

Aplicación de kriging factorial en exploración geoquímica de zonas cubiertas muestreadas con colectores pasivos.

Pamela Castillo^{1,2*}, Xavier Emery^{2,3}, Brian Townley^{1,2} y Álvaro Puig⁴

(1) Departamento de Geología, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 808, Santiago, Chile

(2) Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Av. Beauchef 850, Santiago, Chile

(3) Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Av. Tupper 2069, Santiago, Chile

(4) Gerencia de Exploraciones, Codelco, Huérfanos 1270, Santiago, Chile

* E-mail: pcastillolagos@gmail.com

Resumen. Un muestreo mediante colectores pasivos en áreas de prospección de CODELCO provee tres matrices de datos de 313 muestras x 45 variables, 416 muestras x 50 variables y 575 muestras x 56 variables. Estas bases de datos fueron analizadas y depuradas mediante control de calidad, estadística univariante y multivariante, mostrando un sesgo analítico de dirección E-W y, a la vez, no permitiendo delimitar claramente anomalías de contraste. El método geoestadístico de kriging factorial propone un modelamiento de la información a través de su correlación espacial, con el fin de filtrar el sesgo analítico y además delimitar anomalías de contraste multivariantes según escalas regionales y locales.

Palabras Claves: colectores pasivos, sesgo analítico, kriging factorial, anomalía de contraste.

1 Introducción

La exploración geoquímica en zonas con cobertura plantea un cambio en la evaluación tradicional de yacimientos. Numerosos estudios se han focalizado en los mecanismos que controlan la generación de anomalías superficiales de depósitos ocultos bajo cobertura, integrando diferentes tipos de muestreo y análisis químicos (Taylor et al., 1982; Hamilton, 1998; Cameron et al., 2002; entre otros). Entre estas metodologías, el Departamento de Geología de la Universidad de Chile y el área de exploraciones de CODELCO han estudiado la aplicabilidad de colectores Ore Hound GOCC® en el muestreo de gases e iones libres (Townley et al., 2007).

Las bases de datos obtenidas a través del muestreo de tres áreas de prospección de CODELCO, han sido ordenadas, analizadas e interpretadas mediante técnicas estadísticas y geoestadísticas, para diferenciar falsas anomalías provocadas por errores, o sesgos, analíticos o de medición. En particular hemos explorado el método de kriging factorial (Sandjiv, 1984; Goovaerts, 1992), que es usado para aislar anomalías locales, regionales y errores, considerando la naturaleza multivariante de los datos y la ubicación espacial de las muestras.

2 Áreas de estudio y muestreo

Los prospectos seleccionados se ubican en las regiones XV, II y III y, por confidencialidad, serán nombrados como

Zona 1, 2 y 3. Las mallas de muestreo cubren áreas de 75 km², 100 km² y 120km², respectivamente. Los colectores pasivos fueron instalados en mallas regulares de 400x500m y enterrados a 40 cm de profundidad durante 3 a 4 meses, obteniendo un total de 314, 417 y 575 muestras válidas en cada zona.

Se definen dos conjuntos de datos según el tratamiento analítico realizado sobre el material del colector (carbón activado y caolín). Los análisis químicos se realizaron por ICP-MS para un paquete de 72 elementos en Laboratorio ACME (Toronto, Canadá), después de una lixiviación ácida del carbón, realizada en Laboratorios AAA (Chile). El análisis de 162 especies de compuestos de hidrocarburo se realiza en el Laboratorio Activation Lab (Canadá), a través de cromatografía de gases y espectrometría de masa (GC-MS), practicada directamente por desorción sobre la muestra de caolín, en estado de muestra sólida.

3 Marco geológico

Zona 1: La geología se compone principalmente de ignimbritas, rocas volcánicas efusivas y secuencias sedimentarias, con menor presencia de cuerpos intrusivos y depósitos recientes. El muestreo se realiza sobre una ignimbrita que corresponde a una toba riolítica de alto sílice y potasio (García et al., 2004).

Zona 2: La zona está cubierta mayormente por depósitos semiconsolidados a no consolidados. Los afloramientos de rocas circundantes al muestreo corresponden a andesitas y riolitas, intercaladas con arenas rojas continentales, intruidos por diques y filones de composición andesítica a dacítica (Naranjo y Puig, 1984). Hacia el SW del área muestreada (figuras 1d-1f) existe un depósito de Fe-Cu-(Au), hospedado en rocas volcánicas, 400 m bajo la superficie actual, pero sobre el nivel freático presente.

Zona 3: El área está principalmente cubierta por depósitos semiconsolidados a no consolidados. Las rocas aflorantes se componen de secuencias volcánicas (andesíticas a riolíticas) y volcanoclásticas y por cuerpos intrusivos de composición intermedia a básica. En el prospecto se presentan dos zonas de mineralización sondeada de tipo pórfido cuprífero, ubicadas en la vertiente sur del área muestreada (figuras 1g-1j). El agua subterránea está en contacto directo con la mineralización (Soto, 2010).

4 Resultados y discusión

4.1 Control de calidad y estadística univariable

El control de calidad a partir de estándares, duplicados de terreno y analíticos, disminuye el número de variables a 45 en la Zona 1, 50 en la Zona 2 y 56 en la Zona 3.

La estadística univariable comienza con el cálculo de los estadígrafos básicos (media, desviación estándar, percentiles, etc.). A partir de ellos, se realiza una búsqueda de valores *outliers*, eliminando una muestra para las bases de datos de las zonas 1 y 2. De este modo, las muestras se reducen a 313 en la Zona 1, 416 para la Zona 2 y 575 en la Zona 3. Posteriormente se realizan mapas de cada variable, en donde se observa un fuerte sesgo (error analítico) de los datos a lo largo de la dirección E-W (preferentemente para elementos químicos).

4.2 Estadística multivariable

Examinando los coeficientes de correlación de Pearson, se determina una baja correlación entre elementos químicos y compuestos de hidrocarburo. Por esto, la subsiguiente estadística multivariable se analiza por separado.

La estadística multivariable se realiza por Análisis de componentes principales (ACP), el cual tiene como objetivo crear variables sintéticas (o factores) mediante la combinación lineal de las variables originales. Tales factores no tienen correlación y se ordenan decrecientemente según la información que contienen.

A través del ACP se separan distintas poblaciones multivariadas de datos. Para las zonas 2 y 3 (levemente para la zona 1), se evidencia el sesgo analítico E-W en los elementos químicos. En cuanto a la delimitación de anomalías por medio de los factores, las anomalías no son claras y persiste la reproducción del sesgo analítico.

4.3 Geoestadística – Kriging factorial

El Kriging factorial (KF) es un método geoestadístico que combina el ACP con el modelamiento y la estimación espacial. Esto permite estudiar e interpretar datos multivariados, considerando la información espacial y estructural que contienen. El KF se realiza mediante tres pasos:

- Análisis variográfico multivariable, a través de un modelo lineal de correogionalización.
- Descomposición de las variables en factores espacialmente no correlacionados que sintetizan la información.
- Estimación de los factores por co-kriging.

A partir de los datos originales se realizan los variogramas en dos direcciones principales: N90° (dirección E-W), con el fin de modelar y aislar el sesgo analítico reconocido, y N0° (dirección N-S). En base a los variogramas experimentales, se ajustan modelos anidados, considerando estructuras esféricas de distintos alcances (corto alcance, alcance local y alcance regional), además de un efecto

pepita que corresponde a ruido y/o errores de medición.

Estas estructuras corresponden a los modelos teóricos que se han elegido para modelar los variogramas experimentales simples y cruzados de las diferentes variables. A partir de cada una de las estructuras modeladas se descomponen tres factores, cuyo porcentaje de varianza explicada se observa en la Tabla 1:

Tabla 1. Porcentaje de varianza para los factores obtenidos mediante KF, para cada estructura de los tres prospectos.

Área	Estructura	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Zona 1	Local	86.5%	13.1%	0.29%
	Regional	91.2%	8.8%	0.02%
	Corto alcance	67.7%	22.2%	8.9%
Zona 2	Local	65.3%	32.1%	2.1%
	Regional	81.8%	12.1%	6.1%
	Corto alcance	79.1%	15.9%	4.4%
Zona 3	Local	89.7%	5.3%	3.7%
	Regional	72.3%	18.4%	7.6%
	Corto alcance	89.2%	7.0%	2.5%

La estimación mediante co-kriging se realiza en una grilla de 100×100 m, obteniendo mapas de distribución (Figura 1) para los factores y estructuras descritas en la Tabla 1. La estructura de corto alcance refleja, para las tres zonas y en todos los factores asociados, el sesgo analítico (ej. Figura 1a), el cual está filtrado de mejor manera en las estructuras de alcance local (ej. figuras 1b, 1d, 1e, 1g y 1h).

Para la Zona 1 (figuras 1a-1c), se muestran los primeros factores para las tres estructuras. En la estructura local (figura 1b) es posible delimitar dos anomalías de contraste puntuales en el centro-sur y sureste del área. La estructura regional (figura 1c) refleja una anomalía aparente al sur del área, reconocida también en los datos originales.

En la Zona 2 (figuras 1d-1f), se observan dos anomalías de contraste en los factores 1 y 2 de la estructura local. La anomalía del factor 1, al parecer está influenciada por un valor *outlier* de carácter multivariable, que no fue identificado anteriormente. La anomalía del factor 2 se ubica hacia el norte de la zona de mineralización conocida. La relevancia de ella dependerá de los elementos que caractericen a este factor y de la geología del área.

La Zona 3 (figuras 1g-1j) muestra, en los factores 1 y 2 de la estructura local (Figuras 1g-1h), dos anomalías de contraste puntuales al sureste y al sur de una de las zonas de mineralización conocida. El origen geoquímico de estas anomalías debe analizarse con los elementos representativos de estos factores, entre otros parámetros.

5 Conclusiones

A través de un análisis variográfico y de la utilización de KF es posible separar componentes asociadas a errores de medición y a escalas espaciales diferentes (local y regional).

Se determina que la influencia del sesgo analítico ha sido aislada de las estructuras de alcance local, permitiendo delimitar algunas anomalías de contraste positivas, que no

eran diferenciables en los datos originales tratados con estadística uni- y multivariable. En las estructuras de alcance regional se mantiene de manera más evidente el sesgo analítico. No obstante, podrán utilizarse en la interpretación y diferenciación de anomalías de contraste positivas, de anomalías aparentes. La interpretación conjunta con los elementos químicos que representan a los factores y estructuras obtenidas mediante el KF, entregará una visión geoquímica de la naturaleza de las anomalías de contraste obtenidas.

Agradecimientos

Se agradece a CODELCO – Chile, quien financió totalmente el Proyecto Ore Hound 2330-2. Adicionalmente el primer autor agradece el financiamiento parcial de CONICYT a través del Proyecto Fondecyt 1090013.

Referencias

Cameron, E.; Leybourne, M.; Kelley, D. 2002. Exploring for deeply covered mineral deposits: Formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface flooding of mineralized groundwaters. *Geology* 30(11): 1007-1010.

García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., Hérial, G. 2004. Hoja Arica, Región de Tarapacá, escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N° 84. Servicio Nacional de Geología y Minería: 149 p. Santiago.

Goovaerts, P. 1992. Factorial kriging analysis: A useful tool for exploring the structure of multivariate spatial soil information. *J. Soil Science* 43(4): 597-619.

Hamilton, S. 1998. Electrochemical mass-transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain. *J. Geochem. Explor.* 63: 155-172.

Naranjo, J.; Puig, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama, escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N°62-63. Servicio Nacional de Geología y Minería: 140 p. Santiago.

Sandjiv, L. 1984. The factorial kriging analysis of regionalized data - Its application to geochemical prospecting. In *Geostatistics for Natural Resources Characterization* (Verly, G., Journel, A. G. & Maréchal, A. eds.), Reidel: 559-571. Dordrecht.

Soto, M.C. 2010. Hidrogeología e hidrogeoquímica de aguas subterráneas en el Distrito Inca de Oro, Región de Atacama: procesos de interacción agua-roca y dispersión geoquímica. Tesis de magister, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 199 p.

Taylor, C.; Kesler, S.; Clocke, P. 1982. Sulfur gases produced by the decomposition of sulfide minerals: application to geochemical exploration. *J. Geochem. Explor* 17: 165-185.

Townley, B., Puig, A., Ojeda, G., Luca, R., Vargas, T., LeRoux, J. 2007. Understanding real time processes behind the development of surface geochemical expressions from ore bodies beneath cover: source to surface and detection by means of collector devices. In *Decennial International Conference on Mineral Exploration*; N° 5: 4 p. Toronto, Canada.

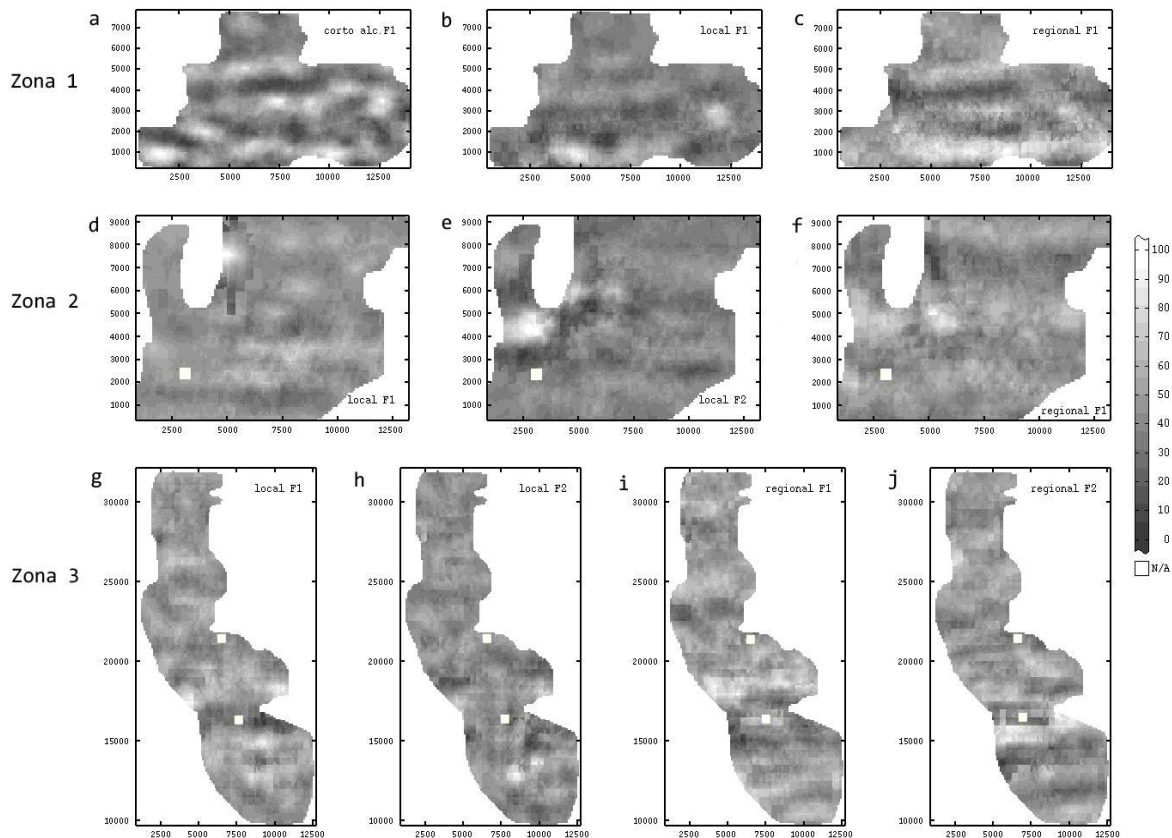


Figura 1. Mapas de distribución de factores obtenidos por modelación y estimación de KF. **Zona 1:** 1a) Factor 1, estruct. corto alcance; 1b) Factor 1, estruct. local; 1c) Factor 1, estruct. regional; **Zona 2:** 1d-1e) Factores 1 y 2, estruct. local; 1f) Factor 1, estruct. regional; **Zona 3:** 1g-1h) Factores 1 y 2, estruct. local; 1i-1j) Factores 1 y 2, estruct. regional. Cuadros blancos: áreas de mineralización conocida.