



Modelamiento geoestadístico de variables geoquímicas en exploración de depósitos minerales tipo pórfido de cobre utilizando simulación por bandas rotantes

Leonardo Cajicá-Acosta & Luís Hernán Sánchez-Arredondo

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. lcajicaa@unal.edu.co, lhsanche@unal.edu.co

Recibido: 9 enero 2024. Recibido en formato revisado: 19 marzo 2024. Aceptado: 1 abril 2024.

Resumen

En Ecuador y Colombia se presenta un cinturón de rocas cristalinas de edad jurásica, en el cual se han realizado descubrimientos de depósitos minerales tipo pórfido de cobre durante las últimas décadas. Razón por la cual se realiza el presente estudio en la parte norte del departamento del Putumayo, un área prospectiva para el descubrimiento de depósitos minerales tipo pórfido de Cu-Mo, como el de Mocoa. Para la identificación de anomalías geoquímicas desde la etapa de exploración regional, se utiliza el modelamiento geoestadístico mediante la simulación condicionada por bandas rotantes, empleando datos de 443 muestras de sedimentos activos finos de corriente, tomados en cuencas hidrográficas que drenan principalmente rocas de edad jurásica. La cartografía automática de bandas rotantes elaborada para cada uno de los elementos en este estudio, permitió identificar cuatro anomalías de importancia regional correspondientes a firmas geoquímicas en la identificación de sistemas tipo pórfido de cobre en superficie.

Palabras clave: modelamiento geoestadístico; simulación; bandas rotantes; pórfido; cobre; Putumayo.

Geostatistical modeling of geochemical variables in copper porphyry type mineral deposits exploration using turning bands simulation

Abstract

In Ecuador and Colombia there is a belt of crystalline rocks of the Jurassic age, in which discoveries of copper porphyry-type mineral deposits have been made during the last decades. The reason for carrying out the present study is in the northern part of the Putumayo department, a prospective area for the discovery of porphyry-type mineral deposits of Cu-Mo, like Mocoa. For the identification of geochemical anomalies from the regional exploration stage, geostatistical modeling is used through the conditioned turning bands simulation tool, using data from 443 fine current active sediment samples, taken in basins within the study area draining mainly Jurassic age rocks. The automatic cartography of turning bands carried out for each of the elements under study identified four anomalies of regional importance, corresponding to geochemical signatures in the identification of copper porphyry systems on the surface.

Keywords: geostatistical modeling; simulation; turning bands; porphyry; copper; Putumayo.

1 Introducción

Las rocas presentes en el norte del departamento de Putumayo, forman parte del cinturón magmático Jurásico de pórfidos cupríferos del Sistema Andino que se extiende desde Perú hacia Ecuador y Colombia (Bloque Norandino), donde se conocen depósitos de importancia económica y varios prospectos [1]. Los sistemas tipo pórfido de Cu muestran una marcada tendencia a ocurrir en cinturones lineales, típicamente paralelos a orógenos, los cuales van desde unas

pocas decenas a cientos, e incluso hasta miles de kilómetros de longitud, como es ejemplificado en la cordillera de los Andes [2].

En Colombia este cinturón se extiende a lo largo de todo el país de forma interrumpida hasta la parte norte, como resultado de la interacción entre placas y microplacas continentales y oceánicas, con la formación y amalgamación de terrenos de diversa afinidad y el desarrollo de orógenos desde el Meso-Proterozoico hasta el Cretácico Superior. Además de la formación de arcos continentales y oceánicos

que se emplazaron en estos terrenos y que hoy se presentan apilados a lo largo de los Andes Noroccidentales y algunos de ellos dispersados por la tectónica transcurrente de la margen Suramericana [3].

Este cinturón de rocas hospeda depósitos minerales tipo pórfido de Cu, entre los cuales se han descubierto en las últimas décadas los depósitos minerales de Panantza, San Carlos, Warintza y Mirador al sur de Ecuador. En Colombia el Proyecto Mocoa en el departamento del Putumayo se presenta como un prospecto con recursos inferidos de 636 Mt @ 0.45% CuEq [4] en etapa de exploración y que es la base para la exploración de depósitos similares en el cinturón de rocas del Jurásico que afloran en la parte sur del país, más específicamente en la parte norte del departamento del Putumayo.

La exploración regional de sistemas tipo pórfido de Cu-Mo se realiza teniendo en cuenta que estos sistemas son definidos como grandes volúmenes (10 - 100 km³) de rocas alteradas hidrotermalmente centradas en cuerpos intrusivos que pueden tener asociados depósitos tipo skarn, reemplazamiento de carbonatos, hospedados en sedimentos y epitermales de alta e intermedia sulfuración con mineralización de metales base y metales preciosos [2]. Actualmente en la exploración de depósitos minerales metálicos se tiene como insumos indispensables a la geoquímica y la geofísica en la identificación de anomalías en superficie, sin tener en cuenta una herramienta fundamental y robusta como lo es la estimación y modelamiento geoestadístico desde las etapas tempranas de la exploración.

Mediante el uso de resultados geoquímicos de muestras de sedimentos activos de corriente, la cual es la información inicial con la que se empieza a construir la exploración regional, se estima la correlación entre las variables identificadas como firma geoquímica para depósitos tipo pórfido como: cobre (Cu), molibdeno (Mo), plomo (Pb), zinc (Zn), plata (Ag) y manganeso (Mn), y de esta manera lograr identificar las zonas anómalas para una etapa posterior de exploración. A medida que hay más información disponible para un área de trabajo, se pueden integrar los muestreos de suelo, rocas y núcleos de perforación.

La geoestadística debe utilizarse desde etapas iniciales de exploración debido a que sirve como herramienta que permite utilizar la información inicial de las muestras representativas y hacer una simulación en zonas con baja densidad de muestreo para lograr determinar anomalías regionales y locales en la superficie que permiten tener mayor grado de certeza en el direccionamiento de la exploración regional, así como la disminución en los costos asociados.

Entre los parámetros de entrada para el modelamiento se define el muestreo de sedimentos activos de corriente, de microcuencas hidrográficas pertenecientes a rocas de edad Jurásica y que cuentan con resultados geoquímicos para los elementos Cu, Mo, Pb, Zn, Ag y Mn. De esta forma se realiza un estudio centrado en rocas con las mismas características, correspondientes a una misma edad (Jurásico) y que poseen un origen ígneo similar (intrusivas – extrusivas), logrando que las muestras sean representativas y que puedan ser correlacionables.

1.1. Área de estudio

El área de estudio comprende un polígono enmarcado por el cinturón de rocas de edad principalmente del Jurásico, que aflora en el área norte del departamento del Putumayo. Dentro de este polígono, existen rocas de edad diferente al Jurásico y que representan el 8% del total del área, además de tener en cuenta que las muestras son de sedimentos activos de corriente los cuales representan un área (cuenca hidrográfica) y no un punto, razón por la cual fueron incluidas dentro del área de estudio.

El área tiene 1.254 km² de extensión y en división geográfica corresponde de forma porcentual de mayor a menor medida a parte de los municipios de Mocoa, San Francisco, Santiago y Villa Garzón; en la Fig. 1 se presenta el área municipal de cada uno en relación con el polígono del área de estudio.

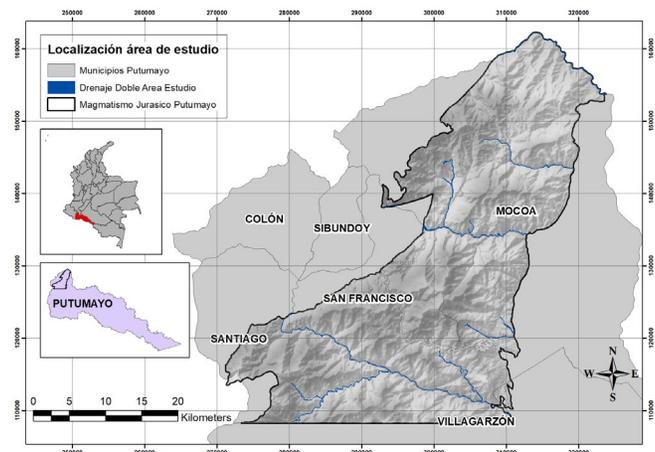


Figura 1. Área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 2 se observa el área de estudio y la distribución espacial de las 443 muestras de sedimentos activos de corriente con resultados geoquímicos de elementos indicadores de depósitos minerales tipo pórfido como Cu, Mo, Pb, Zn, Ag y Mn.

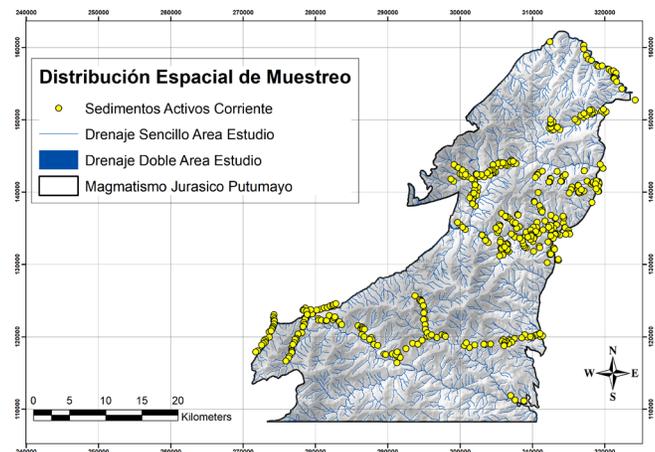


Figura 2. Distribución espacial de muestras dentro del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Estas muestras se encuentran distribuidas espacialmente en el área del polígono, dentro de las microcuencas hidrográficas cercanas a las quebradas y ríos principales. En la distribución espacial se aprecia un agrupamiento de muestras, principalmente cerca de zona del depósito mineral de Mocoa, lo cual es tenido en cuenta para el procesamiento geoestadístico de la información.

1.2. Geología

La geología del área de estudio la comprende rocas con edades entre el Triásico superior hasta el presente, y está conformada por paquetes litológicos en orden de importancia de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias principalmente con algunas ventanas de rocas metamórficas. Entre las unidades geológicas presentes en el área de estudio se observa que el 91.9% de las rocas son de edad Triásico Superior – Jurásico (Tjsal: Formación Saldaña, Jcndsom: Cuarzomonzodiorita Sombrerillos y Jmgmoc: Monzogranito de Mocoa); el 7.1% son de edad Cretácico (K1K2cb: Formación Caballos, K2V: Formación Villeta, K2E1rum: Formación Rumiyaco); el 0.5% de edad Cuaternario (Q2c y Q2al: depósitos cuaternarios) y el 0.6% perteneciente al Paleozoico.

En la Fig. 3 se presenta el mapa geológico y de estructuras principales en el área de estudio, tomado y digitalizado de la plancha 430 Mocoa [5, 6].

La geología estructural en el área de estudio está compuesta por los sistemas de fallas correspondientes al límite andino oriental de la Cordillera Oriental con la llanura colombiana y que poseen una orientación espacial preferencial con sentido NNE – SSW y NE – SE que han sido responsables del levantamiento cordillerano y la geomorfología que tenemos actualmente. Otra dirección presente en la zona de estudio es el fallamiento con dirección NW – SE representada por la Falla de Sibundoy y otras fallas menores.

Los movimientos en el área están más o menos documentados a partir del Jurásico, cuando actuó una tectónica distensiva, a la que se le atribuye la formación de las zonas de debilidad que dieron origen a fallas normales en los

límites oriental y occidental del área de estudio. A partir del Neógeno se inició la Orogenia Andina que ocasionó el levantamiento de las cordilleras Central y Oriental, debido a la tectónica compresiva, que cambió el movimiento de las fallas a inverso y transcurrente, y se impuso un estilo tectónico de cabalgamiento y plegamiento; este nuevo estilo persiste en la actualidad y se atribuye a la interacción entre las placas de Nazca, Suramérica y Caribe [7].

1.3. Geología económica

El área comprendida en el norte del departamento del Putumayo ha sido estudiada en décadas anteriores utilizando información geoquímica, geológica y geofísica disponible, en busca de manifestaciones de depósitos minerales de diferentes escalas, asociados a metales preciosos y metales básicos. Esta zona se encuentra en un ambiente de corteza continental y el potencial mineral de esta provincia se encuentra asociado a la superposición de dos eventos metalogenéticos que tuvieron lugar, uno en el Mesozoico (Triásico – Jurásico) y otro en el Cenozoico (Neógeno) [8].

La primera campaña de exploración regional en el área se dio en el año 1977, en el marco del convenio realizado entre las Naciones Unidas e INGEOMINAS (Actual Servicio Geológico Colombiano), donde se desarrolló el Proyecto de Metales Básicos en las cordilleras central y occidental COL 72-002/13, cuyo objetivo principal fue la exploración de un área de 90.000 km² en el sur de Colombia, haciendo énfasis en las posibilidades de encontrar mineralización de tipo pórfido de cobre [9].

La siguiente campaña de exploración regional, hace referencia a los años siguientes de la década de los setenta, cuando el programa de exploración conducido por las Naciones Unidas, INGEOMINAS y la Empresa Colombiana de Minas (ECOMINAS) concluyó en el descubrimiento de un gran depósito tipo pórfido de cobre y molibdeno cerca de la ciudad de Mocoa en el suroccidente de Colombia [10]. Allí, se desarrolló el Proyecto Metales Básicos Fase II COL 76/030 para desarrollar el estudio preliminar de factibilidad económica para el depósito de cobre y molibdeno de Mocoa [11]. El proyecto Mocoa, el cual se encuentra actualmente en etapa de exploración, y hasta la fecha es el único proyecto en la zona de estudio el cual ha pasado a etapa de exploración del subsuelo con perforación diamantina (para 2021 se contaba con 43 pozos profundos con un total de 25.199 metros perforados, [5]) y del cual se conocen los rasgos inherentes a un depósito tipo pórfido de Cu-Mo como las alteraciones hidrotermales, mineralización de sulfuros y tipos de vetillas, las demás anomalías han permanecido sin interpretaciones adicionales y consideradas sin interés económico. El conocimiento del depósito de Mocoa es el punto de partida para la identificación en terreno de depósitos similares en el cinturón de rocas jurásicas del norte del departamento del Putumayo, teniendo en cuenta las asociaciones mineralógicas determinadas en campo, las cuales permiten zonificar las alteraciones hidrotermales presentes, que son el rasgo determinante en la comprobación de mineralización tipo pórfido en áreas de exploración regional.

Algunas ocurrencias minerales se presentan sobre algunos de los cursos principales de ríos, en donde se puede encontrar

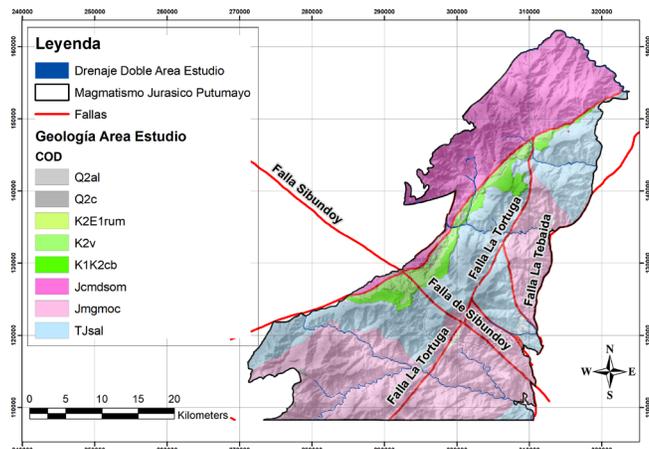


Figura 3. Mapa geológico y estructuras principales del área de estudio
Fuente: Elaboración propia.

a mineros artesanales barequeando a muy pequeña escala en busca de oro, indicando la presencia de pequeños depósitos de oro de tipo aluvial en la zona, y adicional algunos puntos de extracción de materiales de construcción.

De acuerdo con lo anterior podemos afirmar que el área se encuentra con información primaria de etapas iniciales de exploración, donde la interpretación y uso de herramientas adicionales pueden ayudar a identificar de una forma más acertada el potencial minero para metales básicos en esta zona del país, donde predominan rocas y asociaciones minerales que permiten inferir una zona con alto potencial para la exploración regional de depósitos tipo pórfido de cobre y/o molibdeno tales como el depósito de Mocoa y depósitos similares en Ecuador.

2 Metodología

Para la realización del presente trabajo se utilizó la base de datos proporcionada por la compañía Libero Cobre Ltd., consistente en los resultados geoquímicos de dos campañas regionales de muestreos de sedimentos activos de corriente en el norte del departamento del Putumayo, realizados en primera instancia por INGEOMINAS entre los años 1973 y 2006 (305 muestras) y por la compañía B2 Gold Corporation de forma más local y con una mayor densidad de muestreo cerca del proyecto Mocoa (138 muestras) durante los años 2008 a 2012. En este sentido, se dispone de 443 muestras para el procesamiento de la información geoestadística.

Las muestras de las dos campañas fueron cotejadas en áreas comunes donde se tenía la posibilidad de comparar los resultados y se verificó que tenían resultados consistentes y homogéneos, haciendo posible el trabajo entre ellos. Luego se procede al análisis e interpretación de elementos indicadores en exploración de depósitos de minerales metálicos como Cu, Mo, Pb, Zn, Ag y Mn, los cuales se encuentran en la totalidad de las muestras.

Para el análisis, interpretación y modelamiento de la información geoestadística se utilizó el software Isatis neominning v2022_12 de la compañía Geovariances.

2.1. Análisis exploratorio de datos

La primera etapa consiste en realizar el análisis exploratorio de los datos (AED) para las variables (Cu_ppm, Mo_ppm, Pb_ppm, Zn_ppm, Ag_ppb y Mn_ppm) en el cual se identifica para cada una de ellas la distribución, las medidas de tendencia central (media, percentiles, media geométrica, media armónica), medidas de dispersión (varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis), los datos duplicados (dando preferencia por el valor más alto) y los datos extremos (aberrantes) los cuales no son tenidos en cuenta (ocultados) en el análisis.

En la Tabla 1 se presentan las estadísticas básicas procesadas por el software para las variables filtradas sin duplicados y sin valores extremos de Cu_ppm, Mo_ppm, Pb_ppm, Zn_ppm, Ag_ppb y Mn_ppm. Para las variables Cu, Pb, Zn y Mn, el conjunto de datos es de 443 muestras; para el Mo se cuenta con 384 datos y para la Ag se cuenta con 387 datos. Estos dos últimos elementos tienen menor cantidad de muestras debido a inconvenientes que en su momento no permitieron que se procesaran las muestras.

Tabla 1.
Estadísticas básicas para las variables analizadas.

Variable	Cu_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Zn_ppm	Ag_ppb	Mn_ppm
Conteo Total	435,00	378,00	435,00	435,00	381,00	435,00
Media	38,34	2,90	25,68	91,08	97,40	710,18
Varianza	1016,0	6,322	559,9	4767,0	45420,0	120582,0
Desviación Estándar	31,87	2,51	23,66	69,04	213,12	347,25
Coef. de Variación	0,8313	0,8680	0,9214	0,7581	2,1880	0,4890
Mínimo	4,00	0,21	5,00	31,00	0,20	19,00
Máximo	200,00	20,00	140,00	400,00	1000,00	1900,00
Percentil 5%	11,00	0,40	6,00	42,00	0,40	286,00
Percentil 25%	21,00	1,30	13,35	56,00	0,60	457,00
Percentil 50%	31,00	3,00	18,00	71,50	0,80	632,00
Percentil 75%	46,00	3,01	26,00	98,00	100,00	875,00
Percentil 90%	65,00	5,00	49,00	142,00	250,00	1148,00
Percentil 98%	170,00	8,00	117,00	400,00	1000,00	1710,00
Media Geométrica	30,67	2,20	19,86	77,53	5,22	628,67
Media Armónica	25,07	1,51	16,26	69,65	0,91	501,97
Asimetría	3,109	4,388	2,936	3,087	3,167	1,156
Curtosis	14,83	29,64	12,70	13,06	12,90	4,51

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se observa que el coeficiente de variación (relación entre la desviación estándar y la media) es <1.00 para las variables Cu_ppm, Mo_ppm, Pb_ppm, Zn_ppm y Mn_ppm indicando que las variables se comportan adecuadamente para la estimación. Para el caso de la variable Ag_ppb, el valor >2.00 indica que tiene valores que continúan siendo extremos y pueden dificultar la estimación. Los valores de asimetría son todos positivos y como se observa en los histogramas de frecuencias indican que tiene cola hacia la derecha. El coeficiente de curtosis >0.00 indica que todas las variables presentan comportamiento leptocúrtico, es decir, presentan una alta frecuencia alrededor de los valores centrales.

2.2. Desagrupamiento de datos

Con los anteriores insumos procesados y analizados para cada variable se continua con la corrección de sesgos de muestreos preferenciales en cercanía a las zonas de altos valores, lo cual se evidenció visualmente en la Fig. 2. Por lo cual es necesario realizar un desagrupamiento de datos, que consiste como su nombre lo indica en desagrupar los datos debido a su irregularidad y a la concentración en sitios específicos, ya que es conveniente no atribuir el mismo peso estadístico a todos los datos [12]. Se toma una ventana móvil

Tabla 2.

Valores de desagrupamiento (valores pesados) y tamaño óptimo de las ventanas para las variables analizadas.

Variable	Cu ppm	Mo ppm	Pb ppm	Zn ppm	Ag ppb	Mn ppm	
Conteo	435,00	378,00	435,00	435,00	381,00	435,00	
Media	Cruda	38,340	2,897	25,680	91,080	97,400	710,200
	Pesada	33,340	2,840	24,680	87,650	76,630	680,500
Desviación Estándar	Cruda	31,870	2,514	23,660	69,040	213,100	347,200
	Pesada	26,380	2,032	22,960	64,810	191,500	339,000
Ventana X y Y (m)	2868,42	2868,42	2868,42	2868,42	2394,74	2868,42	

Fuente: Elaboración propia.

centrada en cada una de las muestras desde un tamaño inicial de 500 m x 500 m hasta 5.000 m x 5.000 m. Para obtener el tamaño más adecuado de la ventana, se realizan 20 pruebas para cada variable moviendo la ventana en el rango dado de tamaños, de allí se selecciona el valor óptimo, el cual debe poseer un valor de desviación estándar bajo, no estar tan alejado de la media, mostrar un cambio significativo entre el valor crudo y el valor pesado para los valores de media y desviación estándar que justifique el desagrupamiento. Los resultados son guardados en una nueva variable pesada del conjunto de datos de muestra, que luego es utilizada para el análisis variográfico y el modelamiento de la anamorfosis gaussiana, en la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos (valores pesados) y se suministra el tamaño de la ventana que posee geometría cuadrada, por lo tanto, es el mismo valor para el eje X y Y.

Con los valores de tamaño de ventanas en metros obtenidos para X y Y, se procede a seleccionar las dimensiones de la grilla a utilizar en la estimación y la simulación de 2 km x 2 km respectivamente para las coordenadas X y Y.

2.3. Análisis variográfico

El análisis variográfico permite determinar la continuidad espacial de la variable en el estudio, ajustándola a un modelo de variograma experimental, el cual se obtiene al relacionar el promedio de la variabilidad entre pares de muestras en función a la distancia de separación en una dirección determinada. Para el presente caso de estudio se realizaron los análisis variográficos preliminares de las variables en las diferentes direcciones, sin obtener alguna dirección preferencial en ninguna de ellas. Esto refuerza el tipo de depósito mineral tipo pórfido, en el que la tendencia de mineralización es diseminada a lo largo de las zonas alteradas hidrotermalmente; teniendo en cuenta lo anterior, se toma una tendencia omnidireccional para el ajuste de los parámetros y la realización de los modelos de variogramas.

En la Fig. 4 se presenta el variograma experimental y el modelo de variograma para cada una de las variables (Cu ppm, Mo ppm, Pb ppm, Zn ppm, Ag ppb y Mn ppm). En línea punteada de color rojo se exhibe el variograma experimental omnidireccional, en línea continua de color rojo se muestra el trazo del modelo de variograma omnidireccional. Los números en color negro indican la cantidad de pares de muestras utilizadas para el cálculo del variograma, lo cual resulta útil para determinar la representatividad de los puntos seleccionados en la construcción y ajuste del modelo del variograma.

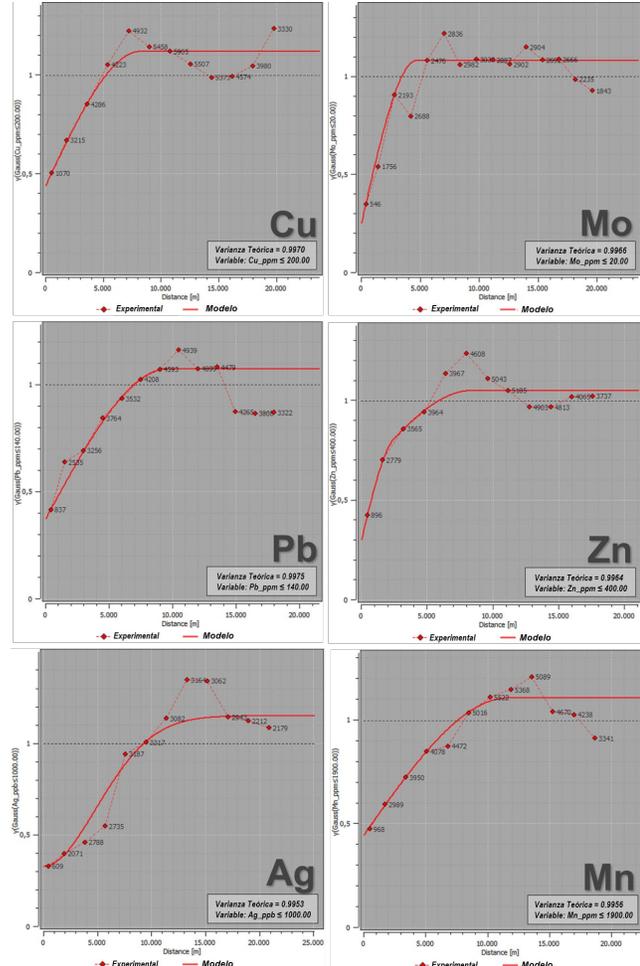


Figura 4. Variograma experimental y modelo de variograma para cada variable.

Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la validación de los modelos variográficos obtenidos utilizando la validación cruzada, donde se compara el valor real con el valor estimado y se analiza la distribución de los errores entre cada punto muestreado y el valor estimado. Se hace énfasis en: el gráfico de dispersión de valores reales y estimados, el cual debe tener una pendiente superior a 0,60, indicando buena correlación; el histograma de frecuencias debe tener una media de los errores estandarizados cercana a 0,00, la desviación estándar debe ser cercana a 1,0; y la gráfica de errores estandarizados debe tener un porcentaje de muestras rechazadas inferior al 10%. Las

anteriores condiciones de la validación cruzada permiten validar los modelos variográficos realizados para las variables Cu_ppm, Mo_ppm, Pb_ppm, Zn_ppm, Ag_ppb y Mn_ppm.

2.4. Simulación geostatística

La idea de utilizar la simulación estadística permite obtener un número determinado de nuevas realizaciones de la función aleatoria $Z(x)$ de tal manera que éstas compartan las mismas propiedades estadísticas que la función aleatoria $Z(x)$. Por lo general no se conoce con precisión las propiedades estadísticas de $Z(x)$ y lo que se hace es intentar obtener realizaciones simuladas $ZS(x)$ que sean estadísticamente equivalentes a la muestra que se posee de la función aleatoria original [13].

La idea de la simulación condicional es poder construir una representación de un fenómeno que es consistente con los datos observados, de esta forma, una simulación condicional no es la realidad, tan sólo es una posible versión de ella. Una simulación de la función aleatoria consiste en la selección de una realización de la función $Z(x)$ del conjunto de todas las posibles realizaciones. La construcción requiere el conocimiento de la distribución espacial de la función aleatoria $Z(x)$ [13].

Se tiene en cuenta la definición de segundo orden, una simulación (no condicional) de la función aleatoria $Z(x)$, es una realización de una función aleatoria $S(x)$ seleccionada en la clase de todas las funciones aleatorias con el mismo momento de segundo orden como $Z(x)$, es decir, la misma covarianza, variograma o covarianza generalizada [13].

2.4.1. Objetivos de la simulación

Las estimaciones de un fenómeno regionalizado que se puedan describir mediante una función aleatoria $Z(x)$ son con frecuencia insuficientes debido a la falta de información de la variable x , la información disponible en muchos casos se limita al muestreo realizado en puntos específicos de acuerdo con las características de dicha variable, las estimaciones obtenidas a partir de esta información empleando un estimador como el Kriging suavizan la realidad y resultan en una imagen errónea de la realidad y se requiere realizar la simulación condicionada de la variable [13].

Los objetivos de la simulación corresponden a interpretar una variable en términos de una estructura variográfica con características similares, y por otro lado obtener información de áreas donde no existen información, de esta forma el fenómeno simulado se conoce en toda el área de estudio y no solamente en los puntos muestreados.

Una simulación, por lo tanto, consiste en obtener otra realización de esta función aleatoria $Z(x)$. Las dos realizaciones, la real y la simulada difieren una de la otra en determinadas localizaciones, pero ambas pertenecen a la misma función aleatoria $Z(x)$; es decir, tienen la misma función de distribución y los mismos momentos de primer y segundo orden, por lo que se dice que son estadísticamente equivalentes [13].

2.4.2. Método de bandas rotantes

El método de simulación por bandas rotantes (TBS, por sus siglas en inglés), es un método que simplifica la

simulación en el espacio y que tiene por objetivo fundamental la obtención de la función de covarianza unidimensional de la variable, teniendo en cuenta que permite la construcción de simulaciones en el espacio, a partir de procesos unidimensionales por medio de la simulación de líneas; la simulación en un punto resulta de la sumatoria de las proyecciones de las líneas en ese punto. De este modo, los métodos de simulación sobre una línea son de interés para la construcción de simulaciones en 2D y 3D.

El método de bandas rotantes ha sido usado desde la década de los 50's [14], para el caso especial de las funciones aleatorias Brownianas, pero solo fue desarrollado para simulaciones en la década de los 70's [13,15]. Matheron, redujo el problema de obtener una simulación de una función aleatoria $Z(x)$ con distribución gaussiana en tres dimensiones a obtener varias simulaciones independientes en una sola dimensión a lo largo de líneas rotadas en el espacio tridimensional R^3 [15].

En la cartografía por el método de bandas rotantes para cada uno de los seis elementos analizados se utiliza una grilla de 2 km x 2 km, y se fijaron los siguientes parámetros: 400 bandas, 8 sectores de búsqueda en el elipsoide, 4 muestras máximas por sector y 100 realizaciones. Una vez llevadas a cabo estas 100 realizaciones (simulaciones), se extraen tres cartografías: un escenario optimista, un escenario promedio o estimado y un escenario pesimista.

Para la realización de la cartografía de simulación por el método de bandas rotantes, se tiene en cuenta una escala unificada de colores y de valores correspondientes a los percentiles 5% (P05), 25% (P25), 50% (P50), 75% (P75), 90% (P90) y 98% (P98), ubicados en la parte izquierda de las escalas gráficas.

Para el presente estudio se relacionan y describen las anomalías altas como los valores que se encuentran por encima del percentil 90% (P90) y como anomalías moderadas las que se encuentran con valores entre el percentil 75% (P75) y el percentil 90% (P90).

2.4.3. Simulación por bandas rotantes – Escenario promedio para 100 realizaciones

La cartografía del escenario promedio para 100 realizaciones simula los valores de las concentraciones promedio de las variables analizadas para muestras de sedimentos activos de corriente y delimita zonas geoquímicas anómalas para las variables en estudio, las cuales son vectores en exploración regional para depósitos minerales tipo pórfido de cobre y/o molibdeno. Estas anomalías geoquímicas se encuentran por encima de los valores de referencia para concentraciones comunes en la corteza terrestre y rocas graníticas similares a las del cinturón de rocas jurásicas en el área de estudio.

La variable Cu de la Fig. 5 en el escenario promedio presenta dos anomalías fuertes con valores por encima del P90 en los sectores NW y E, y una anomalía moderada con valores por encima del P75 en el sector SW del área. Las anomalías del sector NW y E se encuentran con valores superiores a los valores de Cu de referencia para valores del promedio de la corteza terrestre de 60 ppm [16].

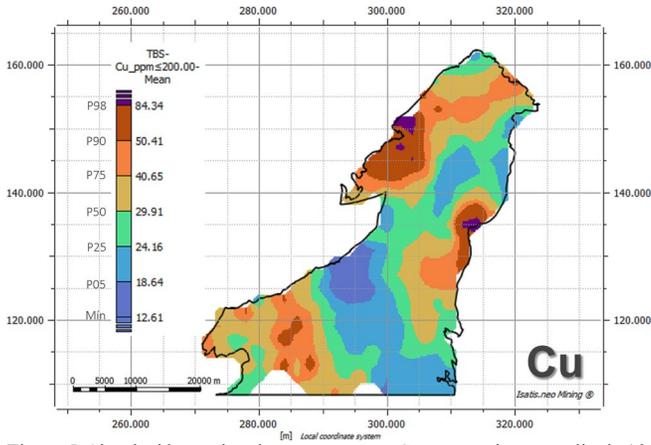


Figura 5. Simulación por bandas rotantes para Cu, escenario promedio de 100 realizaciones.
Fuente: Elaboración propia.

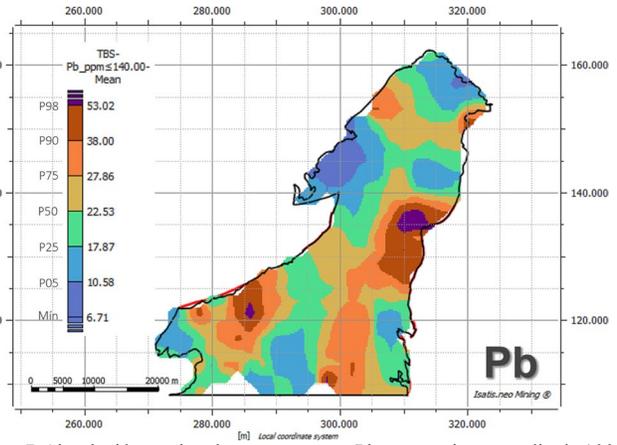


Figura 7. Simulación por bandas rotantes para Pb, escenario promedio de 100 realizaciones.
Fuente: Elaboración propia.

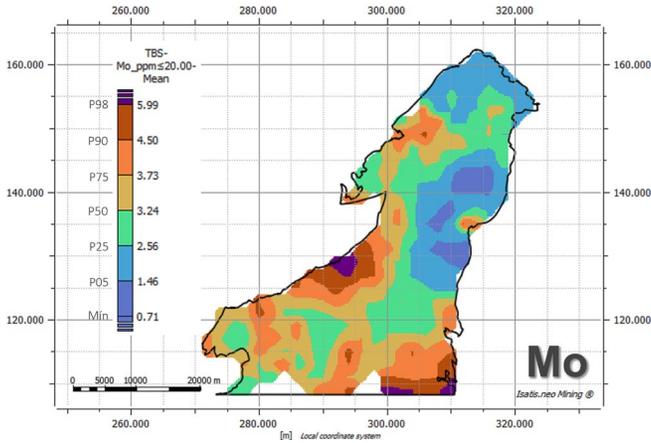


Figura 6. Simulación por bandas rotantes para Mo, escenario promedio de 100 realizaciones.
Fuente: Elaboración propia.

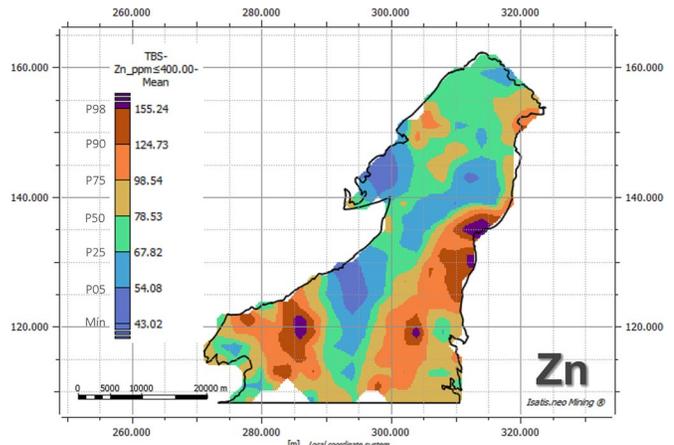


Figura 8. Simulación por bandas rotantes para Zn, escenario promedio de 100 realizaciones.
Fuente: Elaboración propia.

La variable Mo de la Fig. 6 en el escenario promedio presenta dos anomalías fuertes con valores por encima del P90 en los sectores W y SE, y dos anomalías moderadas con valores por encima del P75 en los sectores NW y SW del área. Las anomalías se encuentran con valores superiores a los valores de Mo de referencia para valores del promedio para rocas graníticas de 1,5 ppm [16].

La variable Pb de la Fig. 7 en el escenario promedio presenta dos anomalías fuertes con valores por encima del P90 en los sectores E y SW, y dos anomalías moderadas con valores por encima del P75 en los sectores N y SE del área. Las anomalías se encuentran con valores superiores a los valores de Pb de referencia para valores del promedio para rocas graníticas de 20 ppm [16].

La variable Zn de la Fig. 8 en el escenario promedio presenta tres anomalías fuertes con valores por encima del P90 en los sectores E, SW y SE del área. Las anomalías se encuentran con valores superiores a los valores de Zn de referencia para valores del promedio para rocas graníticas de 50 ppm [16].

La variable Ag de la Fig. 9 en el escenario promedio presenta tres anomalías fuertes con valores por encima del P90 en los sectores E y NE. Las anomalías se encuentran con valores superiores a los valores de Ag de referencia para valores del promedio para rocas graníticas de 50 ppm [16].

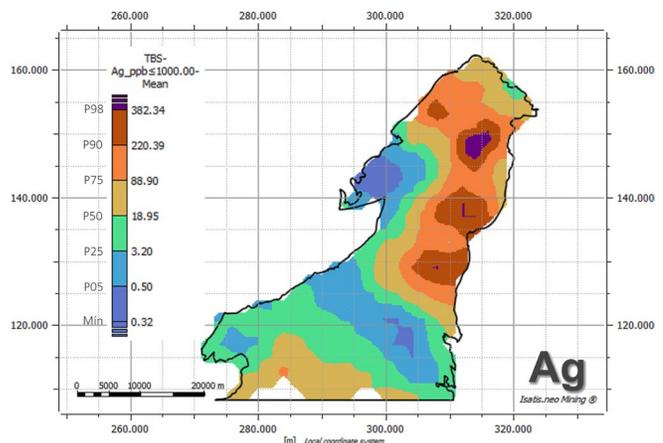


Figura 9. Simulación por bandas rotantes para Ag, escenario promedio de 100 realizaciones.
Fuente: Elaboración propia.

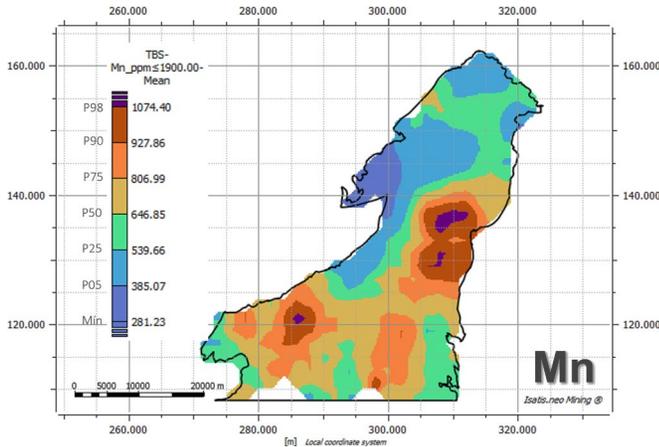


Figura 10. Simulación por bandas rotantes para Mn, escenario promedio de 100 realizaciones.

Fuente: Elaboración propia.

La variable Mn de la Fig. 10 en el escenario promedio presenta dos anomalías fuertes con valores por encima del P90 en los sectores E y SW, y una anomalía moderada con valores por encima del P75 en el sector SE del área. Las anomalías se encuentran con valores superiores a los valores de Mo de referencia para valores del promedio para rocas graníticas de 400 ppm y del promedio de rocas de la corteza terrestre 950 ppm [16].

En la Tabla 3 se presentan las estadísticas básicas procesadas para las variables en el escenario promedio para

Tabla 3.

Estadísticas básicas para las diferentes variables analizadas en el escenario del promedio de 100 simulaciones.

Variable	Cu_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Zn_ppm	Ag_ppb	Mn_ppm
Conteo Total	841,00	841,00	841,00	841,00	841,00	841,00
Media	33,93	3,23	24,36	86,09	70,38	672,40
Varianza	211,0	1,1	102,2	725,8	10576,0	34979,0
Desviación Estándar	14,53	1,05	10,11	26,94	102,84	187,03
Coef. de Variación	0,4282	0,3242	0,4150	0,3129	1,4610	0,2781
Mínimo	12,61	0,71	6,71	43,02	0,32	281,23
Máximo	98,44	6,96	67,18	198,37	533,61	1150,89
Percentil 5%	18,64	1,46	10,58	54,08	0,50	385,07
Percentil 25%	24,16	2,56	17,87	67,82	3,20	539,66
Percentil 50%	29,91	3,24	22,53	78,53	18,95	646,85
Percentil 75%	40,65	3,73	27,86	98,54	88,90	806,99
Percentil 90%	50,41	4,50	38,00	124,73	220,39	927,86
Percentil 98%	84,34	5,99	53,02	155,24	382,34	1074,40
Media Geométrica	31,48	3,04	22,53	82,43	16,67	645,59
Media Armónica	29,48	2,82	20,81	79,21	3,03	617,75
Asimetría	1,798	0,452	1,381	1,247	1,890	0,280
Curtois	7,179	4,223	5,552	4,711	6,242	2,585

Fuente: Elaboración propia.

100 realizaciones. El coeficiente de variación (relación entre la desviación estándar y la media) es <1.00 para todas las variables, excepto para la Ag_ppb. Como se puede observar, tanto las medidas de tendencia central, las medidas de variabilidad y las medidas de forma estimadas siguen conservando estadísticas similares de los valores originales para cada de los elementos analizados.

3. Resultados

Luego de realizar la simulación por el método de bandas rotantes utilizando el software Isatis Neo Mining [17], se identificaron cuatro anomalías regionales en el cinturón de rocas jurásicas del norte del departamento de Putumayo. Dentro de los resultados se obtiene que, al modelar las fallas geológicas presentes en el área de estudio, estas no representan límites rígidos para el modelamiento, esto teniendo en cuenta que, tanto la mineralización como la litología en el caso del depósito mineral de Mocoa son coetáneas y las fallas geológicas fueron muy posteriores a estos eventos; igualmente por tratarse de información de muestras de sedimentos activos de corriente las cuales drenan de un área en superficie.

La simulación por bandas rotantes fue igualmente analizada para los casos optimista y pesimista, en donde se obtiene que la mejor representación de las variables de estudio corresponde al escenario promedio.

La simulación por bandas rotantes para un escenario promedio de 100 realizaciones permite clasificar las anomalías generadas en dos grupos: dos anomalías de alta importancia con valores superiores al percentil P90 que se encuentran en los sectores oriente y suroccidentes del área; y dos anomalías de moderada importancia con valores superiores al percentil P75.

La Tabla 4 presenta las concentraciones comunes de los elementos químicos analizados para la corteza terrestre y para el promedio de granitos y granodioritas [16], que son las rocas más abundantes en el cinturón Jurásico del área de estudio, estos valores se utilizan como referencia en la identificación de anomalías para las variables Cu_ppm, Mo_ppm, Pb_ppm, Zn_ppm, Ag_ppb y Mn_ppm. Para comparar los resultados obtenidos, se toman los valores correspondientes al granito y la granodiorita, a excepción del cobre en el cual se considera como referencia el promedio de la corteza terrestre, teniendo en cuenta que el valor del granito – granodiorita es demasiado bajo para los resultados obtenidos en el área de estudio.

Tabla 4.

Abundancia promedio de variables analizadas para la corteza terrestre y granito.

Abundancia Promedio	Cu (ppm)	Mo (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Ag (ppb)	Mn (ppm)
Corteza terrestre	60	1,2	14	70	75	950
Granito - Granodiorita	12	1,5	20	50	50	400

Fuente: Tomado de Reimann C & et al, 1998.

3.1. Error relativo en simulaciones

Una vez realizadas las simulaciones por el método de bandas rotantes para los tres escenarios: optimista, promedio y pesimista, se procede a determinar el porcentaje de error relativo para el escenario promedio o simulado, debido a que de las 100 realizaciones se considera la simulación más acertada a la realidad, para ello se utiliza la relación entre la desviación estándar y la media de cada una de las celdas pertenecientes a la grilla de simulación. De esta forma se conoce el porcentaje de error en cada celda y se compara con los resultados de la simulación para cada variable.

En general, para las anomalías identificadas de Cu, Pb, Zn, Ag, y Mn se tienen errores relativos aceptables para validarlas.

Para las anomalías de Mo identificadas en los sectores W y SW se tienen errores relativos aceptables para su validación, sin embargo, los sectores SE y NW poseen errores relativos altos que no validan en su totalidad estas dos anomalías, debido al efecto de borde teniendo en cuenta la baja cantidad de muestras en el elipsoide de búsqueda.

3.2. Resultados simulación caso promedio

En el escenario promedio simulado por el método de bandas rotantes para las seis variables en estudio, se puede determinar que todos los valores considerados anómalos en este escenario se encuentran por encima de los valores referencia para concentraciones comunes de estos elementos en rocas graníticas similares al cinturón de rocas jurásicas. De acuerdo con la Tabla 4 para el promedio de granito y granodiorita, en el caso del Cu este valor se encuentra por encima de P90; para el Mo, Pb, y Zn se encuentran por debajo del P25; para la Ag se encuentra por debajo de P75 y para el Mn se encuentra por debajo del P90. Este escenario marca muy bien el depósito de Mocoa con anomalías de Cu, Pb, Zn, Mn, Ag y Mo en el muestreo realizado; y por consiguiente representa una buena prospectividad para este tipo de depósitos en las anomalías fuertes identificadas en el sector NW y SW del área de estudio.

3.3. Anomalías para escenario promedio por método de bandas rotantes

Una vez analizadas las anomalías generadas por el método de bandas rotantes, se toma el escenario promedio como el escenario que simula más adecuadamente la realidad de la naturaleza de las concentraciones de las variables analizadas, generando el mapa de anomalías regionales del área de estudio, producto del análisis de resultados de muestras de sedimentos activos de corriente. En la Fig. 11 se observan las cuatro anomalías regionales identificadas dentro del área de estudio, numeradas en orden de importancia de acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación.

- Anomalía 1. Localizada al oriente del área de estudio y delimitada por concentraciones anómalas de Cu-Pb-Zn-Mn-Mo-Ag. Esta anomalía se considera de alta importancia y corresponde a la firma geoquímica de depósitos tipo pórfido de Cu, dentro de ésta se encuentra el depósito mineral de Mocoa, corresponde a un área de 89,03 km².

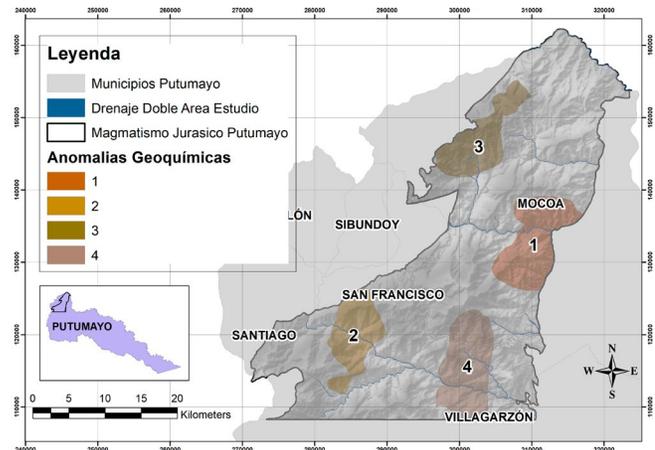


Figura 11. Anomalías geoquímicas resultado de simulación por bandas rotantes para escenario promedio simulado.

Fuente: Elaboración propia.

- Anomalía 2. Localizada al suroccidente del área de estudio y delimitada por concentraciones anómalas de Pb-Zn-Mn-Mo-Cu. Esta anomalía se considera de alta importancia y corresponde a la firma geoquímica de depósitos tipo pórfido de Cu, corresponde a un área de 65,43 km².
- Anomalía 3. Localizada al noroccidente del área de estudio y delimitada por concentraciones anómalas de Cu-Mo-Zn-Pb-Ag. Esta anomalía se considera de mediana importancia y corresponde por la intensidad a una firma geoquímica moderada de depósitos tipo pórfido de Cu-Mo, corresponde a un área de 70,15 km².
- Anomalía 4. Localizada al suroriente del área de estudio y delimitada por concentraciones anómalas de Pb-Zn-Mn-Mo. Esta anomalía se considera de mediana importancia y corresponde por la intensidad a una firma geoquímica moderada de depósitos tipo pórfido de Cu, corresponde a un área de 90,54 km².

Cada una de estas cuatro anomalías geoquímicas generadas deben estar relacionadas y acompañadas en superficie con zonas de alteración hidrotermal, que dependiendo del nivel en profundidad del sistema y/o del nivel de erosión en el que se encuentren los sistemas mineralizados, puede gradar desde alteraciones de baja temperatura como la alteración propilitica y alteración sericitica hasta alteraciones de mayor temperatura. De esta misma forma, los elementos Pb, Zn, Mn y Ag corresponden a niveles superiores en los sistemas tipo pórfido con temperaturas más bajas; y los elemento Cu y Mo corresponden a niveles más profundos con temperaturas altas. Inicialmente estas cuatro anomalías suman 315,15 km² de extensión superficial y son el punto de partida de próximas campañas de exploración de depósitos minerales de Cu-Mo.

4. Conclusiones

Se permite identificar el comportamiento geoestadístico de las variables Cu, Mo, Pb, Zn y Mn utilizando la metodología de las bandas rotantes para el escenario promedio simulado de 100 realizaciones, como indicadores de mineralización tipo pórfido Cu-Mo, y que se encuentran

asociados en dos anomalías regionales de alta importancia y dos anomalías de moderada importancia dentro del área de estudio en el norte del departamento del Putumayo, indicando la necesidad de estudios adicionales para determinar su potencial y delimitar su extensión en el terreno. Las cuatro anomalías generadas corresponden a firmas geoquímicas en la identificación de sistemas tipo pórfido de cobre en superficie y que, mediante la utilización de la herramienta de simulación por bandas rotantes, junto con una siguiente fase de estudios geológicos detallados de alteración hidrotermal, mineralización de sulfuros e identificación de tipos de vetillas, pueden aportar información primaria adicional para reconocer su extensión en superficie.

Junto con la simulación geoestadística se utilizó la información disponible de geoquímica, geología a nivel regional, y de alteraciones hidrotermales para el caso puntual del depósito mineral de Mocoa en los resultados del modelamiento geoestadístico, en la identificación de anomalías.

Dentro del cinturón de rocas jurásicas en el norte del departamento del Putumayo se identificaron cuatro anomalías geoquímicas regionales para depósitos tipo pórfido de Cu-Mo con una extensión total de 315,15 km², dos de alta importancia localizadas al este y al suroccidente; y dos de moderada importancia localizadas al noroccidente y sureste del área de estudio, asociadas a eventos metalogénicos del Triásico-Jurásico.

El modelamiento geoestadístico por medio de simulación condicionada por bandas rotantes es una herramienta que, junto a los análisis geoquímicos y estudios geofísicos, resultan ser de gran utilidad a la hora de definir con soporte científico anomalías geoquímicas de elementos vectores en etapas tempranas de exploración regional de depósitos minerales tipo pórfido de Cu-Mo.

Estos resultados permiten incentivar y promover la exploración de minerales de interés estratégico como el cobre en Colombia [18], y que teniendo en cuenta el contexto geológico presenta gran potencial, respaldado por los proyectos exploratorios y descubrimientos de depósitos de cobre en rocas de edad Jurásica en Ecuador, así como los ya existentes en diferentes regiones del país.

El mercado del cobre continua en crecimiento, para 2023 la producción global fue de 22 millones de toneladas [19] y la oportunidad de aporte a tecnologías más limpias y amigables con el planeta, así como el aprovechamiento racional de los recursos disponibles, nos ponen en la obligación no sólo con nosotros mismo, sino con las generaciones venideras a aportar activamente para que esta transición energética se haga una realidad, sumando desde todos los puntos de vista, con consciencia ambiental, pero también con inteligencia del aprovechamiento de los recursos naturales disponibles.

Referencias

- [1] INGEOMINAS. Análisis del potencial de recursos minerales de la plancha 431 Piamonte y parte de la 430 Mocoa suroccidente de Colombia. Bogotá, Colombia, 2006.
- [2] Sillitoe, R.H., Porphyry copper systems, Sillitoe, *Economic Geology*, 105, pp. 3-41, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- [3] Rodríguez-García, G., Zapata, J.P., Correa-Martínez, A.M., Ramírez, D.A., y Obando, G., (). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico Temprano-Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), pp. 15–50, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001>.
- [4] Rowland, M., Sim, R., and Bruce, D., Mocoa copper-molybdenum Project, Colombia. NI 43-101 Technical Report. [online]. 2022. Available at: https://www.liberocopper.com/_resources/reports/Technical-Report-Mocoa.pdf
- [5] INGEOMINAS, & Geoestudios. Geología de la Plancha 430 Mocoa. 1:100000. 2002.
- [6] INGEOMINAS, & Geoestudios. Mapa geológico de Colombia Plancha 411, La Cruz. 2000.
- [7] INGEOMINAS. Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 orito y 465 Churuyaco. Departamentos de Cauquetá, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo. Escala 1:100.000. [en línea]. 2003. Disponible en: www.ingecominas.gov.co
- [8] INGEOMINAS. Análisis del potencial de recursos minerales de la plancha 431 Piamonte y parte de la 430 Mocoa suroccidente de Colombia, 2006.
- [9] ONU & INGEOMINAS. Proyecto de metales básicos en las cordilleras Central y Occidental, 1977.
- [10] Sillitoe, R.H., and Jaramillo, L., Geologic exploration of a molybdenum-rich porphyry copper deposit at Mocoa, Colombia. *Economic Geology*, 79(1), pp. 106-123, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.79.1.106>
- [11] INGEOMINAS. Resumen del informe preliminar de factibilidad proyecto Mocoa, 1984.
- [12] Morales, F., Evaluación geoestadística por medio del método de condicionamiento uniforme para un caso de estudio de un yacimiento de oro localizado en el departamento de Antioquia, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- [13] Chiles, J.-Paul., and Delfiner, P., Geostatistics: modeling spatial uncertainty. John Wiley & Sons, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470316993>
- [14] Chentsov, N.N., Lévy Brownian motion for several parameters and generalized white noise. *Theory of probability and its applications*, 2(2), pp. 265-266, 1957. DOI: <https://doi.org/10.1137/1102019>
- [15] Matheron, G., The intrinsic random functions and their applications. *Advances in Applied Probability*, 5(3), pp. 439-468, 1973. DOI: <https://doi.org/10.2307/1425829>
- [16] Reimann C, et al., Environmental geochemical atlas of the central Barents region. Schweizerbart Science Publishers, 1998.
- [17] Geovariances. User's Guide Isatis.neo-mining, 2022.
- [18] Agencia Nacional de Minería. Resolución Número 1006 de 30 noviembre 2023 República de Colombia, pp. 1–6, 2023.
- [19] U.S. Geological Survey. (). Mineral Commodity Summaries – Copper, 2024.

L. Cajicá-Acosta, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia en 2004, MBA con Especialidad en Gestión Integrada de la Calidad, Seguridad y Medioambiente de la Universidad de Viña del Mar, Chile en 2014 y MSc en Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia en 2023. Ha trabajado en el área de exploración de minerales metálicos y geología económica desde 2006 desde etapas tempranas en prospección hasta etapas avanzadas de proyectos mineros Sus intereses de investigación incluyen geología, exploración geológica, geoquímica, geoestadística, simulación, modelamiento, geología económica.
ORCID: 0009-0004-2410-6245

L. Sánchez-Arredondo, es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Área de estimación de depósitos minerales y geología de minas, geoestadística ambiental y minera. Actualmente se dedica a la investigación de proyectos relacionados con la reutilización de terrenos mineros con enfoque hacia el geoturismo de sitios mineros y actividades relacionadas con la geoducción, geoconservación y geoturismo. Participante en el curso digital "UNESCO Global Geoparks and Sustainability, 2021". Super Mentor certificado por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo en el año 2023.
ORCID: 0000-0003-1501-8345