

# Determinación de anomalías mono- y multielementales mediante el análisis geoquímico en el proyecto La Equis (Chocó - Colombia)

John Franklin Cerrón-Sarcco<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. (\*) jcs12160005@gmail.com

## Resumen

El proyecto La Equis se localiza en el departamento del Chocó (Colombia) y forma parte de la Franja Metalogenética del Batolito de Mandé-Acandí del Paleoceno-Eoceno, reconocida por albergar depósitos minerales tipo pórfido de  $\text{Cu}\pm\text{Mo}$  y epitermales ( $\text{Au}\pm\text{Ag}\pm\text{Pb}\pm\text{Zn}\pm\text{Cu}$ ). El objetivo de este estudio fue determinar anomalías geoquímicas mono- y multielementales que permitan delimitar zonas de interés para la exploración minera. Para ello, se utilizaron resultados geoquímicos de ensayos ICP-MS y al fuego de 253 muestras de roca de superficie y subterráneas, que fueron procesados usando análisis estadísticos univariados, bivariados (correlación de Spearman) y multivariados (Análisis de Componentes Principales, PCA), así como la interpolación geoestadística por *kriging* ordinario para determinar la distribución espacial de los elementos de interés económico (Au, Cu, Mo, Zn, Pb), elementos guía (As, Sb, Tl, Bi, Te, Se, entre otros) y los 3 principales PCA's que explican el 65,2 % de la varianza total de datos. Estos resultados se integraron en el perfil geoquímico AA' y se definieron los siguientes sectores de interés para exploración en el proyecto: 1) sectores mineros de Progreso y Capotero, ubicados al suroeste, catalogados históricamente como evento epitermal de intermedia sulfuración con la correlación multielemental Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb, Cu) y parte de las anomalías de Mn o Te. 2) Sector anómalo 1 ubicado en la zona central, que presenta las correlaciones multielementales Se-Te-Bi-S-(Mo) y Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe), rodeadas por anomalías de Mn o As, las cuales indican que es un sector clave para exploración por los elementos guía típicos en eventos tipo pórfido de  $\text{Cu}\pm\text{Mo}$ . Y 3) Sector anómalo 2, ubicado al noreste, y que presenta la misma correlación multielemental de los sectores mineros de Progreso y Capotero, lo cual permite inferir que es parte de otro evento epitermal.

**Palabras clave:** Anomalía geoquímica; Batolito de Mandé-Acandí; Epitermal; Pórfido de  $\text{Cu}\pm\text{Mo}$ .

## Determination of mono- and multielement anomalies through geochemical analyses at La Equis project (Chocó - Colombia)

### Abstract

The La Equis project is located in the Chocó, department of Colombia, and lies within the Paleocene-Eocene Mandé-Acandí Batholith Metallogenic Belt, recognized for hosting porphyry-type ( $\text{Cu}\pm\text{Mo}$ ) and epithermal-type ( $\text{Au}\pm\text{Ag}\pm\text{Pb}\pm\text{Zn}\pm\text{Cu}$ ) mineral deposits. This study aimed to identify mono- and multielement geochemical anomalies to delineate areas of interest for mineral exploration. A total

Forma de citar: Cerrón-Sarcco, J.F. (2025). Determinación de anomalías mono- y multielementales mediante el análisis geoquímico en el proyecto La Equis (Chocó - Colombia). *Boletín de Geología*, 47(3), 97-119. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n3-2025005>

of 253 rock samples from surface and underground were analyzed using ICP-MS and fire assay techniques. The geochemical data were processed using univariate, bivariate (Spearman correlation), and multivariate (Principal Component Analysis, PCA) statistical methods, as well as ordinary kriging for geostatistical interpolation to determine the spatial distribution of economically significant elements (Au, Cu, Mo, Zn, Pb), pathfinder elements (As, Sb, Tl, Bi, Te, Se, among others), and the first three PCA components (65.2% of the total variance). These results were integrated into a geochemical cross-section (profile AA'), which identified the following anomalous sectors of interest for mineral exploration within the project area: 1) The Progreso and Capotero mining sectors in the southwest, historically classified as intermediate-sulfidation epithermal systems, characterized by the multielement association Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb, Cu) and partial Mn or Te anomalies; 2) Anomalous sector 1, located in the central area, defined by the associations Se-Te-Bi-S-(Mo) and Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe), surrounded by Mn and As anomalies, indicating the relationship of pathfinder elements suggesting potential for exploration of a porphyry Cu±Mo event; and 3) Anomalous sector 2 in the northeast, exhibiting a similar multielement signature to the Progreso-Capotero sector, indicating the possibility of a second epithermal event.

**Keywords:** Geochemical anomalies; Mandé-Acandí Batholith; Epithermal; Porphyry Cu±Mo.

## Introducción

El proyecto La Equis está ubicado a 36,5 km al este de Quibdó, en el departamento del Chocó, Colombia. Forma parte de la Franja Metalogenética del Batolito de Mandé-Acandí, caracterizada por la presencia de depósitos de tipo pórfido de Cu±Mo y epitermales (Au±Ag±Pb±Zn±Cu) del Paleoceno-Eoceno (Sillitoe *et al.*, 1982; Sillitoe y Perelló, 2005; Shaw *et al.*, 2019), que se extienden desde el norte de Ecuador hasta el este de Panamá.

En este proyecto se han extraído metales como Cu, Pb, Zn, Ag y Au desde 1920, mediante explotación subterránea por túneles en los sectores mineros Progreso y Capotero (zona suroeste del proyecto), siguiendo las vetas Progreso, Capotero y La "J" (Delgado, 1953; Colombian Mineral Resources Inc., 1986; Sepúlveda, 2013). Ha sido clasificado como un depósito epitermal de intermedia sulfuración asociado con los últimos episodios de enfriamiento del Batolito de Mandé (Shaw *et al.*, 2019); sin embargo, información geológica confidencial y observaciones históricas de campo —que incluyen evidencias de alteración hidrotermal, mineralización y posibles tipos de venillas (Sepúlveda, 2013)—, junto con su ubicación en la Franja Metalogenética Mandé-Acandí del Paleoceno-Eoceno (Sillitoe *et al.*, 1982), sugieren que aún podría existir debate sobre la asociación de este epitermal a un depósito tipo pórfido.

Este estudio se enfoca en el análisis e interpretación geoquímica de ensayos multielementales mediante ICP-MS y al fuego, utilizando muestras de roca recolectadas en superficie y subterráneas dentro de un área de 5 km<sup>2</sup>. El objetivo principal es identificar anomalías mono-

y multielementales, tanto de elementos económicos (Au, Ag, Cu, entre otros) como de elementos guía (As, Bi, Sb, Sn, etc.), que permitan definir zonas anómalas dentro del proyecto. A partir de dichas anomalías y su asociación con datos históricos (Sepúlveda, 2013) se busca interpretar las anomalías con base en el contexto metalogenético regional (Sillitoe *et al.*, 1982; Shaw *et al.*, 2019) y referencias bibliográficas relevantes (Buchanan, 1981; Clarke, 1989; Halley *et al.*, 2015).

## Marco teórico

### Geología regional

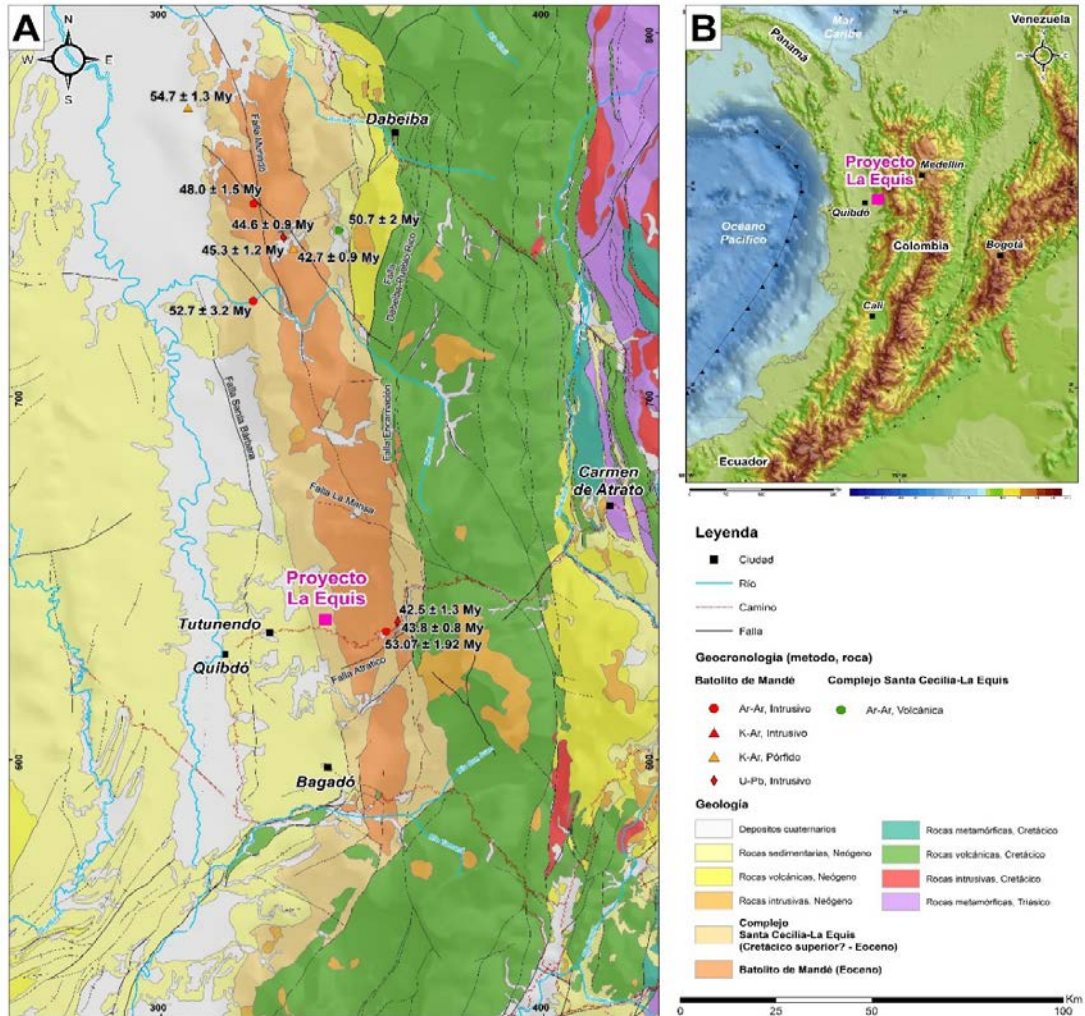
La región occidental de Colombia se ubica en la confluencia tectónica de las placas de Nazca, Cocos, Caribe y Sudamericana. En esta región afloran rocas volcano-sedimentarias meso-cenozoicas del dominio tectónico de la Cordillera Occidental, parte del Bloque Andino Norte de los Andes Colombianos (Cediél *et al.*, 2003).

Dentro del contexto geológico de Colombia, el proyecto La Equis se encuentra en el terreno El Paso-Baudó del Paleoceno-Eoceno (Zapata-García y Rodríguez-García, 2020), que es parte del Arco del Chocó. Esta zona se caracteriza por la presencia de diversas rocas ígneas, entre las que destacan el Complejo Santa Cecilia-La Equis y el Batolito de Mandé, limitados al oeste por el sistema de fallas de Quebrada Santa Barbara y al este por el sistema de fallas de Encarnación (Figura 1).

El Complejo Santa Cecilia-La Equis (Calle y Salinas, 1986) ha sido catalogado como una secuencia volcano-sedimentaria compuesta por las Formaciones Santa Cecilia y La Equis (Salazar *et al.*, 1991; González,

1997). La Formación Santa Cecilia se encuentra en la parte este y está compuesta por una sucesión de basaltos, basaltos boniníticos y tobas subalcalinas a alcalinas intercaladas con limolitas, lodolitas calcáreas y calizas, con una extensión de 2 a 10 km de ancho y una orientación norte-sur. Por otro lado, La Formación La Equis se encuentra en la parte oeste y está compuesta por andesitas, basaltos, brechas volcánicas y aglomerados subalcalinos, con presencia local de rocas sedimentarias, con una extensión de 2 a 5 km de ancho de norte-sur. Este complejo fue formado en un arco de isla con afinidad toleítica a calcoalcalina (Salazar *et al.*, 2005;

Zapata-García y Rodríguez-García, 2020). Si bien, las dataciones en ambas formaciones son escasas, estudios previos de U-Pb, K-Ar y Ar-Ar definen la edad en el rango de Cretácico superior al Paleoceno temprano; sin embargo, dataciones más recientes reportaron edades de  $50 \pm 2$  Ma por Ar-Ar en hornblendas de basaltos de la Formación Santa Cecilia (Buchely *et al.*, 2009) y  $45 \pm 1,6$  Ma por Ar-Ar en vidrio volcánico de un basalto de la Formación La Equis (Zapata-García y Rodríguez-García, 2020), lo que sugiere su formación en el Eoceno.



**Figura 1. A.** Mapa geológico regional del proyecto La Equis (modificada de Gómez *et al.*, 2015), con dataciones históricas de Ar-Ar, K-Ar y U-Pb del Batolito de Mandé y Complejo Santa Cecilia-La Equis (Álvarez y Parra, 1979; Sillitoe *et al.*, 1982; Buchely *et al.*, 2009; Leal-Mejía, 2011; Montes *et al.*, 2015; Zapata-García y Rodríguez-García, 2020), **B.** Ubicación del proyecto La Equis en Colombia.

El Batolito de Mandé es un cuerpo ígneo que aflora en el centro del Complejo Santa Cecilia-La Equis y lo separa en dos formaciones (Álvarez, 1971); representa

al batolito como la posible cámara magmática del complejo, según Salazar *et al.* (2005), aunque otros autores (Parra y Salazar, 1999; Cardona *et al.*, 2018;

León *et al.*, 2018; Zapata-García y Rodríguez-García, 2020) aseveran que esta unidad intruye al Complejo Santa Cecilia-La Equis. El batolito está conformado por una variable composición de rocas subalcalinas desde gabros en el borde este, hasta granodioritas y stocks porfídicos andesíticos a riódacíticos (facies tardías) al oeste, relacionados con un arco de isla de afinidad a la serie toleítica a calcoalcalina (Zapata-García y Rodríguez-García, 2020), y caracterizados como granitos de tipo I (Salazar *et al.*, 2005). Abarca un área superior a 3000 km<sup>2</sup> con tendencia NNO-SSE, además evidencia xenolitos metamorfizados de granulometría fina en los bordes, donde algunos autores sugieren que evidencia la asimilación de rocas del Complejo Santa Cecilia-La Equis (Parra y Salazar, 1999).

### **Metagenia**

Según las definiciones hechas en el Mapa Metalogenético de Colombia (López-Isaza *et al.*, 2018), el proyecto La Equis estaría ubicado en el Dominio Metalogenético Andino, Provincia Occidental Andina y Subprovincia Metalogenética Chocó (Figura 2B), donde además congregan rocas meso-cenozoicas del Bloque Andino Norte (Cediel *et al.*, 2003), incluida la Franja Metalogenética del Paleoceno-Eoceno (Sillitoe *et al.*, 1982), también denominada Franja Metalogenética Mandé-Acandí (relacionada a los batolitos de Mandé y Acandí), que se caracteriza por depósitos tipo pórfido de Cu±Mo y epitermales de Au±Ag±Pb±Zn±Cu asociados a magmas máficos a intermedios (Shaw *et al.*, 2019). Se cree que esta franja se extiende desde Panamá hasta Colombia y posiblemente hasta el norte de Ecuador, con ejemplos de depósitos tipo pórfido de Cu+Au como Río Pito, con una edad de 48,5 ± 0,5 Ma, el cual se encuentra localizado al oriente de Panamá (Zappettini *et al.*, 2020), y Cascabel-Alpala de edad 38,6 ± 0,2 Ma, ubicado al norte de Ecuador (Garwin *et al.*, 2022).

En el tramo de esta franja metalogenética en Colombia, se ubican diversos depósitos minerales como Pantanos-Pegadorcito (42,7 ± 0,9 Ma por K-Ar en sericita hidrotermal; Sillitoe *et al.*, 1982), Murindó (55 ± 1,3 Ma por K-Ar en hornblenda; Sillitoe *et al.*, 1982), Río Andagueda, Cabrasco-Comitá (20 km al norte de La Equis; Redwood, 2014) y Acandí (48 ± 1 Ma por K-Ar en sericita hidrotermal; Sillitoe *et al.*, 1982). Muchos de estos depósitos fueron descubiertos durante las campañas de prospección geológica-geoquímica del proyecto Mandé (Bergmann *et al.*, 1988; Lugo *et al.*, 2003), y se lograron estimar recursos inferidos como en el caso de Acandí de 625 Mt con 0,77 % de Cu y Pantanos-Pegadorcitos con 700 Mt con 0,736 % de Cu (Long, 1995).

Además, se identificaron depósitos epitermales de Au±Ag±Pb±Zn±Cu hospedados en rocas volcánicas, entre los cuales se incluyó al proyecto La Equis, el cual se asoció al emplazamiento y enfriamiento del Batolito de Mandé (Shaw *et al.*, 2019).

En el proyecto La Equis se ha estimado recursos inferidos de 96 Kt con 11 g/t de Au, 16 g/t de Ag, 0,82 % de Cu, 8,75 % de Zn y 1,13 % de Pb, en la veta Progreso (Molina *et al.*, 1990) de los sectores mineros Progreso y Capotero, para túneles subterráneos y perforaciones que no superan los 100 m de profundidad, infiriendo que el proyecto pueda tener más recursos de los estimados, dada la presencia de otros sistemas vetiformes adyacentes que aún no se han explorado (Sepúlveda, 2013).

### **Geología local**

El proyecto La Equis presenta una secuencia volcánica que dispone de afloramientos de lavas de composición basáltica y andesítica con una estratificación de ángulo alto de inclinación (70° al W; Sepúlveda, 2013) con pequeños horizontes de sílice opalina blanca verdosa, superpuestos por intercalaciones de rocas piroclásticas como tobas, lapillis, aglomerados y brechas piroclásticas de composición intermedia a félsica (Colombian Mineral Resources Inc., 1986), con ocasional textura pseudo-fluidal y *fiammes*; esta secuencia está relacionada con el Complejo Santa Cecilia-La Equis. Dicha secuencia volcánica se encuentra oxidada, presenta hematita, limonita y óxidos de manganeso. Además, se observan afloramientos de rocas ígneas porfiríticas de composición tonalítica a dacítica, posiblemente relacionados con los últimos pulsos del Batolito de Mandé (Colombian Mineral Resources Inc., 1986).

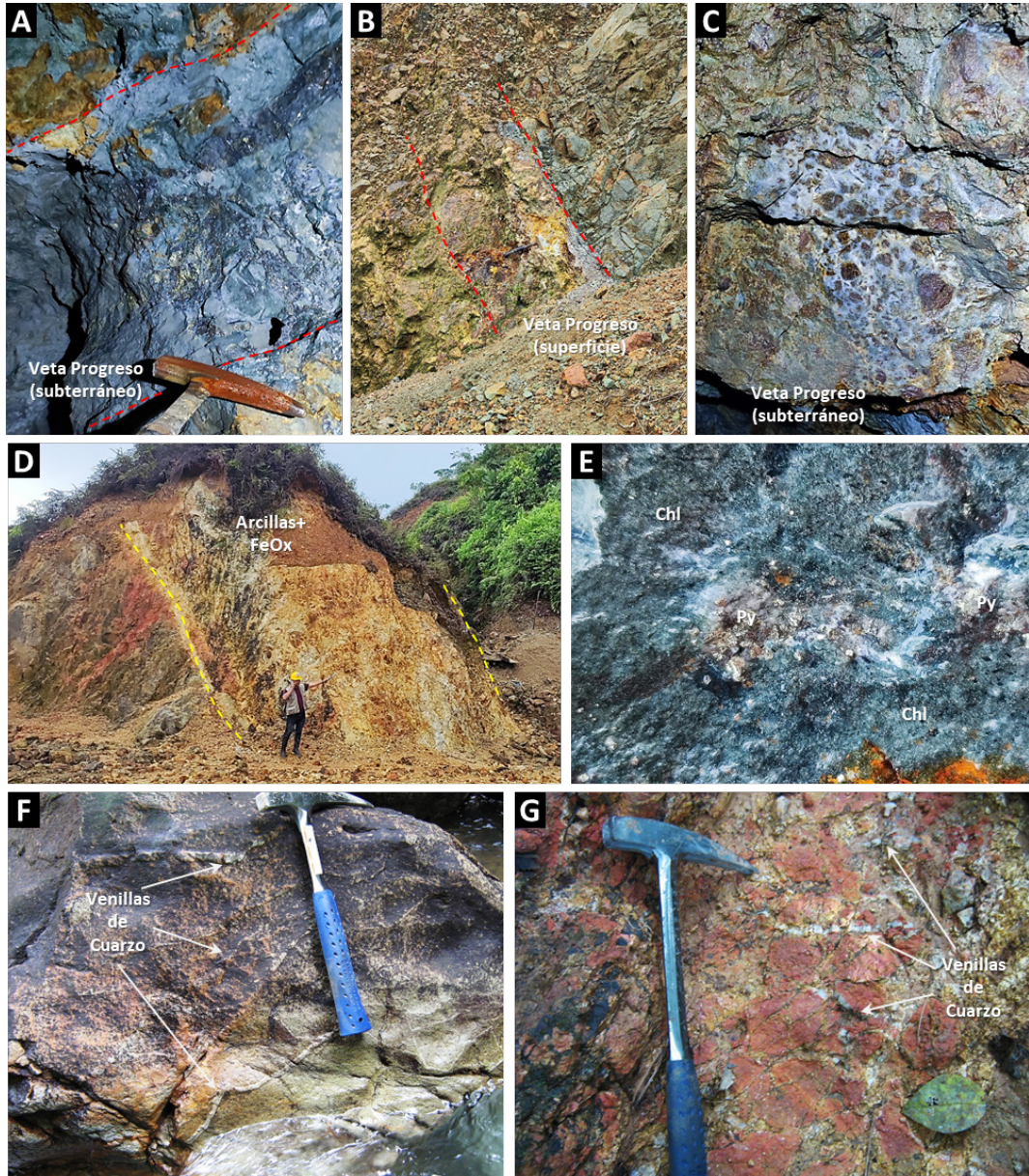
El sistema estructural define una serie de lineamientos, donde se observan tendencias NE-SW concordante a la orientación de la Falla Encarnación, como también N-S relacionadas a la orientación de la Falla Santa Bárbara y/o Falla Murindó, y E-W vinculadas con la orientación de la Falla Atrático (Sepúlveda, 2013).

Los minerales de alteración hidrotermal en las rocas ígneas porfiríticas son ocasionalmente biotita secundaria débil y tramos con clorita±muscovita junto con mineralización diseminada de pirita (Sepúlveda, 2013). Además, en algunas zonas como los sectores mineros Progreso y Capotero, se destaca una intensa alteración de minerales como sílice, muscovita, arcillas y clorita, relacionadas a la mineralización compuesta de esfalerita, galena, calcopirita, pirita, covelina y oro (Figuras 2A-2E), dispuestos en vetas, brechas hidrotermales y venillas con gangas de cuarzo±calcita±baritina (Sepúlveda, 2013). Las vetas

presentan texturas brechoides, crustiformes y bandeadas típicas de eventos epitermales. Se registraron tres vetas epitermales principales (veta Progreso, Capotero y "J") en los sectores mineros Progreso y Capotero, con tendencia estructural NW-SE (Sepúlveda, 2013).

Se reportan venillas centimétricas que podrían asociarse a un evento de mineralización tipo pórfido (Sepúlveda, 2013), las cuales están compuestas por cuarzo + pirita + calcopirita + galena + esfalerita

con halo muscovita + clorita en los sectores mineros Progreso y Capotero (posible tipo E), además de venillas de cuarzo + pirita con halo de muscovita (muy escasas, posible tipo D), venillas de cuarzo rectas sin sulfuros (posible tipo B) y venillas de cuarzo granular sinuoso sin sulfuros (posibles tipo A) disgregadas en las partes centrales del proyecto, ver Figuras 2F y 2G. Se señala que faltan más estudios detallados para establecer la presencia de este tipo de mineralización (Sepúlveda, 2013).



**Figura 2.** A. Mineralización de la veta Progreso en túnel subterráneo, B. Mineralización de la veta Progreso en superficie, C. Textura brechada de la veta Progreso en túnel subterráneo, D. Piso de veta Progreso con presencia intensa de arcillas y óxidos de hierro (FeOx), E. Roca obliterada por alteración clorítica moderada (Chl) y mineralización diseminada de pirita (Py), F-G. Dos generaciones de venillas de cuarzo gris blanquecino sinuosas (posible tipo A) y planares (posible tipo B). Modificado de Sepúlveda (2013).

## Metodología

En este estudio se utilizó información geoquímica histórica obtenida de campañas de exploración llevadas a cabo entre los años 2000 y 2007 por empresas mineras como Sociedad Kedahda S.A. y otras (Sepúlveda, 2013). Se seleccionaron 253 muestras de roca de afloramiento e interior mina (túneles de los sectores mineros Progreso y Capotero), las cuales fueron analizadas por ICP-MS con digestión multiácida, que permitió la determinación de 47 elementos, y ensayo al fuego para oro, en el laboratorio Acme Labs. Los datos se validaron mediante el uso del *software* ioGAS, el cual también se empleó para filtrar los datos censurados no analizados (por ejemplo, elementos con más del 80 % de valores debajo del límite de detección inferior). Con esta información se realizaron los análisis estadísticos univariados, bivariados y multivariados, e interpolación geoestadística utilizando el método de *kriging* ordinario, sumado a un perfil geoquímico para definir las anomalías mono- y multielementales.

El análisis estadístico univariable, bivariable y multivariable se desarrolló con los *softwares* Minitab y ioGAS. La estadística univariable proporcionó parámetros estadísticos como medidas de tendencia central y de forma, mientras que la estadística bivariable por correlación de Spearman (1904) determinó las correlaciones entre variables. La estadística multivariable fue desarrollada por Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), método no supervisado que reduce la dimensionalidad de datos, revelando múltiples correlaciones entre variables.

En el análisis geoestadístico, se empleó el *software* Golden Surfer® para generar semivariogramas experimentales y teóricos, los cuales permitieron determinar los parámetros geoestadísticos necesarios para la interpolación mediante el método de *kriging* ordinario (OK) de algunos elementos de interés y de los PCA's determinando la ubicación espacial de las anomalías. Como resultado, se obtuvieron mapas

de interpolación escalados en función de los rangos geoquímicos de *background*, *threshold* y anomalías.

Posteriormente, se realizó un análisis en conjunto de toda esta información, comparando las anomalías identificadas de los PCA's y otros elementos de interés. Este análisis se llevó a cabo utilizando un perfil geoquímico generado con el *software* Target for ArcGis.

## Resultados

### Análisis estadístico

Los principales resultados de la estadística descriptiva de los elementos de interés económico se presentan en la [Tabla 1](#). Se observa una gran variabilidad en los valores de los elementos, como se refleja en el coeficiente de variación y los valores máximos, los cuales en algunos casos superan 100 veces la mediana. Un ejemplo notable es el del cobre (Cu), cuyos valores oscilan entre 6 y 53.400 ppm, con una variación abrupta (desviación estándar: 5471,98 y coeficiente de variación: 422,96), lo cual genera un desplazamiento de las medidas de tendencia central (la media aritmética es más de 8 veces mayor que la mediana).

Además, al analizar la distribución de los elementos mediante histogramas transformados a escala logarítmica, se evidencia la asimetría positiva debido a la presencia de valores atípicos o extremos y a la fuerte variabilidad. Los elementos plata (Ag) y plomo (Pb) presentan una distribución leptocúrtica, con una mayor concentración de valores cercanos a las medidas de tendencia central ([Figura 3](#)). Por otro lado, los elementos cobre (Cu), molibdeno (Mo) y zinc (Zn) tienen una distribución mesocúrtica, mientras que el oro (Au) muestra una distribución platicúrtica, con una mayor presencia de valores atípicos positivos o negativos ([Figura 3](#)).

El análisis por correlación de Spearman (1904) reveló algunas correlaciones de interés ([Tabla 2](#)), como las correlaciones entre Au-Pb-Zn-Ag-As-Mo-Cd-Sb-Hg-W-Tl, o también correlaciones secundarias como Cu-Ag y Te-Bi-Se.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de los principales elementos de interés.

<b>Variable estadística</b>	<b>Au (ppm)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Mo (ppm)</b>	<b>As (ppm)</b>	<b>Ag (ppm)</b>	<b>Pb (ppm)</b>	<b>Zn (ppm)</b>
<b>Cantidad</b>	253	253	253	253	253	253	253
<b>Valores únicos</b>	116	189	186	146	99	181	212
<b>Mínimo</b>	0,0025	6	0,1	0,1	0,005	0,8	1
<b>Máximo</b>	14,8	53400	64,5	503	57,3	116000	303000
<b>Suma</b>	145,46	327315,00	1001,60	2857,00	384,78	294952,60	1440910,00
<b>Media</b>	0,57	1293,74	3,96	11,29	1,52	1165,82	5695,30
<b>Mediana</b>	0,01	148,00	1,33	3,90	0,12	8,30	150,00
<b>Moda</b>	0,003	33,00	-	-	0,04	-	-
<b>Media geométrica</b>	0,03	179,56	1,59	4,72	0,18	23,09	262,98
<b>Desviación estándar</b>	1,87	5471,98	7,98	33,22	5,56	9159,89	30236,56
<b>Coficiente de variación</b>	324,69	422,96	201,64	294,16	365,38	785,70	530,90
<b>Curtosis</b>	30,28	58,53	23,03	192,25	57,94	116,52	62,34
<b>Asimetría</b>	5,12	7,30	4,43	13,07	6,99	10,47	7,63
<b>Límite de valores de fondo</b>	0,01	120,00	1,25	2,70	0,15	10,00	170,00
<b>Límite de umbral</b>	0,25	500,00	5,50	8,50	0,80	180,00	2000,00
<b>Límite de anomalía débil-moderada</b>	1,00	1000,00	15,00	24,00	3,50	1400,00	13000,00
<b>Límite de anomalía moderada-fuerte</b>	5,00	5000,00	35,00	36,00	12,00	5000,00	150000,00

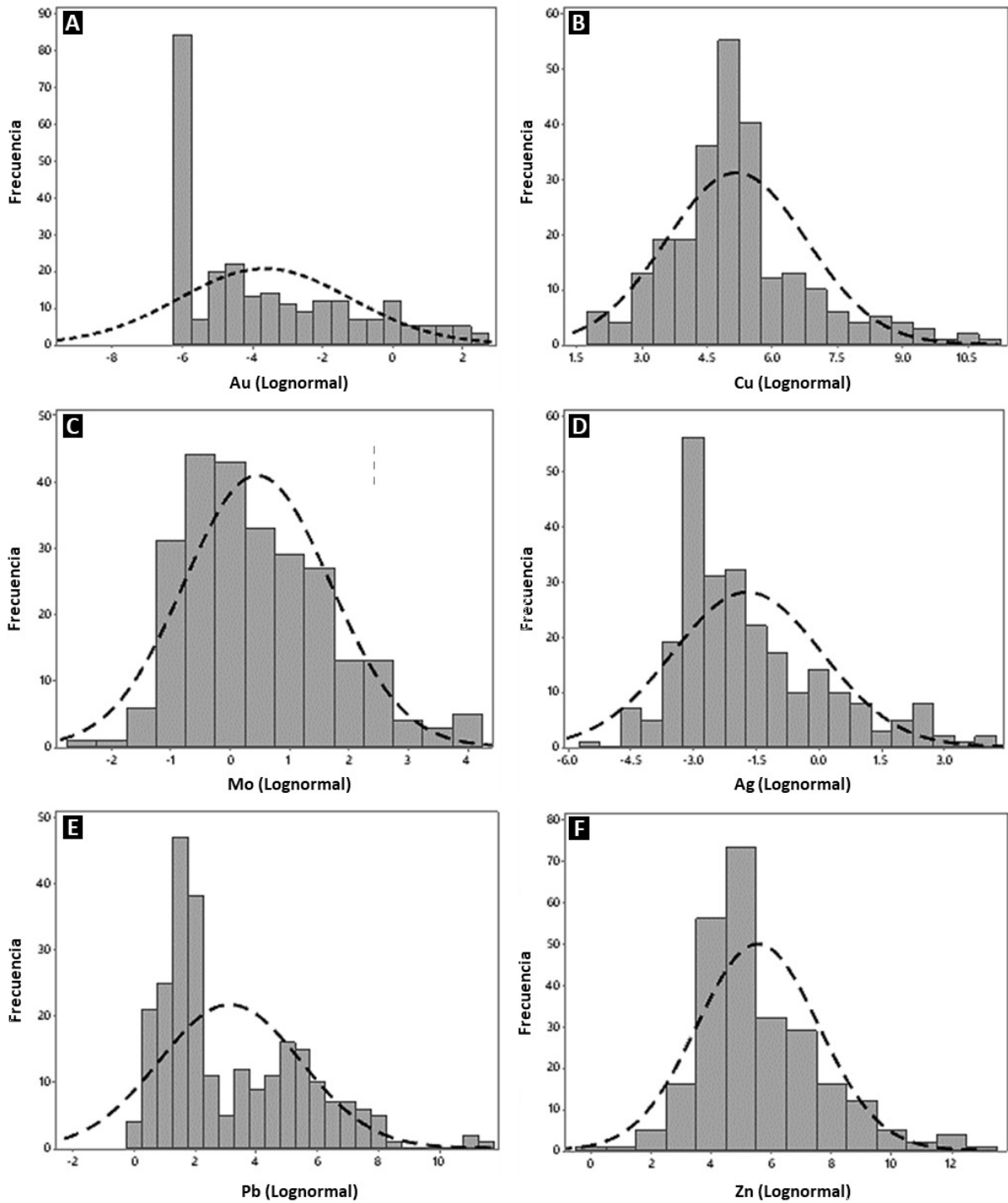


Figura 3. Histogramas de los principales elementos de interés transformados a escala lognormal.

**Tabla 2.** Coeficiente de correlación de Spearman para algunos elementos seleccionados.

Elemento	Au	Cu	Pb	Zn	Ag	Mo	As	Cd	Sb	Bi	Hg	Tl	Se	Te	W
Au	1														
Cu	0,44	1													
Pb	0,77	0,43	1												
Zn	0,64	0,45	0,83	1											
Ag	0,77	0,65	0,75	0,63	1										
Mo	0,64	0,38	0,55	0,36	0,61	1									
As	0,75	0,36	0,75	0,58	0,69	0,64	1								
Cd	0,63	0,49	0,79	0,9	0,67	0,4	0,54	1							
Sb	0,72	0,41	0,85	0,73	0,69	0,5	0,77	0,67	1						
Bi	0,43	0,34	0,23	0,13	0,44	0,44	0,4	0,15	0,26	1					
Hg	0,71	0,4	0,79	0,7	0,61	0,49	0,66	0,68	0,71	0,3	1				
Tl	0,53	0,11	0,63	0,56	0,51	0,42	0,59	0,59	0,53	0,065	0,55	1			
Se	0,23	0,26	0,066	-0,021	0,29	0,34	0,21	0,061	0,026	0,57	0,15	0,12	1		
Te	0,38	0,32	0,19	0,079	0,41	0,4	0,37	0,045	0,23	0,74	0,25	0,01	0,59	1	
W	0,53	0,089	0,64	0,51	0,44	0,44	0,6	0,45	0,59	0,028	0,53	0,69	-0,03	-0,01	1

Se llevó a cabo un análisis multielemental mediante el método de Análisis de Componentes Principales (PCA) utilizando los resultados de los 48 elementos obtenidos del ensayo ICP-MS. Estos elementos fueron transformados al Log-Ratio Central (CLR) para estandarizar la variabilidad y mitigar la influencia

de los valores atípicos. El análisis de PCA reveló 6 componentes principales que representan más del 1 % de la varianza de los datos. De estos, se seleccionaron los 3 primeros, ya que en conjunto representan el 65,22 % de la varianza total (Tabla 3).

**Tabla 3.** Porcentajes de varianza de datos de los primeros 6 PCA.

PCA	<i>Eigenvalues</i>	Porcentaje	Acumulativo %
PCA1	<b>17,86</b>	<b>37,21</b>	<b>37,21</b>
PCA2	<b>9,629</b>	<b>20,06</b>	<b>57,27</b>
PCA3	<b>3,818</b>	<b>7,955</b>	<b>65,22</b>
PCA4	2,718	5,662	70,88
PCA5	1,992	4,149	75,03
PCA6	1,241	2,586	77,62

Las asociaciones multielementales identificadas en los PCA's se basaron en los elementos que superaron un umbral  $\geq 0,4$  en el índice escalado. Este umbral arbitrario fue establecido para resaltar los elementos de interés y mejorar su representación (Tabla 4).

La primera asociación PCA1 explica el 37,61 % de la varianza y está compuesta por la asociación multielemental de Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb, Cu), que representa a elementos económicos, elementos guía y de transición.

La segunda asociación PCA2 explica el 20,06 % de la varianza y está compuesta por Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe). Esta asociación representa elementos económicos, elementos guía y de transición.

La tercera asociación PCA3 explica el 7,955 % de la varianza y está compuesta por Se-Te-Bi-S-(Mo) que representa elementos guía y, en ocasiones, puede estar presente un elemento económico.

**Tabla 4.** Valores escalados de los tres principales PCA's evaluados.

PCA1		PCA2		PCA3	
Variable	Coordenadas escaladas	Variable	Coordenadas escaladas	Variable	Coordenadas escaladas
Pb-CLR	0,86	Cr-CLR	0,67	Se-CLR	0,68
Au-CLR	0,84	Ni-CLR	0,63	Bi-CLR	0,60
Ag-CLR	0,83	Cu-CLR	0,53	Te-CLR	0,56
Cd-CLR	0,80	Co-CLR	0,53	S-CLR	0,53
Zn-CLR	0,75	S-CLR	0,51	Mo-CLR	0,44
Hg-CLR	0,69	Te-CLR	0,48	Th-CLR	0,37
As-CLR	0,68	Bi-CLR	0,47	Sn-CLR	0,34
Sb-CLR	0,58	Se-CLR	0,42	Ge-CLR	0,32
Mo-CLR	0,54	Fe-CLR	0,40	Ga-CLR	0,24
Tl-CLR	0,52	Mg-CLR	0,38	As-CLR	0,22
Rb-CLR	0,48	V-CLR	0,36	W-CLR	0,20
Cu-CLR	0,46	Li-CLR	0,30	Tl-CLR	0,19
K-CLR	0,39	Ca-CLR	0,27	La-CLR	0,18
S-CLR	0,24	In-CLR	0,26	Ce-CLR	0,18
Te-CLR	0,19	Ag-CLR	0,24	Fe-CLR	0,17
Bi-CLR	0,19	Sr-CLR	0,08	Al-CLR	0,15
Zr-CLR	0,14	Mn-CLR	0,07	Rb-CLR	0,14
W-CLR	0,13	Na-CLR	0,05	In-CLR	0,12
Hf-CLR	0,05	Mo-CLR	0,04	U-CLR	0,09
U-CLR	0,03	Au-CLR	0,00	Ta-CLR	0,07
Ba-CLR	-0,07	Zn-CLR	-0,01	Nb-CLR	0,06
Se-CLR	-0,07	Ga-CLR	-0,03	K-CLR	0,06
Mn-CLR	-0,26	Cd-CLR	-0,06	Ag-CLR	0,04
Cs-CLR	-0,27	Cs-CLR	-0,07	Au-CLR	0,01
Th-CLR	-0,33	Al-CLR	-0,09	Ti-CLR	0,00
In-CLR	-0,34	Hg-CLR	-0,09	P-CLR	-0,02
Cr-CLR	-0,37	Ti-CLR	-0,16	V-CLR	-0,03
Li-CLR	-0,44	Ge-CLR	-0,17	Cr-CLR	-0,06
Ge-CLR	-0,52	As-CLR	-0,18	Y-CLR	-0,06
Nb-CLR	-0,57	Pb-CLR	-0,22	Cs-CLR	-0,06
Ta-CLR	-0,58	Sb-CLR	-0,22	Cu-CLR	-0,09
La-CLR	-0,60	P-CLR	-0,25	Sb-CLR	-0,09
Ni-CLR	-0,60	Be-CLR	-0,30	Hg-CLR	-0,10
Ce-CLR	-0,63	Sn-CLR	-0,40	Be-CLR	-0,11
...	...	...	...	...	...

**Análisis geoestadístico e interpolación por kriging ordinario (OK)**

El análisis geoestadístico y la interpolación mediante el método de *kriging* ordinario (OK) permitieron delimitar la ubicación espacial de las anomalías de los elementos de interés económico (Au, Cu, Mo, Zn, Pb)

y guía (Mn, S, Bi, Te, As, etc.) en el área de estudio (Figura 4 al 8).

Por ejemplo, se identificaron diversas anomalías como: 1) al suroeste, en los sectores mineros Progreso y Capotero, se registraron valores de Au de hasta 101 ppm,

Cu superiores a 500 ppm, Mo de más de 5,5 ppm y Zn por encima de 2000 ppm, asociados a vetas epitermales; 2) en la zona central, denominada Sector anómalo 1, se observaron altos valores de Cu entre 1000 y 5000 ppm y Mo con valores superiores a 35 ppm; y 3) al noreste, denominada Sector anómalo 2, se detectaron valores de Au superiores a 1 ppm, Cu por encima de 1000 ppm y Mo mayor a 15 ppm. Finalmente, el Mn presentó anomalías superiores a 1700 ppm en los extremos noroeste y suroeste del proyecto, conformando una envolvente de distribución semicircular.

En cuanto al análisis geoestadístico e interpolación mediante el método de *kriging* ordinario (OK) de los PCA's, se identificaron las siguientes anomalías

(Figuras 9 al 11): 1) El PCA1, representado por la asociación Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb, Cu), presentó anomalías localizadas al suroeste (sectores mineros Progreso y Capotero), zona central (Sector anómalo 1) y al noreste (Sector anómalo 2). 2) El PCA2, representado por la asociación Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe), presentó anomalías distribuidas principalmente en la zona central como parte del Sector anómalo 1. 3) El PCA3 que representa a la asociación Se-Te-Bi-S-(Mo) muestra una anomalía en la zona central (en el Sector anómalo 1, similar al PCA2) y al suroeste relacionado con los sectores mineros Progreso y Capotero extendiéndose hasta cerca de la vía de acceso en dirección a Tutunendo.

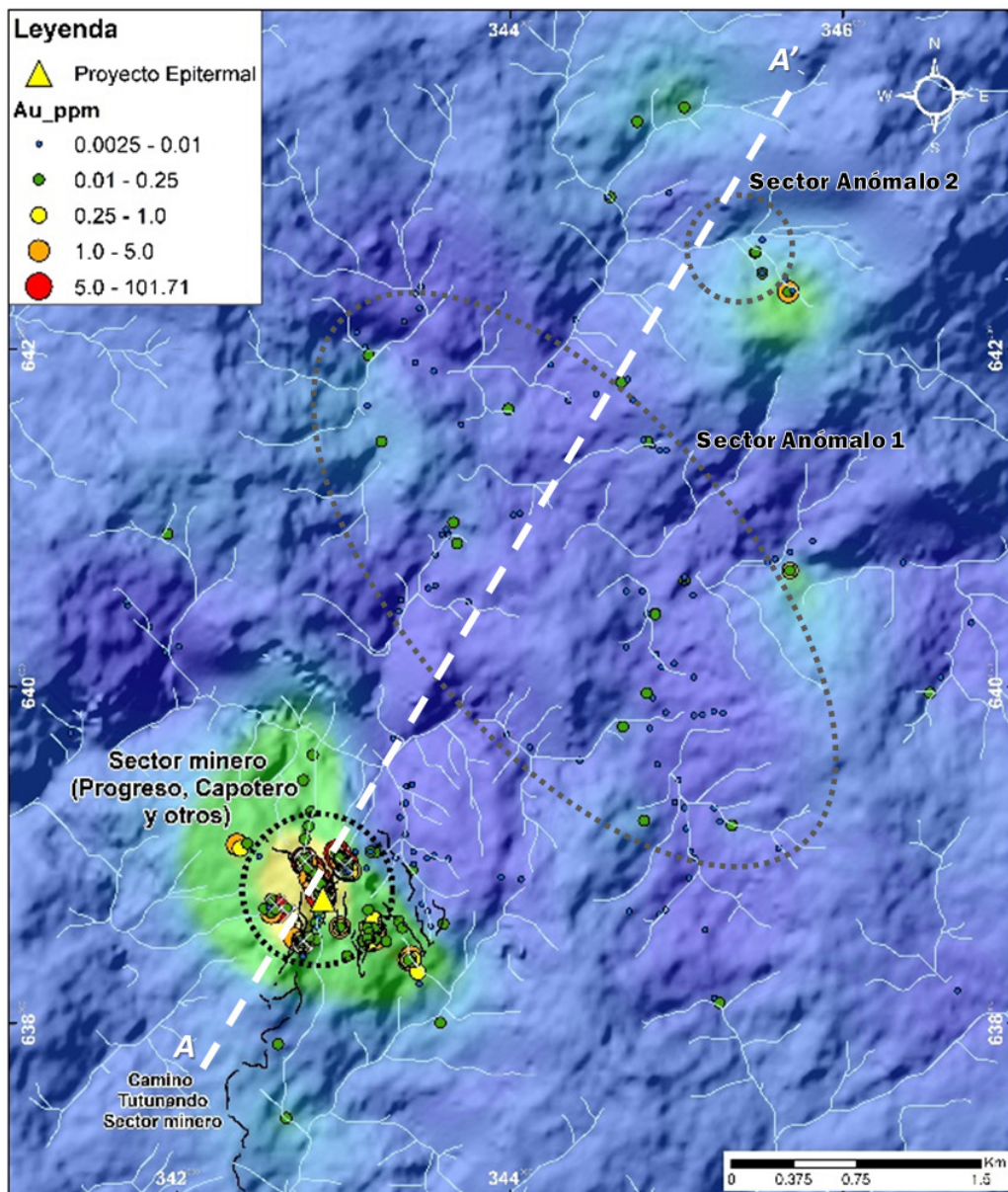


Figura 4. Interpolación por *kriging* ordinario para Au (ppm).

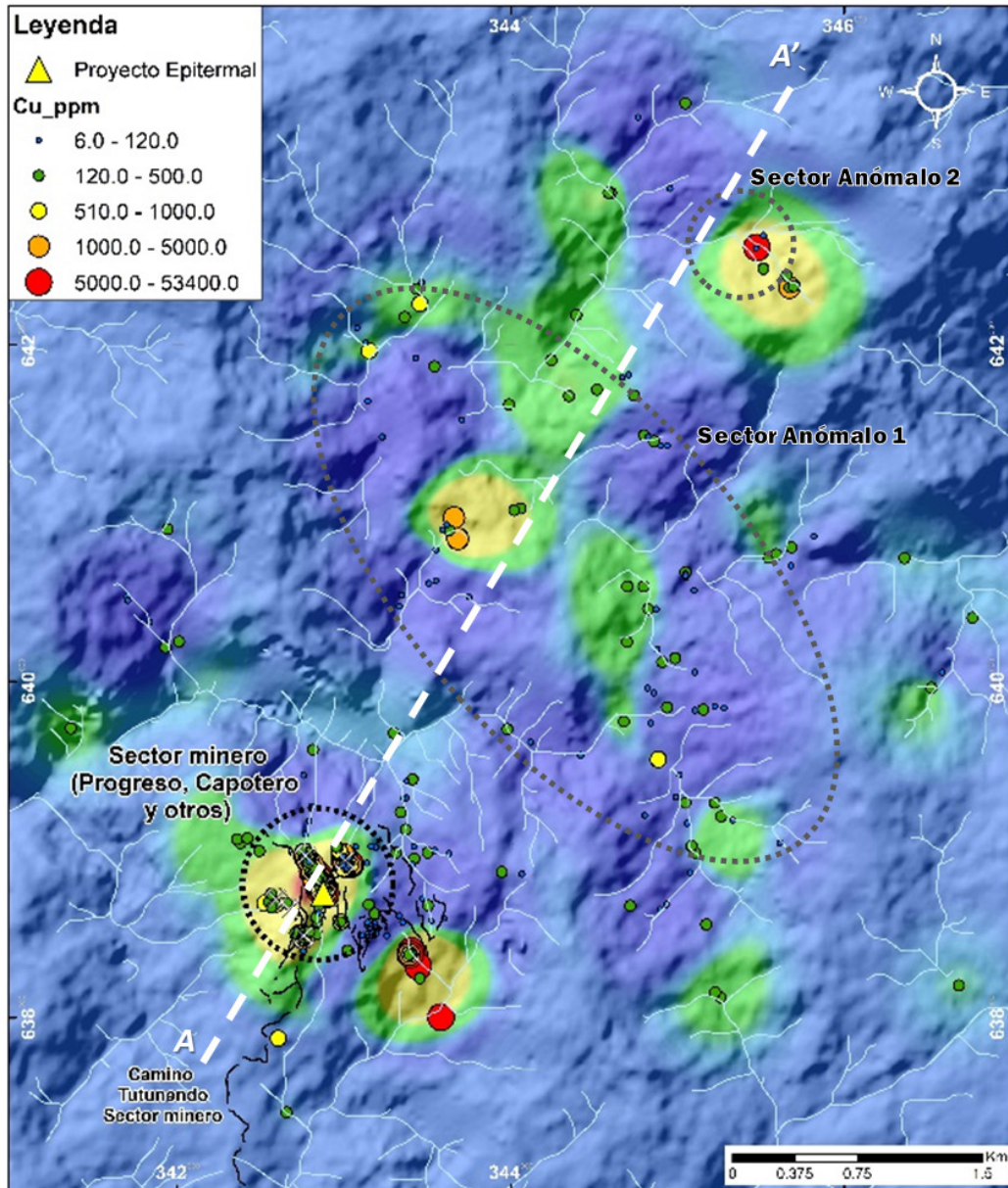


Figura 5. Interpolación por *kriging* ordinario para Cu (ppm).

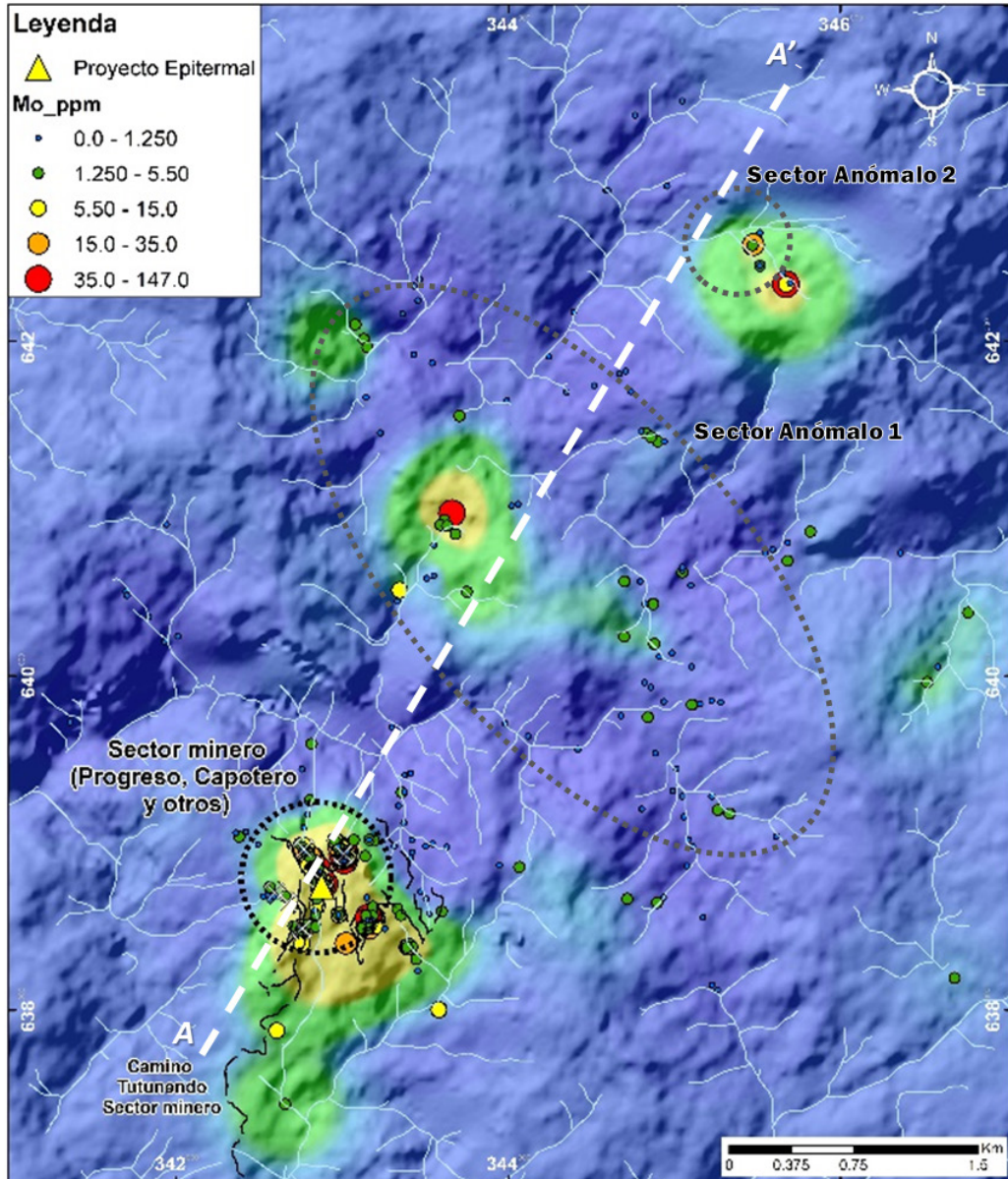


Figura 6. Interpolación por *kriging* ordinario para Mo (ppm).

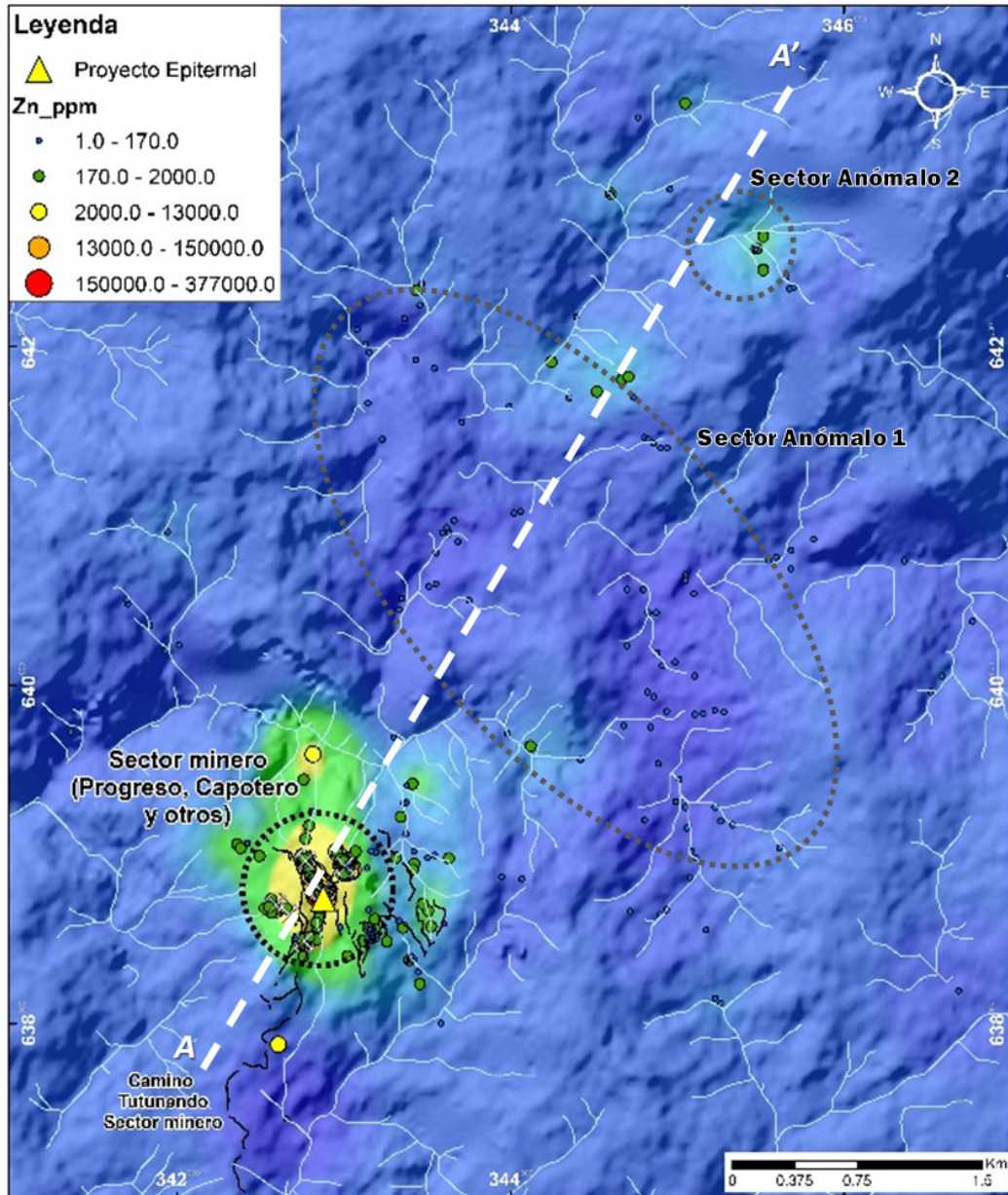


Figura 7. Interpolación por *kriging* ordinario para Zn (ppm).

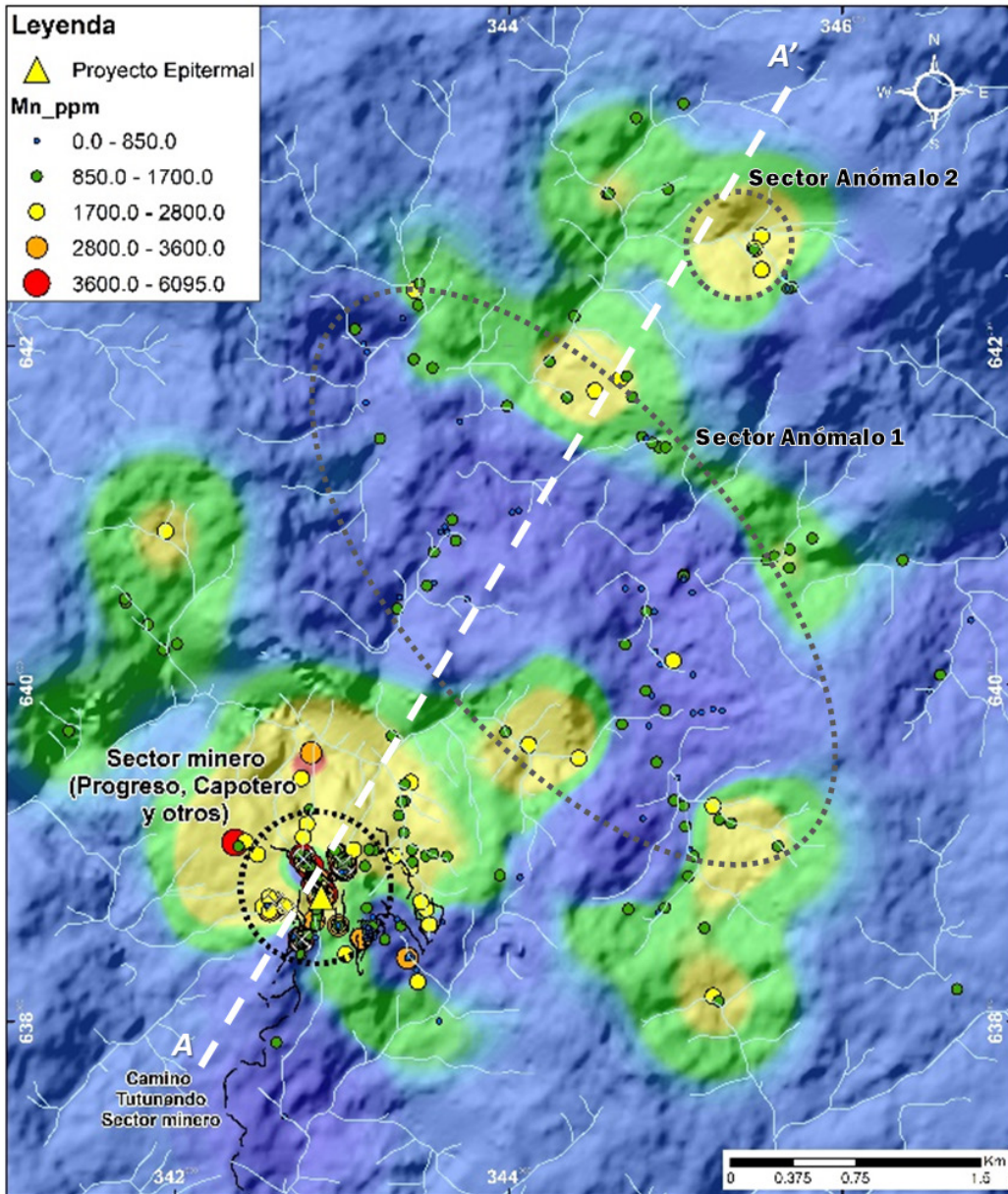


Figura 8. Interpolación por *kriging* ordinario para Mn (ppm).

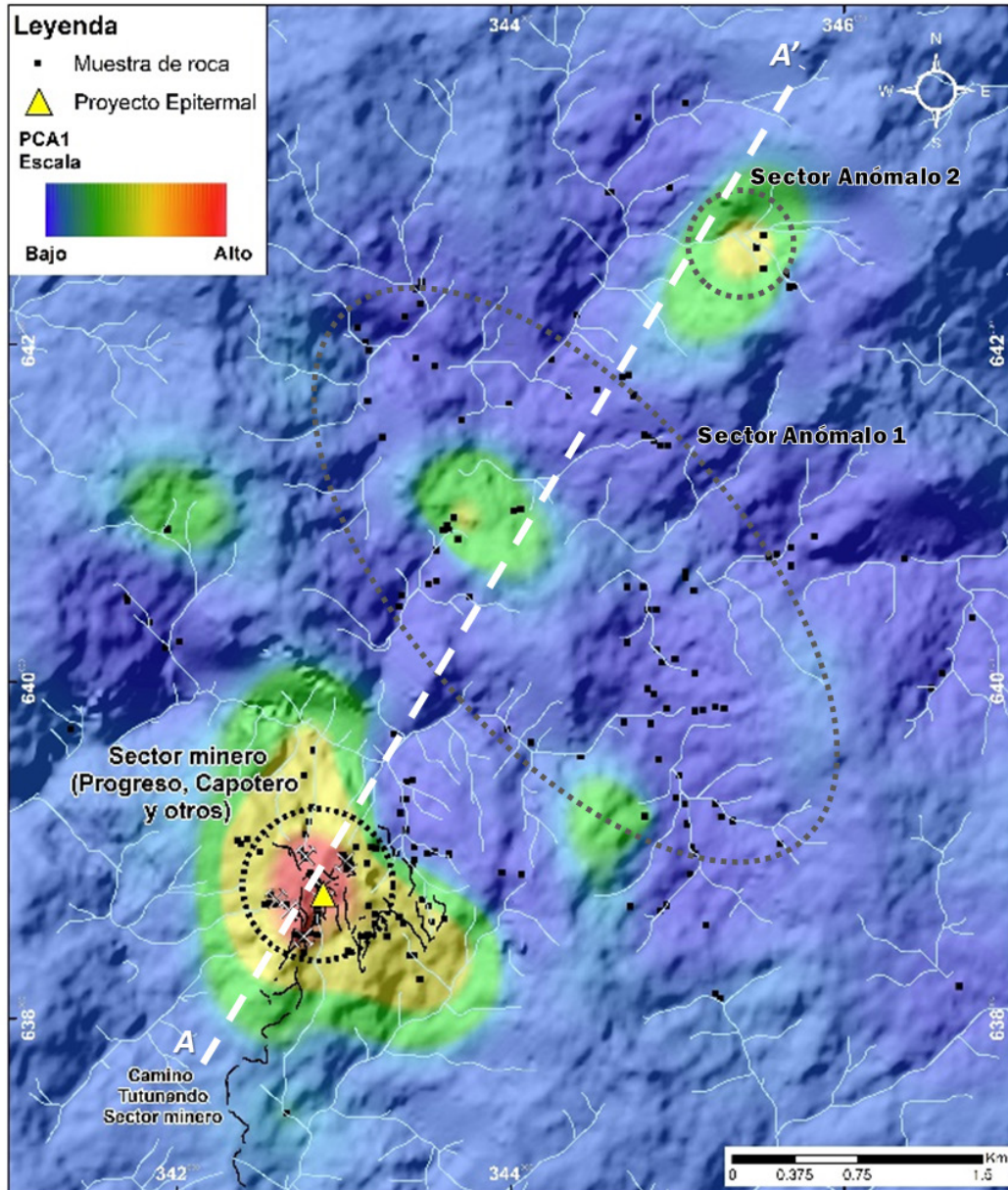


Figura 9. Interpolación por *kriging* ordinario para PCA1.

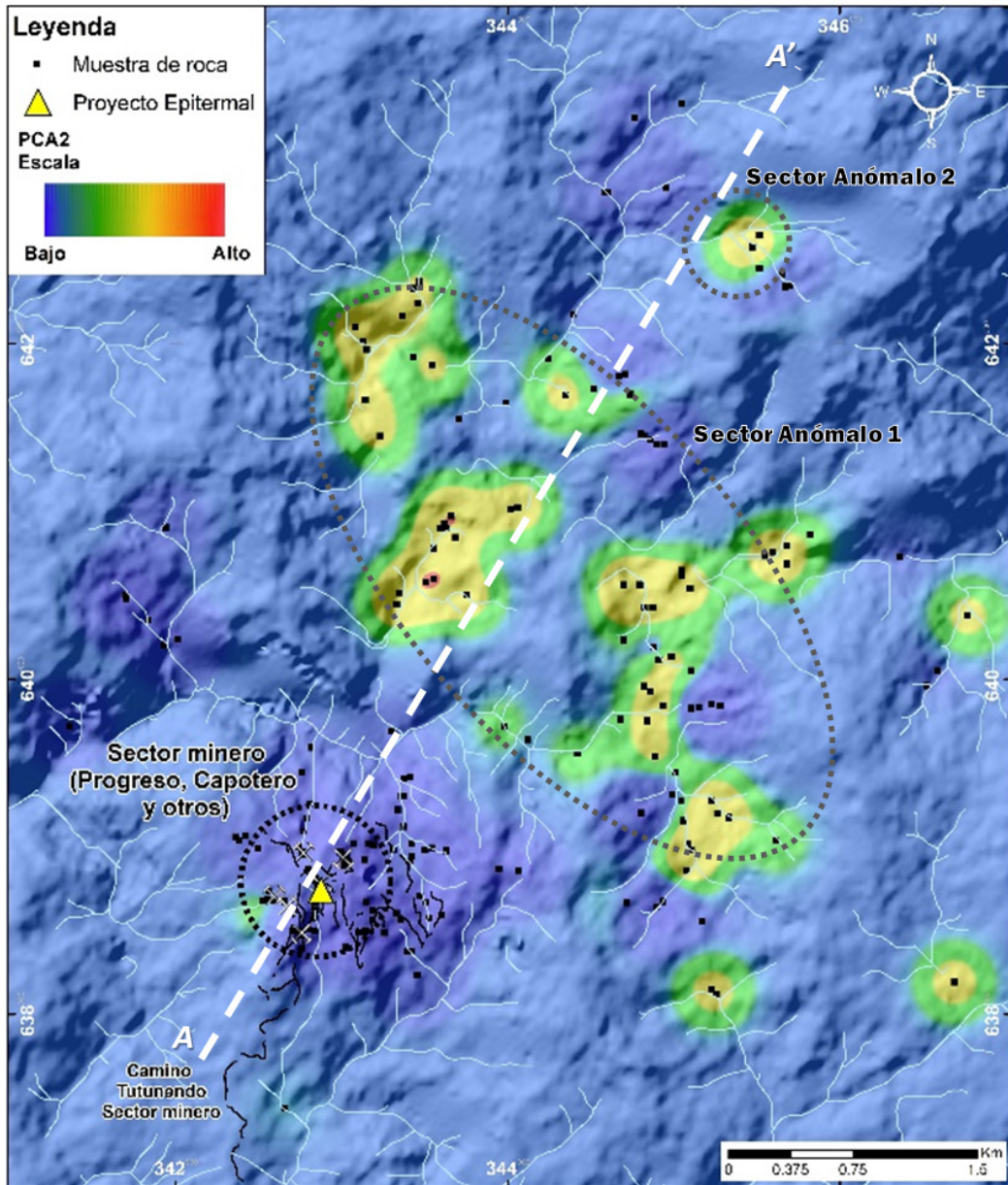
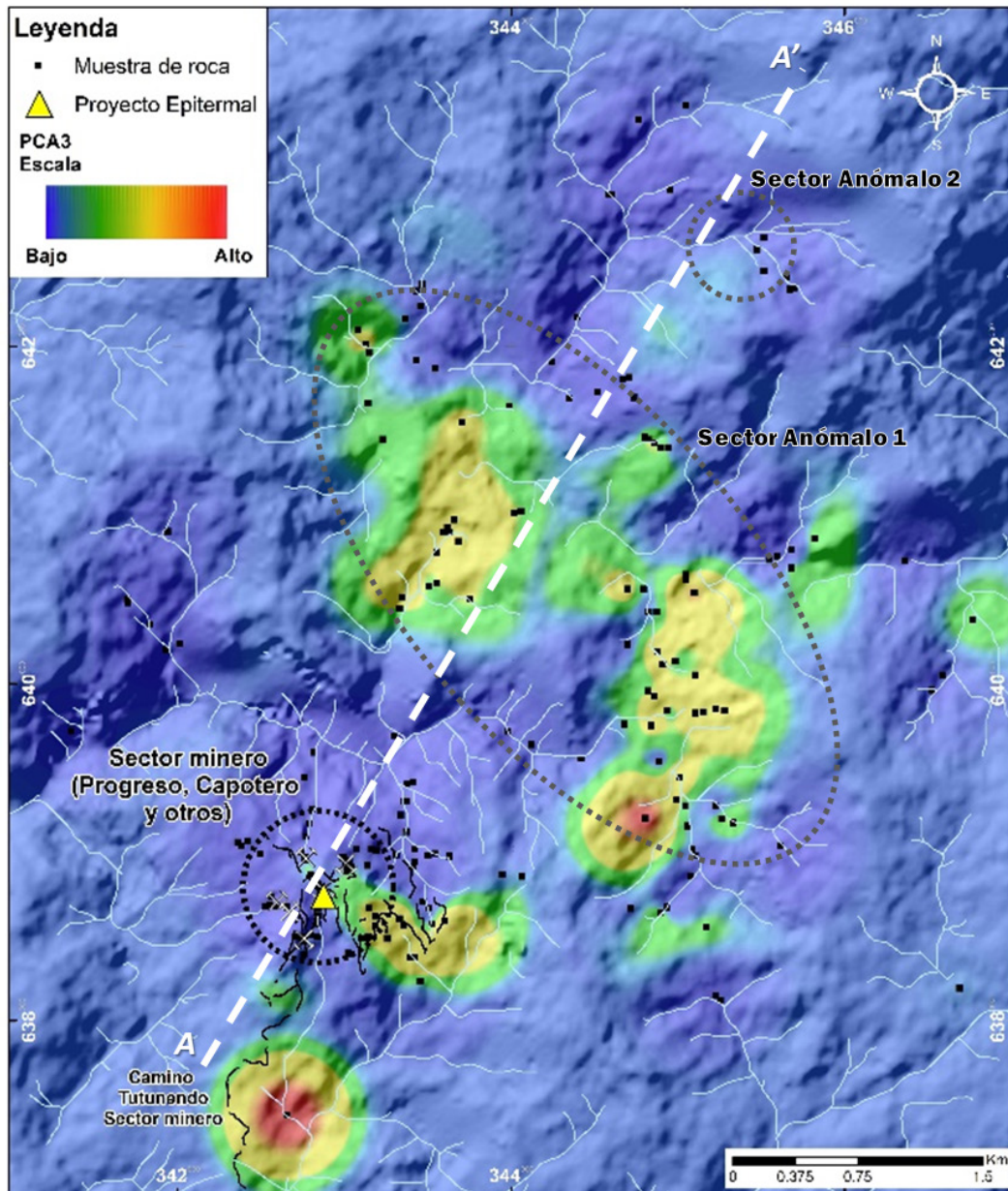


Figura 10. Interpolación por *kriging* ordinario para PCA2.



**Figura 11.** Interpolación por *kriging* ordinario para PCA3.

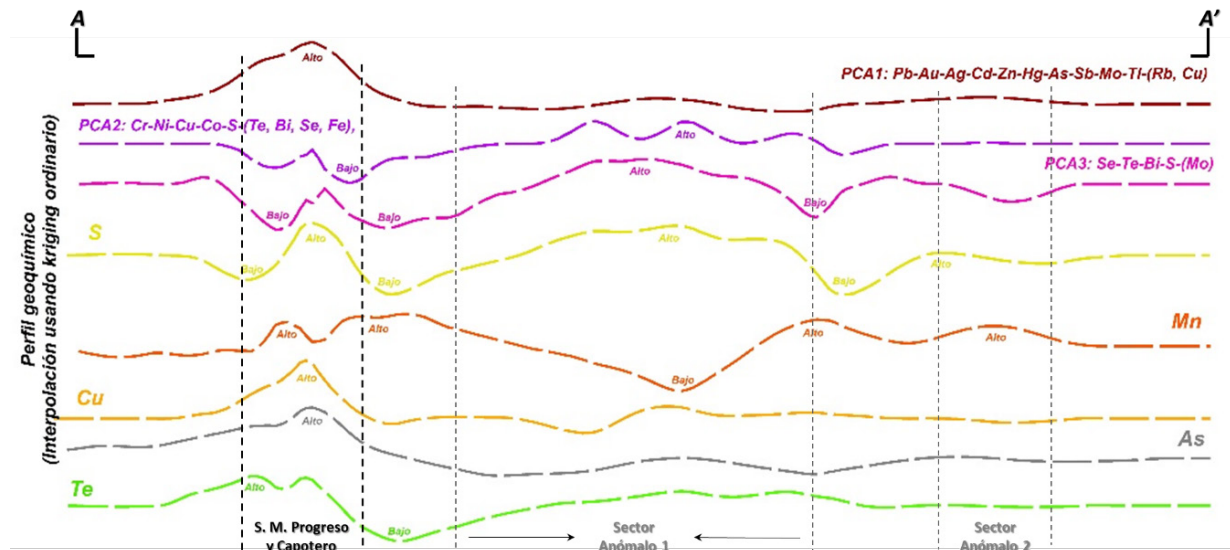
### Discusión de resultados

A partir del análisis estadístico de los datos geoquímicos del proyecto, se elaboró un perfil geoquímico AA' (Figura 12) en dirección SE-NW, que muestra en corte una representación de la interpolación mediante *kriging* ordinario para el PCA1, PCA2, PCA3, S, Mn, Cu, As y Te. En este perfil, los picos representan valores altos y los valles, valores bajos. Se destaca lo siguiente:

- 1) Los sectores mineros de Progreso y Capotero se encuentran relacionados con la asociación Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb,Cu), además de algunas anomalías de Mn y Te.
- 2) El Sector anómalo 1, ubicado en el centro del proyecto, muestra una relación de Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe) y Se-Te-Bi-S-(Mo), rodeado por anomalías de Mn o As.

3) El Sector anómalo 2, situado al noreste, presenta una leve asociación Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-

Tl-(Rb, Cu) y parte de la anomalía de Mn, similar a los sectores mineros Progreso y Capotero.



**Figura 12.** Perfil geoquímico AA' de las interpolaciones por *kriging* ordinario usando las variables PCA1, PCA2, PCA3, S, Mn, Cu, As y Te.

La [Figura 13](#) presenta un gráfico resumen con la distribución de elementos trazas y la impronta hidrotermal en un evento Pórfido de Cu±Mo y Epitermal de Intermedia Sulfuración (IS), modificado de [Halley et al. \(2015\)](#) con información adicional de [Buchanan \(1981\)](#), [Clarke \(1989\)](#), [Sillitoe y Perelló \(2005\)](#) y [Cooke et al. \(2017\)](#). El término “impronta hidrotermal” hace referencia a la huella hidrotermal que deja un evento mineralizante, como un pórfido o epitermal. Para este trabajo se discute la clasificación propuesta en la figura con la distribución de los elementos traza obtenidos en los análisis.

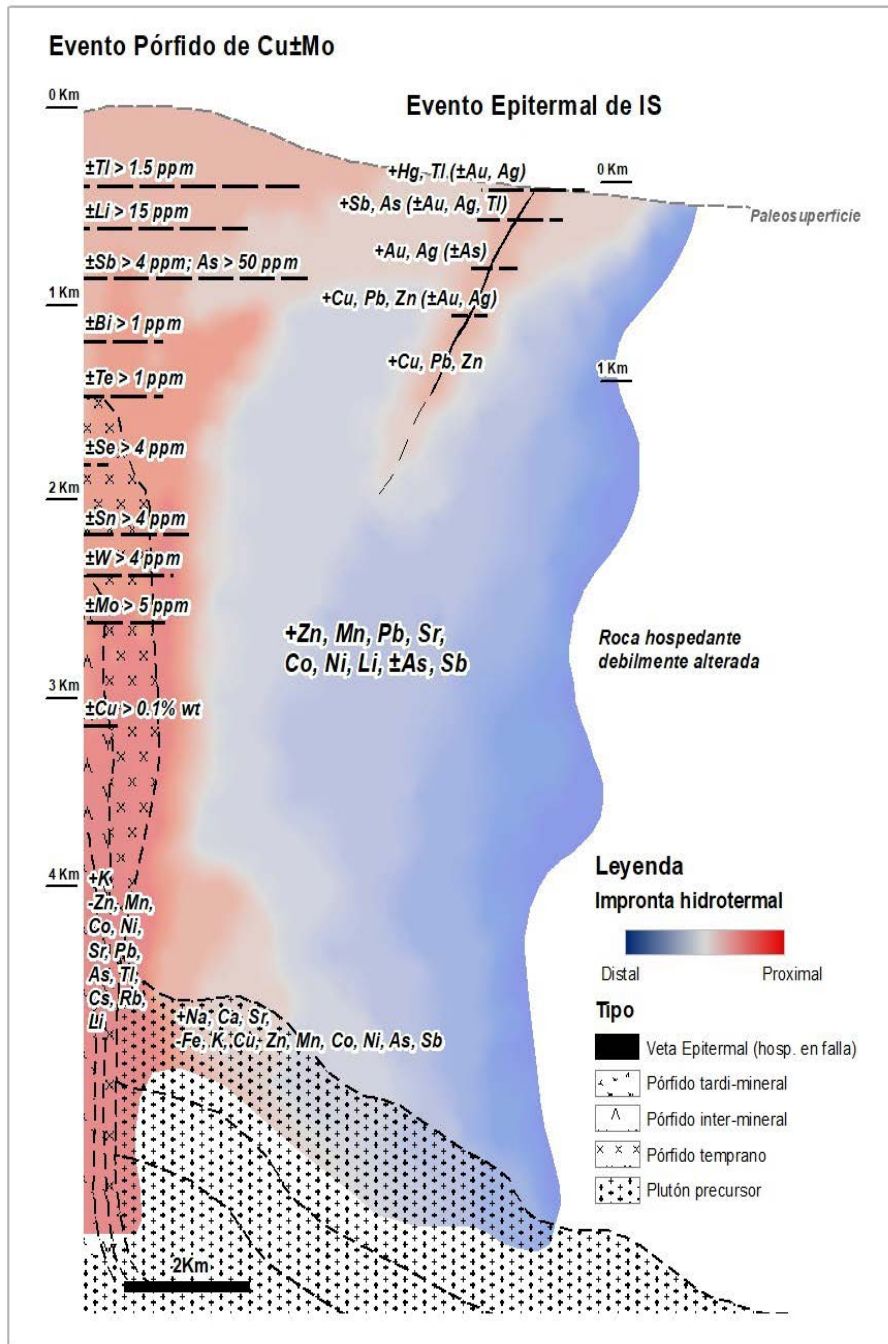
Los sectores mineros de Progreso y Capotero son definidos como parte de un evento Epitermal de Intermedia Sulfuración, caracterizado por la presencia de mineralización vetiforme, compuesta de sulfuros como galena, esfalerita, pirita y calcopirita, junto a cuarzo y minerales de alteración hidrotermal como clorita, muscovita, epidota y sílice ([Shaw et al., 2019](#)), los cuales muestran la asociación Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb, Cu). Esta asociación concuerda con las características de depósitos epitermales, según los modelos propuestos por [Buchanan \(1981\)](#) y [Clarke \(1989\)](#). De manera similar, el Sector anómalo 2 presenta la misma asociación, y permite inferir que también podría estar vinculado a un evento epitermal.

Cabe destacar que dicha asociación incluye elementos como Hg, As, Sb y Tl, los cuales se consideran elementos guía fundamentales en la exploración de depósitos epitermales, debido a su tendencia a concentrarse en las zonas más someras del sistema mineralizante ([Buchanan, 1981](#); [Clarke, 1989](#)), tal como se ilustra en la [Figura 13](#).

Por su parte, el Sector anómalo 1 se caracteriza por las asociaciones Se-Te-Bi-S-(Mo) y Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe), las cuales tienen especial importancia, ya que la presencia conjunta de estos elementos ha sido asociada como clave en la exploración de depósitos tipo pórfido de Cu±Mo. Estas asociaciones multielementales podrían interpretarse como indicativos de una relación con rocas originadas a partir de magmas con afinidad a fluidos hidrotermales capaces de generar mineralización de sulfuros de cobre-hierro y molibdeno ([Halley et al., 2015](#)). A esto se suma el hecho que en este sector, los valores de Mn y As disminuyen hasta alcanzar los niveles más bajos de todo el proyecto, un patrón relevante, ya que en muchos depósitos tipo pórfido de Cu±Mo se ha documentado una disminución de Mn y As hacia las zonas centrales, mientras aumentan las anomalías de Cu, Mo, Se, Te o Bi ([Halley et al., 2015](#)), ver [Figura 13](#).

En consecuencia, se plantea la hipótesis de que el Sector anómalo 2 podría ser una zona de interés en la exploración de un depósito tipo pórfido de Cu±Mo, dadas sus características geoquímicas. Esta posibilidad se ve reforzada por el contexto metalogenético, dado que el proyecto se localiza en la Franja Metalogenética del Paleoceno-Eoceno (Sillitoe *et al.*, 1982), que

alberga importantes depósitos tipo pórfido como Pantanos-Pegadorcito, Murindó, Cabrasco-Comitá o Acandí. Además, información histórica registra en campo presencia de intrusivos porfíricos, minerales de alteración hidrotermal como biotita secundaria o clorita±muscovita y algunas posibles venillas típicas de depósitos tipo pórfido de Cu±Mo (Sepúlveda, 2013).



**Figura 13.** Gráfico resumen de distribución de elementos trazas y la impronta hidrotermal en un evento Pórfido de Cu±Mo y Epitermal de Intermedia Sulfuración (IS). Modificado de Halley *et al.* (2015) con información adicional de Buchanan (1981), Clarke (1989), Sillitoe y Perelló (2005) y Cooke *et al.* (2017).

## Conclusiones

El análisis estadístico, geoestadístico e interpolación usando *kriging* ordinario aplicado a los datos geoquímicos del proyecto La Equis permitió caracterizar anomalías mono- y multielementales y definir sectores de interés para exploración.

Los sectores mineros Progreso y Capotero, ubicados al suroeste, presentaron anomalías de Au (hasta 101 ppm), Cu (superiores de 500 ppm), Mo (superior a 5 ppm) y Zn (superior a 2000 ppm); en conjunto con la asociación multielemental Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Hg-As-Sb-Mo-Tl-(Rb,Cu) e información histórica dan evidencias de un evento Epitermal de Intermedia Sulfuración. De manera similar, el Sector anómalo 2, ubicado al noreste, presentó anomalías importantes de Au (mayor a 1 ppm), Cu (más de 1000 ppm) y Mo (por encima de 15 ppm), acompañadas por la misma asociación multielemental, lo que permite inferir su posible relación con un evento epitermal.

Por otro lado, el Sector anómalo 1, ubicado en la zona central, presentó anomalías de Cu (entre 1000 y 5000 ppm) y Mo (mayor a 35 ppm) junto a las asociaciones multielementales Cr-Ni-Cu-Co-S-(Te, Bi, Se, Fe) y Se-Te-Bi-S-(Mo), rodeadas por anomalías positivas de Mn y As, lo cual indica que es un sector prospectivo para exploración de un posible depósito tipo pórfido de Cu±Mo, reforzado por la correlación de elementos guía, información histórica y el contexto metalogénico del Paleoceno-Eoceno, conocido por albergar importantes depósitos porfiríticos en Colombia.

## Agradecimientos

Se agradece al Ph. D. Stewart D. Redwood por los comentarios y observaciones brindadas durante la elaboración de este artículo. Además, un encarecido agradecimiento a los revisores de la revista. Además, se agradece al Ing. Rubén Darío Sepúlveda por el apoyo con la información geológica y geoquímica, así como el soporte durante la etapa de campo.

## Referencias

Álvarez, J. (1971). Informe preliminar sobre geoquímica de la Cordillera Occidental. INGEOMINAS, Informe interno. Medellín.

Álvarez, E.; Parra, E. (1979). Evaluación del prospecto de cobre y molibdeno en las cabeceras del río Muerto, municipio de Acaandí, departamento del Chocó. INGEOMINAS y Naciones Unidas, Informe interno 1799. Medellín.

Bergmann, H.; Muñoz, R.; Tisil, M. (1988). Proyecto Mande Fase II: Prospección en detalle para minerales preciosos en la cuenca del río Icho, Cordillera Occidental, Departamento del Chocó. Medellín, Colombia.

Buchanan, L.J. (1981). Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest. *Arizona Geological Society Digest*, 14, 237-262.

Buchely, F.; Parra, E.; Castillo, H.; González, F.; Dávila, C.F.; Romero, Ó.A. (2009). Realización de la cartografía geológica y muestreo geoquímico en las planchas 144, 145, 128, 129, 113 y 114 (1580 km<sup>2</sup>). INGEOMINAS & GRP Ltda., 163 p. Bogotá.

Calle, B.; Salinas, R. (1986). Geología y geoquímica de la plancha 165, Carmen de Atrato. INGEOMINAS, Informe 1987. Bogotá.

Cardona, A.; León, S.; Jaramillo, J.S.; Montes, C.; Valencia, V.; Vanegas, J.; Bustamante, C.; Echeverri, S. (2018). The Paleogene arcs of the northern Andes of Colombia and Panama: Insights on plate kinematic implications from new and existing geochemical, geochronological and isotopic data. *Tectonophysics*, 749, 88-103. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.032>

Cediel, F.; Shaw, R.P.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: C. Bartolini, R.T. Buffler, J. Blickwede (eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 815-848). AAPG Memoir 79. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>

Clarke, D. (1989). The trace element geochemistry of vein material in Epithermal Systems: Significance for Exploration. *11th New Zealand Geothermal Workshop*. Auckland, New Zealand.

Colombian Mineral Resources Inc. (1986). Reestructuración técnica y económica del "Proyecto La Equis". Reporte interno.

- Cooke, D.R.; White, N.C.; Zhang, L.; Chang, Z.; Chen, H. (2017). Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration. *14th Biennial SGA Meeting*, Quebec City, Canada.
- Delgado, C. (1953). Informe técnico sobre la región de La Equis y cerro del Capote, estudio de los afloramientos encontrados. Ministerio de Minas y Petróleo, Laboratorio Nacional de Fundición y Ensayos, Quibdó-Colombia.
- Garwin, S.; Whistler, B.; Ward, S.; Vaca, S.; Mather, N.; Chand, M.; Silva, J.; Rosero, B.; Cruz, A.; Guachamin, A.; Diaz-Castro, C.; Chafra, A.; Mantilla, S.; Aguilar, L.; Easterday, C.; Leighton, M.; Aravena, A.; Tapia, M.; Vázquez, C.; Miñano, E.; Salas, P.; Olivares, D.; Costa, C.; Beeson, J.; Sheerin, K.; Wallace, M.; McKie, C. (2022). The Application of Geologic Mapping, Core Logging, and 3-D Geoscientific Data Integration in the Exploration and Resource Expansion of Porphyry Copper-(Gold) Deposits: Examples from Recent Discoveries in Ecuador and Chile. *SEG Discovery*, 131, 13-24. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2022-131.fea-01>
- Gómez, J.; Montes, N.E.; Nivia, A.; Diederix, H. (2015). Mapa geológico de Colombia 2015. Escala 1:1.000.000. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- González, H. (1997). Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, Informe 2199, 232 p. Santa Fe de Bogotá.
- Halley, S.; Dilles, J.H.; Tosdal, R.M. (2015). Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *SEG Discovery*, 100, 1-17. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2015-100.fea>
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic approach. PhD thesis, Universitat de Barcelona, España.
- León, S.; Cardona, A.; Parra, M.; Sobel, E.R.; Jaramillo, J.S.; Glodny, J.; Valencia, V.A.; Chew, D.; Montes, C.; Posada, G.; Monsalve, G.; Pardo-Trujillo, A. (2018). Transition from collisional to subduction-related regimes: an example from Neogene Panama-Nazca-South-America interactions. *Tectonics*, 37(1), 119-139. <https://doi.org/10.1002/2017TC004785>
- Long, K.R. (1995). Production and reserves of Cordilleran (Alaska to Chile) porphyry copper deposits. In: F.W. Pierce, J.G. Bolm (eds.). *Porphyry copper deposits of the American Cordillera* (pp. 35-68). Arizona Geological Society.
- López-Isaza, J.A.; Leal-Mejía, H.; Luengas-Burgos, C.S.; Velásquez-Cárdenas, L.E.; Celada-Arango, C.M.; Sepúlveda-Ospina, M.J.; Prieto-Gómez, D.A.; Gómez-Casallas, M.; Hart, C. (2018). Mapa Metalogénico de Colombia: Principios, conceptos y modelos de depósito y manifestaciones u ocurrencias minerales para Colombia. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Lugo, R.; Rodríguez, G.; Domínguez, E. (2003). Prospección geológica y geoquímica regional en el área de Mande, Fase II. Informe final. Subdirección de recursos del subsuelo. Proyecto de exploración y evaluación de recursos minerales. Instituto de investigación e información geo científica minero-ambiental y nuclear (INGEOMINAS). Bogotá, Colombia.
- Molina, L.E.; Ochoa, A.; Ortiz, F. (1990). Estudio geológico de un yacimiento de Pb-Zn en el paraje La X - Tutunendo (Chocó). *Boletín de Geología*, 19(34), 69-87.
- Montes, C.; Cardona, A.; Jaramillo, C.A.; Pardo, A.; Silva, J.C.; Valencia, V.; Ayala, C.; Pérez-Ángel, L.C.; Rodríguez-Parra, L.; Ramírez, V.; Niño, H. (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science*, 348(6231), 226-229. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2815>
- Parra, E.; Salazar, G. (1999). Geología de la Plancha 185, Bagadó. Informe inédito. INGEOMINAS, Medellín. 64p.
- Redwood, S. (2014). Cabrasco-Comita Porphyry Copper Project, Department of Choco, Republic of Colombia. NI 43-101 Technical Report for Rugby Mining Limited. Suite 1660, 999 West Hastings Street Vancouver, British Columbia V6C 2W2, Canada. <https://www.rugbyresourcesltd.com/cobrasco>
- Salazar, G.; James, M.; Tistl, M. (1991). El Complejo Santa Cecilia – La Equis: Evolución y acreción de un arco magmático en el norte de la Cordillera

- Occidental, Colombia. *Simposio de Magmatismo Andino y su Marco Tectónico*. Manizales, Colombia.
- Salazar, G.; González, L.; Muñoz, R.; Güiza, S.; Moreno, J. (2005). Caracterización de unidades litogeoquímicas de la cordillera occidental, plancha 165, Carmen de Atrato. Fase I. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), Bogotá, Colombia.
- Sepúlveda, R. (2013). La Equis Project. Internal report of Colombian Minera Resources S.A.S.
- Shaw, R.P.; Leal-Mejía, H.; Melgarejo, I.; Draper, J.C. (2019). Phanerozoic Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono-magmatic Analysis in Space and Time. In: F. Cediél, R.P. Shaw (eds.). *Geology and tectonics of Northwestern South America* (pp. 411-549). Springer.
- Sillitoe, R.H.; Jaramillo, L.; Damon, P.E.; Shafiqullah, M.; Escovar, R. (1982). Setting, characteristics, and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia. *Economic Geology*, 77(8), 1837-1850. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.8.1837>
- Sillitoe, R.H.; Perelló, J. (2005). Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds.). *One hundredth anniversary volume* (pp. 845-890). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.26>
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72-101. <https://doi.org/10.2307/1422689>
- Zapata-García, G.; Rodríguez-García, G. (2020). New contributions to the knowledge about the Chocó–Panamá Arc in Colombia, including a new segment south of Colombia. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 417-450). Vol. 3. Chapter 14. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.14>
- Zappettini, E.O.; Prieto-Rincón, G.; Amezcua, N.; Muñoz-Tapia, S.; Sepúlveda-Ospina, J.; Celada-Arango, C.M.; Jara, D.; Cazañas-Díaz, X.; Torres-Zafra, J.L.; Cobiella-Reguera, J.L.; Zurcher, L.; Orris, G.; Gray, F.; Maldonado-Díaz, C.; Rodríguez, N.; Mérida-Montiel, R.; Zarruk, C. (2020). Mapa metalogenético de América Central y el Caribe 1:4.000.000. Memoria explicativa. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino.

---

---

Fecha de recibido: 16 de diciembre de 2023

Fecha de aceptado: 26 de septiembre de 2025

---

---