

## Comportamiento probabilístico espacial de la composición sustancial en yacimientos lateríticos del oriente cubano

### Spatial probabilistic performance of substantial composition in lateritic deposits of eastern Cuba

Justino Tomás Antonio<sup>1</sup>, Ramón E. Peña-Abreu<sup>2</sup>, Ramón G. Polanco-Almanza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba. [justino@ismm.edu.cu](mailto:justino@ismm.edu.cu)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones del Níquel. Moa, Holguín, Cuba. [rpena@cediniq.minem.cu](mailto:rpena@cediniq.minem.cu)

---

#### Resumen

Con el propósito de determinar el comportamiento probabilístico espacial de los principales elementos químicos en los yacimientos lateríticos cubanos, los contenidos de Ni, Fe y Co se analizaron en relación a su ajuste a seis distribuciones estadísticas (normal, normal logarítmica, Erlang, exponencial, gaussiana inversa y Chi cuadrada) en ocho direcciones en el plano horizontal y en cada intervalo de muestreo en el plano vertical; utilizando para ello los softwares *Statgraphics* y *Statistica*. El análisis se realizó en dos yacimientos a los que previamente se les habían construido elipsoides de autocorrelación, fundamentadas en variogramas direccionales calculados en un ángulo de 45°. El procesamiento estadístico de las muestras agrupadas en los ocho sectores direccionales a intervalos de un metro de profundidad demostró que ninguno de los tres componentes sustanciales se puede considerar que se ajusta a las distribuciones propuestas, ya que solamente en unos pocos sectores direccionales, en uno solo de los yacimientos, de forma discontinua y para un solo elemento (Ni), existe ajuste a la distribución normal. Esto demuestra diversidad de comportamientos para los componentes sustanciales, como prueba, además, de un comportamiento caótico de los mismos, por lo que se desaconseja en estos tipos de yacimientos el empleo de modelos de estimación que exijan el ajuste de los datos a una distribución probabilística específica, para una o más variables que reflejen los componentes sustanciales.

**Palabras clave:** geoestadística; distribuciones probabilísticas; modelos de estimación; yacimientos lateríticos.

### **Abstract**

The aim of this study is to determine the spatial probabilistic behavior of the main chemical elements in the Cuban lateritic deposits. The contents of Ni, Fe and Co were analyzed related to their adjustment to six statistical distributions (normal, logarithmic normal, Erlang, exponential, Gaussian Reverse and Chi square) on the horizontal plane, in eight directions and on the vertical plane, in each sampling interval, using the Statgraphics and Statistic softwares. The analysis was carried out in two sites to which previously autocorrelation ellipsoids based on directional variograms calculated at an angle of 45° had been constructed. Based on the statistical processing, we can say that none of the three components are considered fit the proposed distributions and there is adjustment to the normal distribution only in one of the deposits and for a single element, (Ni). A diversity of performance for substantial components is evident so, for one or more variables that reflect the substantial components, the use of estimating models that require adjusting data to a specific probabilistic distribution is not advised in this type of deposits.

**Keywords:** geostatistics; probabilistic distributions; estimation models; lateritic deposits.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

La eficiencia en los procesos metalúrgicos extractivos de níquel y cobalto a partir de mineral laterítico depende de la estabilidad en la calidad de las menas, la cual está sujeta al grado de información que se logre en el proceso de exploración y a la forma en que se utilice para el pronóstico de estimación de recursos. Es por ello que el conocimiento del comportamiento espacial de los parámetros geológicos e industriales de los yacimientos lateríticos de Cuba es de vital importancia para la estimación de los recursos y reservas minerales.

En Cuba la modelación matemática de los yacimientos se ha concebido como la aplicación de métodos geoestadísticos, fundamentalmente en el pronóstico del contenido de sus elementos químicos, lo que ha presentado varias dificultades: una es el empleo de métodos que solo modelan una de las variables de la composición sustancial (Legrá-Lobaina 1997; Bernal *et al.* 2001; Legrá-Lobaina, Atanes y Velázquez 2001; Cuador-Gil 2002; Acosta y Gentoiu 2007). Otros emplean combinaciones de variables para

simular un análisis bivariado (Vera, Legrá-Lobaina y Medina 2001; Martínez-Vargas 2007). Trabajos realizados en otros yacimientos y con otros fines presentan este mismo problema (Li *et al.* 2004; Shakeel, Ramaswamy y Abdin 2008). Otra debilidad que se encuentra en estos trabajos es que los datos no se ajustan a la distribución normal estándar (DNE), o no se realizan pruebas para ello, sin considerar que los métodos geoestadísticos se soportan sobre una teoría que exige la normalidad en los datos (Peña-Abreu y Perdomo 2014).

Algunos autores sostienen que la zonalidad de formación de los yacimientos lateríticos del norte de oriente (YLNO) influyó en el carácter caótico del comportamiento geoquímico, motivo por el cual no muestra normalidad u otro tipo de comportamiento afín a una distribución conocida en prácticamente ninguna de las direcciones de los YLNO estudiados (Ariosa 2005; Martínez-Vargas 2007).

Un nuevo modelo multivariado de yacimientos, fundamentado en la variante no paramétrica las cadenas de Markov, ha permitido diseñar redes de alta eficiencia en la adquisición de información con un mínimo de puntos de muestreo (Peña-Abreu 2015). Este modelo, desde un nuevo enfoque del análisis multivariado de los yacimientos, admite el empleo de distribuciones zonales, no necesariamente normales, y recomienda caracterizar el comportamiento probabilístico de los elementos útiles y nocivos en los yacimientos lateríticos en diferentes direcciones en el plano horizontal y en cada intervalo de muestreo en el perfil vertical del yacimiento.

Para verificar la pertinencia del modelo antes descrito, la presente investigación tuvo como objetivo determinar si los contenidos de los componentes sustanciales en los YLNO se ajustan a distribuciones estadísticas en ocho direcciones espaciales establecidas y en cada intervalo de profundidad del yacimiento.

Los métodos geoestadísticos se emplean ampliamente para la estimación del contenido de los elementos químicos en los yacimientos lateríticos, para la estimación de reservas geológicas y categorización de los recursos con el objetivo final de realizar la planificación minera. Su fundamento matemático yace en la teoría de las funciones y procesos aleatorios (Matheron 1967), los cuales se construyeron sobre la axiomática de la teoría de las probabilidades y exigen que las variables en estudio se ajusten a la DNE.

Se ha explicado la influencia del carácter local de los procesos geológicos que formaron los yacimientos lateríticos en la distribución espacial de sus componentes sustanciales, la que ha sido eludida en el modelado de los yacimientos lateríticos (Peña-Abreu, Vera-Sardiñas y Orozco-Melgar 2015).

En un estudio previo (Peña-Abreu 2015) del comportamiento espacial en tres yacimientos de la distribución de probabilidad de dos variables (Fe y Ni), quedó demostrado que para ninguna de ellas existe ajuste a la normalidad en cada una de las ocho direcciones fundamentales de la rosa náutica y en cada intervalo en el perfil de los yacimientos estudiados (Peña-Abreu y Perdomo 2014). Este resultado propició el empleo de nuevos modelos para describir con mayor precisión el comportamiento geoquímico de los yacimientos.

En los trabajos antes analizados no se toma en cuenta durante la modelación, el carácter de las distribuciones para las variables analizadas, o se estudian de forma global en el yacimiento. Rodríguez-Cardona y Rodríguez-Ruiz (1987) y Rodríguez-Cardona (1990) analizaron el ajuste a la DNE en los tipos litológicos propuestos por Lavaut (1987) y concluyó que existe ajuste para Fe, Ni, y Mg en yacimientos de Nicaro y en Pinares de Mayarí. Martínez-Vargas (2007) prueba el ajuste a la DNE en las mismas capas litológicas de un yacimiento de Moa; otros autores lo han hecho de forma similar (Barrientos-Domínguez 2009; Lavaut *et al.* 2009).

Polanco (1996) para establecer clases de menas, según los índices tecnológicos en los yacimientos lateríticos de Moa, realiza el análisis de ajuste a la DNE en cada intervalo del perfil del yacimiento (capas coincidentes con la profundidad de muestreo) y obtiene como resultado el ajuste de Ni, Fe y Co a la DNE, pero no tiene en cuenta sectores direccionales.

Es conocido que para una variable aleatoria, una muestra donde el número de datos es tan grande que tiende a infinito, su distribución de probabilidad tiende a la DNE, lo que se deduce del teorema de los grandes números y otros teoremas límites (Kolmogorov 1956; Mood y Graybill 1969; Projorov y Rozanov 1973).

Los datos de las variables en los YLNO son numerosos y en una primera aproximación se puede asumir normalidad, sin embargo, al modelar espacialmente se necesita una mayor precisión del conjunto de datos que se interpola; esto implica que el modelo no debe obtenerse del comportamiento global del yacimiento, sino que debe ser capaz de aislar y modelar la mayor cantidad de comportamientos locales, en que la cantidad de datos generalmente no es suficiente para una aproximación por los teoremas límites (Projorov y Rozanov 1973).

En estos yacimientos la mayor parte de las variables muestran, de forma global, la presencia de varias poblaciones de datos (Martínez-Vargas y Pérez-Melo 2006; Martínez-Vargas 2007). Esto se explica por la variada

composición química y mineralógica (Wilson 2004) y se repite en pequeños conjuntos de datos de una zona, lo que ilustra que el carácter caótico es también local y por ello no es conveniente confiar en modelos creados a partir de una distribución única estimada para el yacimiento.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Lo antes explicado permitió descartar los resultados de ajuste a la DNE en los trabajos analizados, ya que pueden solaparse comportamientos que son necesarios para modelar los cuerpos minerales de los yacimientos lateríticos. Se hace imprescindible incorporar el comportamiento direccional y espacial de las propiedades, por ello las pruebas de ajuste se aplicaron a todas las variables, en cada metro de profundidad y en ocho direcciones respecto al centro geométrico de cada yacimiento.

Se consideró que actualmente la tecnología de explotación de los yacimientos lateríticos en Cuba es por bancos horizontales y en franjas de ancho variable, en dependencia de los parámetros de trabajo del equipo de excavación. Las direcciones se codificaron en la base de datos con ayuda de la expresión (2) programada en una herramienta computacional simple y luego se procesaron los datos con el software *Statistica* y *Statagraphics*.

La profundidad de cada muestra se obtuvo con respecto a la superficie donde se ubica el pozo y no según su altura respecto al nivel del mar, como se puede apreciar en sector de exploración esquematizado en 3D de la Figura 1.

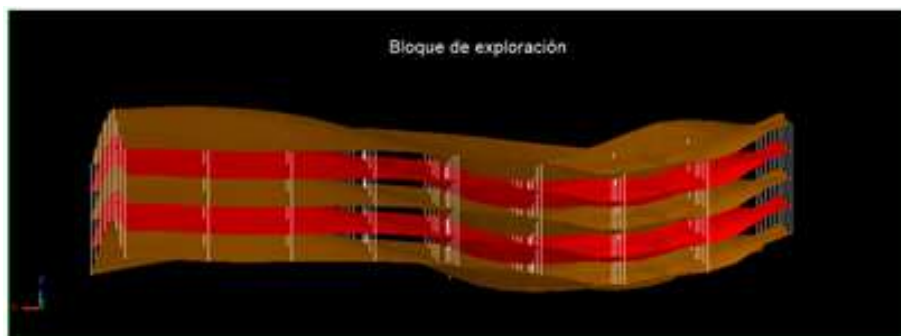


Figura 1. Capas de exploración del perfil laterítico de los yacimientos

Los datos se almacenaron siguiendo una estructura lógica de jerarquía a partir de la cual se establece un patrón que identifica cada muestra (Bloque, Número de pozo, Coordenadas, Ni, Co, Fe, Mg, etc.), como se ejemplifica en la Figura 2.

Las BD de los pozos de la exploración poseen por cada muestra las coordenadas planas locales o nacionales, la identificación del bloque, el contenido de los elementos químicos útiles (Ni, Co) y los demás elementos

químicos que inciden en el proceso metalúrgico (Fe, Si, Mg, Al, Mn, Cu, Zn y Cr). Estos últimos elementos no se encuentran en todas las muestras y no es común su utilización para la creación de los modelos geológicos.

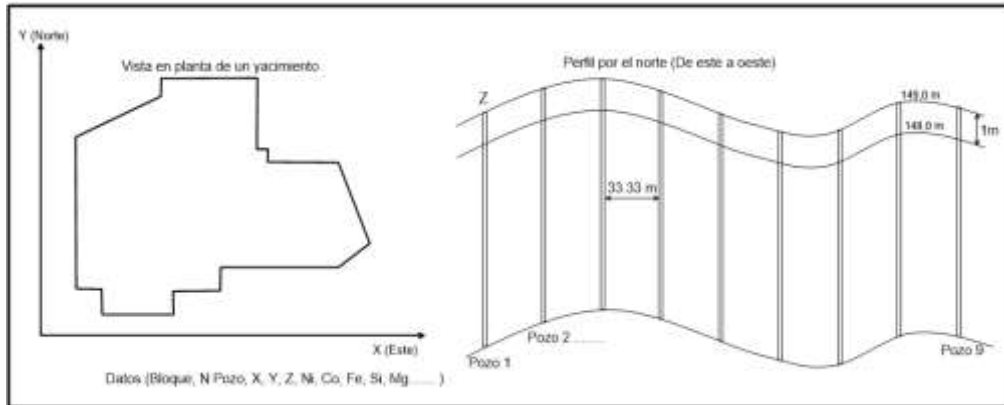


Figura 2. Información contenida en las bases de datos.

El punto de referencia inicial se hizo coincidir con el centro geométrico del yacimiento (CY) analizado, para que en cada dirección la cantidad de muestras fuese aproximadamente igual; si se hace coincidir el CY con el pozo más cercano a él, los resultados son similares. Luego se referenció cada muestra respecto al centro, considerando que las coordenadas x, y de las muestras tomadas en un mismo pozo son iguales.

Este proceso se realizó en la propia base de datos, agregando un campo que contiene la dirección respecto al CY, de tal forma que a cada fila le corresponde un valor en ese campo. Se definió la nomenclatura para cada una de los ocho sectores tomados en las direcciones de la rosa náutica y se codificaron con los símbolos correspondientes (Figura 3).

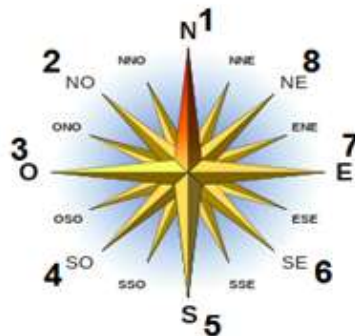


Figura 3. Distribución de los pozos según las direcciones de la rosa náutica definidas en los yacimientos

A partir de las diferencias entre las coordenadas de la muestra y las del CY se obtuvo el ángulo. La fórmula (1) adapta el cálculo de la arcotangente para la herramienta computacional empleada. La codificación de los sectores angulares se realiza según (2).

$$f(y) = \begin{cases} \varphi = \arctan(y, x); & y \geq 0; \\ \varphi = 2 \cdot \pi - \arctan(y, x); & y < 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$f(\varphi) = \begin{cases} n + 1; \forall n \in [0, N - 1]; \varphi \in \left[ \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{N}; \frac{2 \cdot (n+1) \cdot \pi}{N} \right] \\ 0; & \varphi \rightarrow \infty \end{cases} \quad (2)$$

Con el software Statgraphics se realizaron las pruebas de bondad de ajuste a las distribuciones, normal, normal logarítmica, gaussiana inversa, Erlang, chi cuadrada y exponencial. Se aplicó a los componentes geoquímicos que contiene la base de datos de la exploración. Cada prueba se efectuó para cada sector direccional definido por (2) (Figura 3) y para cada intervalo muestreado en los sondeos de exploración.

### 2.1. Dósimas para la bondad de ajuste

Las pruebas estadísticas empleadas para comprobar la bondad de ajuste a las distribuciones fueron las siguientes (Cué-Muñiz, Castell-Gil y Hernández-Carratalá 2008)

1. Chi Cuadrado
2. Kolmogorov Smirnov
3. Kuiper V
4. Cramer Von Mises W2
5. Watson U2
6. Anderson-Darling A2

La prueba de chi-cuadrado divide el rango del componente analizado en intervalos que no intersecan y compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado para la distribución ajustada y muestra el valor del estadístico para cada prueba y el valor de la probabilidad "valor-P". Este último se compara con el valor de significación  $\alpha = 0,05$ . Si el valor más pequeño obtenido es menor que  $\alpha$  se puede rechazar la hipótesis de que la variable de interés proviene de una distribución normal con 95 % de confianza.

Este estudio se realizó para dos yacimientos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las pruebas se exponen en las Figuras 4 y 5 en barras contrapuestas por componentes, para mostrar las diferencias entre el ajuste o no a la DNE en los dos yacimientos estudiados.

En la Figura 4 se exponen los resultados del análisis de la bondad de ajuste para tres elementos en el yacimiento 1. Se aprecia que el níquel ajusta a la DNE solo en los sectores oeste (3) y sur (5) en porcentajes pequeños, en el sector suroeste (4) alcanza aproximadamente el 50 % de los intervalos. En los otros sectores, más del 95 % no presentan ajuste a la DNE en esta variable. El Co y el Fe en este yacimiento no muestran ningún sector direccional en el que indiquen ajustes a la DNE. En la Figura 5, el yacimiento 2 no muestra ajustes a la DNE para ningún sector direccional, en ningún intervalo y en ninguna de las variables. Lo anterior confirma el comportamiento caótico de los datos y coincide con el análisis geológico que se describe en Peña-Abreu (2015).

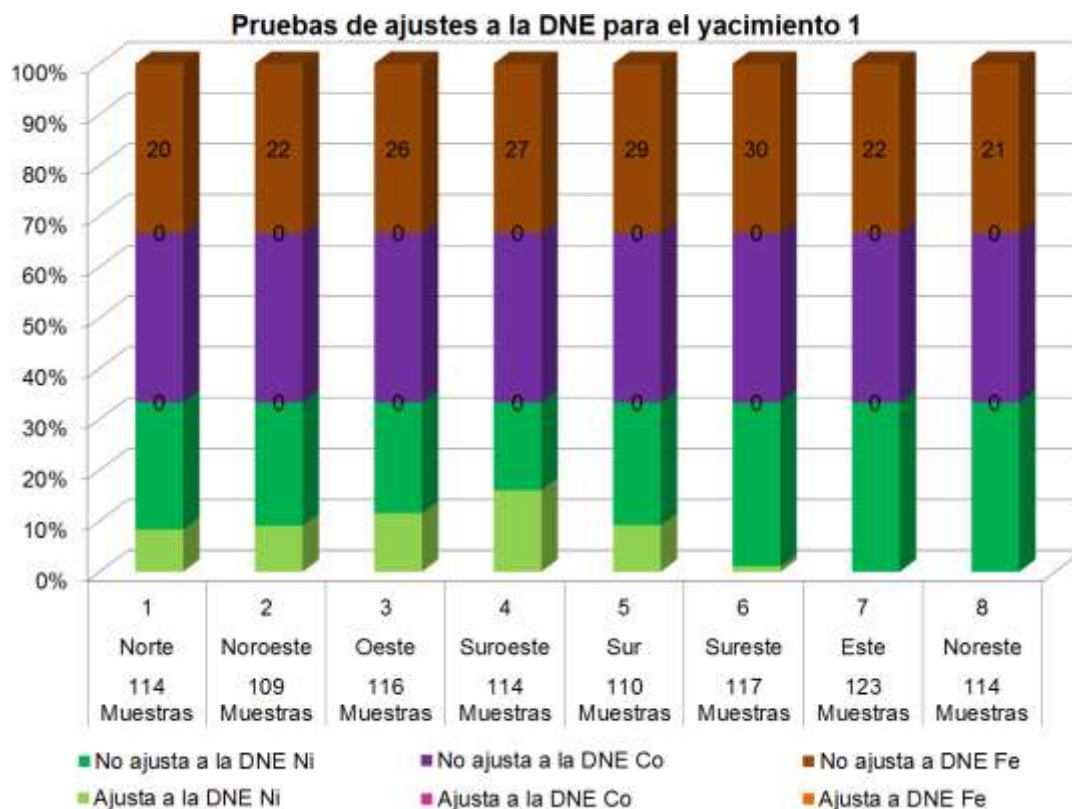


Figura 4. Resultados del análisis de la distribución normal en el yacimiento 1 aplicando el software Statgraphics



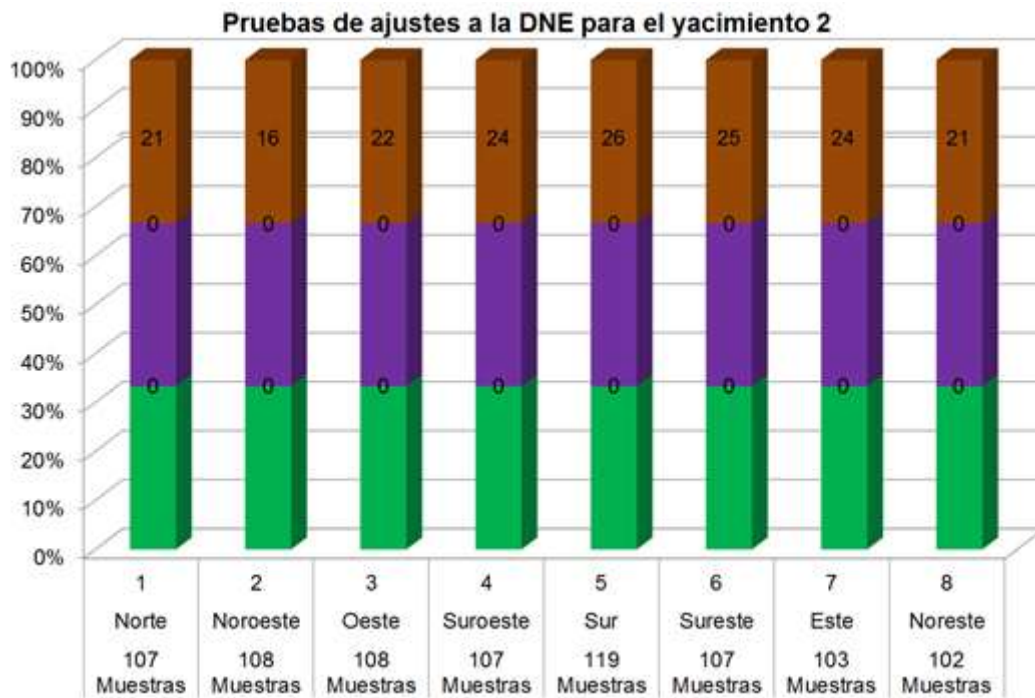


Figura 5. Resultados del análisis de la distribución normal en el yacimiento 2 aplicando el software Statgraphics

Estos análisis han demostrado un comportamiento de los componentes sustanciales alejado de la DNE. Los pocos intervalos en los que existe ajuste a la DNE no corresponden a una continuidad espacial y sucede para solo una variable en uno de los yacimientos, lo que demuestra la naturaleza anisotrópica de los contenidos sustanciales. Se concluye que no debe asumirse normalidad en el comportamiento de ninguno de los componentes sustanciales para modelos que requieran tal condición.

En cada dirección se analizaron todos los intervalos hasta la profundidad que acumulara no menos de 100 muestras de perforación. En las Figuras 4 y 5 se muestra ese número en las barras correspondientes a cada sector direccional, en cada yacimiento. En las Figuras 6 y 7 se pueden apreciar estos resultados sobre los yacimientos 1 y 2, según corresponde en cada sector direccional. Los datos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del análisis de la distribución normal aplicando el software Statgraphics

<b>YACIMIENTO 1</b>													
<b>Sector</b>	<b>Interv. (m)</b>	<b>Muestr. x</b>	<b>Ni</b>		<b>Co</b>		<b>Fe</b>		<b>Ajuste a DNE</b>	<b>No</b>			
			<b>Interv</b>	<b>Ajuste a DNE</b>		<b>Interv</b>	<b>Ajuste a DNE</b>				<b>Interv</b>	<b>Ajuste a DNE</b>	
				<b>Si</b>	<b>No</b>		<b>Si</b>	<b>No</b>				<b>Si</b>	<b>No</b>
<b>1 (Norte)</b>	20	114	5	15	112	0	20	114	0	20			
<b>2 (Noroeste)</b>	22	109	6	16	109	0	22	109	0	22			
<b>3 (Oeste)</b>	26	116	9	17	116	0	26	116	0	26			
<b>4 (Suroeste)</b>	27	114	13	14	114	0	27	114	0	27			
<b>5 (Sur)</b>	29	110	8	21	110	0	29	110	0	29			
<b>6 (Sureste)</b>	30	117	1	29	115	0	30	115	0	30			
<b>7 (Este)</b>	22	123	0	22	121	0	22	121	0	22			
<b>8 (Noreste)</b>	21	114	0	21	110	0	21	110	0	21			
<b>Total</b>	--	--	42	155	--	0	197	--	0	197			

<b>YACIMIENTO 2</b>													
<b>Sector</b>	<b>Interv. (m)</b>	<b>Muestr. x</b>	<b>Ni</b>		<b>Co</b>		<b>Fe</b>		<b>Ajuste a DNE</b>	<b>No</b>			
			<b>Interv</b>	<b>Ajuste a DNE</b>		<b>Interv</b>	<b>Ajuste a DNE</b>				<b>Interv</b>	<b>Ajuste a DNE</b>	
				<b>Si</b>	<b>No</b>		<b>Si</b>	<b>No</b>				<b>Si</b>	<b>No</b>
<b>1 (Norte)</b>	21	107	0	21	107	0	21	107	0	21			
<b>2 (Noroeste)</b>	16	108	0	16	108	0	16	108	0	16			
<b>3 (Oeste)</b>	22	108	0	22	108	0	22	108	0	22			
<b>4 (Suroeste)</b>	24	107	0	24	107	0	24	107	0	24			
<b>5 (Sur)</b>	26	119	0	26	119	0	26	119	0	26			
<b>6 (Sureste)</b>	25	107	0	25	107	0	25	107	0	25			
<b>7 (Este)</b>	24	103	0	24	103	0	24	103	0	24			
<b>8 (Noreste)</b>	21	102	0	21	102	0	21	102	0	21			
<b>Total</b>	--	--	0	179	--	0	179	--	0	179			

En la Figura 6 se aprecia que existe una diferencia de potencia máxima entre los sectores del yacimiento para lograr una cantidad de muestras similar, por ejemplo: el sector norte del yacimiento 1 logra más de 100 muestras con una potencia promedio de 21,5 m, mientras que el sector sur necesita un promedio de 28 m para lograrlas. En el yacimiento 2 sucede algo similar pero en los sectores noroeste y sureste, con 20 m y 25 m de potencia promedio, respectivamente (Figura 7).

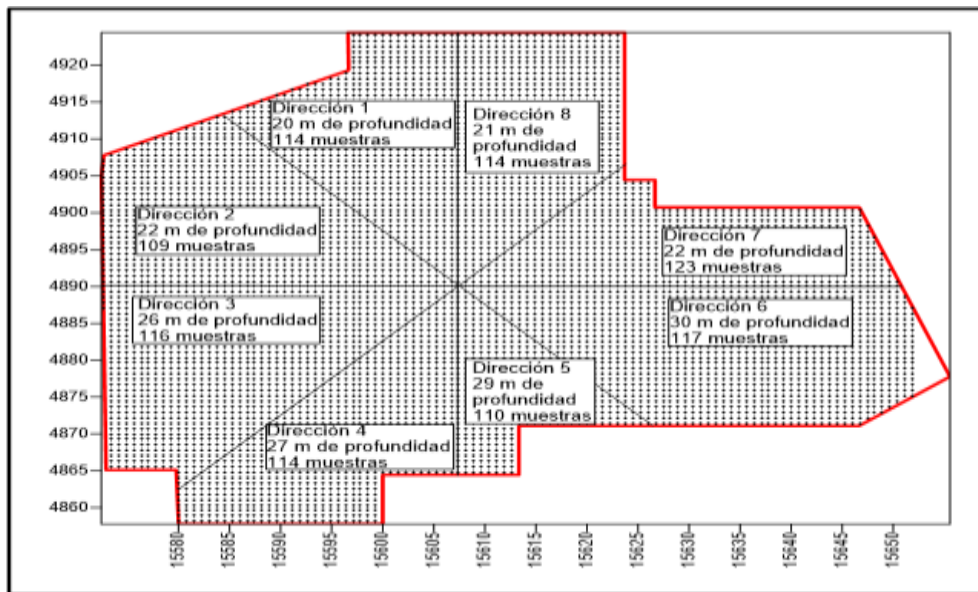


Figura 6. Cantidad de muestras y profundidad de la última capa analizada por direcciones en el yacimiento 1

Este análisis de las potencias promedios es un reflejo del relieve del fondo en cada yacimiento, esto concuerda con lo ya explicado sobre la necesidad de un tratamiento zonal específico, ya que la meteorización depende de las condiciones a las que se someten las rocas madres y eso está condicionado por diversos factores, entre los cuales se encuentra el relieve, por ello los productos residuales serán la memoria de las condiciones y de los procesos que en cada zona ocurrieron, lo que coincide con lo explicado en Lavaut (1987) y Wilson (2004).

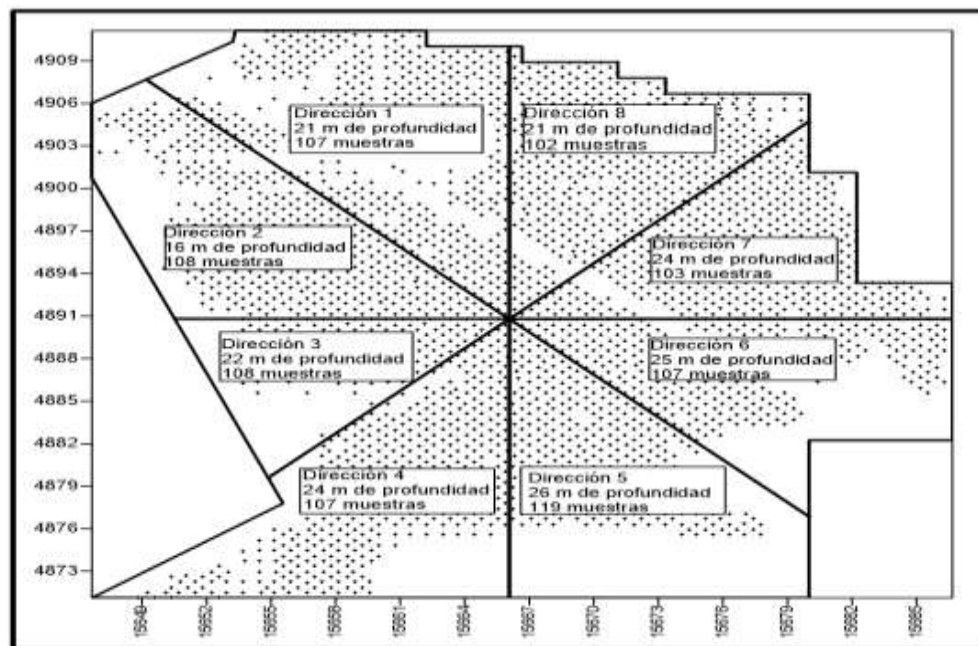


Figura 7. Cantidad de muestras y profundidad de la última capa analizada por direcciones en el yacimiento 2.

#### 4. CONCLUSIONES

- El procesamiento estadístico de las muestras agrupadas en los ocho sectores direccionales a intervalos de un metro de profundidad demostró que ninguno de los tres componentes sustanciales (Ni, Fe y Co) puede considerarse que se ajusta a las distribuciones propuestas, ya que solo en unos pocos sectores direccionales, en uno solo de los yacimientos y de forma discontinua encuentra ajuste a la distribución normal para un solo elemento: el Ni. Esto demuestra la diversidad de comportamientos para los componentes sustanciales, como prueba, además, de un comportamiento caótico de estos elementos.
- No deben emplearse modelos de estimación que exijan el ajuste de los datos a una distribución probabilística específica, para una o más variables que reflejen los componentes sustanciales en los yacimientos lateríticos del oriente cubano

#### 5. REFERENCIAS

- Acosta, J. y Gentoiu, M. 2007: Prospección con Georadar en los yacimientos lateríticos de Yagrumaje Sur. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra MIN2-08. CD-ROM. La Habana. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Ariosa, J. D. 2005: La modelación descriptiva en el ejemplo de los yacimientos lateríticos de Cuba Oriental. *Minería y Geología*, 21(1).
- Barrientos-Domínguez, K. 2009: Simulación Condicional Aplicada a Estudio de Redes. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-P29. CD ROM. La Habana. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Bernal, S.; Trujillo, R. A.; Peña-Abreu, R. E. y Silva, A. 2001: Pronóstico y planificación de la extracción de mineral. CENDA. Registro: 07308-7308.
- Cuador-Gil, J. Q. 2002: *Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo- industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río.
- Cué-Muñiz, J. L.; Castell-Gil, E. y Hernández-Carratalá, J. M. 2008: *Estadística*. Tomo I y II. La Habana: Félix Varela.
- Kolmogorov, A. N. 1956: *Foundations of the Theory of Probability*. Second English Edition. New York: Chelsea Publishing Company.
- Lavaut, W. 1987: *Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto*. Tesis doctoral. Archivo EGS. Moscú. 210 p.
- Lavaut, W.; Lorente, M.; Recouso, Y.; Barrientos-Domínguez, K.; Despaigne, N.; Cadete, M. y Franco, O. 2009: Resultados de la

- exploración geológica del yacimiento Yagrumaje Sur. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-P29. CD-ROM. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Legrá-Lobaina, A. A. 1997: Tres factores que influyen en la exactitud de los resultados de los cálculos de volúmenes geólogo-mineros. *Minería y Geología*, 14(2).
- Legrá-Lobaina, A.; Atanes, D. M. y Velázquez, A. 2001: Sobre la determinación de valores de una variable en la geología y en la minería. *Minería y Geología*, 18(1): 69-76. ISSN: 0258 5979.
- Li, S.; Dimitrakopoulos, R.; Scott, J. y Dunn, D. 2004: Quantification of Geological Uncertainty and Risk Using Stochastic Simulation and Applications in the Coal Mining Industry. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Perth, p. 185-192.
- Martínez-Vargas, A. y Pérez-Melo, N. 2006: ¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto? *Minería y Geología*, 22(3). ISSN: 0258 5979.
- Martínez-Vargas, A. 2007: Modelación de los contenidos de hierro en yacimientos lateríticos heterogéneos de níquel y cobalto. Caso de estudio, yacimiento Moa Oriental. *Minería y Geología*, 23(2): 1-43.
- Matheron, G. 1967: *Traité de Geostatistique appliquée*. París: Éditions Technip. 407 p.
- Mood, A. M. y Graybill, F. A. 1969: *Introducción a la Teoría de la Estadística*. Madrid: Ed. Aguilar S. A.
- Peña-Abreu, R. E. 2015: *Modelación matemática para optimizar el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación en yacimientos lateríticos de Ni Y Co*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 148 p.
- Peña-Abreu, R. E. y Perdomo, E. A. 2014: Comportamiento probabilístico del hierro y el níquel en tres yacimientos lateríticos cubanos. *Ciencia de la Tierra y el Espacio*, 15(2): 161-171.
- Peña-Abreu, R. E.; Vera-Sardiñas, O. y Orozco-Melgar, G. A. 2015: Estado del arte en el diseño de las redes de exploración en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 16(2): 147-163.
- Polanco, R. G. 1996: Establecimiento de clases de menas según índices tecnológicos en los yacimientos lateríticos de Moa. *Minería y Geología*, 13(1): 33-36.
- Projorov, Y. B. y Rozanov, Y. A. 1973: *Teoria Veroiatnostey. Asnovnie Poniatia, Predielnie Teoremi y Sluchainie Protsessin (Teoría de las*

*probabilidades. Conceptos fundamentales, teoremas del límite y procesos aleatorios*). 2<sup>da</sup> ed. Masckva: Nauka. 494 p.

Rodríguez-Cardona, A. y Rodríguez-Ruiz, H. 1987: Distribución del níquel en los yacimientos lateríticos cubanos. *Revista Tecnológica*, 17(3): 19-26.

Rodríguez-Cardona, A. 1990: *Prospección y exploración en las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 120 p.

Shakeel, A.; Ramaswamy, J. y Abdin, S. 2008: Application of Geostatistics in Optimal Groundwater Monitoring Network Design. *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers*. Dordrecht: Springer, p. 179-190. DOI: 10.1007/978-1-4020-6540-8\_14.

Vera, L. O.; Legrá-Lobaina, A. A. y Medina, M. 2001: Principios básicos para la obtención de redes racionales en la exploración de los yacimientos lateríticos cubanos. *Minería y Geología*, 18(1): 1-7. ISSN: 0258 5979.

Wilson, M. J. 2004: Weathering of the primary roc-forming minerals: processes products and rates. *Clay Minerals*, 39(3): 233-266.

Recibido: 09/09/17

Aceptado: 14/03/18

*Justino Tomás António*, Departamento de Minas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba. [justino@ismm.edu.cu](mailto:justino@ismm.edu.cu)