

Aplicación integrada de la estadística multivariada y análisis fractal a datos litogeoquímicos en el distrito metalogénico Dora-Francisco, Pinar del Río

Integrated application of multivariate statistics and fractal analysis to lithogeochemical data at the metallogenic district Dora-Francisco in Pinar del Río

Amadú Baldé¹, José Francisco Lastra-Rivero¹

¹Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, Pinar del Río, Cuba.

Resumen

Se realizó una reinterpretación integral del metalotecto geoquímico en el distrito metalogénico Dora-Francisco. El punto de partida fue la delimitación, composición y disposición espacial de las anomalías litogeoquímicas y su vínculo con los diferentes estilos de mineralización exhalativo-sedimentaria (SEDEX). Para ello se preparó una base de datos con los resultados analíticos de Ag, Ba, Cu, Co, Mo, Pb y Zn en muestras litogeoquímicas de la región de estudio. Mediante el análisis de factores se clasificaron estas variables geoquímicas simples y se obtuvieron dos nuevas variables geoquímicas complejas, cada una representativa de un estilo de mineralización: pirito-polimetálica estratiforme y de *stockwork* cuprífero. El análisis fractal por el método concentración-área se usó para estimar el límite fondo-anomalía (umbral anómalo) de las variables complejas, dando lugar a los mapas geoquímicos complejos. Los resultados de la cartografía de estas anomalías geoquímicas representan a cada metalotecto geoquímico vinculado con su estilo de mineralización, lo que sirve de base para su integración a otros metalotectos (litológico, estructural, mineralógico, geomorfológico) con el objetivo de crear mapas de favorabilidad mineral.

Palabras clave: depósitos SEDEX; anomalías geoquímicas; análisis estadístico multivariado; análisis fractal; metalotecto geoquímico.

Abstract

An integrated re-interpretation of the geochemical metallogenic district was carried out at Dora-Francisco metallogenic district. The spatial disposition, delimitation, and composition of litho-geochemical anomalies and its link with the different styles of exhalative-sedimentary mineralization (SEDEX) were the starting point. A database was prepared with the analytical results of Ag, Ba, Cu, Co, Mo, Pb and Zn in litho-geochemical samples of the study region. These simple geochemical variables were classified by analyzing the factors and two new complex geochemical variables were obtained, each one representative of a mineralization style: stratiform pyrite-polymetallic and copper stockwork. The fractal analysis by the concentration-area method was used to estimate the background-anomaly limit (threshold) of the complex geochemical variables, giving rise to the complex geochemical maps. The results of the cartography of these geochemical anomalies represent each geochemical metallogenic type linked to its mineralization style, which is the basis for its integration to other metallogenic (lithological, structural, mineralogical, and geomorphological) in order to create maps of mineral favorability.

Keywords: SEDEX deposits; geochemical anomalies; multivariate statistical analysis; fractal analysis; geochemical metallogenic.

1. INTRODUCCIÓN

En la provincia de Pinar del Río se han desarrollado numerosas investigaciones, tanto geológicas dirigidas a la prospección y exploración de depósitos minerales metálicos, como geoquímicas referidas a la evaluación de las potencialidades metalíferas de diferentes regiones, como aspecto preliminar para la orientación de la prospección de varios tipos genéticos de yacimientos minerales.

El distrito metalogénico Dora-Francisco ha sido objeto de varios trabajos de prospección durante más de 40 años, todos ellos dirigidos a establecer criterios que contribuyan a comprender los estilos de mineralización presentes y, consiguientemente, a una orientación más efectiva de las perforaciones en los sectores en que han confluído varios índices de prospección.

Burov y otros investigadores (1985) realizaron el levantamiento geológico a escala 1:50 000 de la región noroeste de Pinar del Río, que incluyó a la zona ubicada por el distrito metalogénico Dora-Francisco. Estos trabajos incluyeron tareas vinculadas con la búsqueda acompañante de depósitos sulfurosos, ofreciendo resultados analíticos de varias muestras

litogeoquímicas. Esta información sirvió de base a trabajos de pronóstico metalogénico regional ejecutados en años posteriores por Fernández de Lara (1993) y Lastra (1998), auxiliándose para ello de la utilización de programas expertos.

Lastra (2001) propone una metodología para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa basada en la utilización combinadas de programas expertos y técnicas estadísticas multivariadas.

João-Mateus (2002) retoma estos procedimientos para el pronóstico metalogénico regional, haciendo uso de métodos de superposición de los resultados del procesamiento de los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos, validando sus resultados en un sector de prospección a escala 1:10 000.

En años sucesivos se le ha prestado mucha atención al procesamiento de datos geoquímicos a escala regional dirigidos a delimitar con mayor efectividad las anomalías geoquímicas significantes, tanto las monoelementales como las complejas. Esto ha estado enfocado a la obtención de información confiable que posibilite la revelación de áreas con potencialidades metalíferas.

Las propuestas realizadas por Carranza (2009) en relación con procedimientos alternativos para la estimación de los umbrales anómalos se pueden considerar una guía muy efectiva para delimitar las anomalías geoquímicas significantes.

Huang y Zhao (2015) ofrecen un ejemplo de aplicación de los modelos multi-fractales para revelar anomalías geoquímicas de Cu, Au y Zn que podrían ser útiles en la identificación de áreas donde podrían desarrollarse depósitos tipo MVT.

1.1. Ubicación geográfica

El distrito metalogénico Dora-Francisco se localiza en la hoja topográfica Dimas, en la que se encuentra emplazado. Es limítrofe con los municipios Minas y Guane, provincia de Pinar del Río, y se ubica a 50 km al oeste de la capital provincial, a 20 km de la industria minera Matahambre-Santa Lucía y a 24 km del pueblo de Mantua (Figura 1).

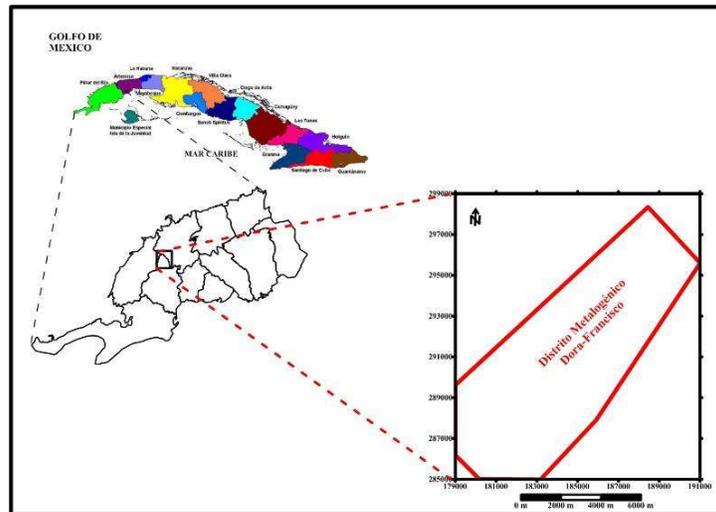


Figura 1. Localización geográfica del área de trabajo.

1.2. Situación geológica

Desde el punto de vista geológico, esta región forma parte de la zona estructuro-facial Guaniguanico, subzona Sierra de los Órganos. Está integrado por depósitos terrígenos del Jurásico Inferior-Jurásico Superior (pre-Oxfordiano), un complejo terrígeno-carbonatado del Jurásico Superior (Oxfordiano)-Cretácico Inferior, rocas del Paleógeno representado por un complejo olistostrómico que incluye rocas carbonatadas, clásticas y vulcanógeno-sedimentarias, y depósitos del Cuaternario (Figura 2).

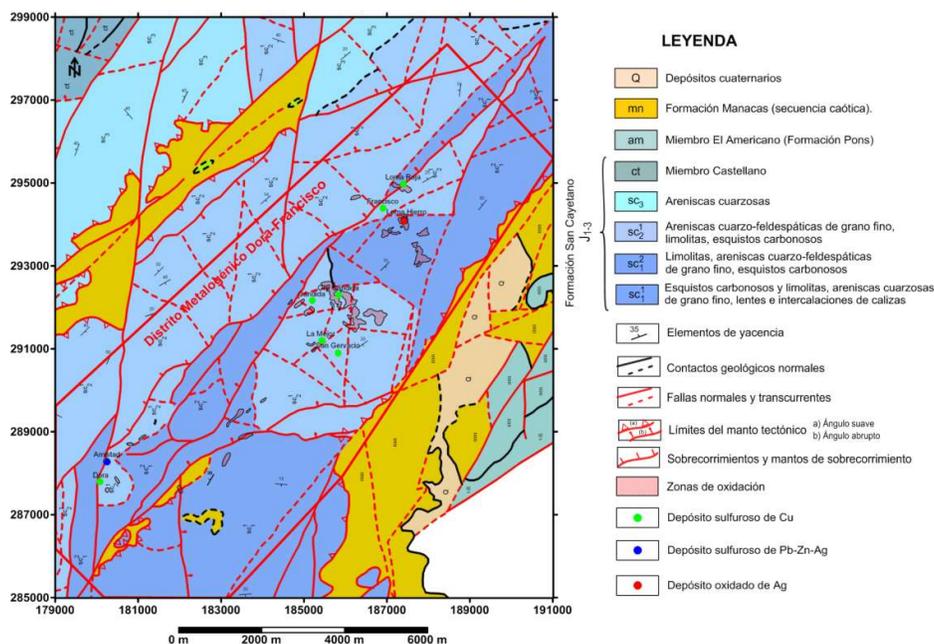


Figura 2. Mapa geológico del área de trabajo (digitalizado de Burov *et al.* 1985).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos geoquímicos disponibles fueron obtenidos del muestreo litogeoquímico realizado por Burov y demás colaboradores (1985), como parte de los trabajos de levantamiento geológico a escala 1:50 000 realizados en la región de estudio. En total se incluyen los resultados de análisis espectral de 959 muestras litogeoquímicas, con una distribución espacial homogénea y aleatoria de 50 muestras/km² (Figura 3).

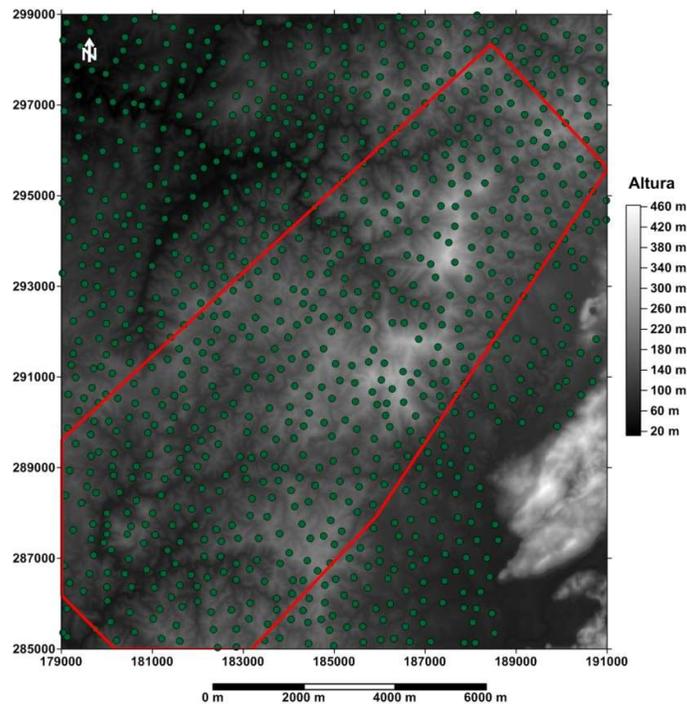


Figura 3. Mapa de distribución espacial de las muestras litogeoquímicas sobre imagen del modelo digital de terreno.

La base de datos geoquímica fue preparada en formato Excel, con una estructura que incluye: coordenadas de los puntos de muestreo, número de muestra y contenidos de cada uno de los elementos indicadores y exploradores de mineralización tipo SEDEX (Ag, Ba, Co, Cu, Mo, Pb y Zn).

Con la finalidad de clasificar los elementos indicadores y exploradores, en correspondencia con el estilo de mineralización al que se asocian con preferencia y la consiguiente posibilidad de obtener variables geoquímicas complejas, se seleccionó el análisis de factores dada la efectividad demostrada en el procesamiento estadístico multivariado de los datos geoquímicos.

El análisis de factores permite simplificar una serie de datos mediante la identificación de uno o más "factores" que pueden explicar las dimensiones asociadas con la variabilidad de los datos (Kelepertsis, Argyraki y

Alexakis 2006). La "carga" de cada variable dentro del factor posibilita el reconocimiento de agrupaciones que son expresión de asociaciones de elementos compatibles con una misma fuente o proceso.

Yousefi, Kamkar-Rouhani y Carranza (2014) expresan que debido a que el análisis de factores puede producir más de un factor en un conjunto de datos de sedimentos fluviales se plantea el reto de cómo reconocer el factor que mejor indica la presencia del mineral de un tipo depósito buscado.

Una premisa sobre la aplicación del análisis de factores lo constituye el trabajo realizado por Melchior, Dejanghe y Hughes (1996) como parte de una investigación geoquímica y microbiológica de los suelos que incluyó Au, Fe, Ni, Cr, Zn, Ba, V, As, Cu, Mn, Y, Sb, Pb, logrando la separación de los elementos según el papel que estos juegan en este sistema geoquímico. De esta manera define el papel que juegan los diferentes factores como controladores de las concentraciones de diferentes elementos y, conocido el posible comportamiento geoquímico de estos, concreta las funciones que realizan en conjunto en este sistema multivariado.

Lastra (1998) hace uso del análisis de componentes principales (PCA) para datos litogeoquímicos en la manifestación Oro Cándida y de suelos en el sector de prospección Loma Roja-Loma de Hierro. Los resultados obtenidos contribuyeron a la definición de variables complejas asociadas a los estilos de mineralización de los depósitos tipo SEDEX en esta región.

Dados los estilos de mineralización que se expresan en el modelo genético de depósitos SEDEX se presupone la obtención de dos variables geoquímicas complejas durante la aplicación del análisis de factores: factor 1 y factor 2. Con la finalidad de lograr una mejor agrupación de las variables geoquímicas simples se optó por realizar la extracción de los factores con rotación varimax, según lo propuesto por Kelepertsis, Argyraki y Alexakis (2006) y Yousefi, Kamkar-Rouhani y Carranza (2014).

Como resultado final de este procesamiento estadístico multivariado son obtenidas las cargas y puntuaciones de cada variable geoquímica compleja; las cargas permiten establecer las asociaciones geoquímicas que representan a cada estilo de mineralización, mientras las puntuaciones representan los valores de estas nuevas variables geoquímicas complejas.

Adicionalmente, se adopta la propuesta realizada por Yousefi, Kamkar-Rouhani y Carranza (2014) de transformar las puntuaciones de las variables geoquímicas complejas, mediante una función logística fuzzy, de manera tal que los valores caigan en el intervalo $[0,1]$, lo cual es coherente con el concepto de favorabilidad. A los resultados de esta transformación le denominaron índices de favorabilidad geoquímica de mineralización (IFGM), y se expresan a través de la expresión siguiente:

$$f(x) = e^x/(1+e^x) \quad (1)$$

donde:

X: valor de la variable geoquímica compleja (puntuación de cada factor).

Estos resultados se adicionan a la base de datos original con vistas a su procesamiento posterior.

De los métodos de estimación de los umbrales anómalos propuestos en la literatura fue seleccionado el análisis fractal por el método concentración-área. Este se fundamenta en el carácter lineal (log-log) que se manifiesta en la relación entre los valores de la variable geoquímica compleja y el área contorneada por cada una de ellas, siempre que no existan otros fenómenos superpuestos que afecten esta tendencia.

Así, en este caso los datos geoquímicos de las variables geoquímicas complejas, previamente transformados por la función logística fuzzy, han de ser convertidos en redes regulares de valores de 25 x 25 m empleando métodos geoestadísticos (variografía y kriging).

Un ejemplo de este procedimiento lo muestra Carranza (2009) en el procesamiento de contenidos de Fe (%) en suelos (Figura 4).

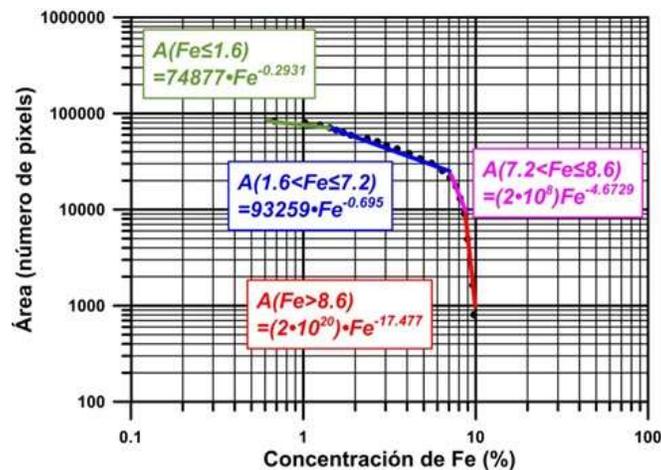


Figura 4. Diagrama concentración-área de contenidos de Fe (%) en suelos (Carranza 2009).

Las ecuaciones de las líneas rectas representadas responden a las expresiones que relacionan el área encerrada por determinado valor de concentración de Fe (píxeles) para los límites establecidos por los puntos alineados, según:

$$A(v) = C v^{-\alpha} \quad (2)$$

donde:

$A(v)$: Área contorneada por la concentración de la variable geoquímica

v : Concentración de la variable geoquímica

α : Pendiente de la línea recta ajustada en un gráfico log-log (concentración-área)

C : Constante.

Los puntos significativos que marcan rupturas en las líneas rectas corresponden a valores de contenidos de Fe (%) de 1,6; 7,2 y 8,6 %, siendo interpretados los dos últimos como límites fondo-anomalía a diferentes niveles.

La medición de las áreas contorneadas por diferentes valores de contenidos se ejecutará sobre la base de la cantidad de píxeles que cumplan con las condiciones de frontera establecidas. Con estos fines se construyen histogramas de los valores estimados de cada variable geoquímica compleja (transformación logística fuzzy de las puntuaciones de los factores), mediante los cuales se obtienen las frecuencias de diferentes intervalos de clases. Con auxilio de estos resultados se elabora una hoja de cálculo en Excel que permite contabilizar la cantidad de píxeles incluidos en estas fronteras, generándose así los pares de valores que son representados en los diagramas concentración-área con escalas logarítmicas.

La finalidad de este procedimiento gráfico consiste en visualizar los modelos multifractales, expresados en cambios más o menos significativos de las inflexiones o rupturas de las líneas ajustadas por el método de los mínimos cuadrados. De estas se derivarán los umbrales anómalos, a partir de los límites observados como parte de la interrupción de la continuidad lineal definida para cada dimensión fractal, según lo indicado por Carranza (2009).

Finalmente se hace una reclasificación de las anomalías geoquímicas, mediante la asignación de valores comprendidos entre 0-4 al fondo geoquímico y los niveles anómalos estimados por este método, de la forma siguiente:

Categoría geoquímica	Clasificación
Fondo	0
Primer nivel anómalo	1
Segundo nivel anómalo	2
Tercer nivel anómalo	4

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del análisis de factores a los datos litogeoquímicos disponibles permitió la agrupación de estas en dos grupos fundamentales, atendiendo a las cargas de los factores resultantes de este procesamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Cargas de los factores con rotación varimax

Variable geoquímica	Cargas	
	Factor 1	Factor 2
Ba	0,074	0,135
Co	0,101	0,611
Pb	0,911	0,097
Zn	0,889	0,068
Ag	0,674	0,017
Cu	0,151	0,532
Mo	0,045	0,767

Estos resultados se corresponden con la distribución de los diferentes estilos de mineralización definidos a través del modelo de depósitos SEDEX, de manera tal que las asociaciones de elementos indicadores y exploradores de cada uno de ellos pueden ser reflejadas con las variables geoquímicas complejas obtenidas: factor 1 y factor 2.

En resumen, se pueden interpretar estos resultados de la siguiente manera:

Factor 1: Asociación Pb-Zn-Ag, vinculada con la mineralización estratiforme pirito-polimetálica.

Factor 2: Asociación Cu-Mo-Co, vinculada con la mineralización de stock-work cuarzo-cuprífero.

Los resultados de la aplicación de la variabilidad espacial de las transformaciones fuzzy de las puntuaciones de los factores se presentan en la Figura 5.

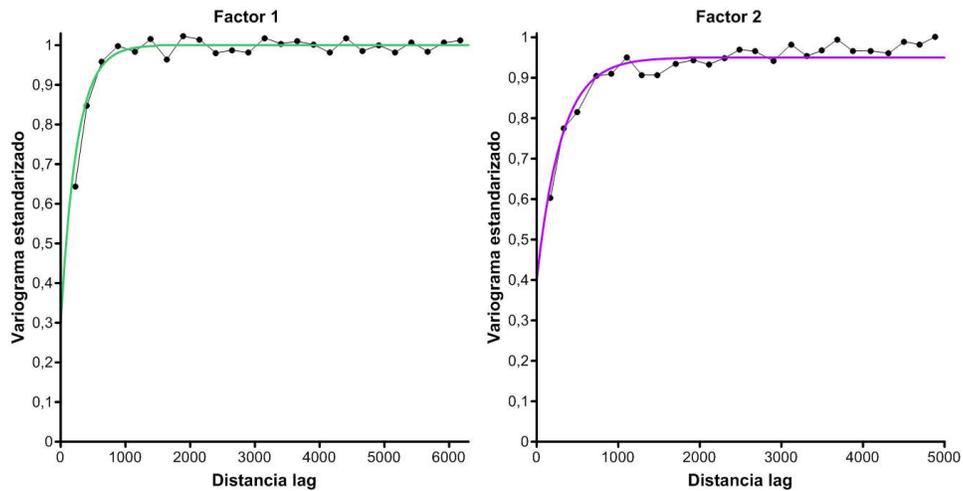


Figura 5. Semivariogramas de la transformación logística fuzzy de las variables geoquímicas complejas factor 1 y factor 2.

En ambos semivariogramas se puede apreciar el ajuste de un modelo teórico esférico con efecto de pepita a los semivariogramas experimentales. Estos sirven de base a la estimación espacial de estas variables geoquímicas complejas, lo que conduce a la obtención de una red regular de 25x25 m en todo el espacio analizado geoestadísticamente por el interpolador insesgado kriging.

Los resultados de estas estimaciones espaciales son representados mediante histogramas, en los que se aprecia una distribución regular de los valores de estas variables, aunque con algunas distinciones entre ellas en lo que respecta al ajuste probabilístico al modelo de distribución normal. Mientras el histograma de la variable geoquímica factor 1 muestra una forma simétrica que permite presuponer el ajuste de sus valores a un modelo de distribución normal, la variable geoquímica compleja factor 2 manifiesta una asimetría de sus valores que está más en correspondencia con un modelo de distribución lognormal (Figura 6).

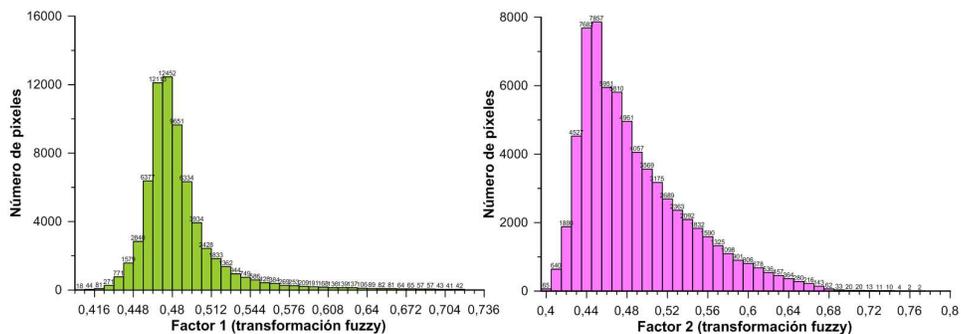


Figura 6. Histograma de la transformación logística fuzzy de las variables geoquímicas complejas factor 1 y factor 2 (estimación espacial por kriging).

Estos histogramas sirven de base al conteo de los píxeles con vistas a la aplicación del análisis fractal por el método concentración-área para la estimación de los umbrales anómalos.

Las líneas representativas de cada dimensión fractal son ajustadas por el método de los mínimos cuadrados para los intervalos marcados (Figura 7).

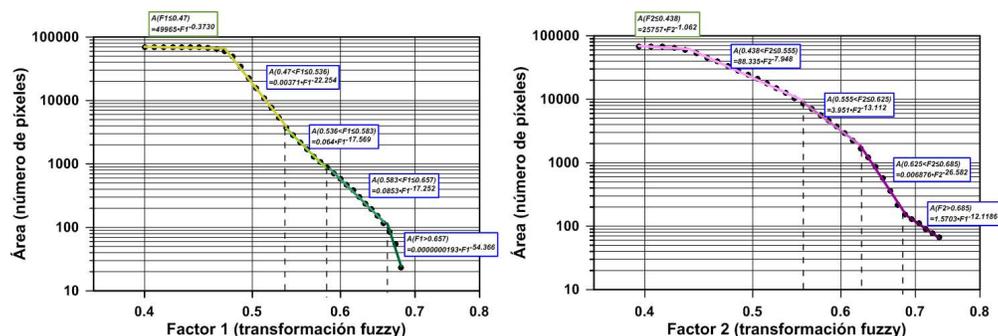


Figura 7. Diagramas concentración-área de la transformación logística fuzzy de las variables geoquímicas complejas factor 1 y factor 2 (estimación espacial por krigging).

A su vez, las rupturas de la linealidad permiten definir valores que representan los umbrales anómalos de cada variable geoquímica compleja (Tabla 2).

Tabla 2. Umbrales anómalos estimados para las transformaciones fuzzy de las variables geoquímicas complejas factor 1 y factor 2 mediante los diagramas concentración-área

Variables geoquímicas	Umbrales anómalos		
	Bajo	Medio	Alto
Factor 1	0,536	0,585	0,657
Factor 2	0,555	0,625	0,685

Estos valores se tienen en cuenta al clasificar el metalotecto geoquímico para cada estilo de mineralización, confiriéndole los valores 0, 1, 2 y 4. De esta clasificación resultan dos representaciones cartográficas, cada una de las cuales identifica un estilo de mineralización (Figuras 8 y 9).

El mapa del metalotecto geoquímico de mineralización pirito-polimetálica estratiforme (factor 1) identifica la presencia de una mayor extensión de las anomalías geoquímicas más intensas hacia la parte más septentrional y central del área. Se aprecian anomalías geoquímicas alargadas en dirección sureste-noroeste, en correspondencia con el rumbo de las secuencias sedimentarias que le sirven de alojadoras (Figura 8).

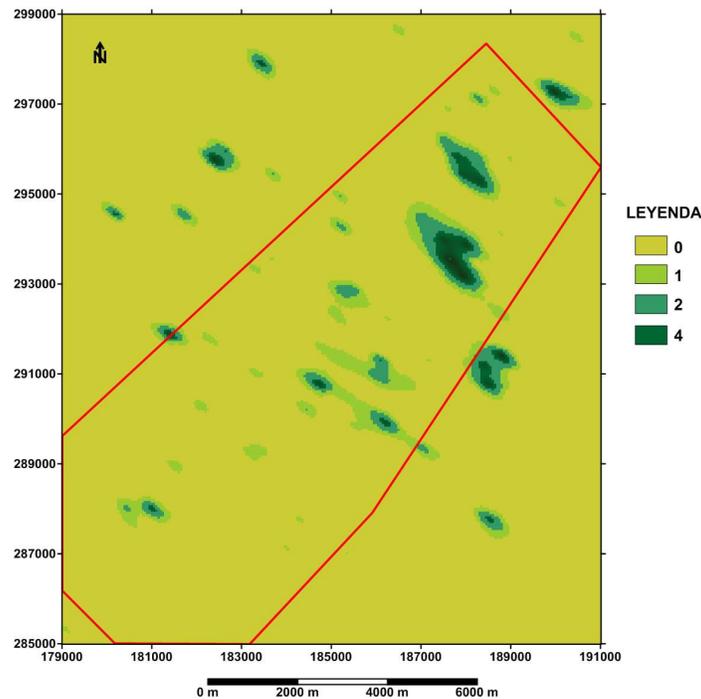


Figura 8. Representación cartográfica del metalotecto geoquímico de mineralización pirito-polimetálica estratiforme.

El mapa del metalotecto geoquímico de mineralización cuarzo-cuprífera de *stockwork* (factor 2) permite apreciar cómo se reducen las áreas, ubicándose las anomalías más intensas en la región central del mapa, también hacia los extremos noroeste y sureste del área. Las anomalías geoquímicas presentan una morfología irregular y una posición espacial que contrasta con las correspondientes al metalotecto geoquímico de mineralización pirito-polimetálica estratiforme. Se destaca una gran anomalía en la parte septentrional que se relaciona con la formación Manacas, la cual no está vinculada con mineralización cuprífera, sino que ha sido interpretada como de naturaleza litológica debido a la composición contrastante de la formación Manacas respecto a la formación San Cayetano (Figura 9).

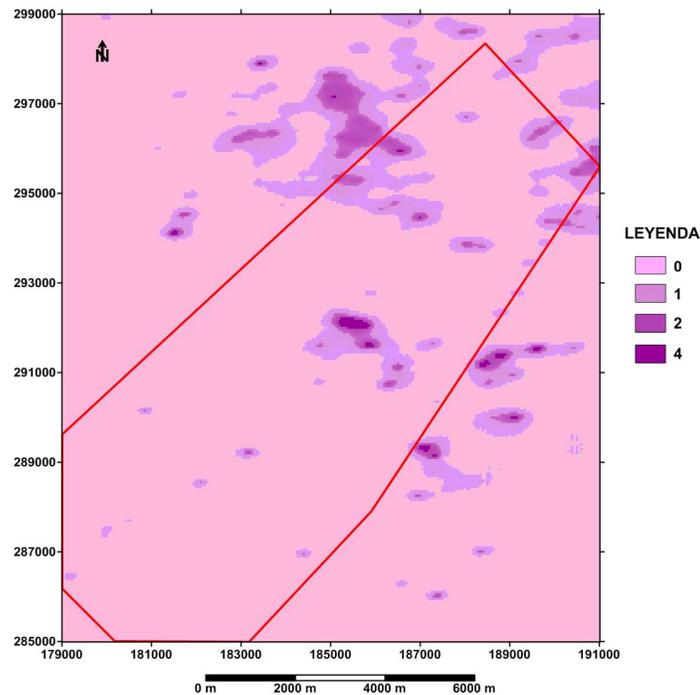


Figura 9. Representación cartográfica del metalotecto geoquímico de mineralización de cuarzo-cuprífera de *stockwork*.

Los resultados obtenidos de la aplicación integrada de la transformación logística fuzzy de las variables geoquímicas complejas factor 1 y factor 2 por el método de concentración-área permiten precisar los sectores de mayor favorabilidad mineral desde el punto de vista geoquímico.

4. CONCLUSIONES

- Las anomalías litogeoquímicas reveladas muestran un alargamiento preferencial sureste-noroeste, lo que corrobora la idea preliminar del vínculo de las zonas mineralizadas con el rumbo de las secuencias sedimentarias.
- Mediante la aplicación del análisis de factores a las variables geoquímicas simples fueron obtenidas dos variables geoquímicas complejas que resultan la expresión resumida de diferentes estilos de mineralización.

Factor 1: Asociación Pb-Zn-Ag, vinculada con la mineralización estratiforme piritó-polimetálica.

Factor 2: Asociación Cu-Mo-Co, relacionada con la mineralización de stock-work cuarzo-cuprífero.

- El análisis fractal demostró su efectividad para la estimación de los umbrales anómalos de las variables geoquímicas complejas, auxiliándose de la transformación logística fuzzy de sus valores.
- La representación cartográfica del metalotecto geoquímico en formato SIG posibilita su integración con las de otros metalotectos, con lo cual resultará más confiable la obtención de un mapa de favorabilidad mineral.

5. REFERENCIAS

- Burov, V.; Martínez, D.; Yusainov, Y.; Fernández, R.; Dervenev, V. y Uspensky, A. 1985: Informe de los trabajos de levantamiento geológico a escala 1:50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río en 1981-85. Oficina Nacional de Recursos Minerales, La Habana.
- Carranza, E. J. M. 2009: Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. In: *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*. Vol. 11. Oxford, USA: Elsevier, 351 p.
- Fernández, R. 1993: *Confeción del mapa pronóstico, asistido por métodos matemáticos, para la mineralización sulfurosa en el distrito metalogénico Dora-Francisco en Pinar del Río*. Tesis doctoral. Inst. Sup. Polit. José A. Echevarría, La Habana, 125 p.
- Huang, J. y Zhao, P. 2015: Application of a multi-fractal model for identification of Cu, Au and Zn anomalies in Western Yunnan, Southwestern China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15(1): 54-61.
- João-Mateus, A. C. 2002: *Procedimiento para el pronóstico metalogénico y su validación en sectores de prospección*. Tesis de maestría. Universidad de Pinar del Río, 64 p.
- Kelepertsis, A.; Argyraki, A. y Alexakis, D. 2006: Multivariate statistics and spatial interpretation of geochemical data for assessing soil contamination by potentially toxic elements in the mining area of Stratoní, north Greece. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 6(4): 349-355.
- Lastra, J. F. 1998: *Criterios geoquímicos para la prospección de mineralización sulfurosa en el distrito metalogénico Dora-Francisco*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río, 100 p.
- Lastra, J. F. 2001: Pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa en el distrito metalogénico Dora Francisco, Cuba occidental. *Minería y Geología*, 18(3-4): 11-19.

Melchior, A.; Dejanghe, L. y Hughes, G. 1996: A geomicrobiological study of soils collected from auriferous areas of Argentina. *Journal of Geochemical Exploration*, 56(3): 219-227.

Yousefi, M.; Kamkar-Rouhani, A. y Carranza, E. J. M. 2014: Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14(1): 45-58.

Recibido: 17/07/17

Aceptado: 18/12/17

Amadú Baldé, Ingeniero Informático. Estudiante de Maestría en Geología. Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, Cuba
amadu.balde@estudiantes.upr.edu.cu