

ANÁLISIS VARIOGRÁFICO DE LOS PORCENTAJES DE SÍLICE, ALÚMINA, PÉRDIDA POR CALCINACIÓN, FÓSFORO Y MANGANESO EN LAS MENAS DE MINERAL DE HIERRO DEL CERRO SAN JOAQUÍN, MUNICIPIO BOLIVARIANO ANGOSTURA, ESTADO BOLÍVAR

Luis Araya¹; Isabel Llatas²

Forma de citar: Araya, L., y Llatas, I. 2015. Análisis variográfico de los porcentajes de sílice, alúmina, pérdida por calcinación, fósforo y manganeso en las menas de mineral de hierro del cerro San Joaquín, municipio bolivariano Angostura, estado Bolívar. Boletín de Geología, 37 (2): 89-95.

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto analizar los variogramas de las variables químicas que acompañan al mineral de hierro presente en el cerro San Joaquín, Ciudad Piar, estado Bolívar. La data utilizada corresponde a las campañas de sondeos exploratorios realizados en el cerro mencionado. La metodología aplicada en este estudio consistió primero en un análisis exploratorio estadístico de la composición química de las menas. Luego se construyeron mapas de variogramas para detectar las direcciones de anisotropía, y se calcularon los variogramas experimentales en la dirección principal y secundaria para cada variable. Finalmente, se ajustaron modelos de variogramas teóricos en los variogramas experimentales obtenidos. Los resultados establecen que la composición química es lognormal, con anisotropía geométrica paralela a la topografía con dirección principal en sentido noroeste – sureste, a excepción del manganeso que es noreste – suroeste. En dirección normal a la topografía la anisotropía es de tipo zonal. Los variogramas teórico transformados logarítmicamente fueron de tipo anidado exponencial-esférico con rangos de dependencia entre 120 m y 480 m. Se concluye que posiblemente el yacimiento esté conformado por estratificaciones mineralizadas de gran tamaño con una correlación espacial que disminuye gradualmente al aumentar la distancia de separación entre un punto y otro del estrato.

Palabras clave: cerro San Joaquín, variogramas, mineral de hierro, anisotropía.

VARIOGRAM ANALYSIS OF PERCENTAGES OF SILICA, ALUMINA, LOSS ON IGNITION, MANGANESE AND PHOSPHORUS IN THE IRON ORES OF CERRO SAN JOAQUIN, BOLIVARIAN MUNICIPALITY ANGOSTURA, BOLIVAR STATE

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the variograms of chemical variables that accompany iron ore present in the Cerro San Joaquin, Ciudad Piar, Bolívar state. The data used correspond to campaigns conducted exploratory wells on the hill above. The methodology used in this study was first exploratory statistical analysis of the chemical composition of the ores. Then Variogram map is constructed to detect the directions of anisotropy, and the experimental variograms were calculated on the primary and secondary directions for each variable. Finally, theoretical variogram models were fitted in the obtained experimental variograms. The results show that the chemical composition is lognormal, with geometric anisotropy parallel to the main direction in topography sense Northwest - Southeast, with the exception of manganese that is Northeast - Southwest. In the direction normal to the topography, anisotropy is zonal. The theoretical variograms were logarithmically transformed spherical nested exponential-type dependence with ranges between 120 m and 480 m. We conclude that the reservoir may be comprised of mineralized stratifications with large spatial correlation that gradually decreases with increasing distance between one point and another stratum.

Keywords: Cerro San Joaquín, variograms, iron ore, anisotropy.

¹ Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar, Escuela de Ciencias de La Tierra, Ciudad Bolívar, Venezuela - le.araya@udo.edu.ve

² Universidad Simón Bolívar, Centro de Estadística y Software Matemático (CESMa), Caracas Venezuela - llatas@usb.ve

INTRODUCCIÓN

El yacimiento en estudio es una concesión de C.V.G. Ferrominera Orinoco, C.A. en fase exploratoria. Se encuentra aproximadamente a 12 km al Sureste de Ciudad Piar, municipio Bolivariano Angostura, estado Bolívar. Muy cerca se encuentran las minas de los cerros San Isidro, Los Barrancos y Las Pailas (FIGURA 1).

El depósito del cerro San Joaquín pertenece a la Provincia Geológica de Imataca, de acuerdo a Menéndez (1968), clasificada dentro de las rocas de granos finos menores a 1 mm (Ascanio, 1985). Geológicamente son muy complejos, en la parte basal presentan cuarcitas ferruginosas bandeadas de origen Precámbrico, con porcentajes de hierro menores a 55%. En la parte superior se encuentran las menas residuales

con porcentajes mayores de 55% de hierro, originadas por el enriquecimiento supergénico del hierro en las cuarcitas ferruginosas al lixiviarse la sílice por la acción de la lluvia ocurrida en millones de años (Ruckmick, 1963; Ferencić, 1969). En la FIGURA 2 se presenta un corte de acuerdo a la explicación anterior.

Las variables químicas que se estudian principalmente en estas menas son los porcentajes de hierro (Fe), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), pérdida por calcinación (PPR) - que corresponde al porcentaje de agua de formación presente en la mena -, fósforo (P) y manganeso (Mn).

El objetivo de este trabajo es analizar los variogramas de los porcentajes químicos de la sílice, alúmina, pérdida por calcinación, fósforo y manganeso, presentes en las menas de hierro del cerro San Joaquín.

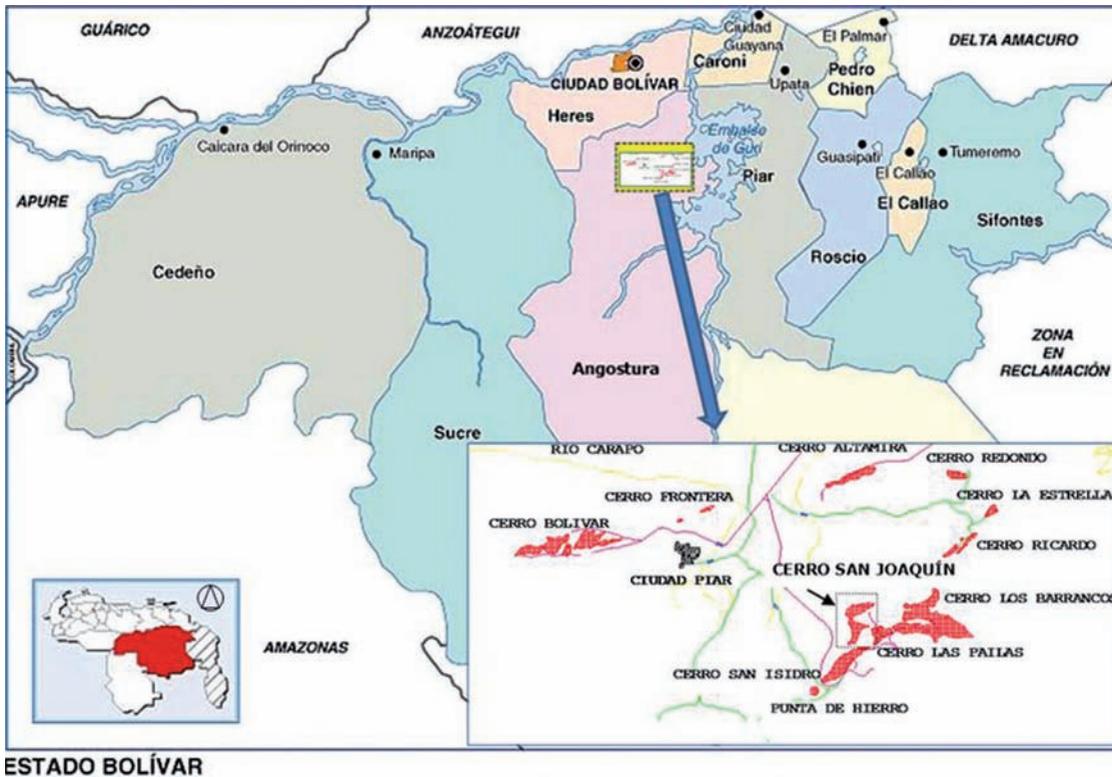


FIGURA 1. Mapa de ubicación del cerro San Joaquín. Modificado y ensamblado de Gobierno Bolivariano(S/F) y C.V.G. Ferrominera Orinoco, C.A. (1991).

TEORÍA Y MÉTODO

Principalmente el estudio fue descriptivo y correlacional (Palella y Martins, 2006), ya que se analizó la variabilidad de la muestra y su correlación espacial para obtener una estimación del comportamiento poblacional del yacimiento.

El estudio se realizó con la data de los 238 sondeos geológicos que en su conjunto representan al subsuelo del cerro San Joaquín. Estos se encuentran distribuidos espacialmente en una red de muestreo irregular de aproximadamente 60x60 m en 2,8 km de largo por 1,3 km de ancho. En el subsuelo los sondeos están divididos cada 2 m para un total de 5.849 intervalos.

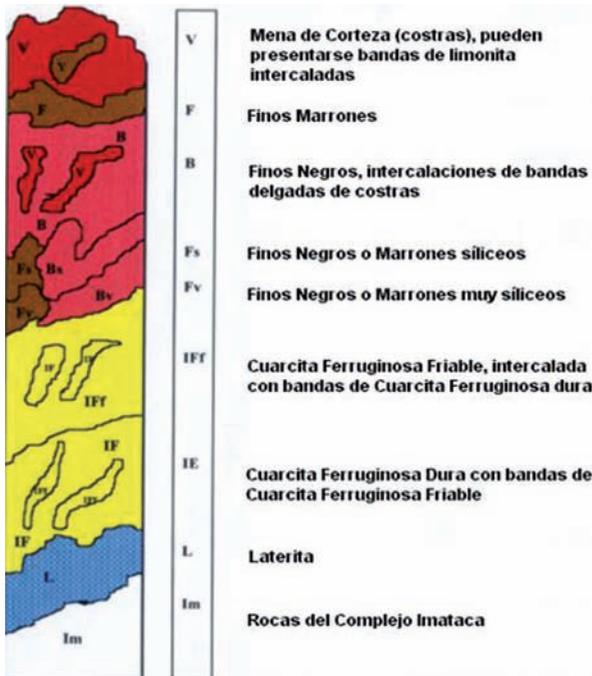


FIGURA 2. Corte litológico de los yacimientos de mineral de hierro. Tomado de C.V.G. Ferrominera Orinoco, C.A. (1991).

Los datos de las muestras provienen de los ensayos químicos a excepción del porcentaje de Fe que se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\%Fe = 0.7 [100\% - (\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%PPC + \%P + \%Mn)] \quad (1)$$

La ecuación (1) es una aproximación y procede de la siguiente forma: Primero se elimina del 100% en peso de la mena el porcentaje en peso de los elementos que conforman la ganga, quedando solamente el porcentaje de mineral de óxido de hierro (Fe_2O_3). Segundo, el resultado previo se multiplica por 0,7 para reducir el peso atómico del oxígeno según la relación molecular y de esta forma queda solamente porcentaje en peso del hierro (Fe).

Los grados químicos de SiO_2 , Al_2O_3 , PPR, P y Mn fueron sometidos a una exploración estadística inicial mediante el cálculo de la media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de asimetría para cada variable. Se estableció el grado de dependencia entre las variables mediante el cálculo de la correlación lineal.

Se consideró que los grados químicos son funciones aleatorias intrínsecas estacionarias, $Z(x)$, en donde los valores se consideran dependientes de la separación espacial que posean. Según Armstrong (1998), la

covarianza $C(h)$ para el conjunto de valores pares $Z(x)$ y $Z(x+h)$ a una distancia h de separación se define como:

$$C(h) = E[Z(x)Z(x+h)] - E(Z(x))^2 \quad (2)$$

Pudiéndose calcular ésta con los datos de la muestra en una dirección dada mediante la siguiente ecuación (Deutsch and Journel, 1998):

$$C(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} Z(x_i)Z(x_i+h) - m_x m_{x+h} \quad (3)$$

Donde x_i son las ubicaciones geográficas de las muestras, $N(h)$ es el número de pares, $Z(x_i)$ es el primer valor del par, $Z(x_i+h)$ es el segundo valor del par, m_x y m_{x+h} corresponden a las medias aritméticas del primer valor y segundo valor de los pares a una distancia h , respectivamente.

Para el análisis espacial se determinó el comportamiento contrario a la covarianza. Se calculó la varianza de los pares de datos separados por una distancia h , el cual se denomina variograma:

$$2\gamma(h) = Var[Z(x+h) - Z(x)] \quad (4)$$

Asumiendo la hipótesis intrínseca de Matheron (1965), la definición del variograma en este estudio corresponde a:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (5)$$

Para calcular los variogramas con los datos de los sondeos geoexploratorios se aplicó la fórmula del semivariograma experimental, definiéndolo Armstrong (1998) como:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (6)$$

El siguiente paso fue construir mapa de variogramas para cada variable química, con el fin de observar las direcciones de mayor y menor correlación espacial.

Se graficaron los variogramas experimentales para cada componente químico en función del crecimiento de h en las direcciones de mayor y menor continuidad espacial en el plano horizontal y vertical. Luego se determinó el modelo de variograma teórico (efecto pepita puro, esférico, exponencial, gaussiano, función potencia, cúbico, etc) que mejor se ajustaba a los variogramas experimentales. Este ajuste permitió determinar el rango o amplitud y la meseta que establecen el conocimiento de la zona de influencia espacial de los datos.

RESULTADOS

La muestra del yacimiento San Joaquín está conformada por diversos tipos de menas, costras, finos negros, finos marrones y cuarcita ferruginosa de forma abundante; y con poca presencia, limonita y canga. La laterita se considera un estéril, en la muestra hay muy poca presencia. Todos estos materiales contienen hierro (Fe) que varía de acuerdo a su contenido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), fósforo (P), manganeso (Mn) y pérdida por calcinación (PPC), la cual indica el agua de formación presente en la mena.

Los resultados de los estadísticos media, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de sesgo se presentan en la TABLA 1.

TABLA 1. Estadísticos del porcentaje químico.

%	\bar{X}	S	CV	CS	N
SiO_2	12,60	16,027	1,27	1,61	5.075
Al_2O_3	1,302	1,775	1,36	1,07	5.075
PPC	3,489	2,948	0,84	1,05	5.075
P	0,061	0,034	0,56	0,62	3.975
Mn	0,034	0,052	1,51	0,83	3.975

Estos resultados indican que el yacimiento tiene dos características primordiales en sus componentes químicos, alta variabilidad y muy asimétricos. Se presentan valores significativamente muy altos que afectan sensiblemente los resultados de los variogramas. Al transformarse logarítmicamente los datos, disminuyeron considerablemente los valores extremos.

La correlación lineal entre las diferentes variables químicas del yacimiento (TABLA 2) explica que la sílice tiene una relación directa muy fuerte con la variabilidad del tenor de hierro seco; además se observa la independencia entre la sílice y los otros componentes químicos.

TABLA 2. Correlación lineal entre los grados químicos.

	Fe	SiO_2	Al_2O_3	PPC	P	Mn
Fe	1	-0,8	-0,5	-0,4	-0,2	0
SiO_2	-0,8	1	-0,0	-0,2	-0,2	0
Al_2O_3	-0,5	-0,0	1	0,6	0,4	0,1
PPC	-0,4	-0,2	0,6	1	0,6	0
P	-0,2	-0,2	0,4	0,6	1	0,1
Mn	0	0	0,1	-0	0,1	1

Se presentan los resultados del ajuste del modelo de variograma teórico con transformación logarítmica de los porcentajes de SiO_2 , Al_2O_3 , PPR, P y Mn, respectivamente (FIGURAS 3 a 7). La curva verde corresponde a la dirección horizontal principal de anisotropía, la curva celeste a la dirección secundaria; y la curva de color azul corresponde a la dirección vertical.

En dirección horizontal (paralela a la topografía) se presenta anisotropía geométrica con dirección de mayor continuidad química N35°O para la sílice, N60°O para la alúmina, N35°O para la pérdida por calcinación, N55°O para el fósforo, y N75°E para el manganeso (FIGURAS 8 a 12). En dirección vertical se presenta anisotropía zonal en todos los porcentajes químicos.

La zona de dependencia espacial para los componentes químicos del yacimiento corresponde a un elipsoide con diferentes valores de radio o rango (TABLA 3).

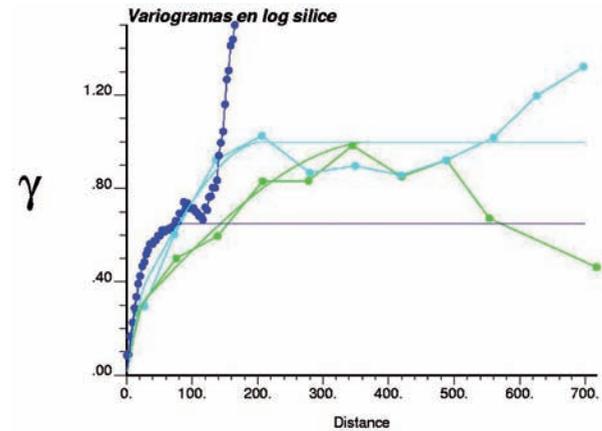


FIGURA 3. Variografía de la sílice.

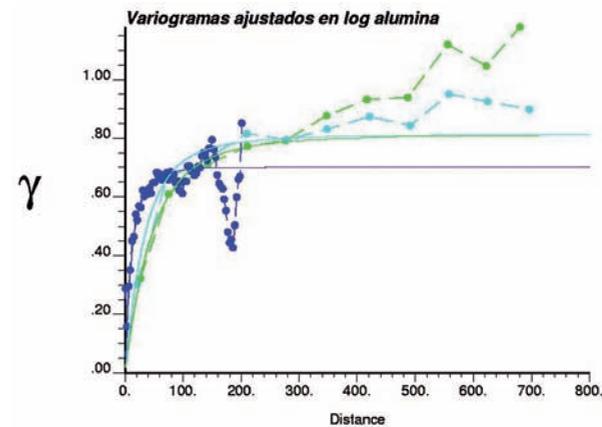


FIGURA 4. Variografía de la alúmina.

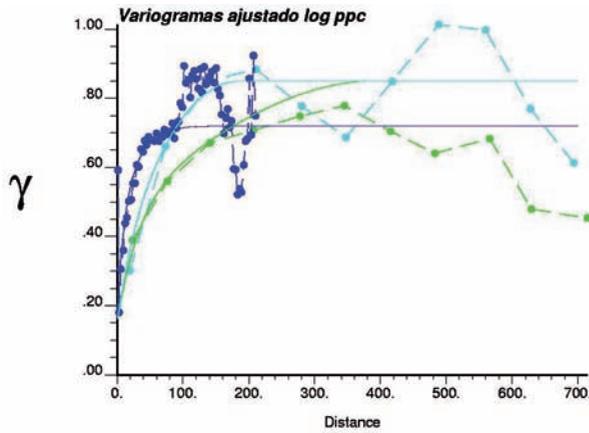


FIGURA 5. Variografía de la pérdida por calcinación.

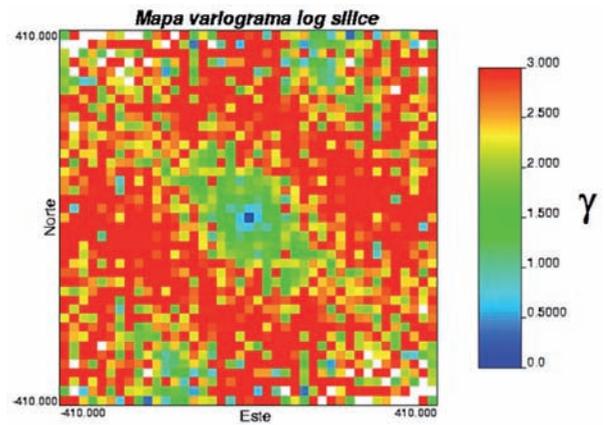


FIGURA 8. Dirección de anisotropía de la sílice.

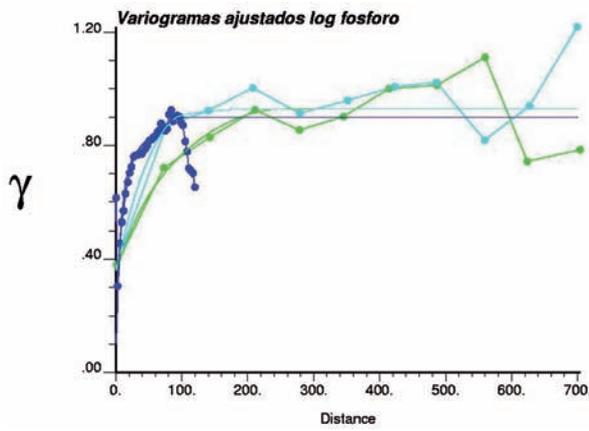


FIGURA 6. Variografía del fósforo.

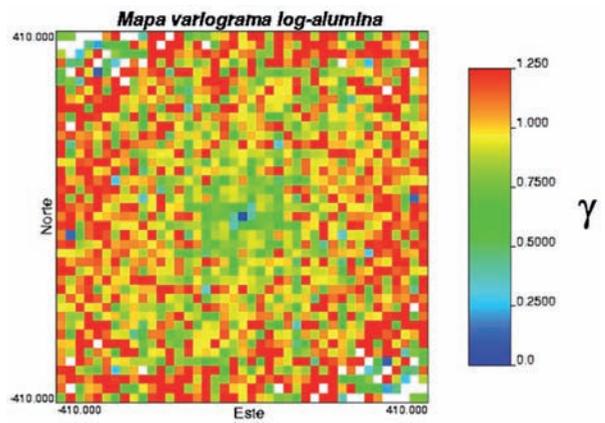


FIGURA 9. Dirección de anisotropía de la alúmina.

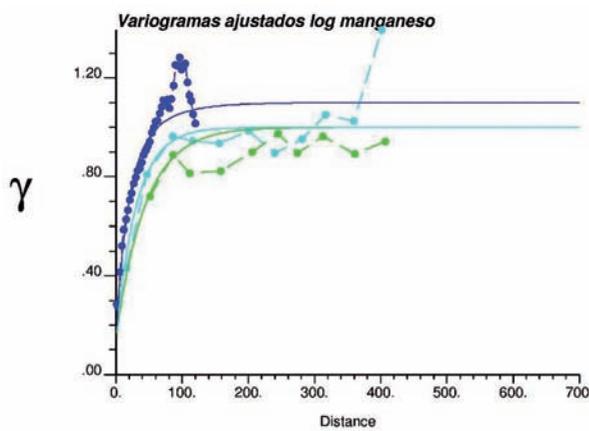


FIGURA 7. Variografía del manganeso.

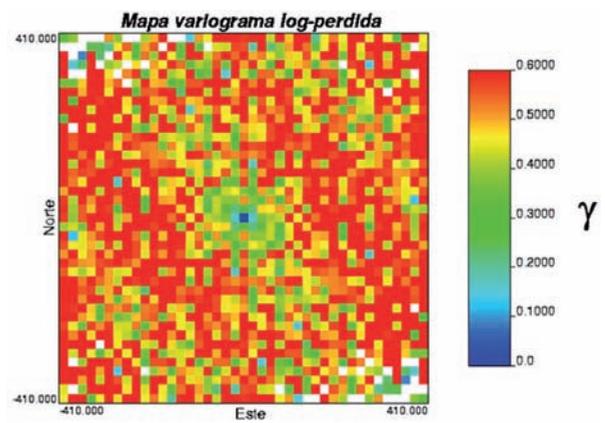


FIGURA 10. Dirección de anisotropía de la pérdida por calcinación.

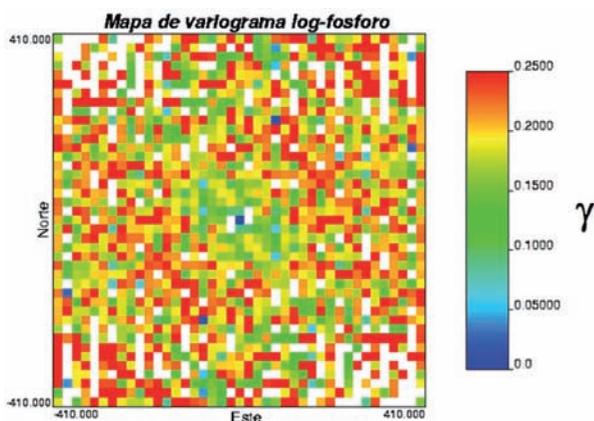


FIGURA 11. Dirección de anisotropía del fósforo.

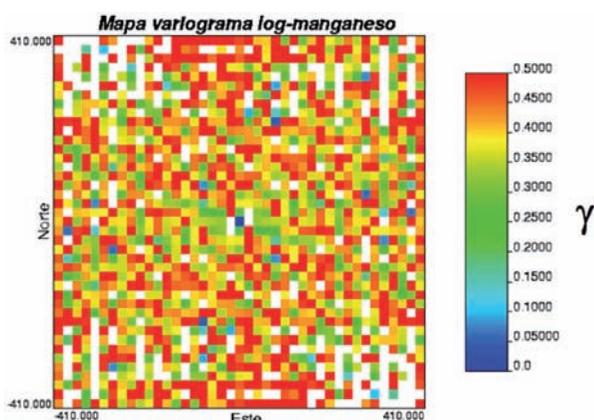


FIGURA 12. Dirección de anisotropía del manganeso.

TABLA 3. Radios de influencia espacial en metros

	Rango principal	Rango secundario	Rango vertical
SiO ₂	480	220	130
Al ₂ O ₃	340	240	80
PPC	390	180	70
P	390	120	110
Mn	120	85	90

DISCUSIÓN

La transformación logarítmica de los datos disminuyó considerablemente los valores extremos, y en todos los componentes químicos la distribución presentó una tendencia hacia la distribución normal. Se estima que el comportamiento poblacional de los componentes químicos de las menas del yacimiento es aproximadamente lognormal.

En el comportamiento de los porcentajes de sílice, alúmina, pérdida por calcinación, fósforo y manganeso, presentan dependencia espacial lineal en los primeros

metros y cuadrática a medida que aumenta la separación hasta desaparecer a gran distancia (FIGURAS 3 a 7). Este tipo de comportamiento variográfico que presentan estas menas son muy complejas, resultando anidadas de tipo Exponencial - Esférico en todas direcciones del espacio tridimensional.

La anisotropía de los porcentajes de composición química de estas menas establece un cambio del rango o alcance de la dependencia espacial de la variabilidad en diferentes direcciones, pero en el plano horizontal presentan la misma meseta (anisotropía geométrica). En cambio en el plano vertical se observa que la meseta cambia en diferentes direcciones con el mismo rango (anisotropía zonal), por lo tanto se presume un cambio brusco de litología al cambiar el comportamiento espacial de la variabilidad en esta dirección.

CONCLUSIONES

En los estudios de estimación y simulación del yacimiento de mineral de hierro del cerro San Joaquín se debe considerar el efecto que produce el espacio geográfico de la distribución de las menas y su comportamiento lognormal.

Las correlaciones de los grados químicos están fuertemente influenciadas en zonas de vecindad cercana, disminuyendo gradualmente a medida que se alejan hasta desaparecer en una superficie elipsoidal con los radios de influencia establecidos en esta investigación

El comportamiento complejo de la anisotropía, siendo geométrica en sentido paralelo a la topografía y zonal en sentido normal a esta, hace inferir que el yacimiento está conformado por grupos de menas que se diseminan en una gran extensión pero de poco espesor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa minera C.V.G. Ferrominera Orinoco, C.A. su apoyo en esta investigación al facilitar la información de la geología exploratoria del cerro San Joaquín.

REFERENCIAS

- Armstrong, M. 1998. Basic linear geostatistics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 153p.
- Ascanio, G. 1985. Yacimientos de Mineral de Hierro del Precámbrico de Venezuela. Memoria del 1º Simposium Amazónico, Boletín Geológico, Publicación especial, Nº 10, pp. 464-473.

C.V.G. Ferrominera Orinoco, C.A. 1991. Informe interno del Área de Geología, Superintendencia de Ingeniería de Minas: Autor. Piar, Bolívar, Venezuela.

Gobierno Bolivariano de Venezuela, S/F. Mapa Político Administrativo del Estado Bolívar: Autor. Disponible en http://www.gobiernoenlinea.ve/Venezuela/perfil_bolivar.html# [Consulta: 15/05/2011]

Deutsch, C., and Journel, A. 1998. GSLIB: Geostatistical software library and user's guide: 2da ed. Oxford University Press. New York, 363p.

Ferenčić, A. 1969. Geology of the San Isidro iron ore deposit, Venezuela. *Mineralium Deposita*, 4 (3): 283-297.

Matheron, G. 1965. Les variables regionalisées et leur estimation: Masson et Cie. Paris.

Menéndez, A. 1968. Revisión de la estratigrafía de la Provincia de Pastora según el estudio de la región de Guasipati, Guayana Venezolana. *Boletín Geológico*, Caracas, 9 (19): 309-338.

Parella, S., y Martins, F. 2006. Metodología de la investigación cuantitativa: FEDUPEL. Caracas.

Ruckmick, J. 1963. The iron ores of Cerro Bolivar, Venezuela. *Economic Geology*, 58 (2): 218-236.

Trabajo recibido: mayo 17 de 2012
Trabajo aceptado: octubre 24 de 2014