermal mineralization potential in the Cofanes River basin (Sucumbíos, Ecuador), as part of the “Geological Research Project and Availability of Mineral Resource Occurrences in Ecuadorian Territory” developed by the Geological and Energy Research Institute (IIGE). The project aims to characterize areas with unexplored mineral potential using advanced geochemical techniques. A total of 74 stream sediment samples were analyzed using ICP-MS, covering 53 elements. Low-variability variables were removed, and statistical controls were applied to outliers. Principal Component Analysis (PCA) and hierarchical clustering helped identify relevant geochemical patterns. Element groupings of Be, Au, Mo, Zn, Pb, and rare earth elements (REE) were detected, concentrated in structurally controlled zones. The results suggest a favorable environment for hydrothermal mineralization and potential emerald occurrences. A preliminary geochemical zoning. This is the first study to present geochemical evidence of a potentially favorable environment for emeralds in Ecuador, opening a novel line of geological research in the region. Model is proposed as a basis for future exploration.

Keywords: Beryllium, Emeralds, Hydrothermal mineralization, Multivariate, Granitic pegmatites.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el 2014, el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) desarrolla el Proyecto de “Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano” (IGTE). Este proyecto se orienta en identificar sectores de interés geológico-minero en Ecuador, a través de la interpretación y análisis de información geológica, geoquímica y geofísica. Uno de los objetivos fundamentales es delimitar zonas anómalas que puedan ser prioritarias para la prospección de recursos minerales, empleando métodos geoestadísticos avanzados para generar *clusters* de elementos químicos y asociaciones minerales. Estos *clusters*, al ser correlacionados con la geología local, permiten inferir los tipos de yacimientos presentes en las áreas de estudio.

En el contexto del proyecto, se ha llevado a cabo un estudio detallado en la cuenca hidrográfica del Río Cofanes, ubicada en el norte de Ecuador, frontera con Colombia. Esta región, que abarca 1 799 km², se caracteriza por su compleja geología, donde coexisten intrusivos ígneos como el Granito Condué y la Granodiorita de Azafrán, y rocas sedimentarias como las de la formación Napo. Adicionalmente, la presencia de estructuras tectónicas activas, principalmente fallas inversas y zonas de cizalla, relacionadas con la compresión andina, sugiere un entorno favorable para la mineralización hidrotermal, lo cual ha motivado una exploración en la zona. El área se sitúa en la cuenca hidrográfica del Río Cofanes, al norte de Ecuador y sur de Colombia, en la provincia de Sucumbíos, cantón Sucumbíos, parroquias La Bonita, La Sofia, Rosa Florida y Puerto Libre. Esta región se encuentra en la Cordillera Real y la zona subandina (Figura 1), dentro de la faja metalogenética interpretada como correspondiente a pórfidos de Au-Cu-Mo del Jurásico Superior [1], donde se localiza el prospecto minero La Bonita, un depósito de tipo pórfido y epitermal de Cu-Au, [2].

El estudio de este sector ha permitido conocer su potencial geológico, a través de la interpretación y correlación de la información geológica recopilada tanto en Ecuador como en Colombia. Además, el análisis geoestadístico de 74 muestras de sedimentos fluviales activos recolectados en los drenajes secundarios, mediante un método multivariado, ha revelado *clústeres* de interés que podrían ser considerados en etapas posteriores de estudios.

A pesar de los avances en la investigación geológica y mineral en la región, aún existen brechas significativas en la comprensión de los procesos geológicos que controlan la distribución de elementos minerales y la génesis de los depósitos en esta área. Los estudios previos han identificado la presencia de elementos metálicos como: oro (Au), molibdeno (Mo), plomo (Pb), zinc (Zn), y elementos de tierras raras; pero, la

relación precisa entre la tectónica, la litología y los procesos hidrotermales no ha sido plenamente comprendida. Esta falta de conocimiento limita la capacidad de evaluar adecuadamente el potencial minero y diseñar estrategias de exploración efectivas.

Este artículo propone un análisis exhaustivo de la distribución espacial de elementos geoquímicos en la cuenca del Río Cofanes, utilizando un enfoque multivariado para identificar patrones de mineralización y su relación con la geología local. El estudio se basa en el análisis geoestadístico aplicando técnicas multivariadas como el Análisis de Componentes Principales (ACP) y la identificación de *clústeres* geoquímicos. Estos métodos permiten una evaluación detallada de la variabilidad espacial de los elementos y la identificación de zonas de interés mineral.

Los resultados de este estudio han identificado varias zonas anómalas con alto potencial minero, especialmente en los contactos entre intrusivos ígneos y rocas sedimentarias, así como, en áreas influenciadas por estructuras tectónicas activas. Estas zonas evidencian concentraciones elevadas de metales preciosos y elementos de tierras raras, lo que sugiere la presencia de sistemas de mineralización hidrotermal y posibles depósitos tipo pórfido. Además, se ha detectado indicios geoquímicos preliminares de mineralización de berilo verde en zonas de contacto entre intrusivos graníticos y metasedimentos, lo cual podría sugerir la existencia de ambientes favorables a la formación de esmeraldas [3], que se forman en ambientes geológicos con condiciones específicas de presión, temperatura, y química de fluidos en zonas de contacto ígneo-metamórficas. El control estructural observado en la distribución de estos elementos resalta la importancia de las estructuras tectónicas en la génesis de depósitos minerales en la región, subrayando su papel crítico en la concentración y localización de los recursos minerales.

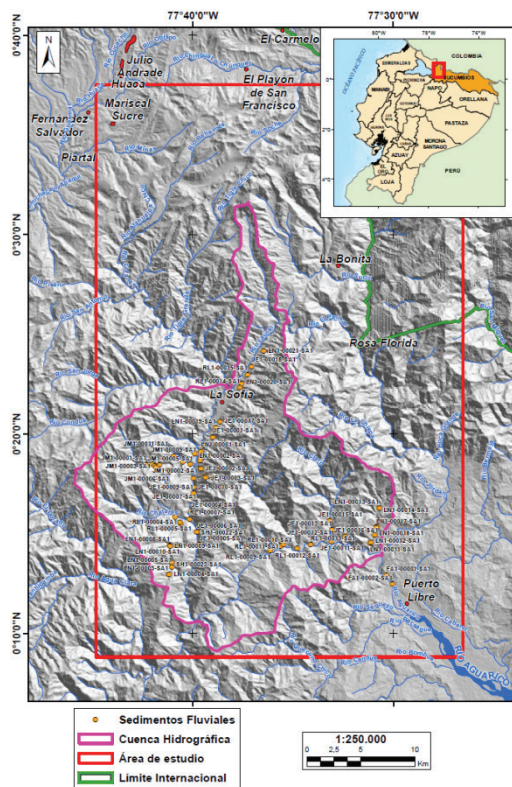


Figura 1: Mapa de ubicación.

2. DESARROLLO (MATERIALES Y MÉTODOS / METODOLOGÍA)

La estructura del artículo se organiza de la siguiente manera: primero se revisa el estado del arte sobre la geología y mineralización de la cuenca del Río Cofanes, destacando áreas de incertidumbre y problemas no resueltos; luego, se expone la metodología aplicada en el análisis geoquímico y estadístico, seguida de la discusión de los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones principales y se proponen recomendaciones para futuras investigaciones en la región.

La elaboración de un mapa geológico base en la cuenca del Río Cofanes permitió identificar unidades litológicas, cuerpos intrusivos, depósitos superficiales y estructuras tectónicas fundamentales para entender el entorno geológico y localizar zonas de mineralización. Se recopilieron mapas geológicos a diversas escalas, junto con datos topográficos, imágenes satelitales y modelos digitales de terreno, sistematizados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que facilitó la correlación litoestratigráfica y estructural entre Ecuador y Colombia.

El estudio abarcó las hojas geológicas escalas 1: 100 000 Tulcán [4], San Gabriel [5], y Mariano Acosta [6], en Ecuador, y el mapa geológico de Colombia, escala 1: 1 000 000 [7], identificando correlaciones clave como la Formación Chingual en Colombia con unidades metamórficas similares en Ecuador, y la

Formación Saldaña en Colombia con la Formación Misahuallí en Ecuador, ambas reflejando importantes eventos volcánicos andinos [8].

Los cuerpos intrusivos como la Granodiorita de Azafrán en Ecuador se correlacionan con el Complejo Migmatítico La Cocha – Río Téllez en Colombia, mientras que la Sienita Rosa Florida en Ecuador encuentra su equivalente en el Monzogranito de Mocoa en Colombia. Estos intrusivos están vinculados a estructuras tectónicas como la falla dextral La Sofía, que dio origen al Granito Condúe, potencialmente mineralizado.

En el sector del río Cofanes, las rocas cretácicas de la Formación Napo en Ecuador, en contacto con la Sienita Rosa Florida y su equivalente la Formación Villeta en Colombia, muestran concentraciones geoquímicas significativas, destacando el potencial mineralógico de la zona. Al sureste, la Formación Tena en Ecuador se correlaciona con la Formación Rumiayaco en Colombia, y la región también incluye rocas volcánicas pliocénicas de la Formación Pisayambo y depósitos cuaternarios. La imagen que ilustra esta información se encuentra en el Anexo A1.

El análisis estructural, apoyado en estudios geomorfológicos, reveló lineamientos y estructuras ortogonales que posiblemente facilitaron el ascenso de pulsaciones magmáticas recientes con potencial para mineralización (la imagen correspondiente se encuentra en el Anexo A2). Estas correlaciones subrayan la continuidad geológica entre Ecuador y Colombia, destacando la relevancia de los procesos tectónicos y magmáticos compartidos en la evolución geológica regional.

Base de datos:

Dentro del marco del proyecto IGTE se recolectaron muestras de sedimentos fluviales en la cordillera ecuatoriana, siguiendo protocolos rigurosos para asegurar la calidad y representatividad de las muestras, con una densidad de una muestra por cada 2,5 km².

Para el área de estudio, los análisis químicos se realizaron mediante técnicas como ensayo al fuego, ICP-OES e ICP-Masas, se consolidaron en una base de datos con 74 observaciones y 47 variables geoquímicas. Esta base de datos, georreferenciada con coordenadas UTM (WGS84, zona 17N), permitió la creación de mapas temáticos usando SIG, identificando áreas con potencial geológico-minero.

El muestreo sistemático, basado en una cuadrícula, garantizó una cobertura uniforme y representativa del área, proporcionando datos confiables para la interpretación geológica y geoquímica del territorio. Las concentraciones de elementos químicos fueron medidas en ppm, ppb y %, abarcando una amplia gama de elementos y compuestos, lo que refuerza la robustez del análisis.

Metodología

El desarrollo del estudio comprendió una secuencia de fases metodológicas, iniciando con la integración geológica regional y local, seguida del análisis estructural y geomorfológico, el levantamiento y análisis geoquímico, y finalizando con el tratamiento estadístico multivariado de los datos. Esta estructura permite una interpretación integral y replicable de los resultados, asegurando coherencia entre los datos de campo y los patrones geoquímicos identificados. En este trabajo se distingue claramente entre berilio (Be), referido a las concentraciones geoquímicas obtenidas mediante análisis ICP-MS, y berilo, el mineral que constituye la fase cristalina de Be en pegmatitas y ambientes de contacto. Las menciones a esmeraldas corresponden a la variedad verde del berilo.

Integración y correlación geológica

Se recopilaron y analizaron mapas geológicos regionales y locales de Ecuador y Colombia para establecer correlaciones litológicas y estructurales transfronterizas. Se digitalizaron unidades litológicas e intrusivos relevantes, como el Granito Condué y la Granodiorita Azafrán, así como, formaciones sedimentarias (Napo, Hollín, Tena), utilizando los Sistemas de Información Geográfica QGIS 3.4 y ArcGIS PRO 3.5.0.

Análisis de estructuras geológicas y geomorfológicas

Se identificaron y analizaron estructuras tectónicas (fallas inversas, zonas de cizalla) y rasgos geomorfológicos a partir de modelos digitales de elevación (DEM) y sombreado. La interpretación estructural se integró a la litología para inferir zonas favorables para mineralización.

Levantamiento geoquímico

Se recolectaron 74 muestras de sedimentos fluviales activos en drenajes secundarios de la cuenca del Río Cofanes, bajo estándares del IIGE para exploración regional. Las muestras fueron secadas, tamizadas (fracción <177 μm), y analizadas mediante técnicas ICP-MS y AAS, generando datos de más de 40 elementos.

Métodos analíticos

Los análisis químicos fueron realizados en laboratorios certificados. Se aplicaron controles de calidad como blancos, duplicados y estándares. Los datos crudos fueron validados y organizados en matrices multielementales para análisis posterior.

Análisis geoestadístico

El análisis geoestadístico se realizó en lenguaje R (versión 4.2.1). Se emplearon los paquetes *tidyverse*, *ggplot2*, *factoextra*, *cluster*, y *corrplot*. El procedimiento metodológico incluyó las siguientes etapas, que permitieron el tratamiento riguroso de los datos:

1. Eliminación de variables con baja variabilidad, como: Ag, Bi, Sb, Se, Te y W, cuyos valores eran cercanos a cero o constantes. Estas fueron excluidas para evitar introducir ruido en el análisis y optimizar la eficiencia estadística del modelo.
2. Gestión de datos atípicos mediante el método del rango intercuartílico (IQR por sus siglas en inglés), lo cual permitió conservar coherencia y robustez en el análisis multivariado y evitar distorsiones provocadas por valores extremos. Este filtrado fue clave para asegurar una interpretación sólida de las relaciones geoquímicas detectadas
3. Evaluación estadística descriptiva mediante diagramas de caja, histogramas y medidas de dispersión para explorar la estructura de los datos originales y depurados.
4. Prueba de Esfericidad de Bartlett, realizada para verificar la adecuación del conjunto de datos al Análisis de Componentes Principales (ACP). Los resultados fueron los siguientes:
 - Estadístico $\chi^2 = 2095,879$
 - Grados de libertad = 496
 - p-valor = $5,061\ 961 \times 10^{-195}$
 Lo cual permite rechazar la hipótesis nula y confirmar la presencia de correlaciones significativas entre las variables (Anexo A10).
5. Normalización de los datos para asegurar comparabilidad entre elementos con distintas unidades y rangos.
6. Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar estructuras geoquímicas latentes y reducir la dimensionalidad de los datos. Las coordenadas, contribuciones y \cos^2 de cada variable se analizaron en los Anexos A11 a A20.
7. Identificación de *clústeres* geoquímicos mediante análisis de conglomerados jerárquicos sobre las componentes principales, apoyados por la interpretación litológica y estructural.
8. Cálculo del *ranking* de variables según su contribución acumulada a las primeras dimensiones del ACP, para destacar los elementos más influyentes en la diferenciación geoquímica de las muestras.

Replicabilidad

Con el fin de garantizar la replicabilidad del estudio, se documentaron minuciosamente todos los pasos y métodos utilizados en el análisis, incluyendo los *scripts* en lenguaje R, las decisiones estadísticas, los filtros aplicados y los criterios de exclusión de variables. Todos los archivos resultantes, matrices, gráficos y modelos fueron organizados en carpetas temáticas y archivados, asegurando trazabilidad para futuras investigaciones. Las visualizaciones se integran en los anexos correspondientes para consulta directa.

3. RESULTADOS

Descripción de las estadísticas básicas.

Se analizaron 74 muestras de sedimentos fluviales activos, cuyas concentraciones de elementos fueron expresadas en unidades de ppb, ppm y porcentaje. La estadística descriptiva reveló comportamientos geoquímicos diversos:

Elementos metálicos:

- Oro (Au) varió entre 2,50–819,00 ppb, con una media de 53,57 ppb y una asimetría positiva pronunciada.
- Plata (Ag) osciló entre 0,10–0,50 ppm (media: 0,128 ppm), comportamiento coherente con concentraciones naturales bajas en medios fluviales.

Elementos litófilos y base:

- Arsénico (As): media de 9,534 ppm.
- Bario (Ba): media de 205,74 ppm.
- Cromo (Cr): media de 104,1 ppm.
- Manganeso (Mn): media de 422,4 ppm.

Elementos en %:

- Aluminio (Al): 0,76 %–2,66 %, media de 1,477 %.
- Hierro (Fe): 1,78 %–6,85 %, media de 3,442 %.
- Potasio (K): 0,29 %–1,79 %, media de 0,709 %.
- Sodio (Na): media de 0,037 %.

Los histogramas (Anexo A3) mostraron que elementos como Al, Fe y K tienden a distribuciones normales, mientras que Au, Ag, Ba, Zn, Pb, y tierras raras presentan asimetrías positivas, indicativas de procesos de concentración secundaria o fuentes puntuales de mineralización [9], [10], [11], [12], [13].

Metales Base:

El cobre (Cu) y el plomo (Pb) presentan distribuciones asimétricas, con picos en bajas concentraciones, sugiriendo su asociación con sulfuros y su movilidad en fluidos hidrotermales [14]. El zinc (Zn) también muestra una distribución asimétrica similar.

Elementos Alcalinos y Alcalinotérreos:

El calcio (Ca) y el magnesio (Mg) exhiben distribuciones uniformes, reflejando su presencia en minerales como calcita, dolomita y arcillas. El potasio (K) muestra una distribución uniforme, coherente con su abundancia en feldespatos potásicos y micas.

Elementos Raros y de Alta Tecnología:

El berilio (Be) presenta bajas concentraciones, posiblemente relacionado con su presencia en minerales específicos o raros, como lo observado en esmeraldas colombianas por Fernando y Guevara [15] y en pegmatitas graníticas por Černý [16]. El niobio (Nb) y el itrio (Y) tienen distribuciones dispersas, indicando su presencia en minerales accesorios raros o fases mineralógicas específicas de rocas ígneas diferenciadas, como se describe en la investigación de Kuzmenko [17].

Distribuciones Peculiares:

El antimonio (Sb) y el mercurio (Hg) muestran distribuciones altamente asimétricas, reflejando su alta movilidad y concentración en ambientes hidrotermales, lo que sugiere procesos de mineralización secundaria en el área de estudio.

Coefficiente de Variación (CV) y Análisis de la Variabilidad de Elementos Químicos

El análisis del coeficiente de variación (CV) permitió identificar el grado de dispersión de los datos para cada elemento. El Au presentó una variabilidad extremadamente alta (CV = 263,07 %), seguido por el Pb con 103,52 %, Ba con 118,10 %, Be con 64,58 % y Nb con 74,47 %, lo cual indica una gran heterogeneidad en la distribución de estos elementos dentro de las muestras recolectadas. Esta variabilidad puede deberse a procesos de enriquecimiento mineral localizados, fuentes múltiples de aporte o a la influencia de estructuras geológicas que controlan la dispersión de los elementos. Por otro lado, el Al, el titanio (Ti), el K y el talio (Tl) mostraron bajos coeficientes de variación, lo que sugiere que estos elementos se encuentran de forma más homogénea en el área de estudio, probablemente por su fuerte control litogénico, ya que forman parte de minerales comunes en las rocas ígneas y sedimentarias [13].

RESULTADOS ORGANIZADOS POR GRUPOS

Grupo 1: Variabilidad Geoquímica y Relaciones Iniciales

El análisis de diagramas de cajas y bigotes, presentado en el Anexo A4, revela una alta variabilidad en elementos como Au, As y Pb, lo que sugiere procesos geológicos como mineralización hidrotermal y dispersión secundaria, en concordancia con lo sugerido por Blaauwbroek [18]. Por otro lado, elementos como Hg, Cr y Co presentan distribuciones más concentradas, lo que indica fuentes geológicas

homogéneas. La uniformidad en elementos como Fe, K y Al sugiere abundancia natural y homogeneidad litológica, mientras que los valores atípicos observados en Cd y Pb podrían corresponder a áreas con implicaciones ambientales o geológicas locales que requieren mayor atención.

La matriz de correlación (Anexo A5) mostró fuertes relaciones positivas entre elementos como Al y Be ($r = 0,493$) y entre Be y Fe ($r = 0,751$), lo que indica una probable co-ocurrencia en minerales aluminicos o ferruginosos. En contraste, se observan correlaciones negativas como Ag y Al ($r = -0,282$), coherentes con ambientes donde los sulfuros no se asocian con silicatos. También destaca la correlación entre Zn y Zr ($r = 0,573$), posiblemente asociada a minerales como esfalerita y zirconita.

Grupo 2: Covarianzas y Patrones Geoquímicos

El análisis de la matriz de covarianza presentado en el Anexo A6 permitió identificar asociaciones geoquímicas clave. Por ejemplo, la covarianza positiva entre Ti y Fe sugiere su coexistencia en minerales como la ilmenita, mientras que la relación entre Ba y Sr podría corresponder a asociaciones en baritina y celestina, típicas de ambientes hidrotermales. Las covarianzas negativas entre Ti y Ba o entre As y Al indican mecanismos de cristalización o deposición distintos.

Estos hallazgos respaldan hipótesis sobre entornos geológicos mixtos, donde procesos magmáticos e hidrotermales convergen. Las agrupaciones elementales, como la de metales base y preciosos (Au, Ag, Cu, Pb), refuerzan la idea de mineralización en vetas con sulfuros.

Grupo 3: Análisis de Componentes Principales (ACP) y Estructuras Subyacentes

Luego del tratamiento de los datos (ver sección de metodología), se ejecutó el ACP sobre las 32 variables seleccionadas. El resultado mostró que los dos primeros componentes explican el 44,71 % de la varianza total (Anexo A7). La Dimensión 1 (29,65 %) está dominada por Cd, Zn, Fe, V y Be, lo cual sugiere influencia de procesos hidrotermales. La Dimensión 2 (15,05 %) presenta alta carga para Mg, Al, Mn y Co, vinculados a procesos secundarios de alteración y mineralización.

Las coordenadas y representaciones de las variables se detallan en los Anexos A8, A9 y A10, donde se observa que Zn, Cd y Fe tienen cargas elevadas en Dim.1, mientras que Mg, Al y Co, dominan en Dim. 2. Be y Zr se comportan como elementos de transición entre componentes, posiblemente asociados a pegmatitas o cuerpos ígneos diferenciados.

Grupo 4: Análisis Detallado con Datos Filtrados

Tras depurar los datos (ver sección metodológica), se obtuvo un nuevo conjunto de correlaciones (Anexo A11), donde se destacan asociaciones entre Al y Li ($r = 0,711$), Be y Cd ($r = 0,648$), y Be y Ca ($r = 0,291$). Estas asociaciones refuerzan la co-ocurrencia de elementos en fases minerales específicas. Se evidencian también correlaciones negativas entre Au y Al ($r = -0,352$) y entre Be y K ($r = -0,375$), que podrían sugerir segregación geoquímica en ambientes contrastantes.

El análisis de la nueva matriz de covarianza depurada, disponible en el Anexo A12, muestra relaciones significativas como Be-Cd (cov. = 0,079), Fe-Cd (cov. = 0,068) y Be-Fe (cov. = 0,077), indicando co-enriquecimiento potencial en determinados contextos geológicos. Las relaciones negativas como Au-Al (cov. = -0,037) y Cu-Be (cov. = -0,041) complementan esta interpretación.

Grupo 5: Distribuciones Estándar y Análisis de Diagramas de Cajas

El Anexo A13 muestra la distribución filtrada de los datos geoquímicos mediante diagramas de cajas y bigotes. Elementos como Na y Hg presentan alta variabilidad, con amplios rangos intercuartílicos (IQR), mientras que K, Ti y Tl exhiben variabilidad baja. Elementos como Cd y Co tienen distribuciones similares, lo cual puede indicar procesos comunes. Be y Fe presentan diferentes rangos de dispersión, lo que sugiere diferencias en sus mecanismos de incorporación litogeoquímica.

Grupo 6: Interpretación Geológica de Dimensiones ACP y Clústeres

La prueba de esfericidad de Bartlett ($\chi^2 = 2095,879$, $p < 10^{-195}$) confirmó la aplicabilidad del ACP. Las variables más influyentes en PC1 fueron Cd, Zn, Fe y V, reflejando procesos de sulfuros; mientras que en PC2 dominaron Mg, Co, Al y Mn, propios de ambientes ígneos o metamórficos. Las contribuciones específicas por componente se detallan en los Anexos A14 a A20.

Grupo 7: Clústeres Geoquímicos y Anomalías

Se identificaron agrupamientos geoquímicos coherentes con la geología local:

- Grupo 1 (Anexo A21): Sulfuros (Cd, Zn, Pb, Cu, Fe, Mn) en contacto granito-sedimentos y en fallas como La Sofía [19], [20], [21].
- Grupo 2 (Anexo A22): Pegmatitas con Li, Be, Nb, V y Ti, asociadas al granito Condué, Sienita Rosa Florida Formación Napo, [22], [23].
- Grupo 3 (Anexo A23): Mg, K, Ca en el Granito Condué con control estructural.
- Grupo 4 (Anexo A24): Concentraciones de Fe, Al, Mg, Mn por metamorfismo de contacto entre Granito Condué y Granodiorita de Azafrán.

Las anomalías coincidentes Al, Be, Cd, Li, Yy en zonas de contacto y fallamiento pueden indicar procesos metasomáticos y control estructural, tal como proponen Nordstrom y Ball [24], (Anexo 25).

El Anexo A26 ilustra la distribución de anomalías geoquímicas de metales como Au, Mo, Pb, Zn y Zr, evidenciando su alineación espacial con unidades litológicas clave (Granito Condué, Formación Napo, Sienita Rosa Florida) y estructuras como la Falla La Sofía. Esta configuración indica un control estructural y litológico sobre la mineralización, especialmente en zonas de contacto e influencia tectónica.

Las fallas principales y subparalelas habrían actuado como metalotectos, favoreciendo la circulación de fluidos hidrotermales y la deposición de sulfuros y óxidos metálicos [25], [26]. La superposición de múltiples elementos sugiere un sistema polimetálico posiblemente asociado a mineralización tipo pórfido o a procesos de hibridación hidrotermal [27].

Estudios similares en contextos andinos han demostrado que los granitos calcoalcalinos, al interactuar con metasedimentos o volcanitas en presencia de estructuras compresivas (como zonas de cizalla o fallamiento inverso), generan condiciones propicias para depósitos tipo pórfido [25], [26], [27].

3.1 Discusión

El análisis geoquímico y estadístico multivariado realizado en la cuenca del Río Cofanes ha permitido identificar patrones de concentración y distribución de elementos traza asociados a procesos geológicos complejos. La interpretación de los datos se organiza según los grupos definidos en el ACP y agrupamientos jerárquicos, descritos en los resultados. A continuación, se discuten las principales asociaciones y su relación con los ambientes geológicos.

Influencia tectónica y litológica en la mineralización

La ocurrencia de anomalías de elementos metálicos (Au, Mo, Pb, Zn, Zr) en el Grupo 1, especialmente en las zonas de contacto entre la Formación Napo y la Sienita Rosa Florida, sugiere un claro control estructural. Estas estructuras corresponden a fallas inversas, zonas de cizalla dúctil y fracturamiento subparalelo al rumbo, generadas en el contexto compresivo andino, que funcionan como metalotectos primarios para la mineralización [19], [25]. Este tipo de fallas actúa como pasajes previamente perforados de alta permeabilidad, facilitando la circulación de fluidos hidrotermales y la precipitación de sulfuros y óxidos metálicos [28], [29], [30].

Distribuciones geoquímicas en zonas de contacto y fusión ígnea

El Grupo 2 mostró concentraciones elevadas de elementos como Al, Be, Cd, Li y Y, en zonas de

contacto entre el Granito Condué y la Granodiorita Azafrán, así como, en el límite entre la Sienita Rosa Florida y la Formación Napo. Estos patrones sugieren un ambiente magmático a metasomático, con acumulación de elementos en pegmatitas y venas hidrotermales ricas en micas, feldespatos y berilo [31], [32], [33].

Asociaciones con procesos de metamorfismo de contacto

En el Grupo 3, las altas concentraciones de Fe, Mg, Mn y Al fueron observadas en márgenes de intrusivos como el Granito Condué. Esto apunta a un entorno de metamorfismo de contacto, caracterizado por aureolas térmicas con formación de minerales como magnetita y granate [34]. La coexistencia de anomalías térmicas y geoquímicas indica la superposición de eventos magmáticos e hidrotermales [30].

Pegmatitas y elementos de tierras raras

El Grupo 4 se distinguió por la concentración de Li, Be, Nb, Y y Ti, elementos asociados con la formación de pegmatitas graníticas diferenciadas. Estos ambientes favorecen la cristalización de minerales portadores de REE, tales como, monacita, xenotima y euxenita. En este estudio, se aclara que los “elementos raros” hacen referencia a La, Ce, Nd, Sm, Y, típicamente concentrados en fases tardías del magmatismo [31], [32], [33], [35].

Potencial de mineralización de esmeraldas

Las anomalías de Be observadas en el Grupo 5, en zonas de contacto entre intrusivos ácidos y metasedimentos aluminosos (como filitas o esquistos micáceos), sugieren condiciones favorables para la formación de berilo verde o esmeralda. Este tipo de mineralización ha sido documentado en contextos similares en donde se destacan la importancia de la interacción entre fluidos hidrotermales y rocas ricas en Al y Be, [36], [37], [38].

Consolidación metodológica y consistencia interpretativa

Cabe destacar que los patrones aquí discutidos derivan de un proceso riguroso de análisis multivariado. Previamente, en la etapa metodológica, se eliminaron variables con baja variabilidad (Ag, Bi, Sb, Se, Te, W) y se gestionaron los datos atípicos mediante el método del rango intercuartílico IQR, lo cual mejoró la robustez del modelo estadístico y la validez de las agrupaciones identificadas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio integró análisis estructurales, geoquímicos y estadísticos multivariados para caracterizar el potencial mineralógico de la cuenca del Río Cofanes, revelando condiciones geológicas favorables para la formación de depósitos polimetálicos y gemológicos.

Se identificaron cinco agrupaciones geoquímicas diferenciadas, asociadas a procesos hidrotermales, skarn cálcico-férrico y pegmatitas enriquecidas en elementos raros. La evidencia geoquímica de Be, en coincidencia con zonas de contacto intrusivos–metasedimentos, constituye un indicio preliminar de un posible contexto geológico favorable para la formación de berilo verde (esmeraldas). Se recomienda validar esta hipótesis mediante estudios mineralógicos y de campo más detallados. Este hallazgo es consistente con modelos internacionales que describen la cristalización de esmeraldas en ambientes ígneo-metamórficos controlados estructuralmente

Adicionalmente, las anomalías coincidentes de Au, Mo, Pb, Zn y Zr, alineadas con estructuras tectónicas activas como la Falla La Sofía, respaldan la existencia de un sistema polimetálico controlado por litología y estructura, con características afines a depósitos tipo pórfido o hibridación hidrotermal

Se recomienda validar las hipótesis propuestas mediante trabajos de campo detallados, incluyendo mapeo estructural y litológico enfocado en zonas anómalas, así como, estudios mineralógicos y petrogenéticos que confirmen la presencia de berilo y minerales asociados. Complementariamente, se sugiere implementar técnicas de modelamiento geofísico para delimitar zonas de contacto ígneo-metamórficas y estructuras profundas que actúan como conductos mineralizantes. Estas acciones permitirán definir con mayor precisión áreas de interés para la exploración futura, particularmente en sectores con potencial para mineralización de esmeraldas y sistemas polimetálicos.

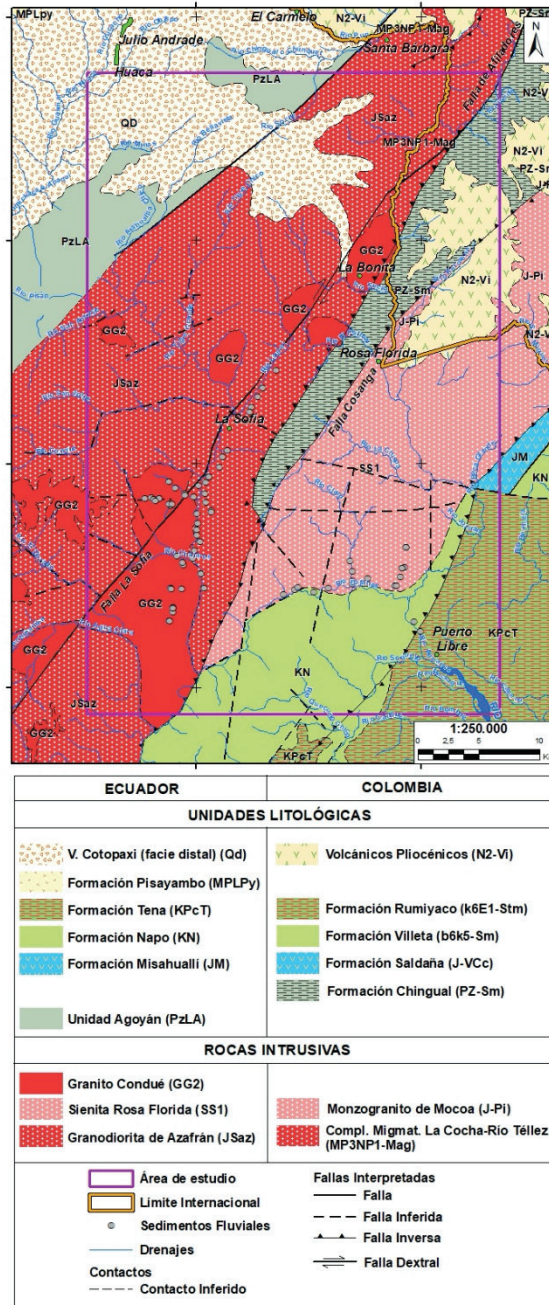
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), “Mapa Metalogenético de la República del Ecuador Escala 1:1000000,” *Mapa metalogenético de Ecuador escala 1:1 000 000 versión 2019*. p. 1, 2019, [Online]. Available: <https://www.geoenergia.gob.ec/mapa-metalogenetico-de-ecuador-escala-11-000-000-version-2019/>.
- [2] MINING PROJECTS ECUADOR MINING COUNTRY 2018 LA BONITA SIGCHOS GABY(Muyuyacu) UNACOTA. [Online]. Available: www.enamiop.gob.ec.
- [3] G. Giuliani, L. A. Groat, D. Marshall, A. E. Fallick, and Y. Branquet, “Emerald deposits: A review and enhanced classification,” *Minerals*, vol. 9, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.3390/min9020105.
- [4] Instituto Ecuatoriano de Minería (DGGM), “Hoja Geológica de Tulcán escala 1:100000.” 1981.
- [5] Instituto Ecuatoriano de Minería (DGGM), “Hoja Geológica de San Gabriel escala 1:100000.” Quito, 1981.
- [6] Instituto Ecuatoriano de Minería (DGGM), “Hoja Geológica de Mariano Acosta escala 1:100000.” Quito, 1981.
- [7] Servicio Geológico Colombiano, “Mapa Geológico de Colombia escala 1:1000000.” Bogotá, 2020.
- [8] Instituto de Investigación Geológico y Energético, “Mapa geológico de la República del Ecuador, 2017.” IIGE, Quito, 2017.
- [9] B. Li, S. Y. Jiang, H. Y. Zou, M. Yang, and J. Q. Lai, “Geology and fluid characteristics of the Ulu Sokor gold deposit, Kelantan, Malaysia: Implications for ore genesis and classification of the deposit,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 64, no. 1, pp. 400–424, 2015, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.07.018.
- [10] H. A. Helba, K. I. Khalil, M. M. Mamdouh, and I. A. A. Khalek, “Zonation in primary geochemical haloes for orogenic vein-type gold mineralization in the Quartz Ridge prospect, Sukari gold mine area, Eastern Desert of Egypt,” *J. Geochemical Explor.*, vol. 209, 2020, doi: 10.1016/j.gexplo.2019.106378.
- [11] J. Viltus and M. de Souza Bonfim, “Favorability mapping of hydrothermal vein-type lead deposits: a case study in Ribeira Valley, Brazil.” 2018.
- [12] D. B. Clarke and others, “Occurrence and Origin of Andalusite in Peraluminous Felsic Igneous Rocks,” *J. Petrol.*, vol. 46, no. 3, pp. 441–472, 2005, doi: 10.1093/petrology/egh083.
- [13] R. G. Garrett, “Natural distribution and abundance of elements,” in *Essentials of Medical Geology: Revised Edition*, Springer Netherlands, 2013, pp. 35–57.
- [14] J. Locutura, A. Bel-Lan, and E. Lopera, “Rios Rosas, 23-28003 Madrid. j.locutura@igme.es,” *Acta Geol. Hisp.*, 2002.
- [15] J. Fernando and J. Guevara, “ESTUDIO QUÍMICO, MINERALÓGICO Y ESPECTROSCÓPICO DE ESMERALDAS COLOMBIANAS DE LOS DISTRITOS MINEROS DE CHIVOR, MUZO Y COSCUEZ Y SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE ORIGEN GEOGRÁFICO.” 2017.
- [16] P. Cerny, “Mineralogy of Beryllium in

- Granitic Pegmatites,” *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 50, pp. 405–444, 2002, doi: 10.2138/rmg.2002.50.10.
- [17] K. A. Vlasov, M. Z. Kuz'menko, and E. M. Eskova, “The Lovozero alkali Massif,” *Geol. J.*, vol. 5, p. xviii, 1966.
- [18] N. Blaauwbroek, “Geochemical models of Sb(-As,Au,Ag) mineralization in Archaean and modern hydrothermal settings-Examples from the Murchison Greenstone Belt and the Manus back-arc basin.” 2016.
- [19] D. P. Cox, D. A. Singer, and U.S. G.P.O., “Mineral deposit models,” 1986. doi: 10.3133/b1693.
- [20] A. L. Hantsche and others, “Metasomatism and cyclic skarn growth along lithological contacts: Physical and geochemical evidence from a distal PbZn skarn,” *Lithos*, vol. 400--401, p. 106408, 2021, doi: 10.1016/j.lithos.2021.106408.
- [21] F. Pirajno, *Hydrothermal Mineral Deposits*, 1st ed. Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg, 1992.
- [22] L. D. Meinert, “Skarns and Skarn Deposits,” *GS*, vol. 19, no. 4, pp. 145–162, 1992.
- [23] P. Černý and T. S. Ercit, “The classification of granitic pegmatites revisited,” *Can. Mineral.*, vol. 43, no. 6, pp. 2005–2026, 2005.
- [24] D. Nordstrom and J. BALL, “The Geochemical Behavior of Aluminum in Acidified Surface Waters,” *Science*, vol. 232, pp. 54–56, May 1986, doi: 10.1126/science.232.4746.54.
- [25] R. H. Sillitoe, “Porphyry copper systems,” *Econ. Geol.*, vol. 105, no. 1, pp. 3–41, 2010, doi: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.
- [26] D. R. Cooke, P. Hollings, and J. L. Walshe, “Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls,” *Econ. Geol.*, vol. 100, no. 5, pp. 801–818, 2005, doi: 10.2113/gsecongeo.100.5.801.
- [27] J. P. Richards, “Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation,” *Econ. Geol.*, vol. 98, no. 8, pp. 1515–1533, 2003, doi: 10.2113/gsecongeo.98.8.1515.
- [28] V. F. Bense, T. Gleeson, S. E. Loveless, O. Bour, and J. Scibek, “Fault zone hydrogeology,” *Earth-Science Rev.*, vol. 127, pp. 171–192, 2013, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.09.008.
- [29] R. Bertani, G. Falcone, and others, “Assessment of geothermal potential in the Andean Cordillera,” *Geotherm. Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 1–23, 2023, doi: 10.1186/s40517-023-00260-8.
- [30] F. S. Spear, *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure–Temperature–Time Paths*. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1993.
- [31] P. Černý, “Mineralogy of Beryllium in Granitic Pegmatites,” in *Beryllium: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry*, vol. 50, E. H. Grew, Ed. Mineralogical Society of America, 2002, pp. 405–444.
- [32] A. Kampf, “Pegmatology: Pegmatite Mineralogy, Petrology and Petrogenesis. By W.B. Simmons, K.L. Webber, A.U. Falster and J.W. Nizamoff,” *Can. Mineral.*, vol. 42, pp. 919–920, 2004, doi: 10.2113/gscanmin.42.3.919-a.
- [33] A. Chakhmouradian and F. Wall, “Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More),” *Elements*, vol. 8, pp. 333–340, Oct. 2012, doi: 10.2113/gselements.8.5.333.
- [34] B. W. D. Yardley, *An introduction to metamorphic petrology*. Harlow, Essex: Longman Scientific & Technical, 1989.
- [35] C. L. Wang, S. Y. Jiang, and X. F. Lei, “Mechanism of beryllium mineralization in a granite-pegmatite system: Constraints from ore geology and beryl mineralogy of the large Arskartor Be-Nb-Mo deposit, southern Chinese Altai,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 167, 2024, doi: 10.1016/j.oregeorev.2024.105996.
- [36] L. A. Groat, G. Giuliani, D. D. Marshall, and D. Turner, “Emerald deposits and occurrences: A review,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 34, no. 1--2, pp. 87–112, 2008, doi: 10.1016/J.OREGEOREV.2007.09.003.
- [37] G. Giuliani, L. A. Groat, D. Marshall, A. E. Fallick, and Y. Branquet, “Emerald deposits: A review and enhanced classification,” *Minerals*, vol. 9, no. 2, 2019, doi: 10.3390/MIN9020105.
- [38] F. P. Schwarz, “Joint Analysis Applied to Structures of the Silverton Volcanic Center,” *Unkn. J.*
- [39] C. L. Wang, S. Y. Jiang, and X. F. Lei, “Mechanism of beryllium mineralization in a granite-pegmatite system: Constraints from ore geology and beryl mineralogy of the large Arskartor Be-Nb-Mo deposit, southern Chinese Altai,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 167, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.oregeorev.2024.105996.

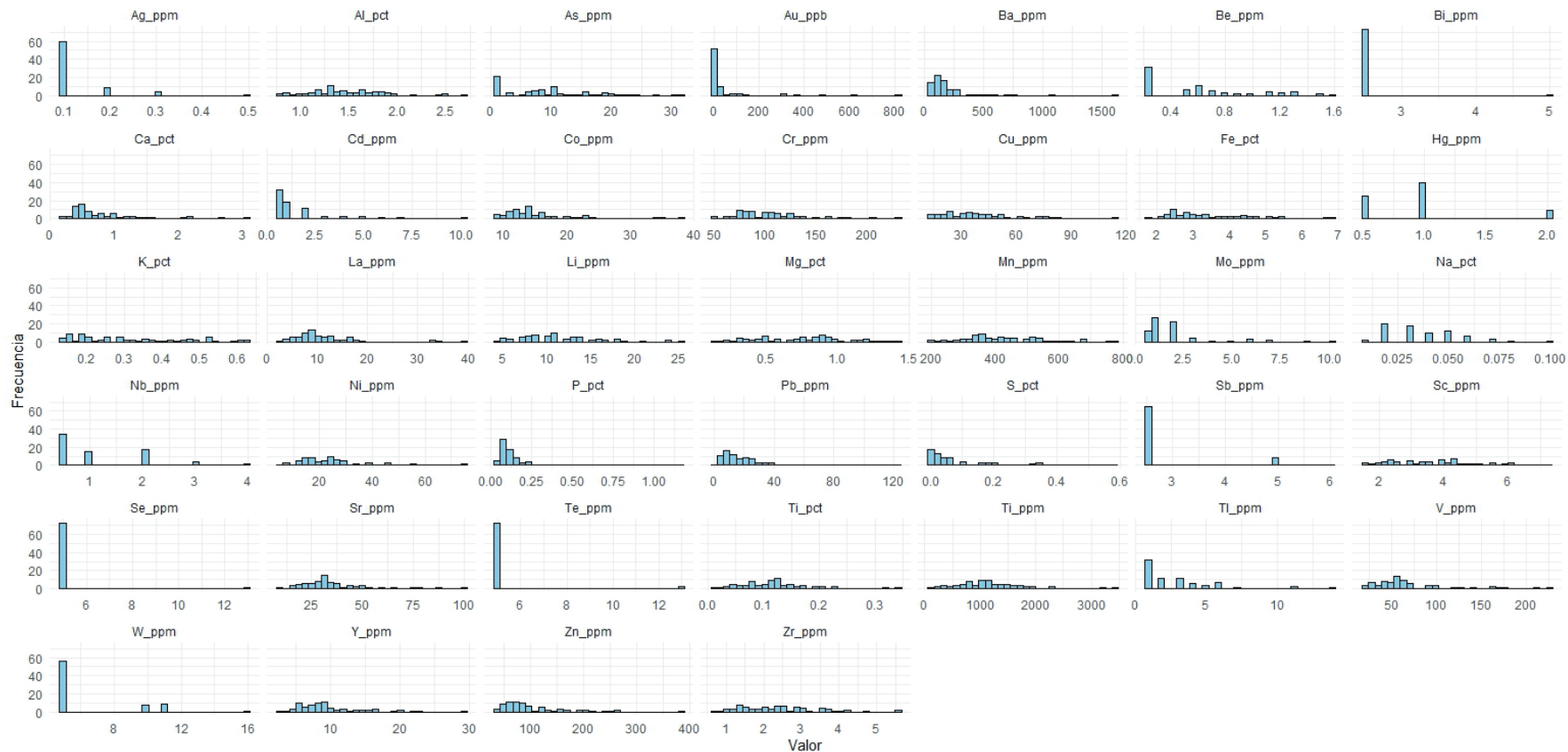
- [40] J. P. Richards, "Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation," *Econ. Geol.*, vol. 98, no. 8, pp. 1515–1533, 2003, doi: 10.2113/gsecongeo.98.8.1515.

ANEXOS

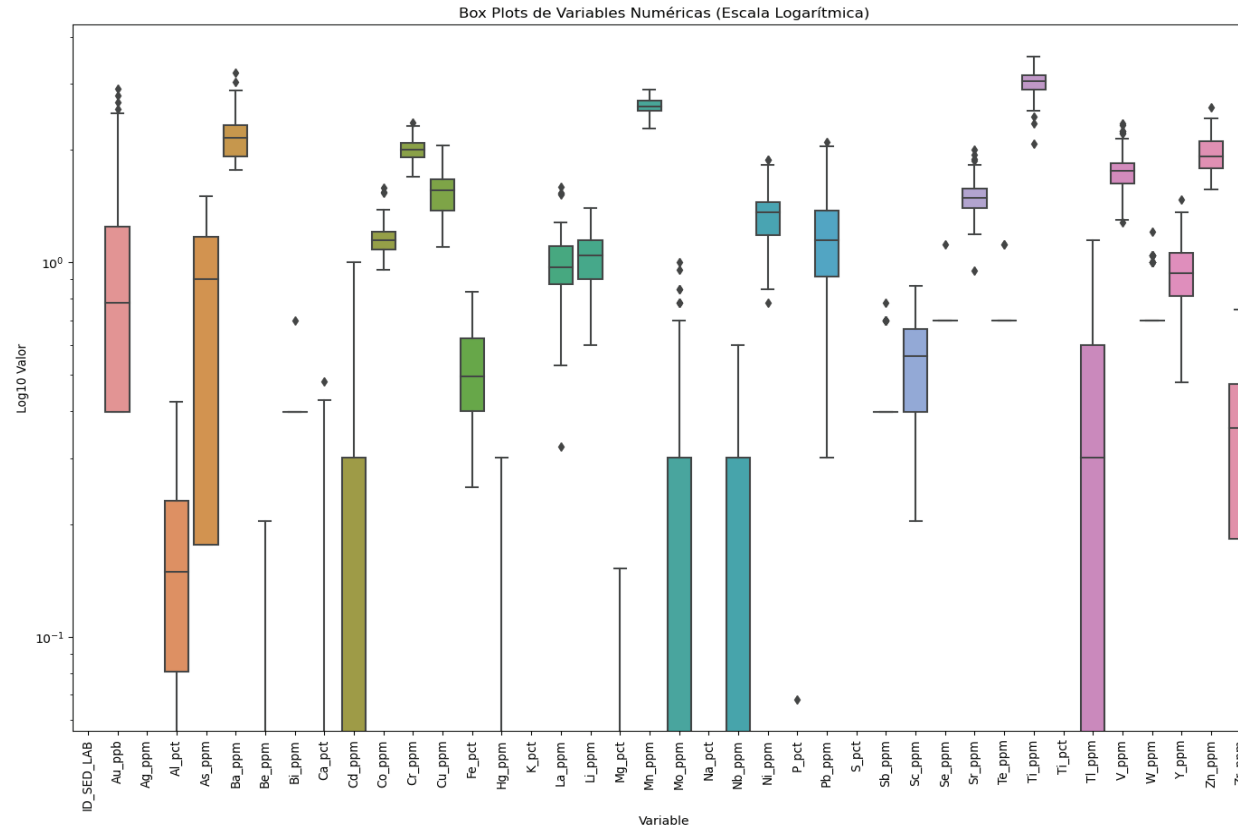


Anexo A1: Mapa geológico integrado del sector del Río Cofanes y su conexión tectono-litológica con el sur de Colombia. Este anexo presenta un mapa geológico detallado de la cuenca del Río Cofanes, elaborado a partir de la integración de cartografía del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) y de hojas geológicas regionales. El mapa incluye la delimitación precisa de unidades litológicas (Formación Napo, Formación Tiyuyacu, Granito Condué, Granodiorita de Azafrán, Sienita Rosa Florida), cuerpos intrusivos calcoalcalinos, y estructuras tectónicas mayores como la Falla La Sofia y zonas de cizalla asociadas. Se destacan contactos litológicos clave e interpretaciones estructurales inferidas a partir del análisis geomorfológico, alineamientos y fallamiento subparalelo, que reflejan el contexto tectónico compresivo andino. Asimismo, se sobreponen simbologías relacionadas con puntos de muestreo geoquímico, ubicaciones de anomalías multielemento y zonas con evidencia de procesos metasomáticos, hidrotermales y de metamorfismo de contacto, integrando aspectos litogénicos y mineralizantes. Este mapa constituye la base espacial para la interpretación geológica del área y para la vinculación con los patrones geoquímicos y estructurales observados en los resultados estadísticos, sirviendo como sustento para modelos de mineralización tipo pórfido, skarn y pegmatítico en el contexto del arco magmático andino norte.

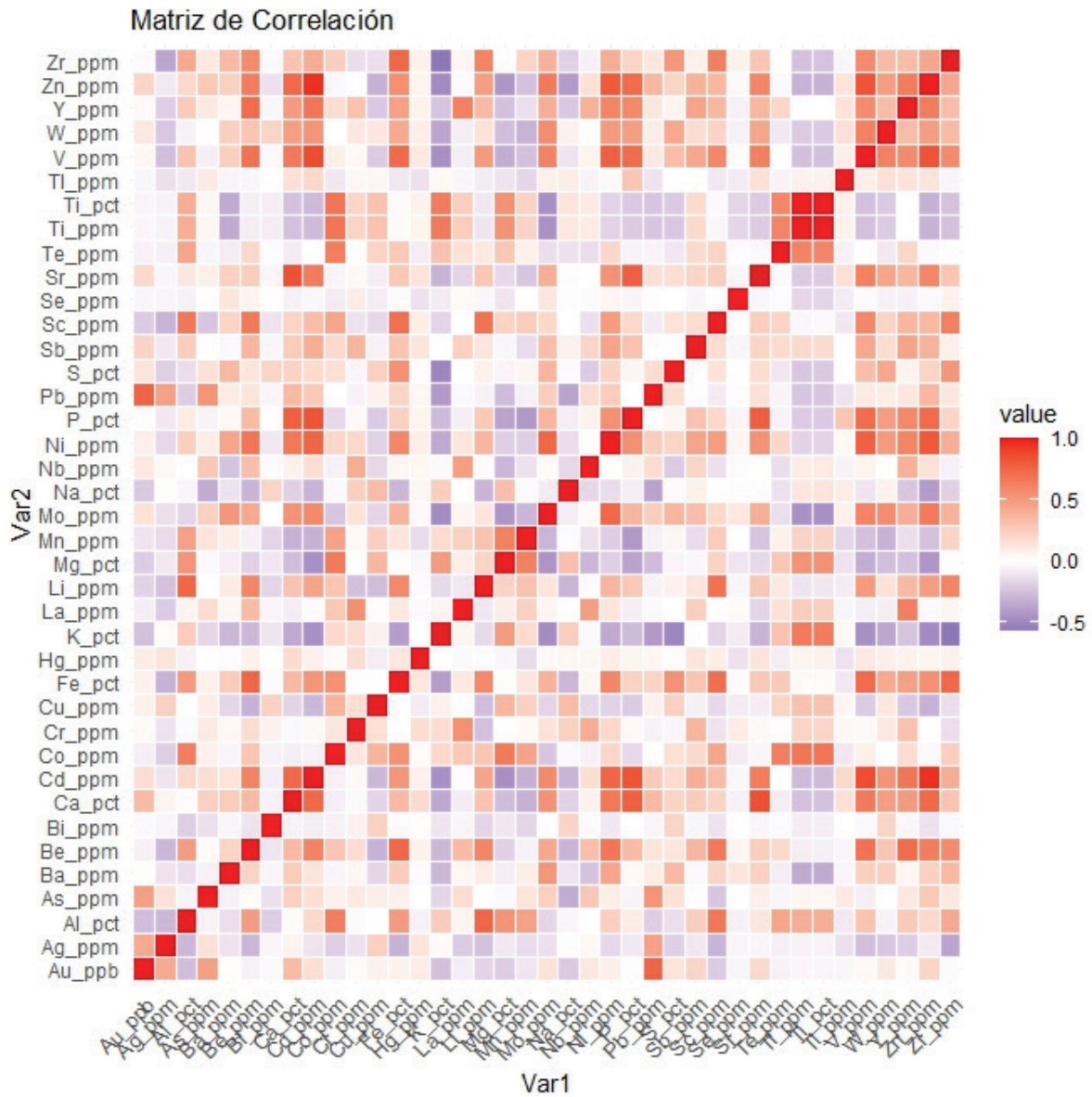
Histogramas de Variables Numéricas



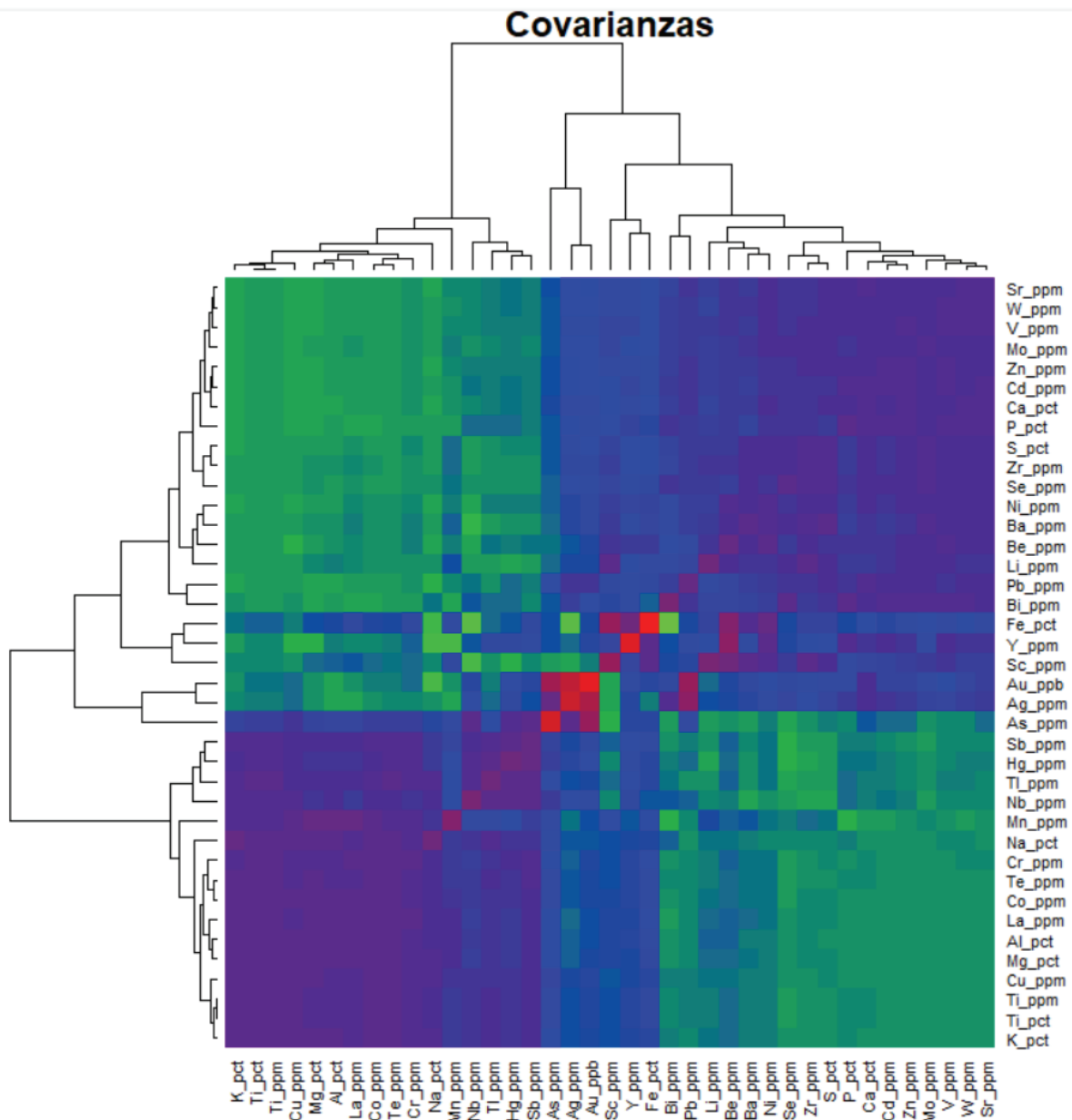
Anexo A3: Análisis de la distribución de frecuencias de elementos químicos en muestras geológicas mediante histogramas de variables numéricas no filtradas. Distribución de frecuencias: Ag_ppm, Au_ppb, y Bi_ppm, muestran una distribución sesgada hacia la izquierda, con una alta concentración de valores bajos y pocos valores altos, lo que sugiere que la mayoría de las muestras contienen bajas concentraciones de estos elementos. La_ppm, Ni_ppm, y Zn_ppm, presentan distribuciones más amplias, lo que indica una mayor variabilidad en las concentraciones entre las muestras. Ba_ppm y Pb_ppm muestran picos claros en su distribución, sugiriendo concentraciones predominantes específicas que son más comunes en las muestras analizadas. Se_ppm y Te_ppm, la frecuencia de valores altos es baja, lo que podría indicar la rareza de estos elementos en las muestras geológicas o su distribución heterogénea en los depósitos minerales.



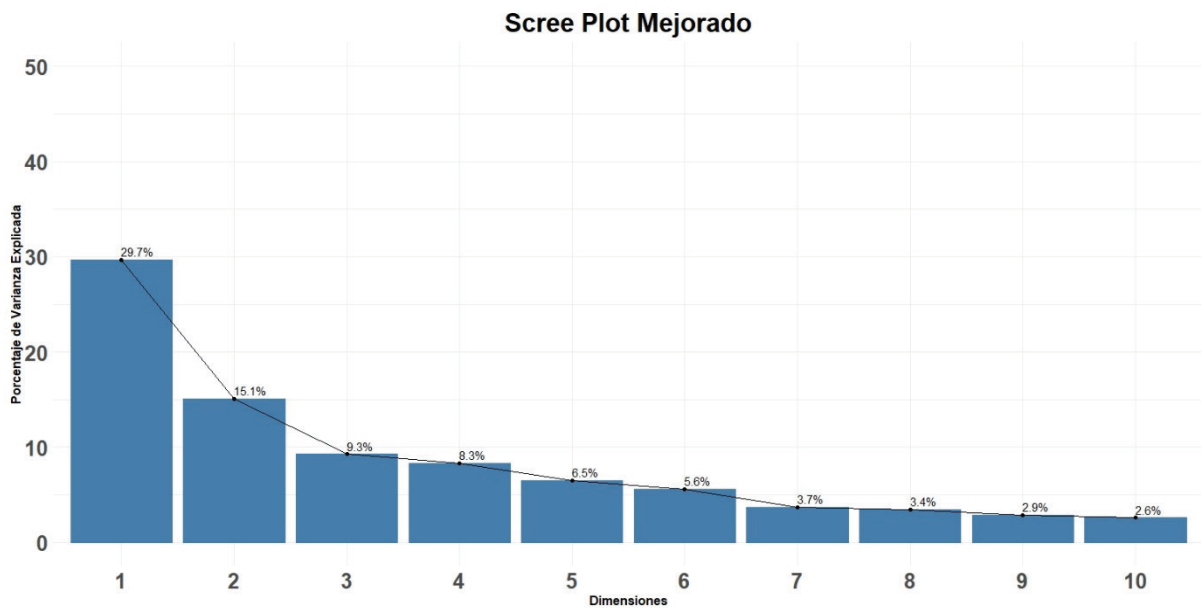
Anexo A4: Evaluación estadística de la variabilidad y anomalías en la concentración de elementos químicos en muestras geológicas mediante diagramas de cajas logarítmicas (box plots) de diversas variables. La escala del eje Y es logarítmica (base 10), Las concentraciones de la mayoría de los elementos muestran una amplia dispersión, con valores fuera del rango intercuartílico (outliers) indicando la presencia de muestras con concentraciones significativamente diferentes del valor mediano. Ba_ppm y Pb_ppm, exhiben una gran variabilidad. Mn_ppm, y Zn_ppm muestran un rango más restringido, sugiriendo una mayor homogeneidad en las concentraciones observadas. Cu_ppm y Ag_ppb tienen rangos amplios, lo que podría indicar variabilidad geológica en las muestras o procesos de mineralización diferente.



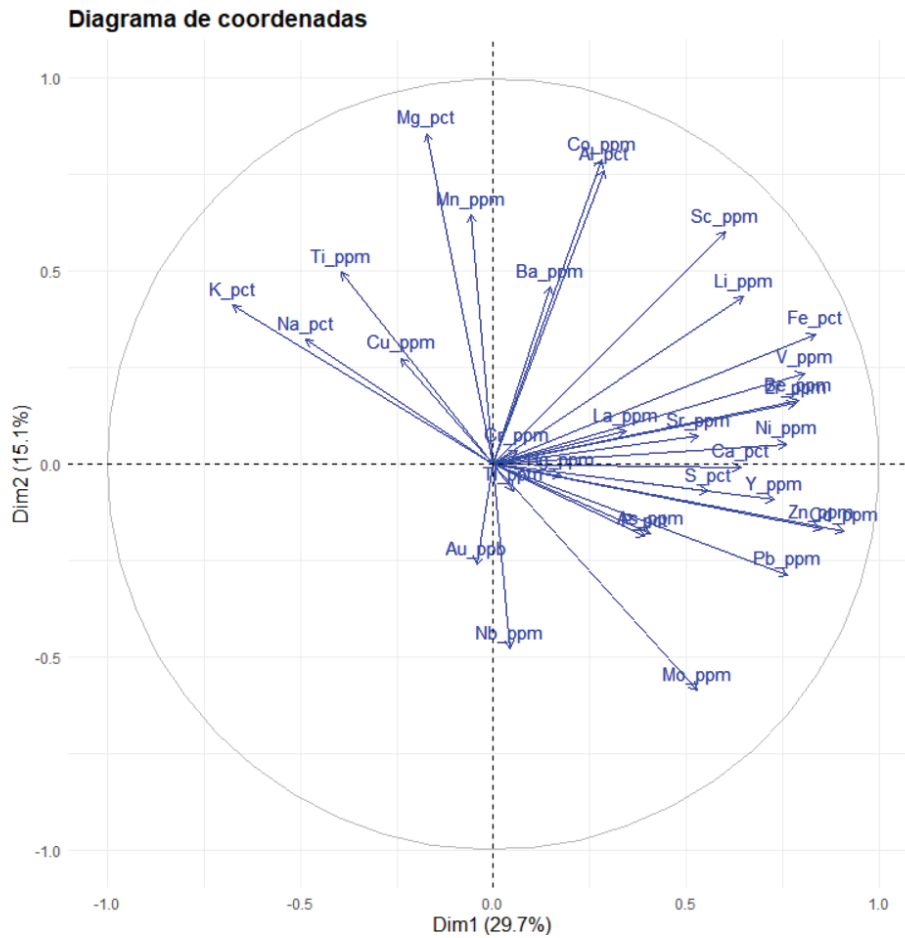
Anexo A5: Matriz de correlación de los datos crudos: coocurrencia de Al, Be, y Fe en minerales aluminicos, exclusión de Ag Asociaciones Zn-Zr y Cd-Be. Asociaciones positivas entre Al, Be, y Fe: La fuerte correlación positiva entre Al, Be, y Fe sugiere que estos elementos tienden a concentrarse conjuntamente. Exclusión de Ag en depósitos sulfurosos: La correlación negativa observada entre Ag y Al indica que altos niveles de Ag no suelen coincidir con altas concentraciones de Al.



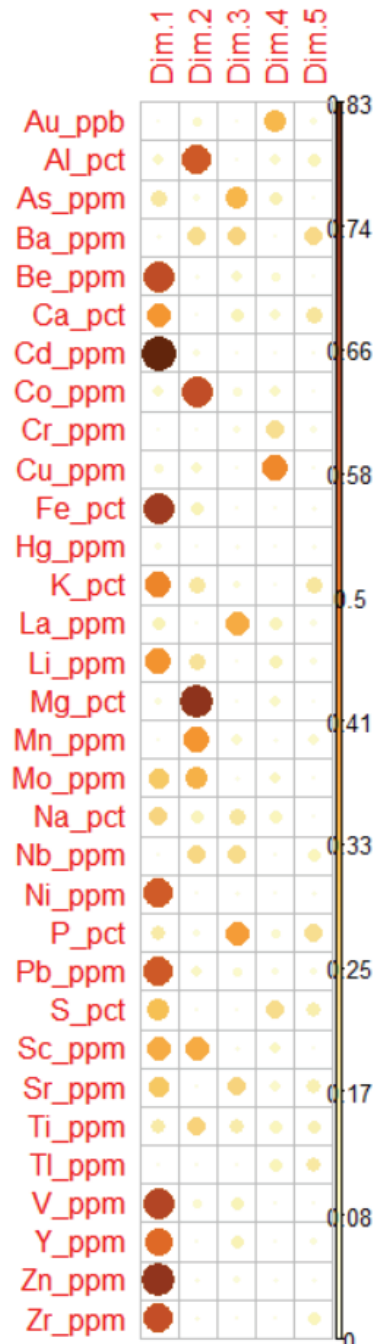
Anexo A6: Matriz de covarianzas de los datos crudos. Correlaciones positivas significativas entre Ti y Fe. Fuerte correlación entre Ba y Sr. Relación positiva entre Ni y Co. Ti y Ba presentan una relación inversa, lo que podría indicar diferentes procesos de cristalización. Correlación negativa entre As y Al sugiere que estos elementos participan en mecanismos de deposición distintos, con As asociado a sulfuros y Al a silicatos.



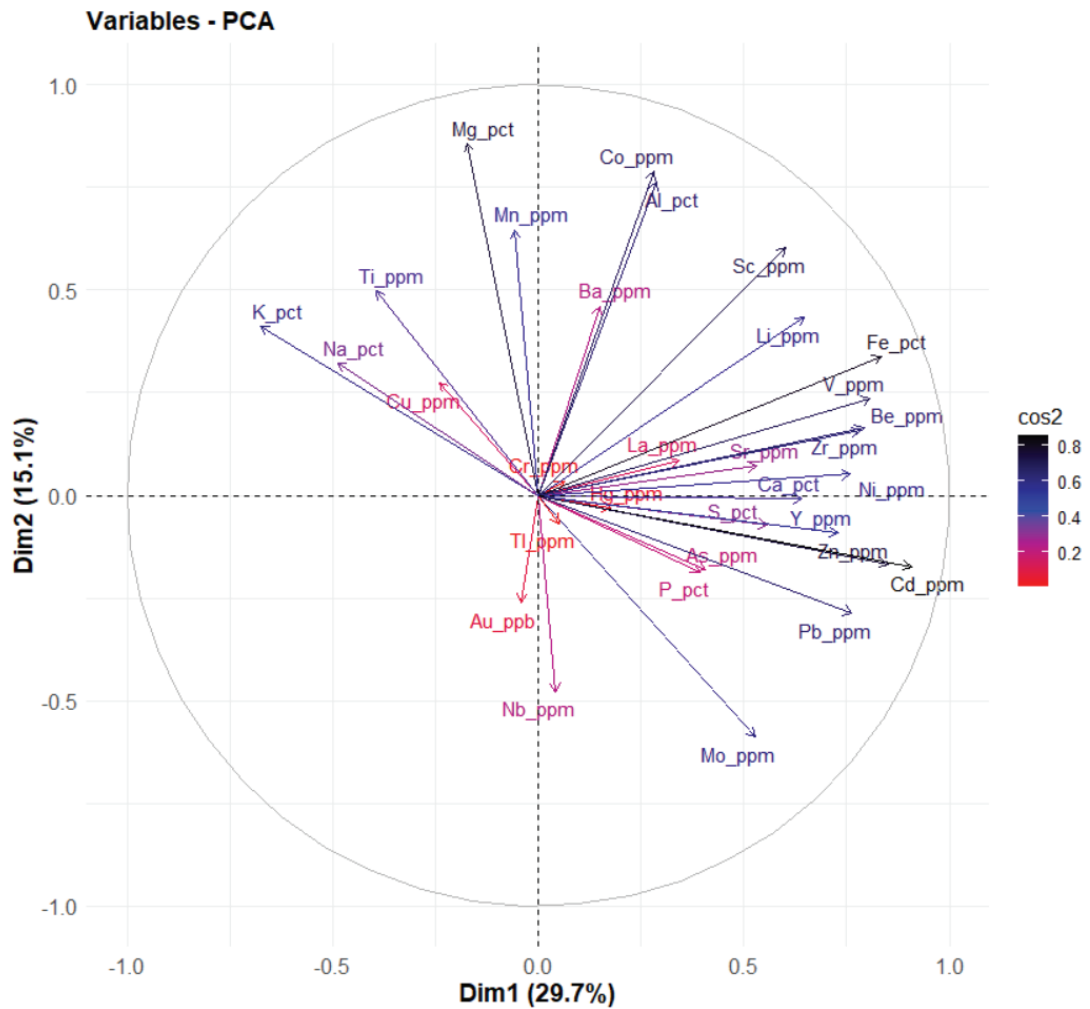
Anexo A7: Gráfico de codo, porcentaje de varianza explicada por las dimensiones. Este anexo permite visualizar la proporción de varianza explicada por cada componente principal y, con ello, determinar cuántas dimensiones (componentes) deben retenerse para explicar de forma adecuada la estructura de los datos sin sobreajuste.



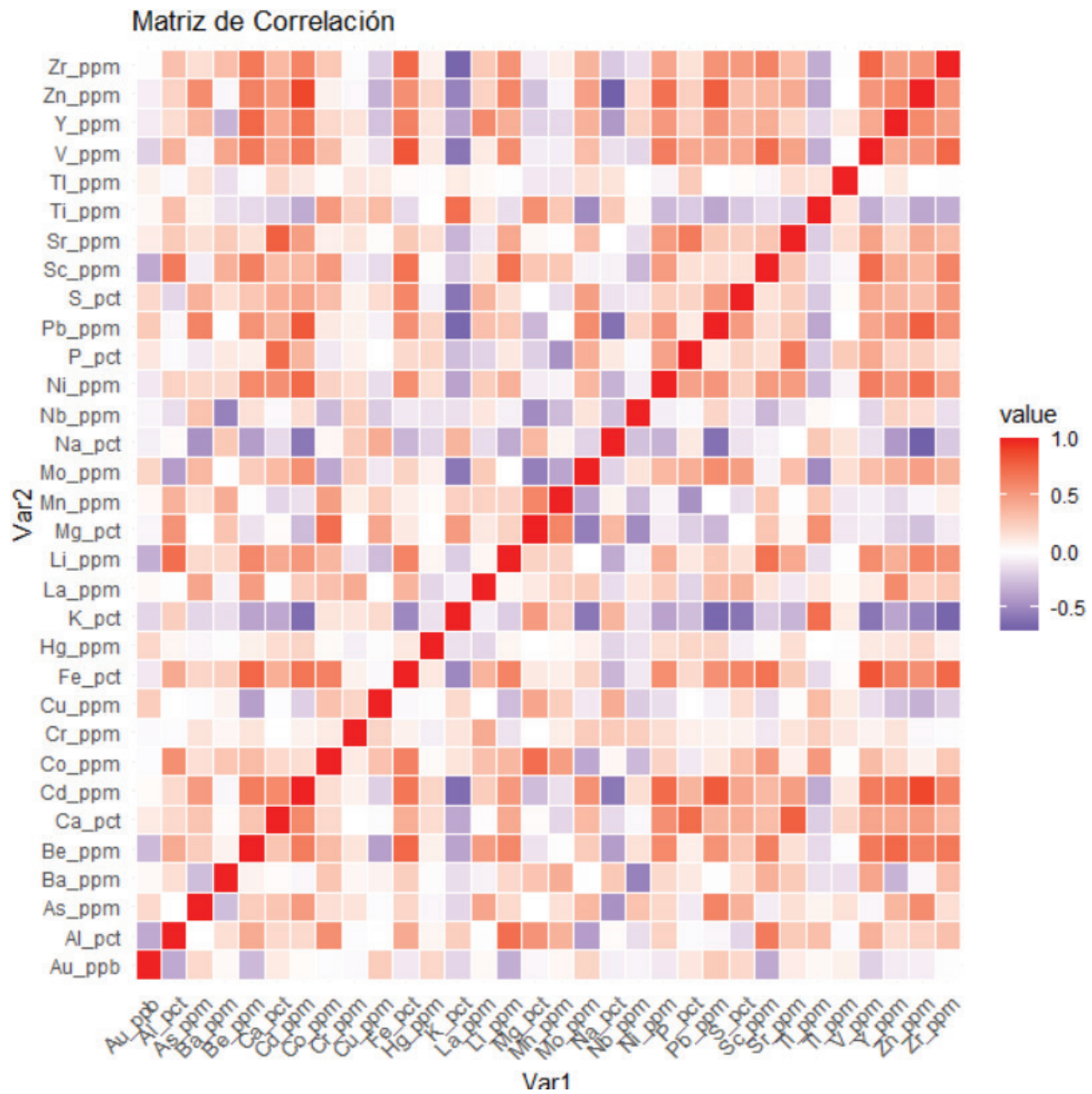
Anexo A8: Diagrama de coordenada muestra la visualización de la contribución y correlación de las variables originales (elementos químicos) con las primeras dos dimensiones factoriales (Dim1 y Dim2), que explican conjuntamente el 44,8 % de la varianza total (29,7 % y 15,1 % respectivamente). Cada flecha indica la dirección y magnitud de la contribución de una variable al espacio factorial. Variables altamente correlacionadas aparecen agrupadas en el mismo sector, mientras que aquellas ortogonales no presentan correlación significativa. Li, Be, Nb, Y, V y Ti muestran proyecciones similares en el primer cuadrante, indicando una fuerte asociación multivariada y sugiere su vinculación geoquímica en ambientes de pegmatitas diferenciadas y rocas ácidas. Cd, Zn, Pb, Cu, Fe y Mn se alinean en sectores contiguos, evidenciando su co-ocurrencia en procesos de mineralización hidrotermal, coherente con los patrones observados en los clústeres del Grupo I. Mo, Au y Ni presentan vectores más aislados, lo cual puede indicar comportamientos geoquímicos más específicos o localizados.



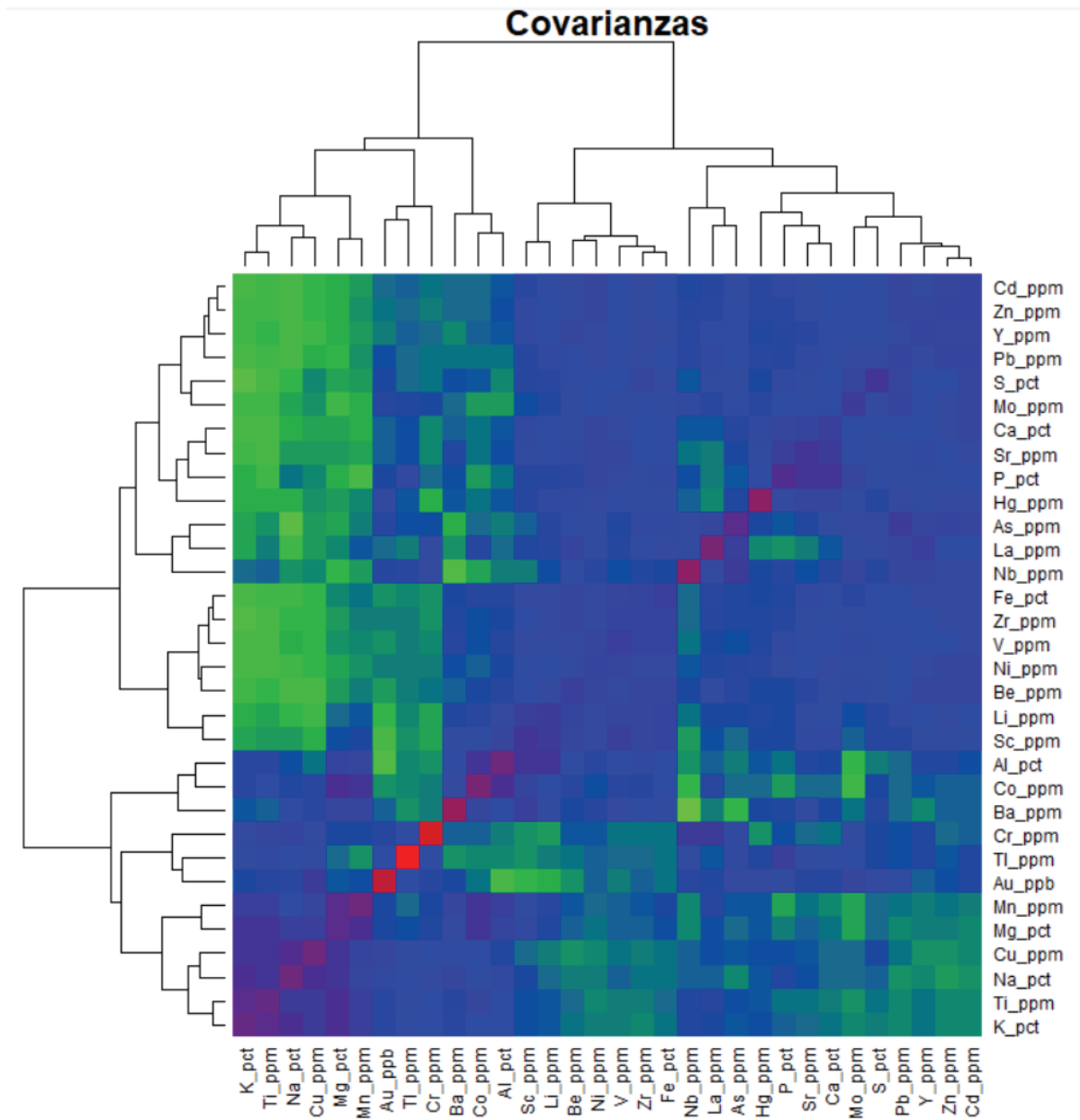
Anexo A9: Calidad de las representaciones de las variables según \cos^2 en el ACP. Este anexo presenta un gráfico de calidad de representación de las variables geoquímicas en el espacio factorial del ACP, evaluado mediante los valores de \cos^2 (coseno al cuadrado). El \cos^2 mide la proporción de la varianza de cada variable explicada por una dimensión específica, funcionando como un indicador de representatividad en el plano de componentes. Valores cercanos a 1 indican una excelente calidad de representación (la variable está bien proyectada en ese plano). Valores bajos ($< 0,2$) sugieren que la variable no se representa adecuadamente en las primeras dimensiones y podría requerir otras dimensiones para su interpretación.



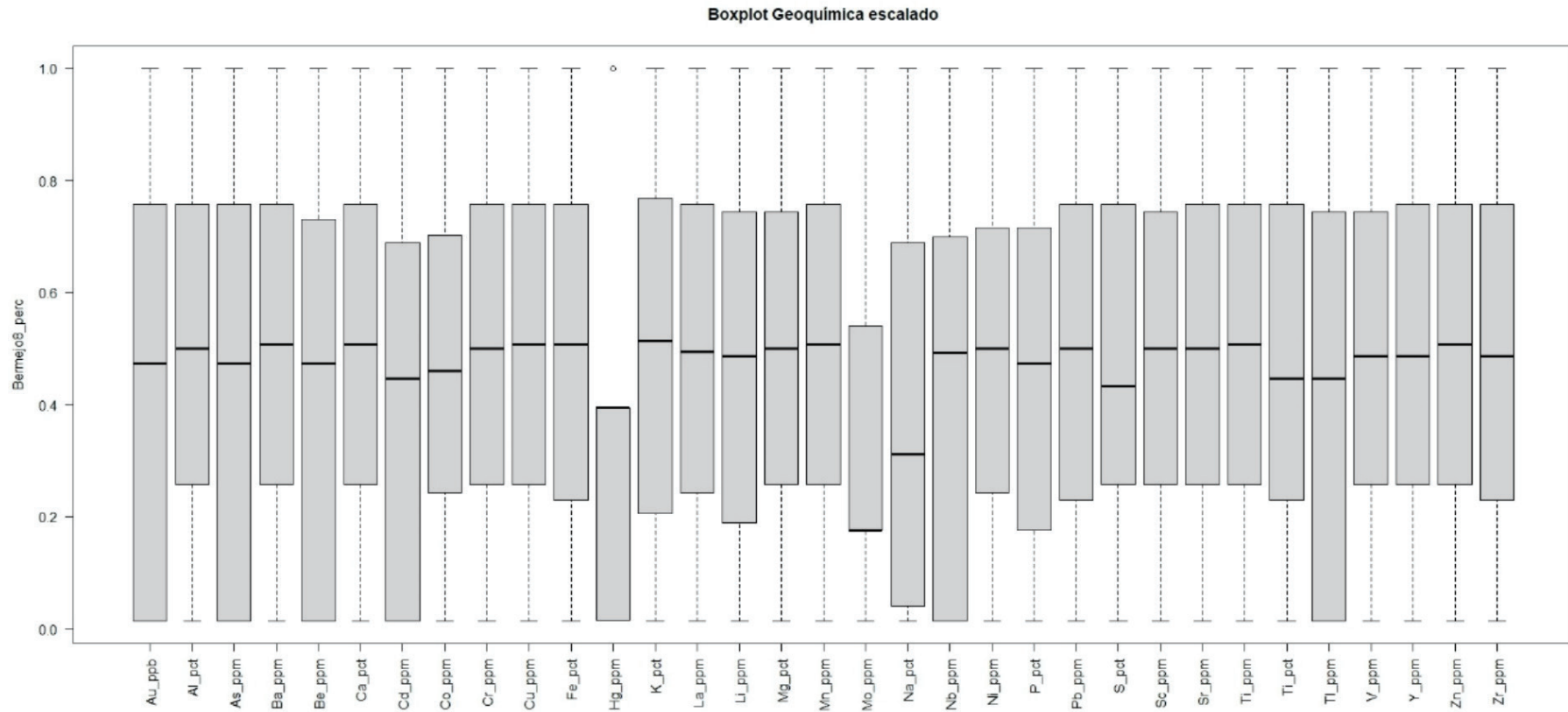
Anexo A10: Representación de variables según la sumatoria total de \cos^2 en el ACP. Este anexo presenta el gráfico de calidad global de representación de las variables geoquímicas mediante la sumatoria total de coseno al cuadrado (\cos^2) en los dos primeros ejes del ACP. Cada vector representa una variable, cuya dirección y longitud indican su contribución a la variabilidad total explicada por las dimensiones principales (Dim1 y Dim2). El color representa la calidad de representación total (de rojo bajo a azul alto). Colores azules oscuros ($\cos^2 > 0,6$) indican que la variable está bien representada en el plano formado por Dim1 y Dim2. Esto ocurre, por ejemplo, con Be_{ppm} , Zr_{ppm} , Y_{ppm} , Zn_{ppm} , Fe_{pct} y Sc_{ppm} , lo cual valida su relevancia estadística en el modelo. Colores rojos señalan baja representación ($\cos^2 < 0,2$), como en Nb_{ppm} , Au_{ppb} , Ti_{ppm} y Mo_{ppm} , lo que sugiere que estas variables podrían estar mejor explicadas en dimensiones adicionales, o bien tienen un comportamiento atípico. El análisis ayuda a interpretar cuáles variables dominan el espacio de componentes principales y son responsables de las agrupaciones observadas en los clústeres geoquímicos (ver Anexos A21–A26). Este gráfico es útil para verificar qué elementos traza aportan significativamente a la explicación de la varianza total, lo que respalda decisiones analíticas como la selección de variables clave para estudios de mineralización, especialmente aquellas asociadas con procesos magmáticos, hidrotermales o metasomáticos.



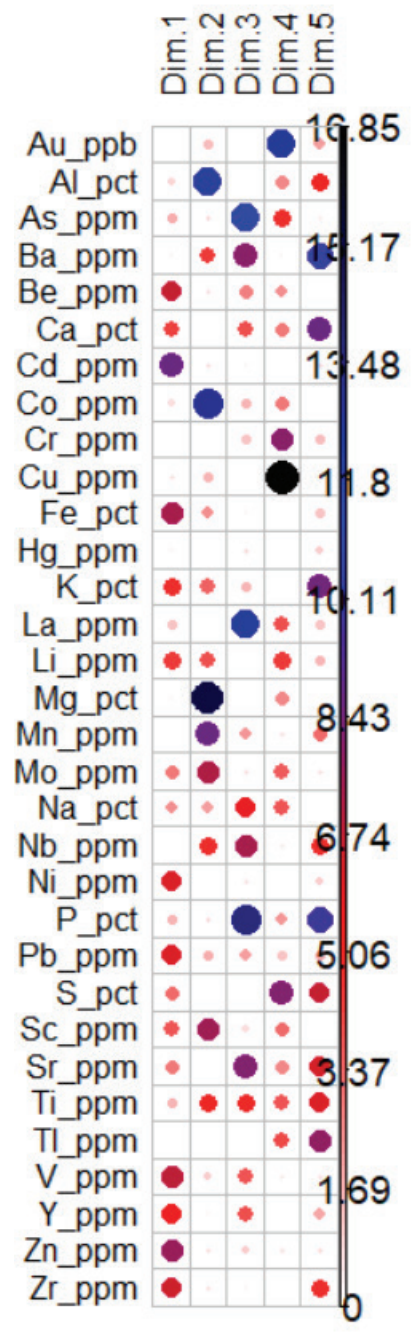
Anexo A11: Matriz de correlación sin datos atípicos e información con escasa variabilidad. Se destacan asociaciones entre elementos traza y mayores, útil para identificar patrones geoquímicos y posibles indicadores de mineralización.



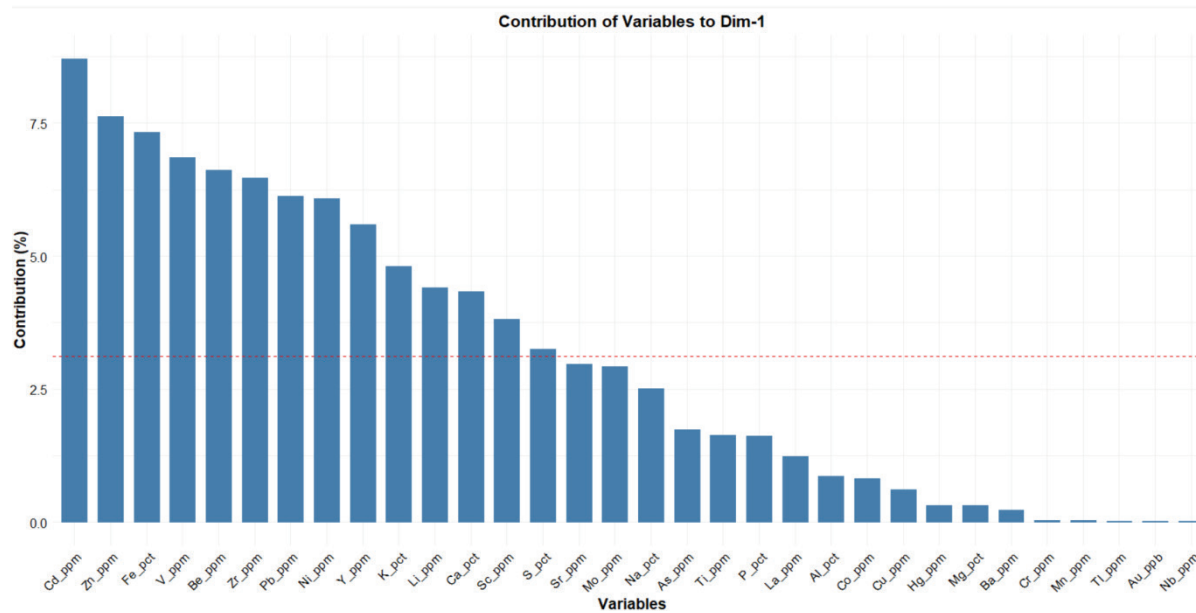
Anexo A12: Matriz de covarianzas sin datos atípicos e información con escasa variabilidad. Muestra relaciones significativas entre variables después del tratamiento de datos extremos, confirmando la robustez de los grupos identificados por ACP y clúster.



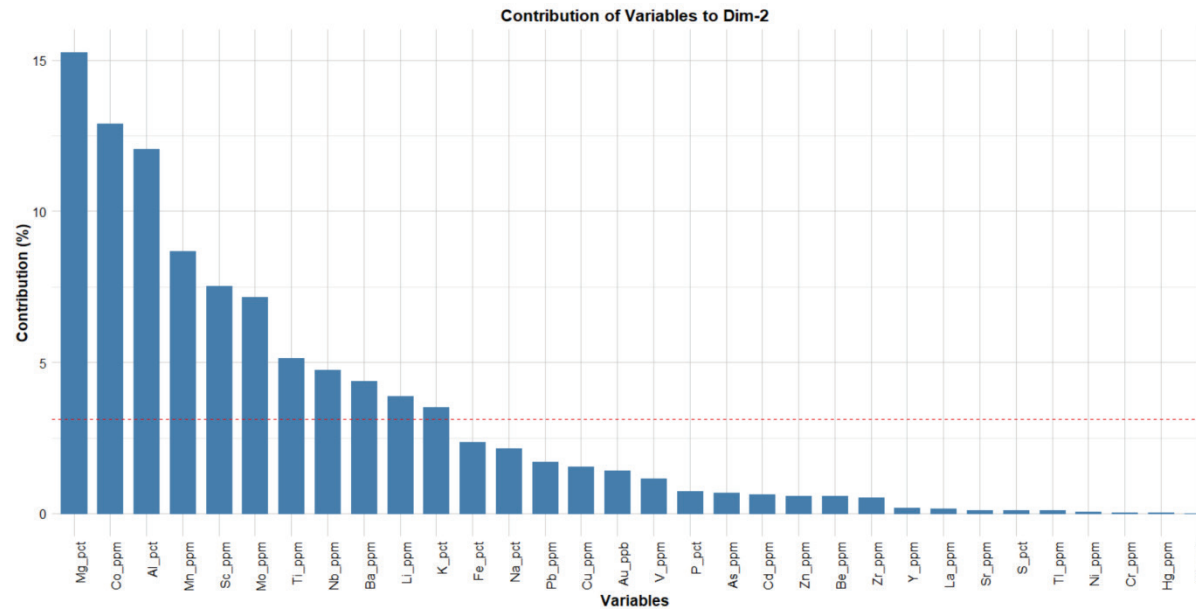
Anexo A13: Diagramas de cajas y bigotes de las variables sin datos atípicos e información con escasa variabilidad luego del filtrado.



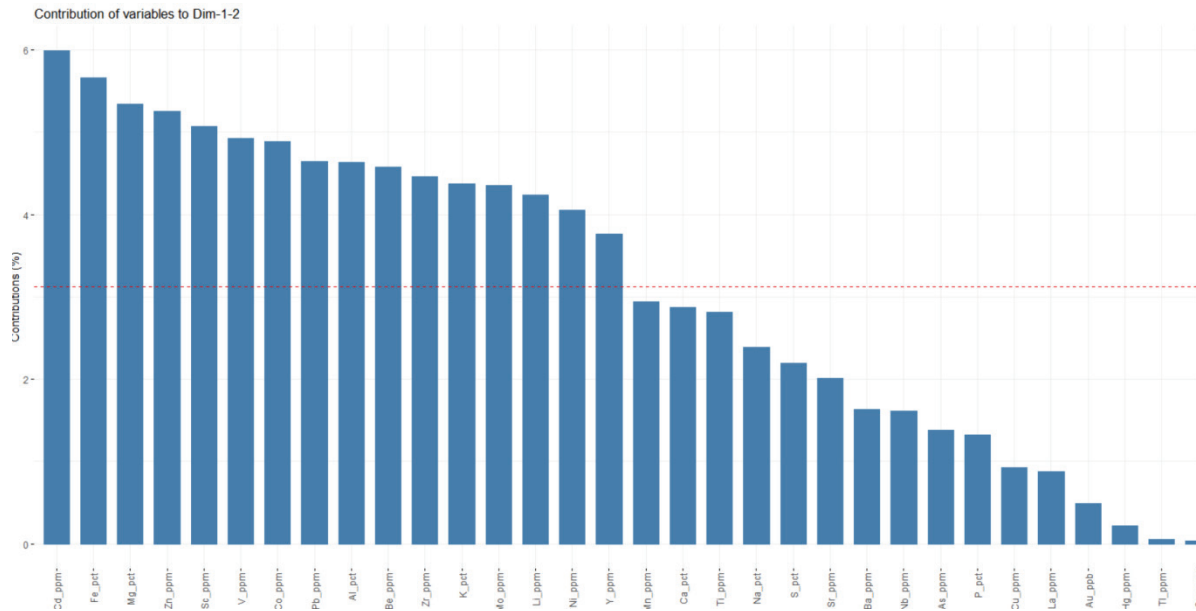
Anexo A14: Contribuciones de las variables a los componentes principales. Este anexo presenta un gráfico tipo dot plot que muestra la contribución porcentual de cada variable geoquímica a las primeras cinco dimensiones componentes principales del ACP. La suma total de contribuciones por variable permite identificar elementos dominantes en el modelo. Al_pct, Ba_ppm, Cd_ppm, Cu_ppm, K_pct, sobresalen como las variables más influyentes para explicar la varianza total del sistema.



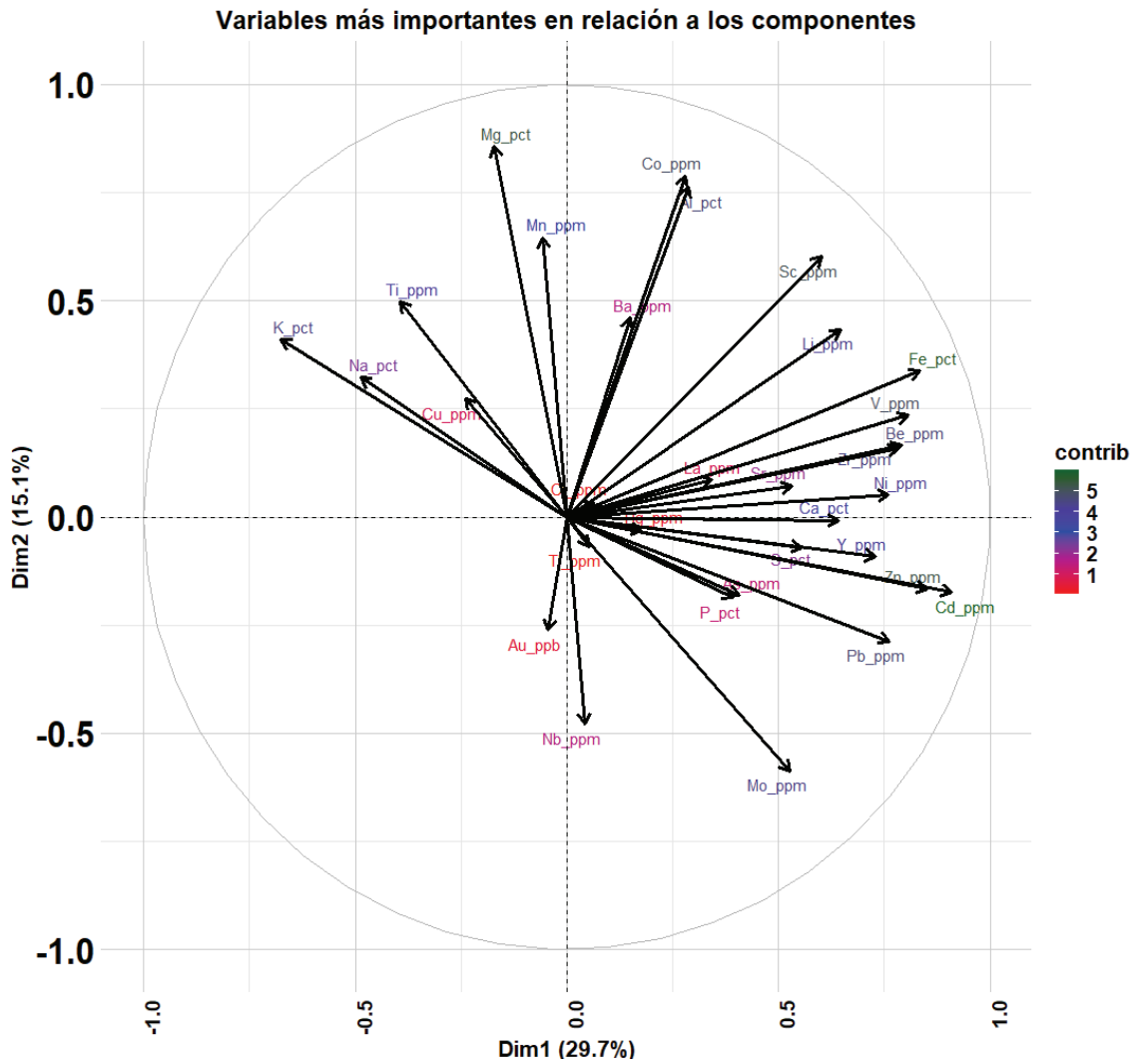
Anexo A15: Contribuciones de las variables al primer componente. Este gráfico de barras muestra la contribución porcentual de cada variable geoquímica a la primera dimensión del PCA (Dim-1), la cual explica el 29,7 % de la varianza total del conjunto de datos (ver Anexo A7). La línea roja discontinua representa el umbral medio esperado de contribución (aproximadamente 3,33 % si todas las variables contribuyeran de manera uniforme). Las variables que superan este umbral tienen mayor peso en la construcción del componente Dim-1, y por tanto, mayor relevancia estadística en la diferenciación geoquímica del sistema. Cd_ppm, Zn_ppm, Fe_pct, V_ppm, Be_ppm, Zr_ppm, Pb_ppm, Y_ppm, Ni_ppm y K_pct son las que presentan mayor contribución a Dim-1, lo que sugiere una asociación estadística clave entre metales traza con potencial económico y rocas ígneas diferenciadas. La presencia de elementos como Be, Y, Zr y Ni está alineada con procesos de fraccionamiento magmático y formación de pegmatitas, relevantes para la identificación de ambientes favorables a berilio, esmeraldas o elementos tecnológicos. En cambio, variables como Au_ppb, Nb_ppm, Tl_ppm y Mn_ppm presentan contribuciones marginales a Dim-1, lo que sugiere que su varianza está mejor explicada por otras dimensiones del PCA (ver Anexos A8–A10).



Anexo A16: Contribuciones de las variables al segundo componente. Este gráfico de barras representa el peso relativo de cada variable geoquímica en la construcción de la segunda dimensión del ACP (Dim-2), que explica el 15,1 % de la varianza total del conjunto de datos multivariado (ver Anexo A7). La línea roja punteada indica la contribución media esperada si todas las variables aportaran por igual (~3,33 %). Las mayores contribuciones corresponden a Mg_pct, Co_ppm, Al_pct, Mn_ppm, Sc_ppm y Mo_ppm, que representan un conjunto de elementos vinculados con procesos de metamorfismo de contacto y regional, dada la presencia de Al, Mg y Mn, que son esenciales en la formación de minerales como granate, clorita y micas, [30]. Ambientes con posible actividad hidrotermal o metasomática, dado el comportamiento del Co y Mo, común en zonas de alteración en contacto con rocas ígneas tal como fue descrito por [3]. Las variables con barras por encima de este umbral tienen mayor influencia sobre la dimensión Dim-2, por lo tanto, contribuyen de forma significativa a su interpretación estadística y geológica.



Anexo A17: Contribuciones de las variables a los dos componentes. Este gráfico de barras resume la contribución conjunta de cada variable geoquímica a las dos primeras dimensiones del análisis del ACP, que en conjunto explican el 44,8 % de la varianza total del sistema geoquímico (Dim-1: 29,7 %, Dim-2: 15,1 %, ver Anexo A7). La línea roja punteada representa la contribución promedio esperada si todas las variables aportaran equitativamente al modelo (~3,33 %). Las variables situadas por encima de esta línea son consideradas contribuyentes significativas a la estructura principal de la varianza multivariada. Principales variables con mayor aporte combinado: Zr_ppm, Zn_ppm, Fe_pct, V_ppm, Be_ppm, Pb_ppm, Y_ppm, Ni_ppm y Cd_ppm son las variables que más contribuyen a las dos primeras componentes. Estas variables están asociadas comúnmente a: ambientes hidrotermales diferenciados, procesos de alteración metasomática o presencia de sistemas mineralizados tipo pórfido y pegmatitas. Metales tecnológicos o de interés estratégico, como el Be, Y, Zr, y metales base como Zn, Pb, Fe. La alta contribución de estas variables refuerza la existencia de clústeres geoquímicos relevantes previamente definidos (ver Grupos 1 y 2). Apoya la interpretación de asociaciones geoquímicas complejas controladas por factores litológicos y estructurales, como los contactos entre el Granito Condué, Sienita Rosa Florida y las Fallas La Sofia y Cosanga (ver Anexos A1, A23, A24 y A26). Es coherente con los procesos de mineralización tipo pórfido, skarn o zonas de enriquecimiento en elementos raros, como ha sido descrito en ambientes geológicos análogos, [3], [39].



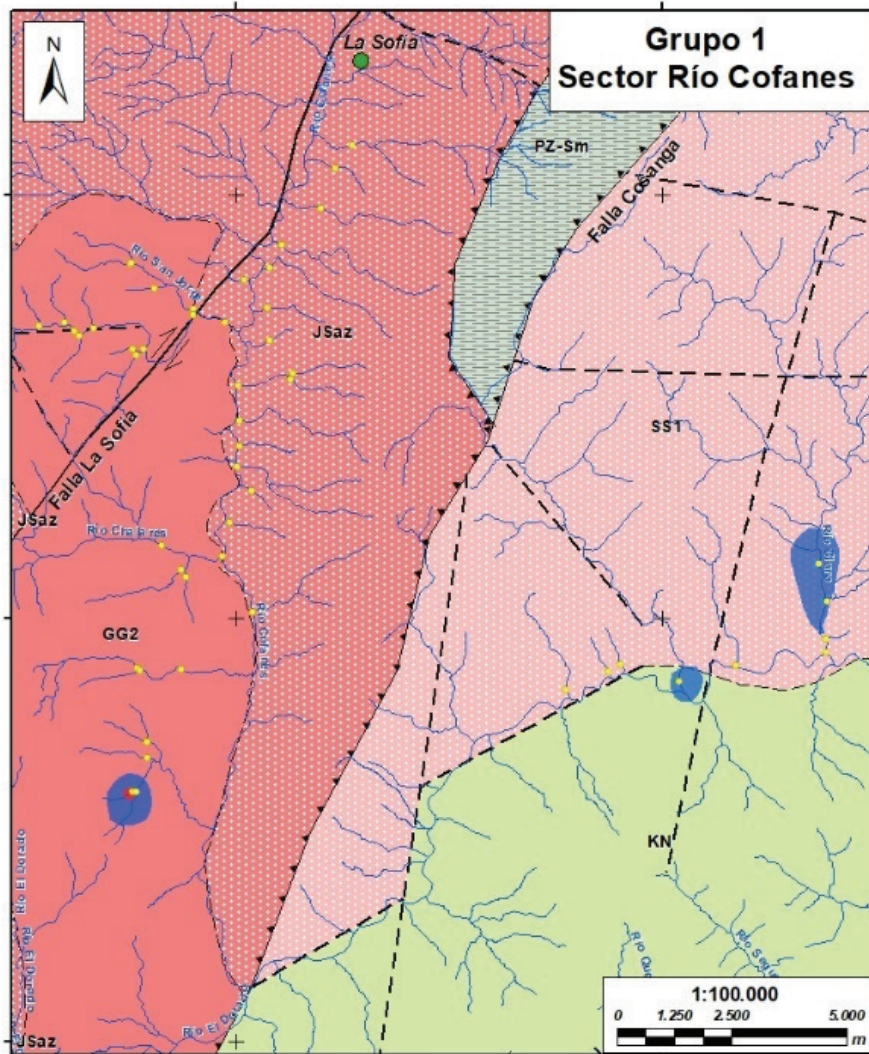
Anexo 18: Relación de las variables con los componentes. Las variables Zr_ppm, Zn_ppm, Fe_pct, Be_ppm, V_ppm, Y_ppm y Pb_ppm muestran vectores largos, estrechamente orientados hacia el eje Dim1, lo que indica una fuerte contribución al primer componente. Estas variables están relacionadas con procesos metalogénicos complejos, posiblemente vinculados a ambientes de mineralización tipo pórfido o pegmatítico. Variables como Mg_pct, Co_ppm, Mn_ppm y Al_pct destacan en el segundo componente (Dim2), lo cual puede indicar su asociación con procesos de alteración, metamorfismo o control litológico (ver también Grupos 3 y 4 de los clústeres). Variables como Nb_ppm, Au_ppb y Mo_ppm tienen flechas más cortas y orientaciones oblicuas u opuestas a la mayoría, lo que refleja baja representatividad en estos ejes factoriales.

	Dimensión 1	
	Correlación	p.value
Cd ppm	0,909	1,13e-25
Zn ppm	0,850	2,94E-19
Fe pct	0,834	6,12E-18
V ppm	0,806	5,45E-16
Be ppm	0,792	3,85E-15
Zr ppm	0,783	1,26E-14
Pb ppm	0,762	1,54E-13
Ni ppm	0,759	2,28E-13
Y ppm	0,728	6,29E-12
Li ppm	0,647	5,72E-09
Ca pct	0,641	8,60E-09
Sc ppm	0,601	1,13E-07
S pct	0,555	1,55E-06
Sr ppm	0,531	5,34E-06
Mo ppm	0,527	6,36E-06
As ppm	0,406	7,69E-04
P pct	0,392	1,20E-03
La ppm	0,343	5,10E-03
Al pct	0,287	2,03E-02
Co ppm	0,279	2,4E-02
Ti ppm	-0,394	1,15E-03
Na pct	-0,487	3,82E-05
K pct	-0,675	6,52E-10

Anexo A19: Correlaciones de las variables y significancias estadísticas para la dimensión 1. Las variables Cd ppm (0,91), Zn ppm (0,85), Fe_pct (0,83), V ppm (0,81), Be ppm (0,79), Zr ppm (0,78), Pb ppm (0,76) y Ni ppm (0,76) muestran las correlaciones más fuertes y significativas ($p < 10^{-13}$), lo que respalda su agrupación dentro del Grupo 1 y su vinculación con sistemas de sulfuros metálicos y estructuras mineralizadas. También presentan correlaciones positivas relevantes Y ppm, Li ppm, Ca_pct, Sc ppm y S_pct, todos con p-values altamente significativos ($< 10^{-6}$), reforzando su rol dentro del modelo geoquímico del sistema. Las variables con correlaciones negativas significativas son: K_pct (-0,676, $p = 6,52E-10$), Na_pct (-0,487) y Ti ppm (-0,394). Estas pueden reflejar un comportamiento geoquímico inverso al de los metales traza, posiblemente asociado a zonas menos alteradas o diferentes litologías. Otros elementos como Al_pct, P_pct, La ppm y Co ppm tienen correlaciones más bajas, pero con significancia estadística aceptable, lo que sugiere contribuciones secundarias al patrón principal. La alta correlación de metales pesados, elementos tecnológicos y litófilos con Dim1 confirma que esta dimensión sintetiza un gradiente metalogénico mayor, influenciado tanto por la litología como por el control estructural (ver mapa estructural A2 y mapa de anomalías A26). Este comportamiento multielemental cohesivo es característico de sistemas polimetálicos, pórfidos y cuerpos pegmatíticos mineralizados, como ha sido descrito por [3] y [39].

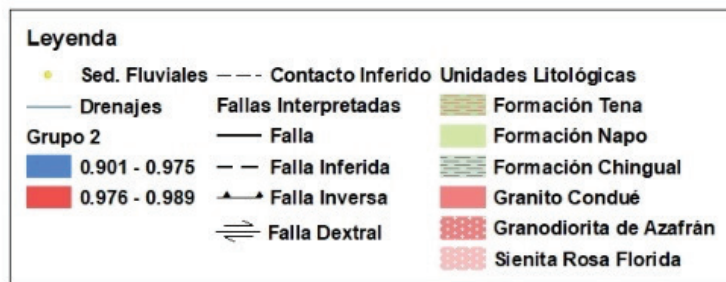
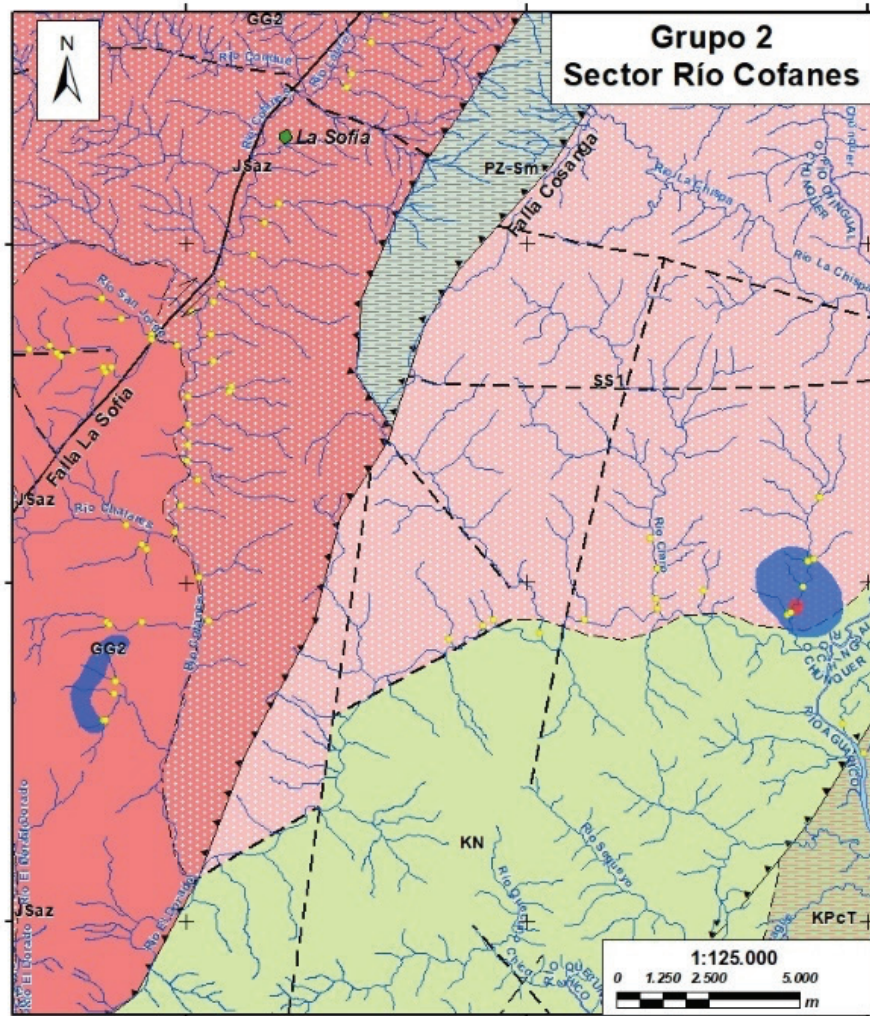
	Dimensión 2	
	Correlación	p.value
Mg_pct	0,857	8,27E-20
Co_ppm	0,787	6,77E-15
Al_pct	0,762	1,64E-13
Mn_ppm	0,646	6,14E-09
Sc_ppm	0,602	1,12E-07
Ti_ppm	0,497	.,50E-05
Ba_ppm	0,459	1,17E-04
Li_ppm	0,432	3,17-04
K_pct	0,410	6,74E-04
Fe_pct	0,337	5,99E-03
Na_pct	0,322	8,82E-03
Cu_ppm	0,273	2,73E-02
Au_ppb	-0,261	3,56E-02
Pb_ppm	-0,287	2,03E-02
Nb_ppm	-0,478	5,58E-05
Mo_ppm	-0,587	2,70E-07

Anexo A20: Correlaciones de las variables y significancias estadísticas para la dimensión 2. Variables con correlaciones positivas y significativas ($p < 0,05$): Mg_pct ($r = 0,86$) y Co_ppm ($r = 0,79$) presentan las correlaciones más altas, con p-values altamente significativos (8,27E-20 y 6,77E-15), lo que sugiere un fuerte control geoquímico posiblemente relacionado con fuentes máficas o procesos de metasomatismo. También se destacan Al_pct, Mn_ppm, Sc_ppm, Ti_ppm y Ba_ppm, todos con valores de $r > 0,45$ y significancia robusta, indicando su participación activa en esta dimensión y su vínculo con alteraciones lateríticas o aluminosas. Elementos como Li_ppm, K_pct, Fe_pct y Na_pct también contribuyen positivamente, aunque con menor intensidad. Variables con correlación negativa significativa: Mo_ppm ($r = -0,59$) y Nb_ppm ($r = -0,48$) muestran las correlaciones negativas más relevantes ($p < 10^{-4}$), lo que puede reflejar su exclusión relativa en ambientes controlados por los elementos anteriores, o una distribución preferencial en fases minerales distintas. También aparecen con correlaciones negativas Pb_ppm, Au_ppb y en menor medida Cu_ppm, lo que podría indicar una separación espacial o genética respecto a las fuentes de Mg, Co y Al. Esta dimensión sugiere un gradiente geoquímico complementario al de la Dimensión 1, posiblemente vinculado a procesos de diferenciación magmática o alteración hidrotermal aluminosa/magnésica, y útil para distinguir zonas con potencial de minerales tecnológicos como el cobalto y el litio. La oposición de elementos como Mo, Nb y Au podría representar una zonación metalogénica, donde los sistemas ricos en Mg-Co contrastan con otros más enriquecidos en metales preciosos o incompatibles, como en ciertos depósitos tipo skarn o zonas de contacto pegmatítico, [22], [3].

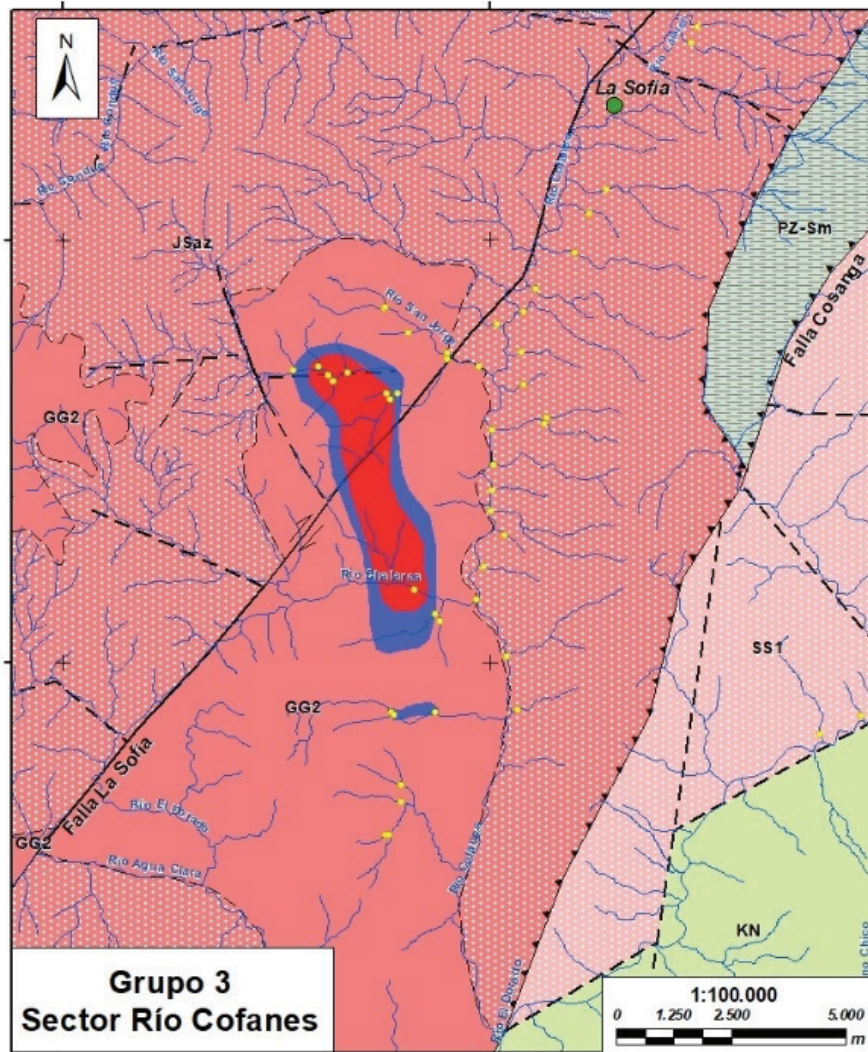


Leyenda		
● Sed. Fluviales	--- Contacto Inferido	Unidades Litológicas
— Drenajes	Fallas Interpretadas	Formación Napo
Grupo 1	— Falla	Formación Chingual
● 0.901 - 0.975	--- Falla Inferida	Granito Condué
● 0.976 - 0.989	↗ Falla Inversa	Granodiorita de Azafrán
	↔ Falla Dextral	Sienita Rosa Florida

Anexo A21: Clúster Geoquímico – Grupo 1. Este anexo muestra la agrupación espacial y estadística de elementos metálicos como Cd, Zn, Pb, Cu, Fe y Mn, cuya distribución está fuertemente asociada a zonas de contacto litológico entre unidades como la Formación Napo, la Sienita Rosa Florida y el Granito Condué, así como, a estructuras tectónicas mayores como la Falla La Sofia y sistemas subparalelos inferidos. La composición de este clúster es típica de ambientes de mineralización hidrotermal, donde la circulación de fluidos mineralizantes en condiciones de temperatura y presión variables promueve la precipitación de sulfuros metálicos en fracturas, zonas de cizalla y contactos litológicos reactivos, [25], [34]. La superposición de múltiples anomalías geoquímicas en estas zonas indica procesos polimetálicos controlados por metallotectos estructurales, que podrían estar vinculados a eventos magmáticos subsuperficiales tipo pórfido o sistemas epitermales. Este patrón respalda el potencial de la región para exploración de metales base y requiere validación mediante estudios mineralógicos, petrografía de alteración y análisis de inclusiones fluidas hidrotermal.

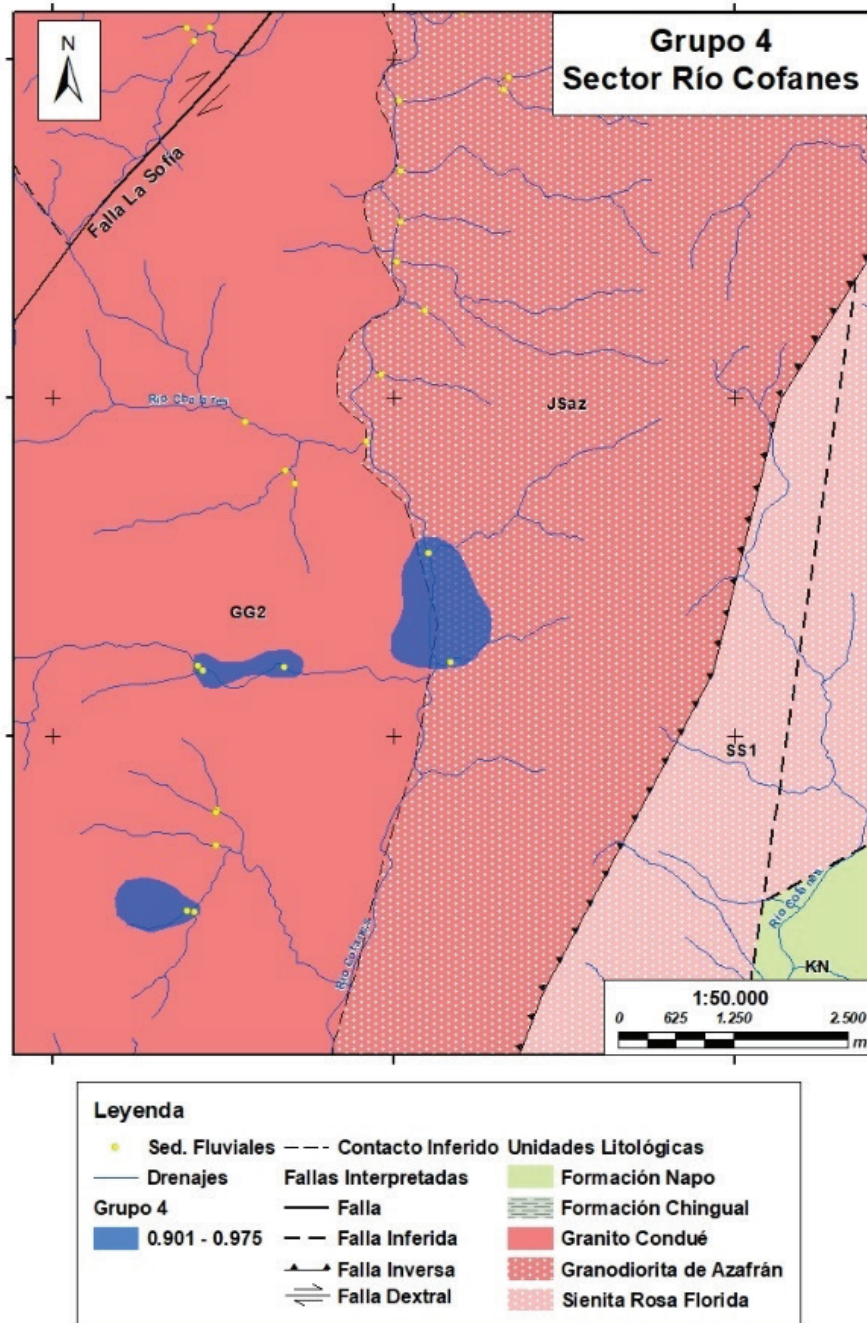


Anexo A22: Clúster Geoquímico – Grupo 2: Asociación de elementos críticos en ambientes pegmatíticos e ígneos diferenciados. Este anexo presenta la distribución espacial y la agrupación estadística de elementos como Li, Be, Nb, V y Ti, los cuales se concentran en zonas vinculadas a pegmatitas graníticas y rocas ígneas diferenciadas como la Sienita Rosa Florida y el Granito Condué. Estas litologías representan fases tardías del magmatismo, caracterizadas por la concentración de elementos incompatibles y de alto valor tecnológico. El patrón geoquímico sugiere un entorno enriquecido por procesos de fraccionamiento magmático avanzado, que favorece la cristalización de minerales como espodumena, berilo, columbita-tantalita y titanita, típicos de ambientes pegmatíticos, [23], [33]. La asociación espacial con estructuras de contacto y fracturación también sugiere el rol de fluidos residuales en la redistribución de estos elementos durante episodios de alteración hidrotermal tardía. Este clúster representa un alto potencial geológico para exploración de elementos críticos y estratégicos para tecnologías limpias y baterías, y justificaría estudios mineralógicos y metalogénicos detallados.

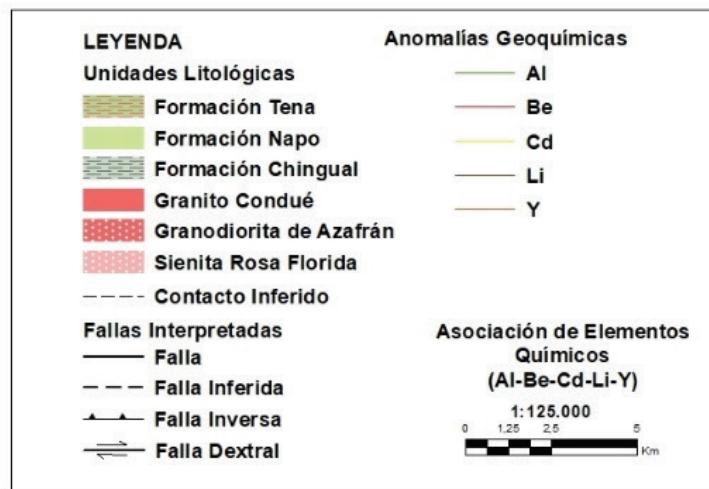
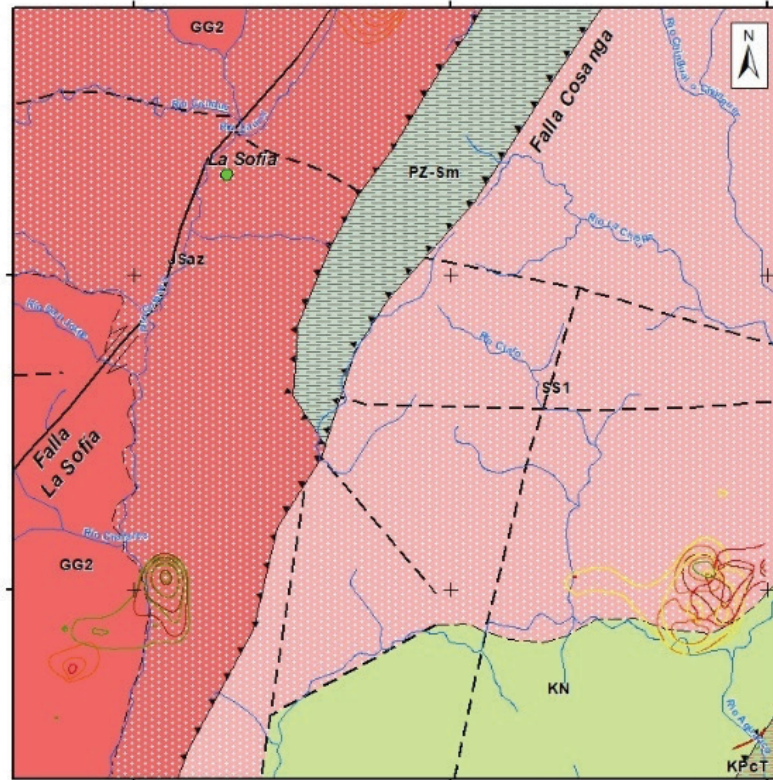


Leyenda		
● Sed. Fluviales	--- Contacto Inferido	Unidades Litológicas
— Drenajes	Fallas Interpretadas	Formación Napo
Grupo 3	— Falla	Formación Chingual
■ 0.901 - 0.975	--- Falla Inferida	Granito Condué
■ 0.976 - 0.989	↗ Falla Inversa	Granodiorita de Azafrán
		Sienita Rosa Florida

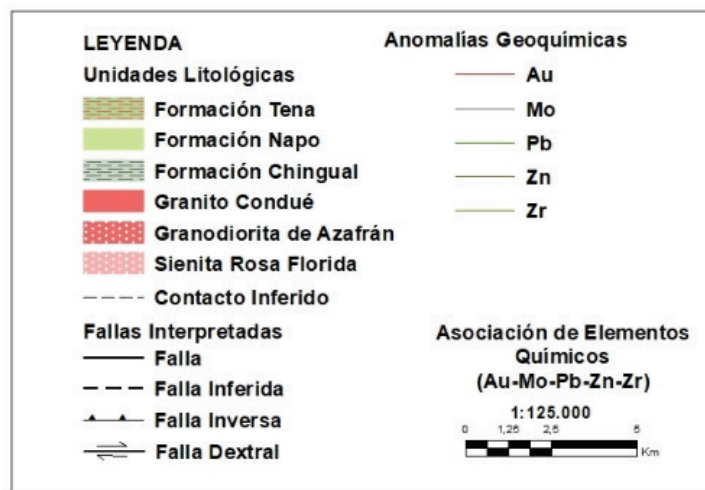
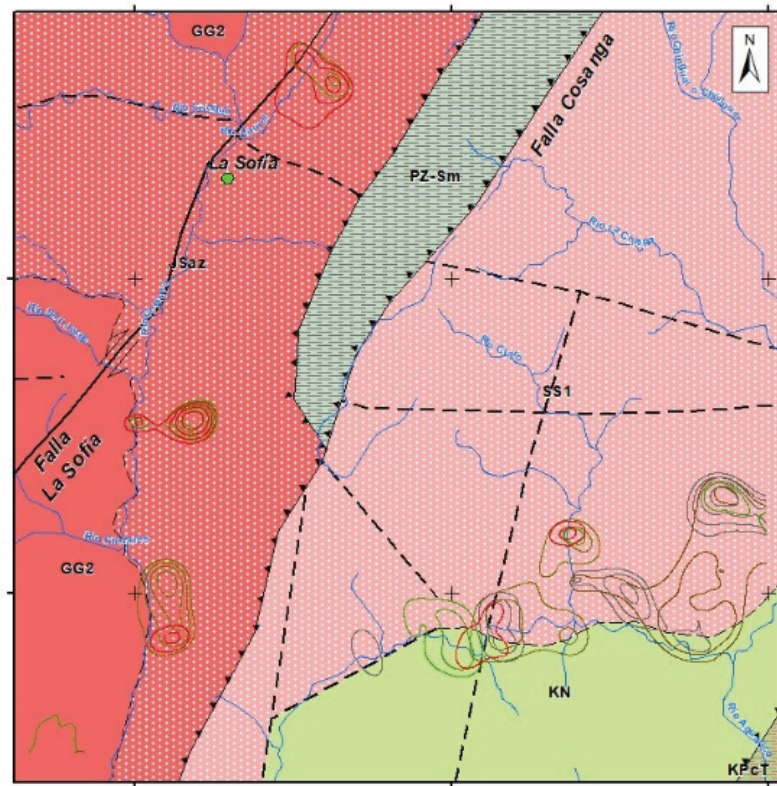
Anexo A23: Clúster geoquímico – Grupo 3: Patrones de Mg, K y Ca posiblemente asociados a alteración hidrotermal potásica y control estructural local. Este anexo representa la distribución espacial de un clúster geoquímico caracterizado por elevadas concentraciones de Mg, K y Ca. La firma geoquímica sugiere la presencia de procesos de alteración hidrotermal potásica, típica de entornos con circulación prolongada de fluidos calientes, favorecida por la fracturación local y el control estructural de fracturamiento. Estos elementos también podrían reflejar zonas propensas a metasomatismo o acumulación de minerales secundarios asociados a micas potásicas, lo cual tiene implicaciones para modelamiento prospectivo y petrogénesis regional.



Anexo A24: Clúster Geoquímico – Grupo 4: Indicadores geoquímicos de metamorfismo de contacto en márgenes intrusivos del Granito Condué y Granodiorita Azafrán. Este anexo representa la distribución de un agrupamiento geoquímico caracterizado por altas concentraciones de Fe, Al, Mg y Mn, localizadas en las zonas de contacto entre cuerpos intrusivos ácidos como el Granito Condué y rocas encajantes. La asociación de estos elementos está vinculada a procesos de metamorfismo de contacto, que generan aureolas térmicas favorables para la formación de minerales como magnetita, granate y clorita. La composición geoquímica también sugiere interacción entre actividad magmática residual y condiciones térmicas elevadas, en un contexto estructuralmente activo. Este clúster refuerza la interpretación de superposición entre procesos ígneos y metamórficos, con implicaciones para la evolución geológica y el potencial de mineralización de skarn en la región, [34], [30].



Anexo A25: Este anexo muestra la superposición espacial de anomalías geoquímicas de Al, Be, Cd, Li y Y, concentradas en zonas de contacto litológico entre unidades ígneas como el Granito Condué y formaciones metasedimentarias como la Formación Napo. Estas coincidencias se alinean estructuralmente con fallas regionales, como la Falla La Sofía y estructuras subparalelas. La presencia conjunta de Be y Al en zonas de alta permeabilidad estructural, junto con litologías propensas a reacciones metasomáticas, sugiere un entorno geológico compatible con la formación de esmeraldas. Este patrón coincide con modelos internacionales de mineralización de esmeraldas en zonas de contacto granito-esquisto bajo condiciones hidrotermales, como se ha documentado en Colombia, Brasil y Zambia, [36].



Anexo A26: Anomalías geoquímicas individuales de Au, Mo, Pb, Zn y Zr: Evidencias espaciales de sistemas polimetálicos controlados por estructuras y litología. Este anexo muestra la distribución espacial de anomalías geoquímicas individuales de Au, Mo, Pb, Zn y Zr, superpuestas sobre las unidades litológicas principales Granito Condué, Formación Napo, Sienita Rosa Florida y estructuras tectónicas mayores, en especial la Falla La Sofia y sistemas subparalelos inferidos. Las concentraciones coincidentes de estos elementos, alineadas con contactos litológicos y estructuras regionales, refuerzan la hipótesis de un sistema de mineralización polimetálica estructuralmente controlado, vinculado a procesos de migración de fluidos hidrotermales a lo largo de zonas de debilidad tectónica. En particular, la combinación de metales base (Pb, Zn), metales preciosos (Au) y elementos de alta temperatura (Mo, Zr) es característica de ambientes de hibridación hidrotermal o depósitos tipo pórfido, como se ha documentado en contextos de arco magmático andino, [25], [40]. Este patrón espacial también complementa las asociaciones encontradas en el Grupo 1 de clústeres geoquímicos (Anexo A21), confirmando la existencia de un sistema activo de mineralización vinculado a intrusivos calcoalcalinos y su interacción con las formaciones sedimentarias locales, [22].