

# APLICACIÓN DE TÉCNICAS MODERNAS EN LA REEVALUACIÓN GEOQUÍMICA, ESTRUCTURAL Y TELEDETECCIÓN EN LOS ANAP'S HUYAHUYA Y ANTABAMBA BLOQUE 2.

(Geología y Exploraciones - Geología económica de yacimientos minerales metálicos y no metálicos. Investigaciones geológicas, petro-mineralógicas, geofísicas y geoquímicas)

**Renzo Flores<sup>1</sup>, Karla Baca<sup>2</sup> y Fakey Zubieta<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Renzo Flores: Datamine Perú S.A, Av. Manuel Olgúin 335. Of. 503, Lima, Perú ([renzomanuel.floreshoyos@gmail.com](mailto:renzomanuel.floreshoyos@gmail.com) 912983069)

<sup>2</sup> Karla Baca: Camino Corp, Av. Jose Pardo Nro. 601 Int. 503, Lima, Perú ([karlabacaacosta@gmail.com](mailto:karlabacaacosta@gmail.com) 983643841)

<sup>3</sup> Fakey Zubieta: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Av. Carlos Germán Amezaga N°375 – Cercado de Lima, Lima, Perú ([zubieta.fakey@gmail.com](mailto:zubieta.fakey@gmail.com) 969091536)

## RESUMEN

Este estudio desarrolla una metodología integrada para identificar zonas de interés exploratorio asociadas a sistemas tipo pórfido y epitermal en la franja metalogenética del sur del Perú, en particular de los ANAPs Huyahuya y Antabamba Bloque 2. Se analizaron 663 muestras geoquímicas de roca aplicando transformación Centered Log-Ratio (CLR), análisis factorial (FA) y modelamiento fractal (C–A y LSA). Sobre datos de teledetección se generaron los índices: Porfido\_Index y Epitermal\_Index, también evaluados fractalmente. Las estructuras fueron analizadas mediante dimensión fractal (D), permitiendo inferir controles tectónicos sobre la mineralización. Se delinearon 27 polígonos, validando 13 propuestos por INGEMMET y proponiendo 14 nuevos (incremento del 107.7%). Todos los polígonos fueron contrastados con descripciones de campo del INGEMMET con presencia de minerales mena como calcopirita, bornita y oro nativo. Destacan TRG\_27 y TRG\_18 por sus altas leyes (hasta 3222 ppm Au y 8264 ppm Cu). El enfoque es replicable y aporta valor estratégico a la exploración mineral moderna.

### 1. Introducción

Los sistemas tipo pórfido Cu-Au-Mo y epitermales Au-Ag representan los principales objetivos de exploración mineral en el sur del Perú, dentro del arco magmático andino, una de las provincias metalogenéticas más significativas a nivel global (Sillitoe, 2010; Cooke et al., 2005). En este contexto, el INGEMMET desarrolló campañas de prospección en las Áreas de No Admisión de Petitorio (ANAP) Huyahuya (2018) y Antabamba Bloque 2 (2016), ubicadas en la región Apurímac y relacionadas a intrusivos del batolito Andahuaylas–Yauri. (**Figura 1.a**)

Se integraron datos geoquímicos, estructurales y espectrales mediante técnicas tradicionales como análisis de componentes principales (PCA), análisis factorial (FA), cocientes de bandas y análisis de orientación estructural (Amiri et al., 2017; Faraj et al., 2019). Las estructuras cartografiadas (INGEMMET, 2022) fueron validadas mediante evidencias de campo y coherencia geométrica (Zuloaga et al., 2016; Villarreal et al., 2019), priorizando aquellas con mayor potencial de canalizar fluidos mineralizantes según su orientación, buzamiento y contraste litológico (Piffner, 2017; Camus & Castelli, 2020; Hronsky, 2013). Sobre esta base, se emplearon diagramas de roseta para identificar tendencias estructurales dominantes vinculadas a la mineralización.

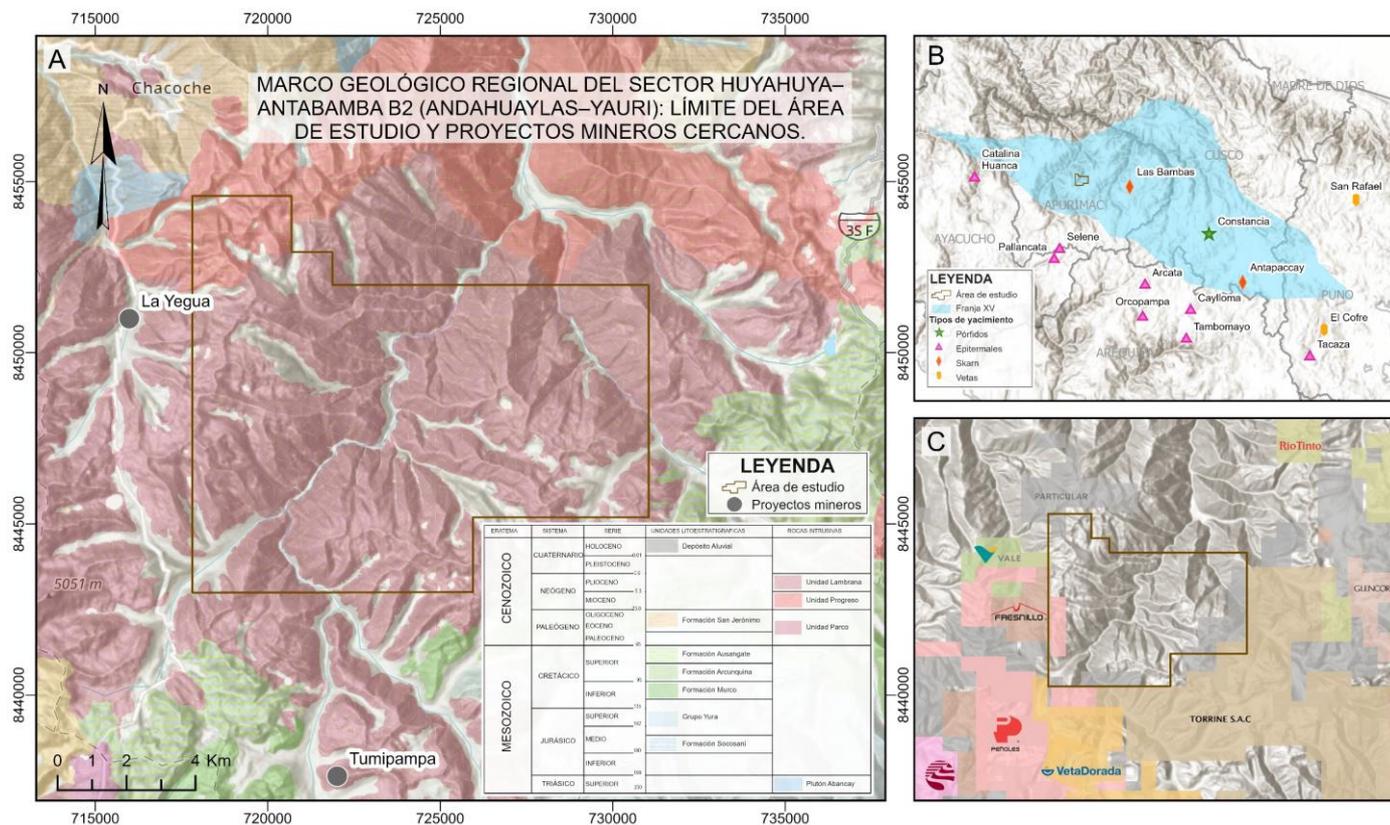
**Sobre esta base, se aplicaron enfoques fractales avanzados.** Para la geoquímica y teledetección, se utilizó el análisis de singularidad local ( $\alpha$ ) y el modelo Concentración–Área (C–A) para definir umbrales anómalos (Ma et al., 2023; Cheng, 2007).

En el análisis estructural, se empleó el método de box-counting para calcular la dimensión fractal (D), cuantificando la complejidad de redes de fallas y su vínculo con procesos mineralizantes (Zhao et al., 2011; Afzal et al., 2011).

La justificación del enfoque fractal radica en su capacidad para modelar la naturaleza multiescalar, auto-similar y no lineal de los sistemas geológicos (Carranza, 2009; Zuo & Wang, 2016), mejorando el targeting al integrar patrones complejos dispersos en diferentes dominios de datos (Liu et al., 2013; Shan Xu et al., 2020).

**Figura 1**

Mapas de referencia del área de estudio: a) Mapa geológico regional del sector Huyahuya–Antabamba B2; b) Mapa metalogenético con yacimientos relevantes en la franja XV; c) Mapa de concesiones mineras y principales titulares en el área de influencia.



Nota. Las figuras muestran el contexto regional del área de estudio ubicada en la franja metalogenética andahuaylas-yauri. La figura (1.a) detalla la geología regional y las principales formaciones; la figura (1.b) presenta los yacimientos tipo pórfido, epitermal, skarn y vetas en la región; y la figura (1.c) ilustra la distribución de concesiones mineras vigentes. Elaboración propia, basado en Zuolaga et al., 2016, Villarreal et al., 2019 y INGEMMET, 2022.

En conjunto, esta metodología proporciona una herramienta cuantitativa, adaptable y eficiente para optimizar la identificación de zonas favorables en diversos entornos geológicos, reforzando el valor predictivo y espacial del análisis en campañas de exploración mineral moderna.

## 2. Objetivos

- Demostrar la eficacia de integrar metodologías fractales y multiescalares (LSA, modelo C–A y box-counting) sobre datos geoquímicos, estructurales y espectrales, con el fin de optimizar el “targeting” mineral en los ANAP Huyahuya y Antabamba Bloque 2.
- Delimitar zonas prioritarias de interés mineral en sistemas tipo pórfido-epitermal mediante el análisis conjunto de datos validados de campo, geoquímica multielemental, de estructuras y teledetección, aportando criterios técnicos para orientar futuras campañas de exploración en la región.

## 3. Contexto geológico y metalogenético

El área de estudio se sitúa dentro de la franja metalogenética XV del sur peruano (Figura 1.b), reconocida por su elevado potencial para el desarrollo de sistemas tipo pórfido Cu-Mo (Au) y skarn Cu-Au-Fe. El sector se encuentra rodeada por múltiples concesiones de compañías nacionales e internacionales, que destacan la importancia prospectiva y estratégica del sector (Figura 1.c).

Estos depósitos se encuentran espacial y temporalmente asociados a la intrusión de stocks del Batolito Andahuaylas-Yauri durante el intervalo Eoceno–Oligoceno (~42–30 Ma). Este batolito, de afinidad calcoalcalina, metaluminosa y tipo I, intruye a las unidades sedimentarias del Grupo Yura (Jurásico) y de la Formación Arcuquina (Cretácico medio), generando contactos litológicos altamente favorables para la circulación de fluidos hidrotermales.

El marco geológico local está dominado por una secuencia de rocas intrusivas asociadas a cinco pulsos magmáticos diferenciados. Estos

comprenden desde intrusiones de dioritas y cuarzo dioritas tempranas, hasta cuerpos más evolucionados de granodioritas, cuarzo monzodioritas y cuarzo monzonitas, seguidos por diques hipoabisales dacíticos y vetillas aplíticas (Zuloaga A, 2016).

Esta evolución magmática polifásica evidencia una prolongada actividad ígnea e hidrotermal, coherente con los modelos de génesis de sistemas tipo pórfido y epitermal (Zurcher & Dilles, 2007; Sillitoe, 2010).

Asimismo, se reconocen cuerpos de brechas intrusivas con clastos de granodiorita y pórfido dacítico, vinculados a la evolución de los pulsos magmáticos e hidrotermales en la zona de estudio (Zuloaga A, 2016).

Desde el punto de vista estructural, el área está atravesada por sistemas de fallas con orientación NE-SO y NO-SE, que actúan como zonas de debilidad estructural facilitando la circulación de fluidos hidrotermales, son también importantes en los contactos entre unidades ígneas y carbonatadas.

Este modelo geológico es análogo al observado en los proyectos cercanos La Yegua (pórfido Cu-Mo-Au) y Tumipampa (skarn Au-Cu-Ag), donde se ha documentado mineralización de Cu-Mo-Au asociada a la alteración potásica central, rodeada por halos de alteración fílica. Las edades radiométricas disponibles (K-Ar y Re-Os) indican que el principal evento de mineralización tipo pórfido se desarrolló entre ~42 y ~30 Ma (Carlotto et al., 2009), en un entorno tectónico compresivo comparable con los cinturones porfiríticos del sur andino peruano y del norte de Chile (Carlotto et al., 2009; Acosta et al., 2010).

## 4. Metodología

### 4.1. Geoquímica

#### 4.1.1. Base de datos geoquímica y control de calidad

Tabla 1A.

Estadísticos descriptivos de los datos geoquímicos crudos (ppm; Au convertido)

Estadístico	Au	Ag	As	Bi	Cd	Cs	Cu	In	Li	Mo	Pb	Sb	Sn	Tl	W	Zn
N	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0	663.0
Mínimo	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2	3.3	0.0	3.0	0.3	2.6	0.1	0.2	0.0	0.2	9.0
Máximo	81.9	330.0	3942.0	2774.0	94.4	123.2	67100.0	6.0	118.0	10100.0	20000.0	6316.0	32.4	3.1	4277.0	4745.0
Media	0.3	3.8	19.2	17.8	0.4	3.3	1099.8	0.1	14.1	34.9	124.7	24.4	1.4	0.5	15.8	78.1
Desv. Est.	3.4	18.7	157.3	131.6	4.2	5.3	4374.1	0.5	13.0	401.1	938.1	258.6	2.1	0.2	170.2	253.1
Asimetría	21.2	10.9	23.6	16.3	19.1	18.4	9.8	7.8	3.3	24.1	16.9	22.2	11.5	2.6	24.0	13.3
Curtosis	494.5	157.2	587.0	312.6	403.2	405.7	124.5	75.7	14.7	601.8	327.2	532.9	152.3	22.6	597.0	210.2

Nota: Valores obtenidos de 663 muestras de roca

Tabla 1B.

Estadísticos descriptivos de elementos geoquímicos transformados mediante CLR

Estadístico	Au CLR	Ag CLR	As CLR	Bi CLR	Cd CLR	Cs CLR	Cu CLR	In CLR	Li CLR	Mo CLR	Pb CLR	Sb CLR	Sn CLR	Tl CLR	W CLR	Zn CLR
Desv. Est.	1.28	1.63	0.96	1.58	1.15	0.94	1.56	0.74	0.78	1.02	0.81	1.03	1.05	1.03	1.27	0.84
Asimetría	2.12	0.22	0.68	1.00	0.32	-1.17	0.62	0.49	-0.66	0.74	0.33	1.47	-0.87	-1.57	0.43	-0.76
Curtosis	5.56	-0.41	1.12	0.75	0.94	1.72	-0.44	3.61	0.68	2.64	2.52	3.18	1.04	2.67	1.65	0.40

Nota: Valores derivados de la transformación Centered Log-Ratio (CLR) aplicada a 663 muestras de roca para normalizar la naturaleza composicional de los datos.

Se utilizaron un total de 663 muestras de roca recolectadas en los proyectos ANAP Huyahuya (2018) y Antabamba Bloque 2 (2016) del INGEMMET. Los análisis fueron realizados en SGS del Perú, mediante ensayo al fuego para oro (Au, 50 g) y ICP-MS tras digestión multiácida, cubriendo un total de 50 elementos químicos.

Como parte del control de calidad, se evaluó la censura analítica por Límite de Detección (LOD). Se excluyeron Se, Te y U, al presentar más del 50% de datos por debajo del LOD, en concordancia con criterios de robustez estadística (Reimann & Filzmoser, 2000). Se retuvo el Au a pesar de su censura parcial, dada su relevancia geoquímica como elemento guía en sistemas mineralizados (Halley et al., 2015; Carranza, 2009).

#### 4.1.2. Análisis exploratorio y transformación composicional

Se realizó un Análisis Exploratorio de Datos (EDA), que incluyó estadísticas descriptivas y métricas de forma como asimetría (*skewness*) y curtosis, evidenciando distribuciones fuertemente sesgadas para Au, Ag, Cu, Mo, entre otros. Debido al carácter composicional de los datos geoquímicos (con restricciones de suma constante), se aplicó la transformación *Centered Log-Ratio* (CLR), propuesta por Aitchison (1986) y posteriormente formalizada en términos geométricos para el análisis multivariado por Egozcue et al. (2003). Esta transformación traslada los datos desde el simplex a un espacio euclidiano, reduciendo las correlaciones espurias y permitiendo la aplicación rigurosa de técnicas estadísticas multivariadas en exploración geoquímica.

#### 4.1.3. Selección de elementos guía y análisis factorial (FA)

Se seleccionaron 16 elementos guía comúnmente asociados a mineralización en pórfidos y epitermales (Au, Ag, As, Bi, Cd, Cs, Cu, In, Li, Mo, Pb, Sb, Sn, Tl, W, Zn) (Tabla 1A), con base en los

trabajos de Halley et al. (2015) y Cooke et al. (2005) sobre zonación geoquímica en estos sistemas.

Sobre los datos CLR transformados (**Tabla 1B**), se aplicó un análisis factorial (FA) con rotación Varimax para identificar asociaciones multielementales (**Tabla 2**). Este enfoque es ampliamente reconocido en geoquímica exploratoria para la identificación de firmas geoquímicas y la construcción de índices multivariados (Carranza, 2009; Zuo & Wang, 2011).

Se extrajeron dos factores principales, que explicaron en conjunto el 51.8% de la varianza. El Factor 1 (34.3%) presentó altas cargas para Au, Ag, Cu, Bi, lo que permitió interpretarlo como un componente mineralizante. En consecuencia, se invirtió su signo para construir el índice  $F1^*$  ( $-F1$ ), lo que facilita su interpretación directa como intensidad de anomalía (Carranza, 2009). El Factor 2 (17.5%) se asoció a elementos de halo distal o alteraciones periféricas (Pb, Zn, Cd, Li, Cs).

Tabla 2.

Matriz de cargas rotadas (Varimax) y comunalidades de variables CLR ( $N = 663$ ).

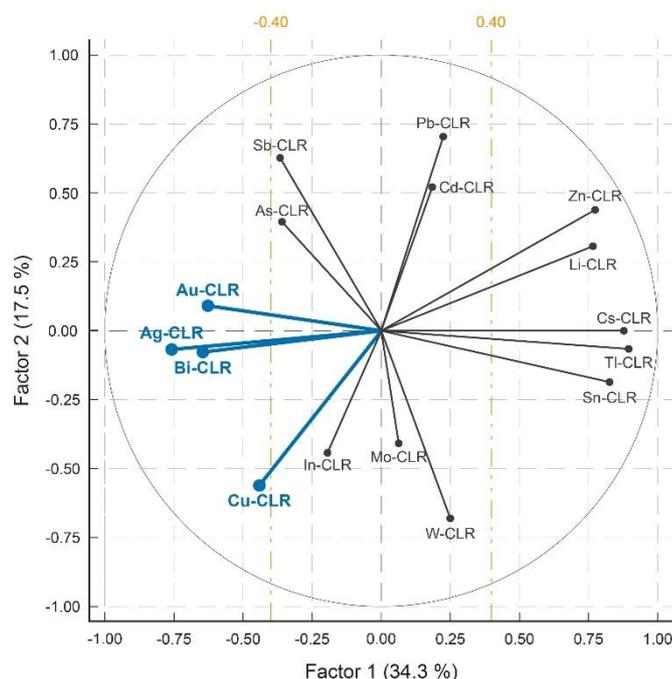
Variable	Factor 1	Factor 2	$h^2$
Tl-CLR	<b>0.894</b>	-0.064	0.803
Cs-CLR	<b>0.879</b>	0.003	0.773
Sn-CLR	<b>0.825</b>	-0.185	0.716
Zn-CLR	<b>0.776</b>	<b>0.444</b>	0.799
Li-CLR	<b>0.765</b>	0.31	0.681
Ag-CLR	<b>-0.761</b>	-0.063	0.584
Bi-CLR	<b>-0.651</b>	-0.075	0.429
Au-CLR	<b>-0.626</b>	0.092	0.401
Cu-CLR	<b>-0.447</b>	<b>-0.552</b>	0.505
Pb-CLR	0.224	<b>0.712</b>	0.557
W-CLR	0.251	<b>-0.672</b>	0.515
Mo-CLR	0.065	<b>-0.402</b>	<b>0.166†</b>
In-CLR	-0.196	<b>-0.441</b>	<b>0.233†</b>
Sb-CLR	-0.368	<b>0.627</b>	0.528
Cd-CLR	0.183	<b>0.526</b>	<b>0.310†</b>
As-CLR	-0.362	0.393	<b>0.286†</b>
<b>Varianza</b>	5.4906	2.7949	8.2855
<b>% Var</b>	0.343	0.175	0.518

Nota: Cargas significativas en negrita ( $|carga| \geq 0.40$ );  $h^2 < 0.40$  indicadas con †. Varianza total explicada: 51.8%.

Esta interpretación fue confirmada mediante un biplot de  $F1$  vs  $F2$  sobre datos CLR (**Figura 2**), donde se observa el agrupamiento de vectores asociados a mineralización en un mismo cuadrante.

Figura 2.

Biplot  $F1-F2$  (rotación Varimax) a partir de datos transformados mediante CLR, que muestra la agrupación de elementos guía de mineralización (Cu, Au, Ag, Bi).



Nota. El análisis se realizó aplicando la transformación Centered Log-Ratio (CLR) seguida de un modelo factorial con rotación Varimax. Los vectores resaltan la asociación geoquímica de Cu, Au, Ag y Bi como elementos guía de mineralización, coherente con la firma geoquímica típica de sistemas tipo pórfido y epitermal.

#### 4.1.4. Cálculo del índice de singularidad ( $\alpha$ )

Para cuantificar la heterogeneidad espacial del índice  $F1^*$ , se calculó el **exponente de singularidad  $\alpha$** , el cual permite detectar anomalías locales mediante el contraste entre un valor puntual y su entorno. El cálculo se efectuó siguiendo la formulación de Local Singularity Analysis (LSA) propuesta por Cheng (2007) y aplicada recientemente en estudios geoquímicos regionales por Ma *et al.* (2023), así como en casos de exploración por Zuo *et al.* (2009):

$$\alpha = \log_{10}\left(\frac{F1^*}{F1^*_{local}}\right)$$

Donde  $F1^*_{local}$  es el promedio del índice  $F1^*$  dentro de una ventana de  $5 \times 5$  celdas de 100 m, representando el entorno local.

La LSA constituye un enfoque multifractal orientado a identificar patrones de enriquecimiento o depleción local, capaces de reflejar la canalización de flujos metálicos en intervalos espaciales y

temporales reducidos (Cheng, 2007; Zuo et al., 2009) (Tabla 3).

Tabla 3. Interpretación del exponente de singularidad ( $\alpha$ ) obtenido mediante LSA sobre el índice  $F1^*$  (ventana 5x5; 100 m).

$\alpha$	Implicación
$\alpha < 0$	Enriquecimiento local: la celda presenta mayor concentración que su entorno → posible anomalía-objetivo.
$\alpha = 0$	Comportamiento comparable al entorno; representa el fondo geoquímico local.
$\alpha > 0$	Depleción relativa: la celda exhibe menor concentración que el vecindario.

Nota: Valores negativos de  $\alpha$  suelen asociarse a procesos de concentración de metales en dominios restringidos, mientras que valores positivos reflejan zonas de dispersión o empobrecimiento.

#### 4.1.5. Modelamiento fractal mediante el modelo C-A

La distribución del índice  $\alpha$  fue modelada mediante el modelo fractal Concentration–Area (C–A) desarrollado por Cheng et al. (1994), el cual describe cómo la intensidad geoquímica y su área de ocurrencia siguen una ley potencial:

$$A(\rho \leq \mu) = \rho^{-\beta}$$

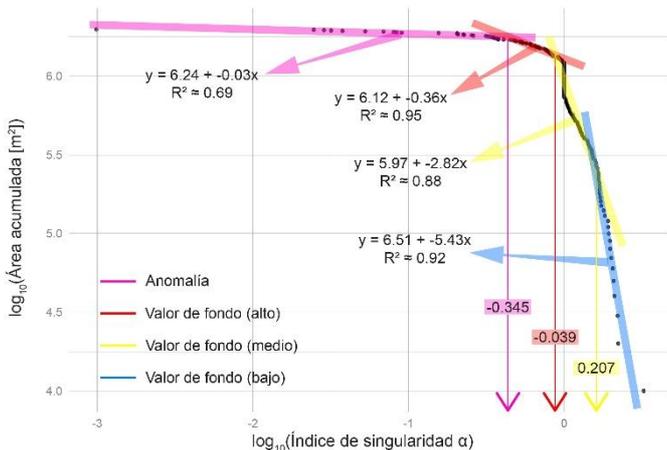
Donde  $A$  es el área acumulada de celdas cuya intensidad  $\rho$  (en este caso, el valor de  $\alpha$ ) es menor o igual a un umbral  $\mu$ . Al representarse en escala logarítmica, esta relación se vuelve línea:

$$\log_{10}(\alpha) \text{ vs } \log_{10}[A(\alpha \leq \mu)]$$

El ajuste se realizó mediante regresión segmentada utilizando el paquete segmented en R (Muggeo, 2003), lo que permitió identificar puntos de quiebre estadísticamente significativos y, por ende, definir umbrales fractales que separan diferentes poblaciones geoquímicas (Figura 3).

Figura 3

Curva fractal C–A aplicada al índice de singularidad ( $\alpha$ , derivado del LSA), mostrando la segmentación log–log y la definición de umbrales fractales para discriminar poblaciones de fondo y anomalías geoquímicas.



Nota. La curva se construyó a partir del análisis fractal concentración–área (C–A) aplicado sobre el índice de singularidad ( $\alpha$ ) obtenido mediante LSA. Las pendientes diferenciadas en el espacio log–log permiten establecer umbrales fractales ( $\alpha = -0.345, -0.039$  y  $0.207$ ), que separan los valores de fondo (bajo, medio y alto) de las poblaciones anómalas. Este procedimiento facilita la delimitación de áreas con potencial geoquímico para mineralización.

Se identificaron cuatro segmentos lineales en la curva C–A, correspondientes a diferentes poblaciones geoquímicas. (Tabla 4):

Tabla 4. Clases fractales del exponente de singularidad ( $\alpha$ ) sobre el índice  $F1^*$  (LSA + C–A), con rangos de  $\log_{10}(\alpha)$  e interpretación geológica

Clase	Rango de $\log_{10}(\alpha)$	Interpretación (LSA + C–A)
Anomalia	$\leq -0.345$	Celdas altamente enriquecidas; zonas-objetivo para pórfidos/epitermales.
Fondo alto	$-0.345 < \alpha \leq -0.039$	Distribución típica de background regional.
Fondo medio	$-0.039 < \alpha \leq 0.207$	Variabilidad intermedia; posible halo de dispersión.
Fondo bajo	$0.207 < \alpha \leq 0.512$	Valores diluidos o ambientes no mineralizados.

Nota: Los límites de clasificación corresponden a los umbrales fractales derivados del modelo C–A aplicado sobre el índice  $F1^*$

Las pendientes suaves ( $-0.03$  y  $-0.36$ ) en los primeros tramos indican poblaciones autosimilares con potencial mineralizado; mientras que las pendientes más negativas ( $-2.82$  y  $-5.43$ ) en los tramos finales corresponden a áreas sin enriquecimiento significativo, reflejando un carácter diluido del background (Carranza, 2011; Zuo et al., 2012; Liu et al., 2013) (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros del ajuste C–A sobre  $\alpha$  (LSA aplicado al índice  $F1^*$ ; tamaño de celda = 100 m, ventana = 5x5)

Clase fractal	Pendiente ( $-\alpha$ )	$R^2$	Interpretación (LSA + C–A)
Anomalia	$-0.03$	0.69	Núcleo singularmente enriquecido; zonas-objetivo pórfido/epitermal.
Fondo	$-0.36$	0.95	Background elevado; posible proximidad a núcleos anómalos.
Fondo Medio	$-2.82$	0.88	Variabilidad intermedia; halo de dispersión probable.
Fondo Bajo	$-5.43$	0.92	Depleción; valores diluidos o ambientes no mineralizados.

Nota: Los parámetros de pendiente y  $R^2$  corresponden a los segmentos lineales de la curva C–A, ajustados sobre el exponente de singularidad ( $\alpha$ ).

#### 4.1.6. Clasificación fractal del terreno

Los umbrales obtenidos mediante el modelo C–A se aplicaron para generar un mapa de clasificación fractal de singularidad, definiendo cuatro dominios geoquímicos. Este mapa fue integrado en un entorno GIS para análisis espacial, lo que permitió delimitar zonas de interés prioritario para exploración, basadas en:

- Singularidad local elevada (valores altos de  $\alpha$ ).
- Asociación multielemental favorable (índice  $F1^*$ ).
- Soporte estadístico sólido, garantizado por la segmentación fractal.

## 4.2. Estructural

### 4.2.1. Recopilación y priorización estructural

Se recopiló la red de fallas y lineamientos a partir de la cartografía geológica digital del INGEMMET (2022), complementada con estudios estructurales previos en ANAPs y en proyectos regionales. Posteriormente, se efectuó una depuración técnica que permitió validar únicamente aquellas estructuras con respaldo morfológico, cinemático y litológico verificable. Esta verificación se basó en metodologías multiescalares recomendadas por Zuloaga et al. (2016), centradas en la coherencia geométrica y el control litoestructural; así como en los criterios de campo propuestos por Villarreal et al. (2019) y el enfoque progresivo de deformación planteado por Contreras (2012) para los Andes Centrales.

Con la red validada, se priorizaron aquellas estructuras con potencial de actuar como conductos de fluidos mineralizantes o sistemas translitosféricos. Para ello se evaluaron atributos estructurales como: tendencia coincidente con áreas mineralizadas, alto ángulo de buzamiento, contraste de edades entre bloques, y presencia de diferenciación magmática. Los cuales sugieren actividad prolongada y control tectono-magmático profundo. Este enfoque se sustenta en los modelos de arquitectura litosférica de Pfiffner (2017), en los criterios estructurales-metalogenéticos de Camus y Castelli (2020), y el concepto de “mineral systems” controlados por zonas de debilidad persistente, propuesto por Hronsky (2013).

### 4.2.2. Análisis direccional – Roseta estructural jerarquizada

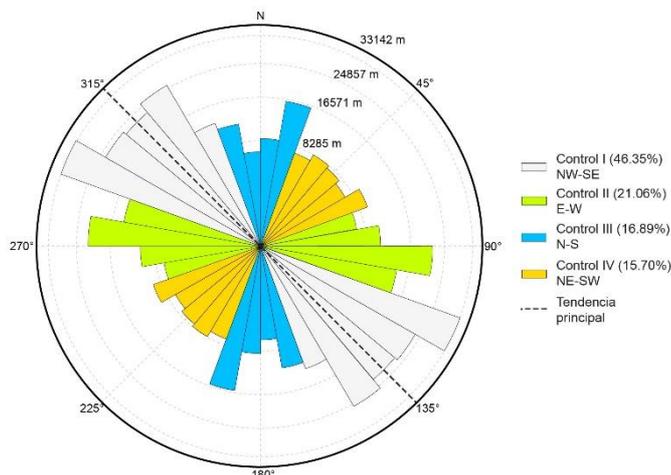
Con la red estructural validada, se construyó un diagrama de rosetas bidireccional ponderado tanto por longitud total acumulada como por número de estructuras. Este análisis permitió clasificar la red en cuatro conjuntos jerárquicos principales según su orientación dominante y frecuencia relativa (**Figura 4**):

- Control I: NW–SE ( $110^{\circ}$ – $160^{\circ}$ ):
  - ✓ Representa el 46.35 %, claramente el conjunto principal.

- ✓ Es la tendencia estructural dominante en longitud acumulada.
- Control II – E–W ( $70^{\circ}$ – $110^{\circ}$  y conjugadas):
  - ✓ Con un 21.06 %, corresponde al conjunto prioritario.
  - ✓ Se evidencia como una orientación estructural significativa pero subordinada al Control I.
- Control III – N–S / NNE–SSW ( $160^{\circ}$ – $20^{\circ}$ ):
  - ✓ Con un 16.89 %, se clasifica como conjunto secundario.
  - ✓ Se vincula a un patrón meridional (N–S).
- Control IV – NE–SW / ENE–WSW ( $20^{\circ}$ – $70^{\circ}$ ):
  - ✓ Con un 15.70 %, es el conjunto subordinado.
  - ✓ Menor peso estructural relativo, con participación en fallas locales.

**Figura 4**

Análisis de orientaciones estructurales representado mediante un diagrama de roseta bidireccional ponderado por longitud total.



*Nota.* El diagrama de roseta muestra la distribución de las orientaciones estructurales en el área de estudio, clasificadas en cuatro dominios principales: NW–SE (46.35%), E–W (21.06%), N–S (16.89%) y NE–SW (15.70%). La ponderación por longitud total permite destacar la mayor continuidad de las estructuras NW–SE, identificadas como la tendencia principal, lo que resalta su importancia como zonas de control estructural y potenciales corredores de mineralización.

La jerarquización se estableció considerando tres criterios principales:

- Intensidad estructural (m/estructura).
- Longitud total acumulada por rango direccional.
- Participación en zonas de interferencia o cruce tectónico.

Esta clasificación permitió relacionar cada conjunto estructural con eventos de deformación específicos y evaluar su influencia relativa en el control de la mineralización.

### 4.2.3. Cálculo de la Dimensión Fractal de Estructuras Lineales

El análisis fractal de las estructuras lineales se realizó mediante el método de box-counting, técnica ampliamente validada en estudios de patrones espaciales complejos asociados con fracturas y lineamientos geológicos (Afzal et al., 2011; Mirzaie et al., 2015; Chauhan y Dixit, 2024). Este enfoque permite cuantificar la complejidad espacial y la distribución fractal de fallas y lineamientos, lo cual resulta clave para identificar sectores con alta densidad estructural y mayor potencial para la concentración de fluidos mineralizantes, constituyendo targets exploratorios prioritarios (Zhao et al., 2011).

Los pasos metodológicos se estructuraron de la siguiente manera:

#### 4.2.3.1. Construcción de grillas multiescala en GIS:

Se generaron grillas jerárquicas (fishnets) con resoluciones espaciales de 100 m, 50 m, 25 m y 12.5 m. Este procedimiento multiescalar, recomendado por Bo Li et al. (2010), Zhao et al. (2011) y Mirzaie et al. (2015), es esencial para capturar la heterogeneidad estructural, garantizando un análisis robusto y consistente en diferentes escalas espaciales.

#### 4.2.3.2. Aplicación del método box-counting:

En cada nivel de resolución se determinó el número de subceldas ocupadas por lineamientos estructurales. Este conteo proporcionó una medida cuantitativa objetiva de la densidad estructural, constituyendo la base empírica para el análisis fractal mediante modelos logarítmicos (Afzal et al., 2011; Zhao et al., 2011).

#### 4.2.3.3. Transformación logarítmica:

Los valores obtenidos se transformaron en escala logarítmica ( $\log_{10}$ ), obteniendo pares ordenados  $[\log(r), \log N(r)]$  que describen la relación fractal entre el tamaño de celda ( $r$ ) y el número de celdas ocupadas ( $N(r)$ ). Esta relación refleja cuantitativamente la complejidad espacial inherente a las estructuras geológicas (Chauhan y Dixit, 2024; Zhao et al., 2011).

#### 4.2.3.4. Cálculo de la dimensión fractal (D):

Para cada celda del área estudiada, se aplicó una regresión lineal simple a partir de los pares ordenados generados ( $\log N(r)$  vs  $\log(r)$ ), conforme a la siguiente ecuación:

$$\text{Log}N(r) = -D \cdot \log(r) + b$$

Donde:

- D: Valor absoluto de la pendiente de la regresión lineal simple ( $|\text{slope}|$ ), representa directamente la dimensión fractal.
- b: Constante dependiente de las características estructurales específicas del área local analizada.

El cálculo se realizó mediante funciones estadísticas estándar en Excel:

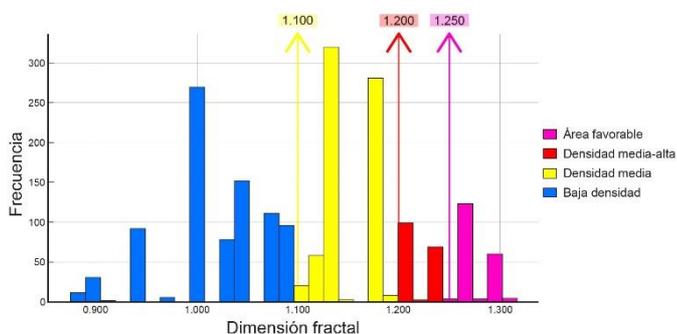
- Pendiente (slope) y Coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

Esta metodología es ampliamente aceptada debido a su simplicidad y rigor estadístico en la determinación precisa del valor fractal de estructuras geológicas (Chauhan y Dixit, 2024; Zhao et al., 2011).

#### 4.2.3.5. Asignación espacial y modelado fractal:

Los valores obtenidos para la dimensión fractal (D) (**Figura 5**) se asignaron espacialmente a sus respectivas celdas dentro de un entorno GIS. Posteriormente, mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW), se generó un modelo continuo de la distribución espacial de la dimensión fractal en el área estudiada. Esta técnica facilita una interpretación integral y sistemática, identificando áreas de interés exploratorio con alta fractalidad estructural, que podrían indicar un control tectónico favorable para la concentración de mineralizaciones asociadas a sistemas tipo pórfido y epitermal (Zhao et al., 2011; Mirzaie et al., 2015; Chauhan y Dixit, 2024).

**Figura 5.** Clasificación Fractal de Densidad Estructural: Identificación de Áreas Potencialmente Favorables



*Nota.* El histograma muestra la distribución de la dimensión fractal y los umbrales en 1.100, 1.200 y 1.250, que permiten diferenciar clases de densidad estructural y resaltar áreas potencialmente favorables para la mineralización.

### 4.3. Teledetección

En Teledetección se adicionó el uso de nuevas técnicas de procesamiento de imágenes satelitales ASTER y LANDSAT en conjunto con aquellos tradicionales empleados en la zona de estudio (Zuloaga et al., 2016; Villarreal et al., 2019), con la finalidad de reconocer y delimitar todas las zonas de alteración relacionados al sistema pórfido de Cu-Mo-Au (Halley et al., 2015) y epitermal de baja y alta sulfuración (Hedenquist et al, 2000).

#### 4.3.1. Preprocesamiento y procesamiento

Previamente, a las bandas agrupadas se les aplico correcciones radiométricas, atmosféricas y de emisividad, y se realizó un enmascaramiento para vegetación, agua y nieve.

En el procesamiento, mientras que con las técnicas tradicionales de Composición de Falso Color (FCC), Cociente de Bandas y análisis de componentes principales (PCA) se calibró y comparó el procesamiento con los mapas de alteración existentes, se añadió la técnica de Band Math (BM) para aprovechar las relaciones entre las bandas y generar nuevos productos o rasters interpretables.

#### 4.3.2. Aplicación del método fractal

##### 4.3.2.1. Transformación e integración por índices

Los valores de reflectancia ( $x$ ) de PCA y BM fueron normalizados mediante un método de transformación robustecida:

$$Z_{rob} = \frac{x - \text{mediana}(x)}{MAD(x)}$$

con la finalidad de reducir el impacto de valores extremos y mejorar la comparabilidad entre datos puntuales (Carranza, 2009).

Ambos datos transformados se integraron mediante una media aritmética según el potencial de mineralización (**Tabla 6**) de cada tipo de alteración hidrotermal (Pour & Hashim, 2012; Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010), permitiendo la construcción de índices integrados para el sistema pórfido y epitermal.

Tabla 6. Índices Espectrales (BM), Componentes Principales (PCA) y Pesos Asignados para la Caracterización de Alteraciones Hidrotermales

Alteración hidrotermal	BM	PCA	Peso	Índice Integrado	Referencias
Óxidos / hidróxidos de Fe	$\frac{B6 + B8}{B7}$	1234	1		Cudahy, 2012; Shirmard et al., 2020
Argílica Avanzada	$\frac{B4 + B6}{B5}$	1457	1	Epitermal	Kalinowski & Oliver, 2004; Shirmard et al., 2020
Fílica	$\frac{B5 + B7}{B6}$	1467	1		Rios et al., 2023; Shirmard et al., 2020
Propilítica	$\frac{B6 + B9}{B7 + B8}$	1458	0.5	Pórfido	Cudahy, 2012; Shirmard et al., 2020
Potásica	$\frac{B4 + B6}{B4 + B7}$	-	1		Yao et al., 2021

*Nota: Los índices espectrales (BM) se definieron en función de combinaciones de bandas satelitales validadas en la literatura, mientras que los componentes principales (PCA) corresponden a las transformaciones más representativas para cada alteración. Los pesos asignados reflejan la relevancia relativa de cada parámetro dentro del índice integrado de exploración, diferenciando sistemas epitermales y pórfidos.*

##### 4.3.2.2. Cálculo del índice de singularidad ( $\alpha$ )

Para cuantificar la heterogeneidad espacial de los índices espectrales ( $F_i$ ), fueron rasterizados, con resolución de 30 m y una ventana de 3x3 píxeles, lo que permitió suavizar las variaciones locales y preservar las tendencias espaciales.

A partir de dichos valores, se calculó el índice de singularidad ( $\alpha$ ) siguiendo la formulación de Local Singularity Analysis (LSA) propuesta por Cheng (2007) y aplicada en exploración mineral por Zuo et al. (2009):

$$\alpha = \log_{10}\left(\frac{F_i}{F_{i_{local}}}\right)$$

donde  $F_i$  representa el valor del índice espectral en cada celda y  $F_{i_{local}}$  corresponde al promedio de su vecindad inmediata (ventana 3x3). Este parámetro ( $\alpha$ ) resalta la acumulación localizada de energía anómala, identificando focos de enriquecimiento o depleción espectral en escalas reducidas de espacio y tiempo, asociados a procesos hidrotermales.

### 4.3.2.3. Aplicación del modelo C–A

Los valores del índice de singularidad ( $\alpha$ ) fueron integrados en el modelo fractal Concentración–Área (C–A) propuesto por Cheng *et al.* (1994), el cual describe la relación entre la intensidad de un parámetro y su área de ocurrencia, siguiendo una ley potencial:

$$A(\rho \leq \mu) = \rho^{-\beta}$$

que en escala logarítmica se expresa como:

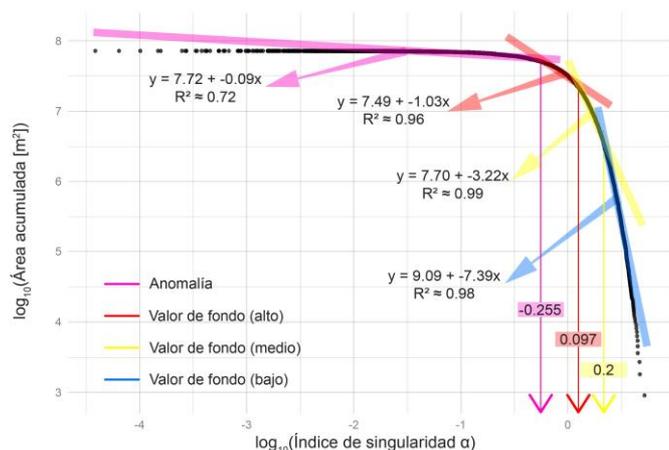
$$\log_{10}(\alpha) \text{ vs } \log_{10}[A(\alpha \leq \mu)]$$

El ajuste de la curva se realizó mediante regresión segmentada (Muggeo, 2003), lo que permitió identificar puntos de quiebre estadísticamente significativos. Dichos puntos definen umbrales fractales objetivos, que separan las poblaciones de fondo de las anomalías espectrales más relevantes (Ma *et al.*, 2023).

Este enfoque, ampliamente documentado en estudios de exploración geoquímica y espectral, refuerza la trazabilidad y la reproducibilidad del análisis. (Figura 6)

#### Figura 6

Curva fractal C–A aplicada al índice de singularidad  $\alpha$  (derivado del LSA–Índice Pórfido), mostrando los tramos segmentados log–log y la definición de umbrales fractales para diferenciar poblaciones de fondo y anomalías espectrales.



Nota. La curva se ajustó mediante regresión segmentada, identificando cuatro tramos con pendientes diferenciadas:  $-0.09$ ,  $-1.03$ ,  $-3.22$  y  $-7.39$ . Los umbrales fractales ( $\alpha = -0.255$ ,  $0.097$  y  $0.200$ ) separan poblaciones de fondo (bajo, medio y alto) respecto a la población anómala, lo que permite una delimitación objetiva de sectores con mayor significancia espectral y potencial exploratorio.

### 4.3.3. Corroboración con métodos de clasificación supervisada

Dichas técnicas se basaron en firmas espectrales de minerales indicadores de alteración hidrotermal (Kokaly *et al.*, 2017; Corbett & Leach, 1997), seleccionadas según su presencia en las muestras previas recolectadas en el área (Zuloaga *et al.*, 2016; Villareal *et al.*, 2019). Esta integración metodológica aseguró la validación cruzada de los resultados, aumentando la confiabilidad en la identificación de evidencias superficiales de targets potenciales de exploración.

## 5. Resultados

### 5.1. Geoquímica

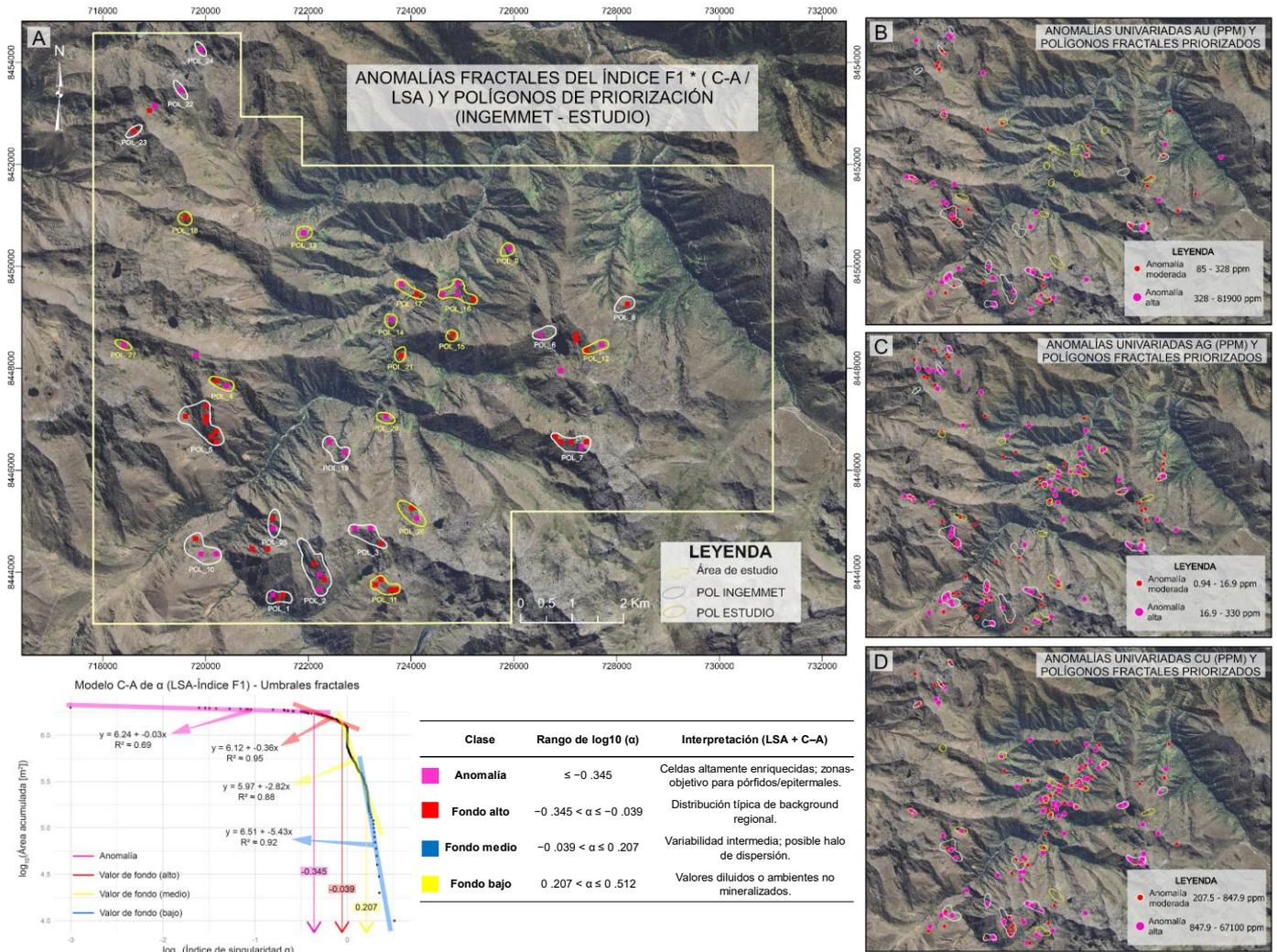
La aplicación del modelo fractal Concentration–Area (C–A) sobre el exponente de singularidad  $\alpha$ , derivado del índice multielemental  $F1^*$ , permitió clasificar el terreno en cuatro dominios geoquímicos. Para fines de exploración, se priorizaron dos clases de interés económico: la clase anómala ( $\alpha$  entre  $-3.003$  y  $-0.345$ ) y la clase de fondo enriquecido ( $\alpha$  entre  $-0.344$  y  $-0.039$ ). Estas clases, definidas por tramos autosimilares en la curva log–log de  $\alpha$  vs área acumulada (Cheng *et al.*, 1994; Carranza, 2011), reflejan poblaciones geoquímicas con grados de heterogeneidad propios de procesos mineralizantes intensos. La segmentación fue realizada con el paquete segmented en R (Muggeo, 2003), garantizando objetividad estadística en la determinación de los puntos de ruptura.

Los polígonos generados a partir de estas clases fractales fueron espacialmente mapeados e integrados en un entorno SIG. La validación geoquímica univariada dentro de dichos polígonos mostró contenidos metálicos notoriamente elevados: oro (Au) entre 14 ppm y 4775 ppm, cobre (Cu) entre 119 ppm y 18,018 ppm, y plata (Ag) entre 0.37 ppm y 95 ppm, valores que se alinean con firmas geoquímicas características de sistemas tipo pórfido Cu–Au y epitermales intermedios Au–Ag (Halley *et al.*, 2015; Cooke *et al.*, 2005). (Figura 7)

Desde un enfoque estructural, los polígonos con  $\alpha$  elevado coinciden espacialmente con estructuras favorables previamente cartografiadas por INGEMMET (ANAP Huyahuya, 2018; Antabamba B2, 2016), incluyendo zonas con vetillas de cuarzo

**Figura 7**

Aplicación del modelo fractal C-A sobre el índice de singularidad ( $\alpha$ , derivado del LSA) para la delimitación de anomalías. a) Anomalías fractales del índice  $F1^*$  (C-A/LSA) y polígonos de priorización; b-d) anomalías univariadas de Au, Ag y Cu integradas con polígonos fractales priorizados (INGEMMET y ESTUDIO).



*Nota. La figura muestra la integración entre el análisis fractal C-A aplicado al índice  $F1^*$  (derivado de LSA) y la priorización de anomalías geoquímicas. Los polígonos delineados corresponden a las clases definidas por los umbrales fractales ( $\alpha = -0.345$  y  $-0.039$ ), que diferencian poblaciones de fondo alto y anomalías significativas. La comparación con las distribuciones univariadas de Au, Ag y Cu valida la robustez del enfoque, permitiendo priorizar sectores con mayor potencial exploratorio. Elaboración propia.*

± sulfuros, brechas hidrotermales, y stockworks, muchas de ellas alineadas con sistemas de fallas mayores con orientación NW-SE. Esta superposición valida la hipótesis de que la singularidad local identificada mediante  $\alpha$  no solo refleja enriquecimiento geoquímico, sino también la canalización estructural efectiva de fluidos mineralizantes (Cheng, 2007; Zuo et al., 2012).

Además, se identificó una clara distribución mineralógica asociada a los dominios anómalos. Los polígonos ubicados hacia el sector suroeste de la zona de estudio presentan concentraciones de minerales secundarios de cobre, tales como malaquita y crisocola, en zonas de oxidación supergénica. Asimismo, se reportó la presencia de

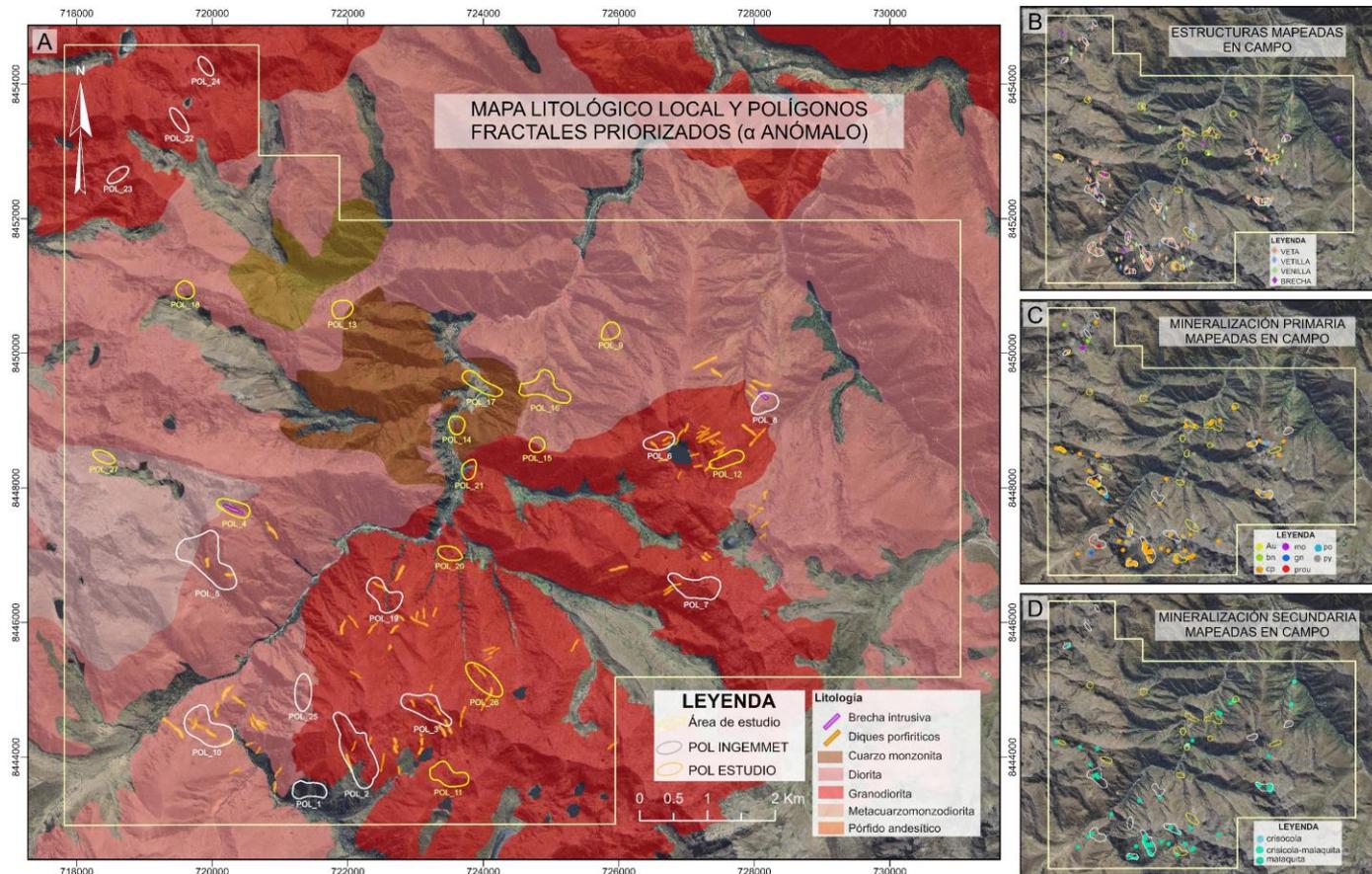
minerales mena como bornita y calcopirita, también con mayor predominancia hacia el suroeste, lo que sugiere un potencial sistema de alimentación magmático bien desarrollado en profundidad. De forma puntual, también se reconocieron especímenes de oro nativo y pirargirita ( $Ag_3SbS_3$ ), esta última como evidencia de eventos hidrotermales de temperatura intermedia a baja. (Figura 8). Toda esta información mineralógica fue recolectada y sistematizada a partir de los estudios técnicos publicados por el INGEMMET, consolidando la validez empírica del modelo geoquímico propuesto.

En conjunto, la integración de resultados fractales, geoquímicos, estructurales y mineralógicos demuestra la eficacia del enfoque LSA + C–A para

direccional, longitud acumulada e intensidad. A través de diagramas de roseta ponderados por longitud y número de estructuras, se distinguieron

**Figura 8**

*Integración de polígonos fractales priorizados con la cartografía de campo. a) Mapa litológico local y polígonos fractales ( $\alpha$  anómalo); b) estructuras mapeadas en campo; c) mineralización primaria observada; d) mineralización secundaria de Cu asociada.*



*Nota. El mapa litológico (a) muestra la distribución de unidades intrusivas y volcánicas junto con los polígonos fractales priorizados derivados del índice  $F1^*$  (C–A/LSA). Las figuras b, c y d validan la coherencia de los polígonos fractales con las observaciones de campo: estructuras principales, mineralización primaria (oro (au), molibdeno (mo), pirrotita (po), bornita (bn), galena (gn), pirita (py), calcopirita (cp) y proustita (prou)) y mineralización secundaria de cobre (crisocola y malaquita). Esta integración confirma la utilidad del enfoque fractal para guiar la exploración en ambientes pórfido–epitermal. Elaboración propia.*

cuatro conjuntos estructurales principales.

identificar zonas con alto potencial mineral en sistemas complejos. La coherencia entre la anomalía multielemental ( $F1^*$ ), la singularidad espacial ( $\alpha$ ), los valores de ley, las estructuras geológicas y la mineralogía asociada, refuerza el valor predictivo de esta metodología para el targeting exploratorio de depósitos tipo pórfido y epitermal.

## 5.2. Estructural

El análisis estructural de la zona permitió identificar un patrón jerárquico de organización en la red de fallas y lineamientos, sustentado en su distribución

El Conjunto I (NW–SE,  $110^{\circ}$ – $160^{\circ}$ ) constituye el sistema dominante en la arquitectura regional, caracterizado por su elevada longitud acumulada ( $\approx 118$  km (46.35%)), alta densidad de estructuras y la presencia de fallas regionales de primer orden como Huamansalcca, además de otras relevantes como Apacheta y Yahualja. Este conjunto concentra segmentos que evidencian reactivación y superposición tectónica, factores que incrementan su relevancia como corredores de fluidos mineralizantes.

El Conjunto II (E–W,  $70^{\circ}$ – $110^{\circ}$ , con conjugados menores), jerárquicamente prioritario, integra

lineamientos como Tamburqui y Ojorcocha, además de fracturas locales en Apacheta y Comiñahue. Este conjunto presenta una intensidad estructural destacada, con valores máximos de más

2025) demuestran que los valores elevados de D están directamente relacionados con una mayor eficiencia en la migración y acumulación de fluidos hidrotermales en sistemas mineralizados.

Tabla 7. Síntesis jerárquica de la red estructural por orientación (clases bidireccionales de 10°)

Ang Inicio (°)	Ang Fin (°)	Longitud total (m)	% Longitud	N° Estructuras	% Estructuras	Intensidad (m/estr)	Clase jerárquica	Orientación dominante	Fallas / corredores locales incluidos
0	10	8653.07	3.40	12	3.91	721.09	Conjunto secundario (Control III)	N-S / NNE-SSW (160-20°)	• Corredor Azullccaca (N5-15°, controla brecha 850m) • Falla Masatajra (N40°W dextral ± normal)
10	20	16137.67	6.35	17	5.54	949.27			
160	170	11501.00	4.53	15	4.89	766.73			
170	180	6621.04	2.61	12	3.91	551.75			
20	30	7318.66	2.88	15	4.89	487.91	Conjunto subordinado (Control IV)	NE-SW / ENE-WSW (20-70°)	• Falla Pilpinto (N34°) y Falla Tinajaya (N60°) • Lineamiento Quisñahue • Tramos NE de la Falla Aysacocha • Fracturas N60°E en diques hipoabisales
30	40	8211.54	3.23	6	1.95	1368.59			
40	50	7761.07	3.05	8	2.61	970.13			
50	60	7071.98	2.78	12	3.91	589.33			
60	70	9555.90	3.76	17	5.54	562.11			
70	80	7028.07	2.77	10	3.26	702.81			
80	90	10600.81	4.17	5	1.63	2120.16	Conjunto prioritario (Control II)	E-W (70-110°) & menores conjugados	• Lineamiento Tamburqui y Ojorcocha • Fracturas locales E-W en Apacheta y Comiñahue
90	100	21764.46	8.57	19	6.19	1145.50			
100	110	14099.43	5.55	14	4.56	1007.10			
110	120	33142.88	13.04	32	10.42	1035.71			
120	130	23494.33	9.25	29	9.45	810.15	Conjunto principal (Control I)	NW-SE (110-160°)	• Falla Huamansalca (N125°, ≈15km) • Falla Apacheta (N318°, subparalela) • Falla Yahualja (N122°) • Segmento NW de la Falla Aysacocha • Lineamientos Trapiche y Huicacocha
130	140	22642.00	8.91	24	7.82	943.42			
140	150	25707.96	10.12	38	12.38	676.53			
140	160	12791.10	5.03	22	7.17	581.41			
150	160	12791.10	5.03	22	7.17	581.41			

Nota: Longitud y % longitud, número y % de estructuras, intensidad (m/estr) y corredores/fallas asociados.

de 2,100 m/estr, y se caracteriza por su elevada conectividad lateral.

La interacción entre los Conjuntos I y II define zonas de interferencia estructural, consideradas como corredores favorables para la circulación de fluidos. Finalmente, los conjuntos subordinados (Control IV, NE-SW / ENE-WSW) y secundario (Control III, N-S / NNE-SSW) representan sistemas de menor jerarquía, aunque con importancia local en contextos de interferencia o bordes de bloques estructurales (Tabla 7).

El análisis fractal aplicado a la red estructural reveló un dominio predominante de dimensiones fractales (D) entre 0.90 y 1.20, lo que indica una red de conectividad baja a moderada en gran parte del área (frecuencias dominantes en clases azul y amarilla). No obstante, se identificaron sectores con  $D > 1.20$  (≈19% de la red), que reflejan una mayor madurez fractal y un incremento notable en la densidad e interconexión de estructuras. Estos dominios se asocian principalmente a segmentos del Conjunto I (NW-SE, 110°-160°) y, en menor medida, a zonas de cruce con el Conjunto II (E-W, 70°-110°).

En particular, los sectores con  $D \geq 1.25$  evidencian una red estructural altamente conectada y posiblemente reactivada, compatible con zonas de cizalla con múltiples fases de deformación. Esta condición resulta crítica, ya que estudios recientes (Peng et al., 2023; Swain & Roy, 2024; Zhao et al.,

En conjunto, los resultados muestran que las estructuras de mayor jerarquía (Control I, NW-SE) con  $D > 1.20$  definen dominios estructurales de alta prospectividad, al reunir condiciones críticas para el targeting geológico: conectividad estructural elevada, reactivación tectónica y convergencia de múltiples familias de fallas. Estos sectores deben ser considerados como blancos prioritarios para programas de exploración avanzada en sistemas tipo pórfido y epitermal (Figura 9.A).

La integración de la conectividad fractal (D, box-counting) con los polígonos geoquímicos priorizados (Figura 9.B) evidencia una coincidencia selectiva: los polígonos de mayor interés se localizan principalmente en sectores con alta interacción estructural, concentrados en el eje central y sur del área de estudio. En contraste, hacia el norte y extremo occidental, varios polígonos se asocian únicamente a interacción moderada, lo que sugiere un menor grado de conectividad y potencial.

### 5.3. Teledetección

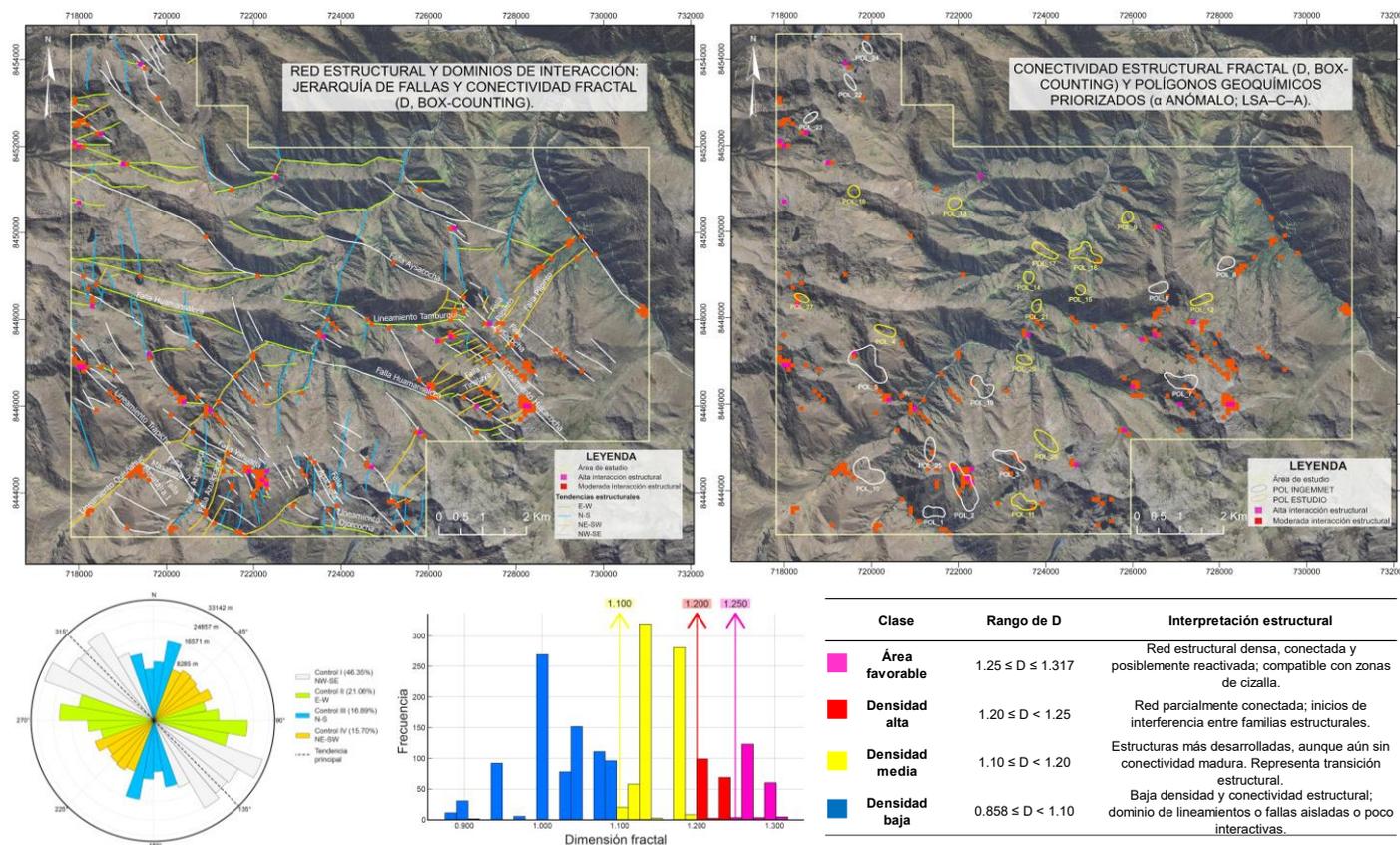
Los resultados obtenidos mediante Operaciones de Bandas (BM) y Análisis de Componentes Principales (PCA) muestran una marcada concentración de alteración argílica avanzada en el sector norte, mientras que las zonas filicas y potásicas presentan mayor desarrollo hacia el noreste y el centro del área de estudio (ANAP

Antabamba). Este patrón se interpreta como un sistema hidrotermal polifásico, con halos de alteración bien definidos y jerárquicamente organizados.

coincidiendo en 21 de los 27 polígonos. En particular, las anomalías derivadas del índice pórfido (**Figura 10.A**) muestran mayor

**Figura 9**

**Análisis estructural fractal y conectividad de fallas. a) Red estructural y dominios de interacción jerarquizados mediante box-counting; b) conectividad estructural fractal (D) integrada con polígonos geoquímicos priorizados ( $\alpha$  anómalo, LSA-C-A).**



**Nota.** El análisis estructural basado en box-counting permitió cuantificar la dimensión fractal (D) de la red de fallas y evaluar su conectividad. Los resultados muestran que las clases con  $D \geq 1.25$  corresponden a redes densas, conectadas y con alta probabilidad de reactivación, mientras que valores intermedios ( $1.10 \leq D < 1.25$ ) reflejan conectividad parcial y desarrollo estructural moderado. Los valores bajos ( $D < 1.10$ ) representan dominios con estructuras aisladas y baja interacción. La integración con anomalías geoquímicas fractales ( $\alpha$  anómalo) confirma la correspondencia espacial entre alta conectividad estructural y áreas de mayor potencial mineralizado. Elaboración propia.

La distribución de estas alteraciones coincide espacialmente con targets prioritarios previamente definidos por Zuloaga et al. (2016) y con la ubicación del proyecto La Yegua, lo que valida la confiabilidad de los resultados derivados de las técnicas espectrales. La comparación con datos de campo y descripciones petrográficas confirma la coherencia entre los índices espectrales y las evidencias de mineralización asociada.

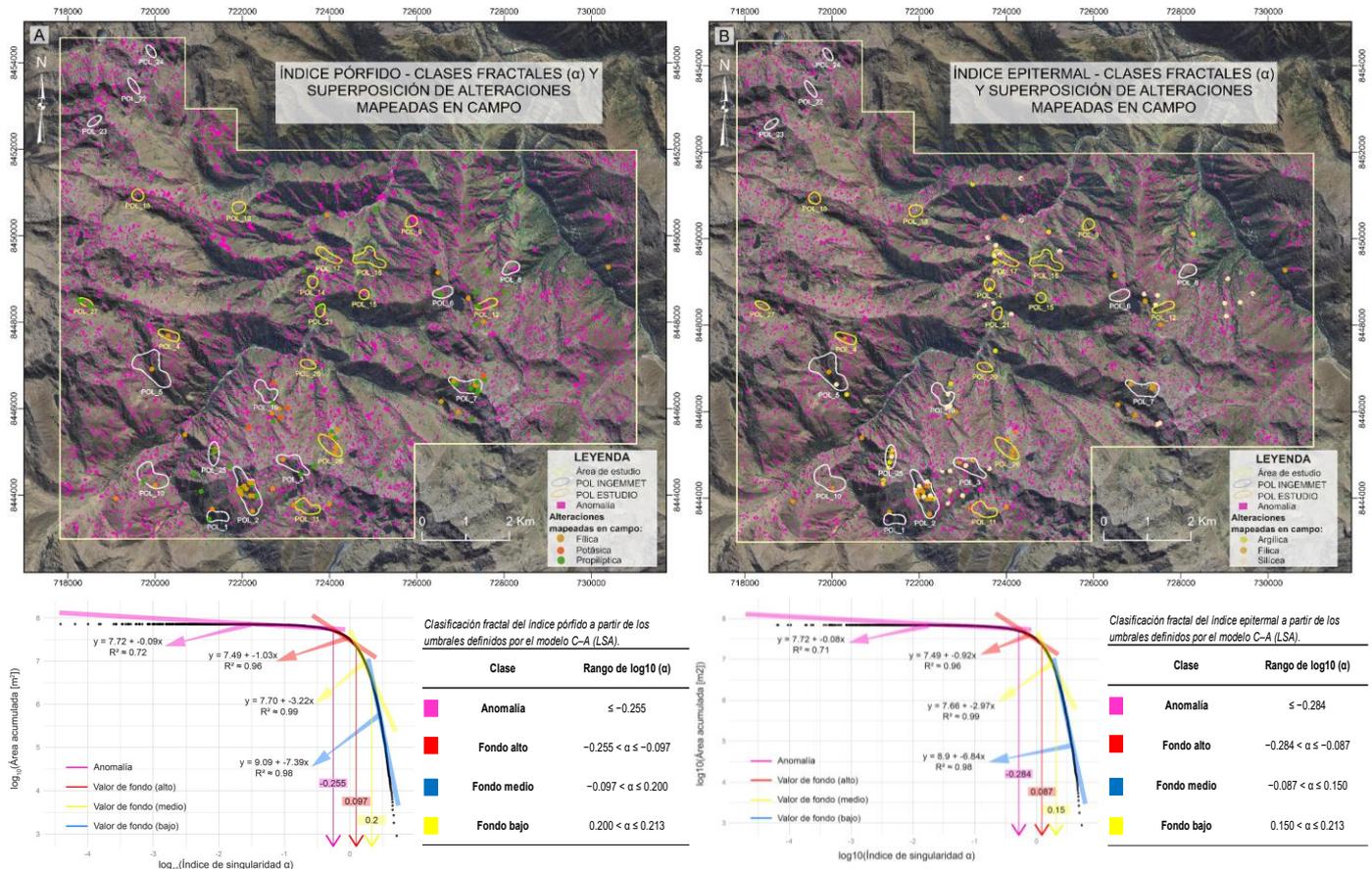
Respecto al modelo fractal concentración-área (C-A) aplicado a los índices compuestos de pórfido y epitermal, se observa que los píxeles anómalos ( $\alpha$  anómalo) mantienen una fuerte correspondencia con los polígonos fractales priorizados,

densidad en el sector sur y central, mientras que las del índice epitermal (**Figura 10.B**) se concentran hacia el norte y noreste, en estrecha asociación con zonas de alteración argílica y sílica identificadas en campo.

Este resultado refuerza la consistencia y trazabilidad del enfoque fractal-espectral, validando su aplicabilidad como herramienta para la delimitación de zonas con potencial mineralizador y para la priorización de blancos de exploración en sistemas tipo pórfido y epitermal.

**Figura 10**

Mapas fractales de índices espectrales y su validación con alteraciones mapeadas en campo. a) Índice Pórfido: clases fractales ( $\alpha$ ) y superposición de alteraciones hidrotermales (filica, potásica, propilítica); b) Índice Epitermal: clases fractales ( $\alpha$ ) y superposición de alteraciones (argílica, filica, sílica). Debajo se muestran las curvas C–A y los umbrales fractales definidos para cada índice.



*Nota.* Los modelos fractales derivados del análisis C–A (LSA) permiten discriminar de manera objetiva poblaciones de fondo y anomalías en índices espectrales orientados a pórfido y epitermal. En el índice pórfido (a), los umbrales fractales ( $\alpha = -0.255, -0.097, 0.200$ ) definen polígonos coincidentes con alteración filica y potásica, en concordancia con observaciones de campo. En el índice epitermal (b), los umbrales ( $\alpha = -0.284, -0.087, 0.150$ ) muestran una correspondencia espacial con halos de alteración argílica y sílica, validando la capacidad del enfoque fractal–espectral para priorizar sectores de interés exploratorio. Elaboración propia.

## 6. Targeting

Se evaluaron en total 27 targets (TRG\_1 a TRG\_27) delimitados a partir de los resultados fractales de geoquímica (LSA  $\rightarrow$  C–A, F1\*). La integración incluyó criterios de geoquímica (leyes de Au, Ag y Cu), teledetección (índices fractales pórfido y epitermal), estructura (dimensión fractal de conectividad por box-counting multiescala) y evidencias de campo (minerales mena, secundarios y estructuras). El objetivo fue contrastar los targets establecidos por INGEMMET y definir nuevas áreas con potencial exploratorio.

Del total, 13 targets coinciden con los definidos por INGEMMET (48.1%), mientras que 14 corresponden a nuevas áreas propuestas

(51.9%), lo que representa un incremento del 107.7% en la identificación de sectores prospectivos (Figura 11, Tabla 8).

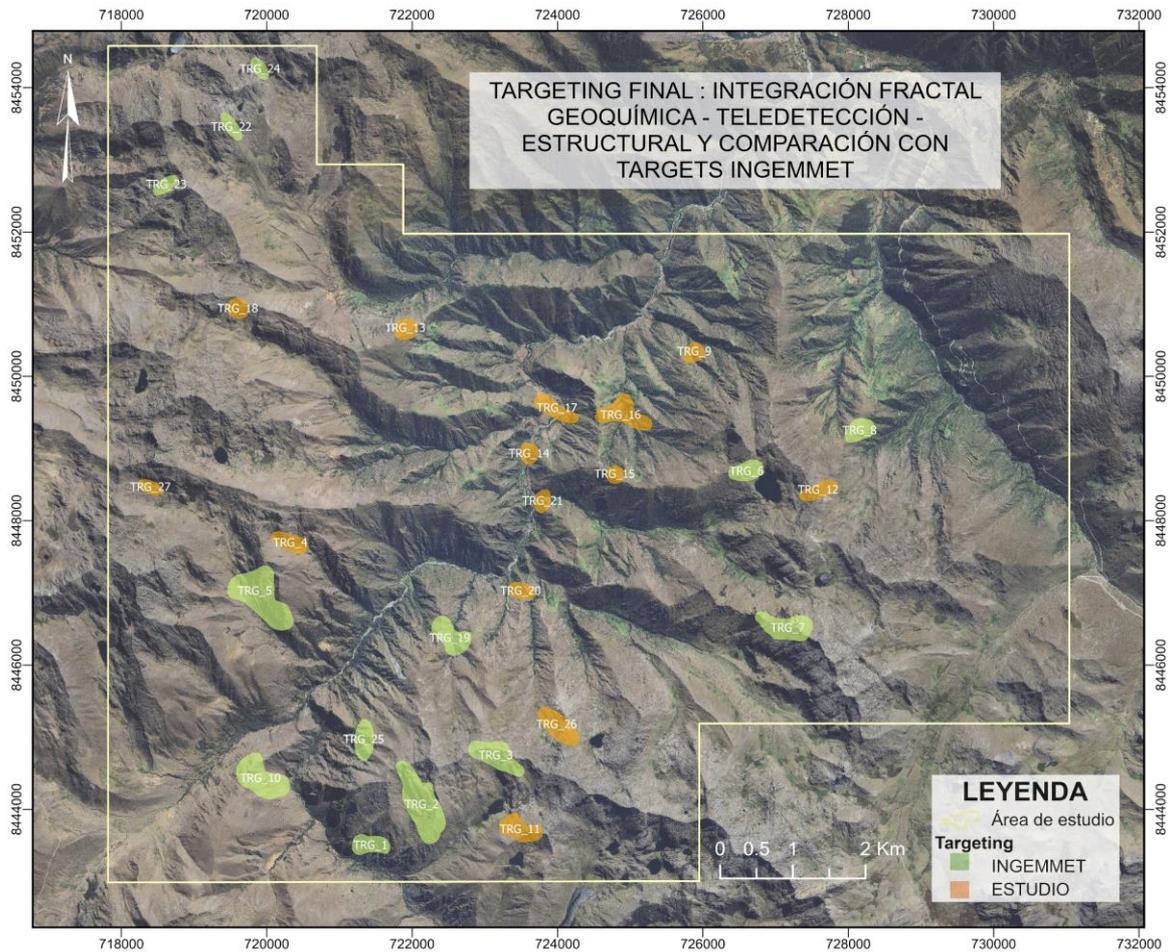
Los resultados destacan targets con valores anómalos significativos y validación múltiple en los distintos índices:

- TRG\_27: registra 3222.4 ppm Au, 42.5 ppm Ag y 8264 ppm Cu, validado simultáneamente por Pórfido Index, Epitermal Index y análisis estructural; asociado a vetas.

- TRG\_3: presenta 4775.6 ppm Au, 11.87 ppm Ag y 6984.1 ppm Cu, con minerales mena calcopirita y bornita, secundario malaquita y estructuras veta y vetilla.

**Figura 11**

Targeting final: integración fractal geoquímica–teledetección–estructural y comparación con targets INGEMMET.



Nota. Se muestran los 27 targets (TRG\_1-TRG\_27) resultantes de integrar: (i) geoquímica fractal (LSA → C-A del F1\*), (ii) teledetección fractal (Índice Pórfido y Epitermal), y (iii) conectividad estructural (D, box-counting). Los polígonos verdes corresponden a targets INGEMMET y los naranjas a targets propuestos en este estudio. La superposición evidencia la coherencia entre ambos conjuntos y resalta nuevas zonas prioritarias para exploración. Elaboración propia.

Tabla 8. Integración Multidisciplinaria de Indicadores para la Delimitación de Targets de Exploración (Geoquímica, Teledetección, Estructural y Evidencia de Campo)

Targets de Exploración	Geoquímica		Teledetección		Estructural	Leyes			Evidencias de Campo			Procedencia del target
	(LSA → C-A, F1*)	(LSA → C-A, Pórfido)	(LSA → C-A, Epitermal)	(D.fractal → box-counting multiescala)	Fuente : INGEMMET (SGS Perú)			Fuente : INGEMMET				
	Polígono	Pórfido Index	Epitermal Index	Áreas estructuralmente favorables	Au (ppm)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	Minerales Mena	Minerales Secundarios Cu	Estructuras		
TRG_1	POL_1	No	No	No	778.00	7.16	4188.90	cp	mlq	vt	INGEMMET	
TRG_2	FRAC_2	Sí	No	Sí	178.50	5.57	1802.29	mt, cp	mlq	vt,vll,vnll	INGEMMET	
TRG_3	FRAC_3	Sí	Sí	Sí	4775.63	11.87	6984.06	cp, bn	mlq	vt, vll	INGEMMET	
TRG_4	FRAC_4	Sí	Sí	No	0.00	11.00	8854.00	-	-	bx	Estudio	
TRG_5	FRAC_5	Sí	No	Sí	110.71	3.11	2110.46	Au, cp	mlq	vt, vll	INGEMMET	
TRG_6	FRAC_6	Sí	No	Sí	0.00	0.51	511.70	cp	-	vt	INGEMMET	
TRG_7	FRAC_7	No	No	Sí	2224.40	23.59	7262.34	cp	mlq	vt, vll, vnll	INGEMMET	
TRG_8	FRAC_8	Sí	No	No	74.50	0.91	0.00	-	-	vnll, bx	INGEMMET	
TRG_9	FRAC_9	Sí	No	Sí	0.00	4.37	5221.00	cp	mlq	-	Estudio	
TRG_10	FRAC_10	Sí	No	Sí	927.67	95.02	18018.50	cp, cv, prou	mlq	vt	INGEMMET	
TRG_11	FRAC_11	No	Sí	Sí	718.00	0.00	0.00	cp	-	vt	Estudio	
TRG_12	FRAC_12	Sí	No	No	102.00	0.00	0.00	-	-	vt	Estudio	
TRG_13	FRAC_13	No	Sí	No	34.00	0.00	694.30	-	-	vnll	Estudio	
TRG_14	FRAC_14	Sí	No	No	0.00	0.55	1481.00	-	-	-	Estudio	
TRG_15	FRAC_15	Sí	No	No	0.00	0.00	4072.00	-	-	vnll	Estudio	
TRG_16	FRAC_16	No	No	Sí	201.00	3.29	2993.89	cp	-	vt, vnll	Estudio	
TRG_17	FRAC_17	No	Sí	No	0.00	1.36	904.85	cp	-	vll	Estudio	
TRG_18	FRAC_18	Sí	No	Sí	1267.50	0.00	286.80	-	-	vt	Estudio	
TRG_19	FRAC_19	Sí	Sí	No	0.00	0.40	212.95	cp	-	vt, vnll	INGEMMET	
TRG_20	FRAC_20	Sí	No	No	0.00	0.39	278.70	-	-	-	Estudio	
TRG_21	FRAC_21	Sí	Sí	Sí	0.00	0.57	1387.03	-	crs	-	Estudio	
TRG_22	FRAC_22	Sí	No	No	47.50	3.96	435.50	-	-	vt	INGEMMET	
TRG_23	FRAC_23	Sí	No	No	0.00	0.37	1242.50	cp, bn	mlq	vt	INGEMMET	
TRG_24	FRAC_24	No	No	No	14.00	2.37	382.00	-	-	-	INGEMMET	
TRG_25	FRAC_25	No	No	Sí	214.00	14.88	608.40	cp	-	vt,vnll, bx	INGEMMET	
TRG_26	FRAC_26	No	No	No	44.00	2.01	119.30	-	-	vt, vll	Estudio	
TRG_27	FRAC_27	Sí	Sí	Sí	3222.40	42.50	8264.00	-	-	vt	Estudio	

Nota: Leyenda: cp (calcopirita), mt (magnetita), bn (bornita), Au (oro nativo), prou (proustita), cv (covelita), mlq (malaquita), crs (crisocola), vt (veta), vll (vetilla), vnll (venilla), bx (brecha)

- TRG\_10: alcanza 927.7 ppm Au, 95.0 ppm Ag y 18018.5 ppm Cu, con mena calcopirita, covelita y

proustita, secundario malaquita y control estructural de vetas.

- TRG\_7: con 2224.4 ppm Au, 23.6 ppm Ag y 7262.3 ppm Cu, asociado a calcopirita, secundario malaquita, y estructuras veta, vetilla y venilla.

- TRG\_18: destaca por 1267.5 ppm Au, con bajo contenido de Cu (286.8 ppm), validado estructuralmente por presencia de vetas.

- TRG\_25: registra 214 ppm Au, 14.9 ppm Ag y 608.4 ppm Cu, asociado a calcopirita y estructuras de vetas, venillas y brechas.

- TRG\_21: con 1387.0 ppm Cu, acompañado de crisocola y validación positiva por Pórfido Index, Epitermal Index y análisis estructural.

En conjunto, de los 14 nuevos targets propuestos, el 50% muestra un Pórfido Index positivo, el 28.6% un Epitermal Index favorable, y el 35.7% se ubica en áreas estructuralmente favorables. Este enfoque multidisciplinario permitió definir blancos de exploración sólidos, varios de los cuales superan en leyes y consistencia a los targets originales de INGEMMET.

## 7. Conclusiones

El presente estudio valida la eficacia de una metodología integrada para la identificación y priorización de zonas de interés exploratorio en contextos de mineralización pórfido–epitermal. El estudio se sustentó en la aplicación combinada de geoquímica y teledetección, transformación composicional (CLR), técnicas estadísticas robustas (PCA y FA), modelamiento fractal (concentración–área y análisis de singularidad local) y criterios estructurales basados en la dimensión fractal de lineamientos. La rigurosidad metodológica permitió delinear 27 targets (TRG\_1–TRG\_27), de los cuales 14 representan nuevas zonas no reconocidas previamente por INGEMMET, lo que constituye un incremento del 107.7% en los blancos potenciales respecto al marco oficial de referencia.

Las zonas propuestas se distinguen por integrar múltiples criterios favorables: valores anómalos de Au (hasta 3222.4 ppm), Ag (hasta 42.5 ppm) y Cu (hasta 8264 ppm), validación por uno o más índices fractales (Índice Pórfido, Índice Epitermal y/o conectividad estructural D) y coherencia con indicadores mineralógicos y estructurales de

campo. En particular, los targets generados en el estudio TRG\_27, TRG\_18 y TRG\_21 concentran evidencia cuantitativa significativa, por lo que se consideran prioritarios para etapas posteriores de evaluación geológica detallada.

Este enfoque integrador ha demostrado ser técnicamente robusto para reducir la incertidumbre en fases tempranas de exploración, optimizando la selección de blancos mediante un marco analítico replicable. La capacidad del modelo para detectar targets no reconocidos previamente, pero coherentes desde el punto de vista geoquímico y estructural, evidencia su potencial de aplicación en otras zonas metalogenéticamente activas del Perú, en particular en dominios controlados por intrusivos calcoalcalinos del Batolito Andahuaylas–Yauri.

En conjunto, este trabajo aporta evidencia de que la integración de geoquímica, teledetección y estructura en un solo marco metodológico permite generar resultados reproducibles, trazables y estratégicamente valiosos. La metodología desarrollada representa una contribución significativa a la exploración mineral moderna, alineada con estándares científicos de excelencia y buenas prácticas del sector.

## 8. Referencias bibliográficas

- Aitchison, J.** 1986. The statistical analysis of compositional data. Chapman & Hall, v. 44, p. 139–177.
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N.** 2011. Delineation of mineralization zones using fractal modeling in Zarshuran gold deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 110, p. 131–144.
- Amiri, H., Tangestani, M.H., Sadeghi, M.** 2017. Hydrothermal alteration mapping from ASTER data using spectral angle mapper and principal component analysis in a porphyry copper deposit, SE Iran. *Journal of African Earth Sciences*, v. 129, p. 38–50.
- Carranza, E.J.M.** 2009. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Elsevier Science, v. 11, p. 347.
- Carranza, E.J.M.** 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial patterns and spatial association with geological phenomena. *Ore Geology Reviews*, v. 35, p. 383–400.
- Carranza, E.J.M.** 2011. Analysis and mapping of geochemical anomalies using continuous and discrete multifractal models. *Applied Geochemistry*, v. 26, p. 1629–1645.
- Camus, F., Castelli, C.** 2020. Historia, Exploración y Geología de los Yacimientos Metalíferos de Chile 900-2020. *Origo Ediciones. – Chile*, v. 7, p. 1765.
- Chauhan, N.K., Dixit, A.** 2024. Fractal analysis and fault pattern classification in mineralized zones using remote sensing and GIS. *Journal of Structural Geology*, v. 176, p. 105460.
- Cheng, Q.** 2007. Mapping singularity with stream sediment geochemical data for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 314–324.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B.** 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 51, p. 109–130.
- Cooke, D.R., Hollings, P., Walshe, J.L.** 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, v. 100, p. 801–818.
- Contreras, E.** 2011. Final Report – Drilling, “La Yegua Project 2011”. Bear Creek Company. v. 1–312
- Corbett, G., Leach, T.** 1997. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization. *Short Course Manual*, v. 1, p. 318.
- Cudahy, T.** 2012. Australian ASTER Geoscience Product Notes. *CSIRO*, v. 1, p. 26.
- Egozcue, J.J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., Barceló-Vidal, C.** 2003. Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*, v. 35, p. 279–300.
- Faraj, A., Tangestani, M.H., Zoheir, B.A.** 2019. Integration of remote sensing, geochemical and geological datasets for mineral prospectivity mapping using fuzzy logic and AHP in the Baft region, SE Iran. *Journal of African Earth Sciences*, v. 158, p. 103558.
- Halley, S.W., Dilles, J.H., Tosdal, R.M.** 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *SEG Discovery*, v. 100, p. 11–17.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Gonzalez-Urien, E.** 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *SEG Reviews*, v. 13, p. 245–277.
- Hronsky, J.M.A.** 2013. The exploration search space: Knowledge, strategies, and insights. *Society of Economic Geologists Special Publication*, v. 17, p. 35–50.
- INGEMMET.** 2022. Cartografía geológica digital y base estructural nacional. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú*.
- Kalinowski, A., Oliver, S.** 2004. ASTER mineral index processing manual. *Geoscience Australia*, v. 1, p. 37.

- Kokaly, R.F., et al.** 2017. USGS spectral library version 7. *U.S. Geological Survey Data Series*, v. 1035, p. 61.
- Li, B., Wang, J., Zuo, R.** 2010. Application of multifractal models to delineate geochemical anomalies: A case study in the Baimashan Pb–Zn district, southern China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 107, p. 118–127.
- Liu, Y., Wang, J., Zhang, X., Zhang, L., Zuo, R.** 2013. Application of multifractal models to delineate geochemical anomalies: A case study in the Baimashan Pb–Zn district, southern China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 128, p. 84–94.
- Lowell, J.D., Guilbert, J.M.** 1970. Lateral and vertical alteration–mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, v. 65, p. 373–408.
- Ma, Y., Zuo, R., Zhang, H., Wang, Y.** 2023. Mapping exploration targets through multifractal modelling of soil geochemical data in the Xiaohongshilazi Pb–Zn–(Ag) ore district, Jilin Province, NE China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 24, p. 89–104.
- Mirzaie, M., Asadi, H.H., Afzal, P., Yasrebi, A.B.** 2015. Fractal analysis of fault systems using satellite images and GIS in the Kerman region, Iran. *Geosciences Journal*, v. 19, p. 721–731.
- Muggeo, V.M.R.** 2003. Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, v. 22, p. 3055–3071.
- Peng, N., Zuo, R., Wang, Y.** 2023. Fractal dimension analysis of fault systems for mineral exploration targeting. *Journal of Structural Geology*, v. 172, p. 105392.
- Pfiffner, O.** 2017. Thick-Skinned and Thin-Skinned Tectonics: A Global Perspective. *Geosciences*, v. 7, n. 71.
- Pour, A.B., Hashim, M.** 2012. Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh-Dokhtar volcanic belt, Iran. *Advances in Space Research*, v. 49, p. 753–769.
- Reimann, C., Filzmoser, P.** 2000. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 69–70, p. 175–187.
- Ríos, A., Villanueva, K., Cáceres, S., Portilla, M.** 2024. Identificación de blancos prospectivos en minería, aplicando imágenes ASTER, Michiquillay - Cajamarca, 2023. *22nd LACCEI International Multi-Conference*, p. 9.
- Shan Xu, Zuo, R., Wang, Y., Zhang, H., Zhang, Y.** 2020. Multifractal modeling and principal component analysis for delineation of geochemical anomalies in the Yindongpo Pb–Zn–Ag deposit, NW China. *Natural Resources Research*, v. 29, p. 411–429.
- Shirmand, H., Farahbakhsh, E., Pour, A., Muslim, A., Müller, R., Chandra, R.** 2020. Integration of selective dimensionality reduction techniques for mineral exploration using ASTER satellite data. *Remote Sensing*, v. 12, p. 1261.
- Sillitoe, R.H.** 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, v. 105, p. 3–41.
- Swain, P.K., Roy, A.** 2024. Structural connectivity and its implications for hydrothermal fluid flow: Insights from fractal dimension analysis. *Journal of Structural Geology*, v. 175, p. 105437.
- Villarreal, E., Vargas, J., Castañeda, D., Valencia, C., Calla, D., Yupa, G., Flores, R.** 2019. Informe de la prospección geológica-minera del ANAP Huyahuya. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*, p. 81.
- Villarreal, E., Yupa, A., Sandoval, A.** 2019. Validación estructural de sistemas mineralizados en contexto andino: Integración geológica de campo y fotogeología. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 114, p. 55–72.
- Yao, Y., Zhu, Y., Liu, J., Li, W.** 2021. Footprints of ore fluid pathway and implications to mineral exploration in the Shihu Gold Deposit, North China: Evidence from short wave infrared spectroscopy of illitic alteration rocks. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 229, p. 106833.
- Zhao, J., Chen, S., Zuo, R., Carranza, E.J.M.** 2011. Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multifractal models: Vectoring towards exploration targets. *Computers & Geosciences*, v. 37, p. 1958–1966.

**Zuloaga, A., Gómez, E., Paullo, J., Mosqueira, P., Otero, J., Yupa, G., Valencia, C.** 2016. Prospección geológica minera del ANAP Antabamba Bloque 2. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET*, p. 158.

**Zuloaga, C., Díaz, H., Ramos, M.** 2016. Evaluación estructural de zonas de interés metalogénico mediante análisis multiescala en los Andes peruanos. *Memorias del Congreso de Geología del Perú*, v. 23, p. 118–124.

**Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F., Xia, Q.** 2009. Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data: A case study from Gangdese, Tibet, western China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 101, p. 225–235.

**Zuo, R., Wang, Y.** 2011. Multifractal analysis of geochemical data for gold exploration in the Heihe area, Xinjiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 111, p. 13–22.

**Zuo, R., Wang, Y.** 2016. Optimization of geochemical anomaly extraction using concentration–area fractal model and singularity index. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 16, p. 347–358.

**Zuo, R., Xia, Q., Wang, J.** 2012. Fractal and multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 122, p. 1–11.

---