

Comportamiento Probabilístico del Hierro y el Níquel en Tres Yacimientos Lateríticos Cubanos

Ramón Eddie Peña-Abreu (*) y Eudis Antonio Perdomo-Orellana

Centro de Investigaciones del Níquel, Carretera Yagrumaje km 5 ½ Moa. Holguín, Cuba. CP:83330 Fax: 53 24 62202, rpena@cil.moa.minbas.cu, eperdomo@cil.moa.minbas.cu

Recibido: agosto 27, 2013

Aceptado: junio 20, 2014

Resumen

Es reglamentaria la utilización de métodos geoestadísticos para la categorización de los recursos y reservas en los yacimientos. Estos exigen el ajuste de los datos a una distribución de probabilidad, si es la normal de Gauss, la aplicación de estos métodos será directa, de lo contrario, deben realizarse transformaciones que pueden afectar la exactitud de los resultados. Actualmente no existe un estudio que corrobore la normalidad en los valores del quimismo, de los yacimientos ubicados al noreste de la provincia Holguín; por lo que se persiguió tipificar el comportamiento probabilístico de las dos variables más utilizadas en los cálculos, el Níquel y el Hierro. Se utilizaron diversas pruebas de bondad de ajuste con la ayuda del *software Statgraphics*, en tres yacimientos del oriente cubano, Yagrumaje Oeste, Yagrumaje Sur y Yagrumaje Norte, en ocho direcciones horizontales para cada intervalo muestreado. Se demostró que prevalecen los comportamientos anormales.

Palabras clave: Estadística, Geoestadística, Geoquímica, Modelación

Probabilistic Behavior of Iron and Nickel in three Lateritic Deposits Cuban

Abstract

Is Regulatory using geostatistical methods for categorizing resources and reserves in the deposits. These require the adjustment of the data to a probability distribution, if the normal Gauss, the application of these methods will be direct, otherwise, changes that may affect the accuracy of the results should be made. Currently there is no study that corroborated the values of chemism of the fields located in the northeast of Holguín conform to normal, so that he sought to define the probabilistic behavior of the two used in the calculations variables, Nickel and Iron . Various tests of goodness of fit with the help of Statgraphics software in three sites in eastern Cuba , Yagrumaje West Yagrumaje Yagrumaje North and South , in eight horizontal directions for each sampling interval were used. It was shown that the behaviors prevail without adjustments to the normal distribution. The use of geostatistics procedure in classifying resources and reserves in orebodies is prescribed by regulations. These require that data are set to probability distribution, if it is the normal Gauss this procedure will be straight, otherwise transformation which can affect results accuracy must be done. Níquel and Iron were the most used variables in calculating the probabilistic behavior. Several test using the Statgraphics software were carried out in Yagrumaje Oeste, Yagrumaje Sur and Yagrumaje Norte orebodies located in the eastern part of Cuba. It is shown that no adjustment to normal distribution behaviors prevailed.

Key words: Statistics, Geostatistics, Geochemistry, Modeling

1. Introducción

Los métodos Geoestadísticos en la actualidad se emplean ampliamente para la estimación del contenido de elementos químicos en los yacimientos, para el cálculo y categorización de los recursos, reservas y para la planificación minera, su fundamento matemático yace en la teoría de las funciones y procesos aleatorios, los cuales se construyeron sobre

Ramón Eddie Peña-Abreu () Centro de Investigaciones del Níquel, Carretera Yagrumaje, Km 5½, Moa, Holguín, Cuba. Email: rpena@cil.moa.minbas.cu*

la axiomática de la teoría de las probabilidades, por ello exigen que las variables en estudio se ajusten a una distribución probabilística (Matheron, 1967; Isaaks y Srivastava, 1989; Goovaerst, 1997; Lantuéjol, 2002; Webster, 2008), en el caso típico exigen que las variables se distribuyan normalmente. Sin embargo los especialistas que utilizan métodos geoestadísticos en *softwares*, frecuentemente no verifican rigurosamente esta condición (Legrá Lobaina, 1997; Cuador Gil, 2003 a y b; Vera Sardiñas, 2001; Gentoiu y Acosta Breal, 2007), lo que induce a errores en la estimación (Peña Abreu, 2013 a y b).

Es conocida la diversidad mineralógica y geoquímica de los yacimientos lateríticos cubanos, así como lo complejo de su distribución en el perfil, sin embargo algunos autores estiman que en la dirección horizontal la variabilidad no es sustancial (Rojas Purón, 1994, Veras Sardiñas, 2001), en trabajos recientes los análisis estadísticos para estos yacimientos contradicen esta afirmación (Peña Abreu, 2013), por tanto esta contradicción debe ser resuelta. Es por ello, que se ha planteado *el objetivo de comprobar si existen regularidades probabilísticas que permitan la aplicación directa de los métodos geoestadísticos en los yacimientos Yagrumaje Sur (YS), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Oeste (YO).*

Para ello se han utilizado las bases de datos (BD) resultante de los sondeos de exploración de los yacimientos Yagrumaje Oeste, Yagrumaje Sur, Yagrumaje Norte. Se programaron en lenguaje C++ del Visual Studio 2008, herramientas de cómputo que permitieron asignar a cada muestra una de las ocho direcciones de la rosa náutica en la horizontal, se tomó como referencia el centro geométrico del yacimiento y el análisis se realizó en cada intervalo del sondeo, así se garantizó análisis del yacimiento en cada metro de profundidad, lo que corresponde con un examen tridimensional.

Debido al volumen de información que fue necesario procesar y analizar el estudio se limitó solo a dos variables, el Níquel y el Hierro; el primero por ser mayoritario en el yacimiento y por su incidencia en los proceso metalúrgicos, el segundo por ser el principal elemento útil objeto de procesamiento metalúrgico y de mercado. Como resultado se pudo determinar que no existe ajuste a la normalidad para estas variables en su continuidad espacial. Este estudio permitirá que los geólogos, los mineros y personal dedicado a las ciencias de la tierra, puedan valorar con rigurosidad los estudios geológicos, estadísticos y la elección de las herramientas de cálculo.

2. Materiales y métodos

El procesamiento y análisis geoestadístico de los yacimientos cubanos generalmente se realiza por sus horizontes típicos (Ariosa-Iznaga, 2003; Lavaut-Copa, 1987, 2003, 2004) o por horizontes de menas industriales (Arias-del-Toro, 2009; Barrientos Domínguez, 2009). La elipsoide de autocorrelación se fundamenta en los variogramas direccionales, realizados generalmente en ángulos de 45°, es por ello que se ha decidido analizar los datos de las variables Fe y Ni, en estas direcciones horizontales y para cada intervalo muestreado en los yacimientos *Yagrumaje Sur, Yagrumaje Norte y Yagrumaje Oeste*. Los metros de profundidad de cada muestra se obtienen respecto a la distancia que se encuentra de la boca del pozo y no según su altura respecto al nivel del mar como se muestra en la Fig. No 1.

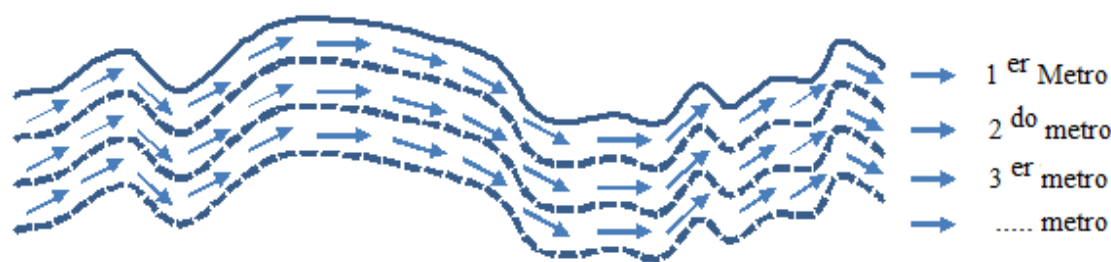


Fig. 1. Análisis de los datos en la dirección horizontal y metro a metro en cada yacimiento

Los datos están almacenados siguiendo una estructura lógica de jerarquía y a partir de esta se establece una llave que identifica cada muestra (Bloque, Pozo, Altura), como se ejemplifica en la Fig. No 2. Las BD de los sondeos de exploración poseen por cada muestra las coordenadas locales, la identificación del bloque, el contenido de los elementos químicos fundamentales (Fe, Ni, Co) y los elementos químicos nocivos al proceso metalúrgico (SiO₂, Mg, Al₂O₃) estos últimos no se encuentran en todos los sondeos y pueden existir otros, pero no es común encontrarlos en las bases de datos de la exploración (Lavaut Copa, 2007). La información captada es suficiente para los objetivos que se han propuesto.

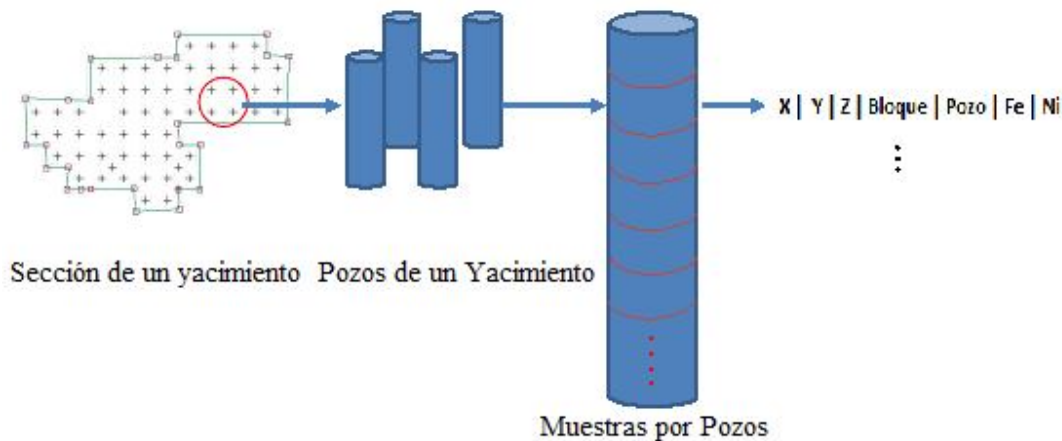


Fig. 2. Información que contienen las bases de datos

Inicialmente se debe crear un punto de referencia, que por comodidad se eligió el centro geométrico de cada uno de los yacimientos, en lo adelante se le denominará centro del yacimiento (CY), luego se debe referenciar cada muestra respecto al CY. Se aclara que las coordenadas de las muestras que pertenecen a 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, se han codificado con los símbolos correspondientes (Fig. No 3).

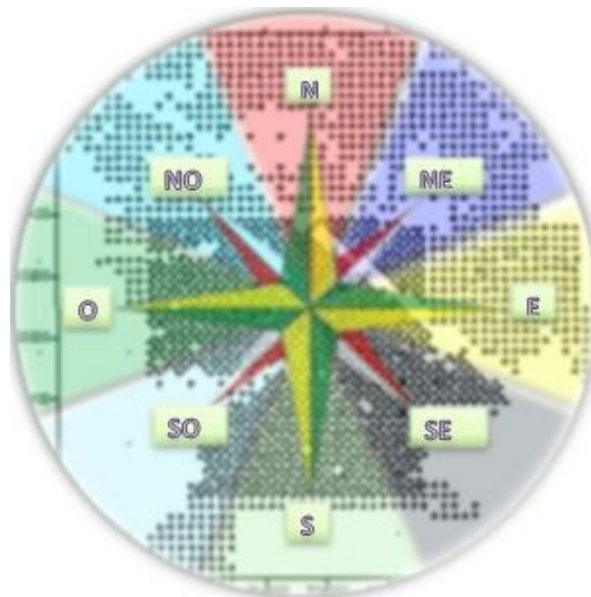


Fig. 3. Distribución de los pozos según las direcciones de la rosa náutica definidas en un yacimiento

La determinación de la dirección de cada muestra respecto al CY se programó con una rutina sobre el lenguaje C++ del Visual Studio 2008, la cual codifica la fórmula (1) para encontrar el ángulo del pozo respecto al CY (ver anexo 1). La misma se encarga de obtener un ángulo entre 0° y 360° a partir de las diferencias entre las coordenadas de la muestra y las del CY. Los resultados de la función $atan(y, x)$ están entre $(-\pi, \pi)$ en dependencia de si la y es positiva o negativa por lo que para obtener los valores positivos cuando la y es necesario restarle 360° al resultado.

$$f(y) = \begin{cases} \theta = \arctan(y, x); & y \geq 0; \\ \theta = 360 - \arctan(y, x); & y < 0; \end{cases} \quad (1)$$

Con la fórmula (2), de igual forma programada en la misma rutina (ver anexo 1), se codifica la dirección enumerándola según corresponda (Peña Abreu, 2007; Trinchet Almaguer, 2010).

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

La función atan2(x,y) de la biblioteca “math.h” del Visual C++ facilita este cálculo. En (2) la variable N es la total de secciones en que se quiere discretizar la esfera, en el caso que se expone N=8.

Para el tratamiento a las BD, se utilizó el M. S. Access y M. S. Excel ambos en la versión del 2010. A los datos se le eliminaron los casos atípicos relacionados con valores excedidos en el contenido de hierro o níquel. Con respecto a la integridad de la BD, la misma estaba mal diseñada por lo que permitía la introducción de errores sin que los usuarios se dieran cuenta. La identificación de una muestra es el conjunto de bloque, pozo y altura. En los datos se encontraron muestras duplicadas con algunas características iguales y otras diferentes. Esto es incorrecto no debían aparecer muestras duplicadas.

En la Tabla No 1 se muestran algunos de estos errores. Para el caso de la muestra con bloque 1247, pozo 09-2, altura 1 y bloque 1247, pozo 09-2, altura 2 se aprecia que aunque están duplicadas, los valores de Ni y Fe son iguales, así que en este caso bastó con eliminar una de las repeticiones; pero en el caso de la muestra con bloque 0652, pozo 88-2, altura 3 la dos apariciones tienen valores diferentes en los metales. Estos casos se consultaron con los especialistas que suministraron los datos y en algunos casos se procedió con la eliminación de todas las apariciones ya que se pudo discernir cual era la correcta.

Tabla No I Errores encontrados en los datos

Bloque	Pozo	Hasta	Ni	Fe
1247	09-2	1	0,38	45,3
1247	09-2	1	0,38	45,3
1247	09-2	2	0,35	45,3
1247	09-2	2	0,35	45,3
0652	88-2	10	0,52	40,6
0652	88-2	10	0,65	23,1

Se creó un identificador (ID) compuesto por el nombre del yacimiento, el bloque, el pozo y el intervalo. La Tabla No 1 es una muestra de la estructura de las BD procesadas. Según (1) se tendrá el número de cada dirección comenzando desde el norte, adicionalmente se le añade la abreviatura de cada dirección correspondiente a la rosa náutica, de la siguiente forma:

1. Norte (N).
2. Noroeste (NO).
3. Oeste (O).
4. Suroeste (SO).
5. Sur (S).
6. Sureste (SE).
7. Este (E).
8. Noreste (NE).

En la Tabla No 2 se observa en la novena columna los resultados de la dirección calculada para cada muestra de un pozo.

Tabla No II. Estructura de la base de datos

ID	X	Y	Z	BLOQUE	POZO	FE	NI	Dirección
YN_B0556_P48_H1	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	28,70	0,30	NO
YN_B0556_P48_H2	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	33,40	0,30	NO
YN_B0556_P48_H3	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	30,40	0,40	NO
YN_B0556_P48_H4	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	6,40	0,10	NO
YN_B0556_P48_H5	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	46,70	0,60	NO
YN_B0556_P48_H6	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	47,60	0,60	NO
YN_B0556_P48_H7	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	33,60	0,70	NO
YN_B0556_P48_H8	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	11,40	0,40	NO
YN_B0556_P48_H9	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	6,20	0,30	NO
YN_B0556_P48_H10	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	5,50	0,30	NO
YN_B0556_P48_H11	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	5,50	0,20	NO
YN_B0556_P48_H12,6	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	5,70	0,30	NO
YN_B0556_P48_H14,4	704349,00	220850,00	12,10	556	48,00	5,70	0,30	NO

En Cuba por su extensión alargada y estrecha se formó un sistema de coordenadas dividido en dos zonas, Cuba Norte y Cuba Sur, este último para las provincias orientales y llega hasta Limones en la provincia de Ciego de Ávila. Los datos pertenecientes al yacimiento Yagrumaje Norte no tenían expresadas las coordenadas x , y , z en el sistema de coordenadas Cuba Sur, para llevarlas a este sistema se utilizaron las fórmulas 3 y 4. Que realizan las transformaciones pertinentes (Raíces, 1980).

$$x = x + 696983,334 \quad (3)$$

$$y = y + 213983,884 \quad (4)$$

Con el *software* estadístico *Statgraphics* se realizaron las pruebas de bondad de ajustes de las variables, cada prueba se efectúa para uno de los sectores definido por las direcciones de la rosa náutica y para cada intervalo de un metro muestreado en los sondeos de exploración, o sea, se comprueba la normalidad metro a metro en cada sector correspondiente a una de las ocho direcciones.

A continuación se muestran tres de las pruebas realizadas con sus respectivos parámetros.

Ajuste de Datos No Censurados - FE (HUBICACION="E"&HASTA>=0,6&HASTA<=1,5)
Datos/Variable: FE
Selección de la Variable: HUBICACION="E"&HASTA>=0,6&HASTA<=1,5
Ajuste de Datos No Censurados - FE (HUBICACION="E"&HASTA>=1,6&HASTA<=2,5)
Datos/Variable: FE
Selección de la Variable: HUBICACION="E"&HASTA>=1,6&HASTA<=2,5
Ajuste de Datos No Censurados - FE (HUBICACION="E"&HASTA>=2,6&HASTA<=3,5)
Datos/Variable: FE
Selección de la Variable: HUBICACION="E"&HASTA>=2,6&HASTA<=3,5

Fig.4. Reporte del Statgraphics. Operaciones realizadas en las pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas estadísticas realizadas para comprobar la normalidad fueron cuatros. Con ellas se determina si las variables de interés en este caso NI y FE pueden modelarse adecuadamente con una distribución normal.

- Chi-Cuadrado
- Estadístico W de Shapiro-Wilk
- Valor-Z para asimetría
- Valor-Z para curtosis

La prueba de Chi-cuadrada divide el rango de las variables en número determinado de clases igualmente probables y compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado de observaciones. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. La prueba de sesgo estandarizado busca falta de simetría en los datos. La prueba de curtosis estandarizada busca si la forma de la distribución es más plana o picuda que la distribución normal (Mood y Graybill, 1969).

El *software* muestra el valor del estadístico para cada prueba y el valor-P. Este último se compara con el valor de significación $\alpha = 0,05$. Si el valor más pequeño obtenido es menor que α se puede rechazar la hipótesis de que la variable de interés proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

El análisis resultó voluminoso teniendo en cuenta que se realiza el ajuste para ocho direcciones y para cada intervalo del yacimiento. En Yagrumage Sur se realizaron 230 pruebas, en Yagrumage Norte y Yagrumage Oeste, 240 pruebas en cada uno para las dos variables, en total suma 690 pruebas. Esto implicó la preparación de esa misma cantidad de datos con la estructura de la Tabla No 2, así como, el análisis de la misma cantidad reportes que emite el Statgraphics.

Este volumen de información se resumió realizando un conteo de la aceptación o no de la hipótesis nula en la prueba de bondad de ajuste a la normalidad, la cual propone el ajuste de los datos a esa distribución contra la alternativa de que no ajustan. El conteo se resume en la Tabla No 3, en ella la primera columna de cada fila contiene el yacimiento, la segunda contiene las dos modalidades de ajuste (Si o No), las restantes ocho columnas contienen, para cada una de las variables, las ocho direcciones de la rosa náutica, en las celdas se plasman, a la izquierda, la cantidad de intervalos que corresponden, con la aceptación del ajuste en la fila “Si” y con los rechazos en la fila “No”; a la derecha, se tiene el porcentaje que representa la cantidad correspondiente del total de intervalos.

3. Resultados y discusión

Los resultados de las pruebas se exponen en la Tabla No 3.

Tabla III. Resultados de las pruebas de ajuste a la normalidad

		Níquel																
		Norte		Noreste		Este		Sureste		Sur		Suroeste		Oeste		Noroeste		
Ajuste		#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	
Yacimiento	YN	Si	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	6,3	2	11,8	2	13,3	1	7,1	0	0,0
		No	13	100,0	13	100,0	15	100,0	15	93,8	15	88,2	13	86,7	13	92,9	14	100,0
	YS	Si	9	60,0	0	0,0	0	0,0	3	20,0	5	33,3	2	13,3	7	46,7	8	53,3
		No	6	40,0	15	100,0	15	100,0	12	80,0	10	66,7	13	86,7	8	53,3	7	46,7
	YO	Si	4	26,7	0	0,0	3	25,0	0	0,0	1	7,1	2	15,4	2	13,3	10	90,9
		No	11	73,3	15	100,0	9	75,0	15	100,0	13	92,9	11	84,6	13	86,7	1	9,1
		Hierro																
Yacimiento	YN	Si	1	7,1	0	0,0	0	0,0	1	6,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
		No	13	92,9	13	100,0	15	100,0	15	93,8	15	100,0	13	100,0	13	100,0	14	100,0
	YS	Si	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	13,3
		No	15	100,0	15	100,0	15	100,0	15	100,0	15	100,0	15	100,0	15	100,0	13	86,7
	YO	Si	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	7,1	0	0,0	0	0,0	5	45,5
		No	15	100,0	15	100,0	12	100,0	15	100,0	13	92,9	13	100,0	15	100,0	6	54,5

La Tabla No 3 muestra que la variable Níquel en el yacimiento YS, se ajusta a la normalidad con más fuerza que el rechazo solo en dos direcciones; en la dirección Norte y en la Noroeste, se han marcado en rojo los valores en los cuales se cumple con mayor frecuencia la normalidad, en marrón se marcaron aquellos valores que superan el 5% de los intervalos que son normales. De esta forma se notó que con valores notables se tienen cuatro direcciones en YN y ninguno en que el comportamiento normal supere a los rechazos de normalidad; en YS cuatro valores notables y dos en que la normalidad en los intervalos supera a los rechazos y en YO se tienen cinco valores notables y uno donde la normalidad supera los rechazos.

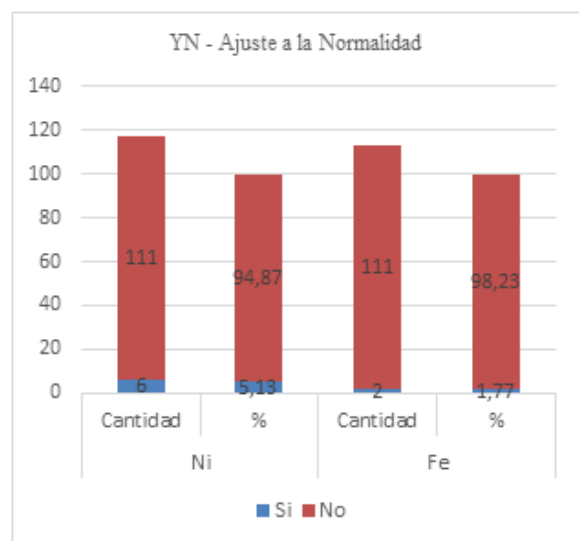
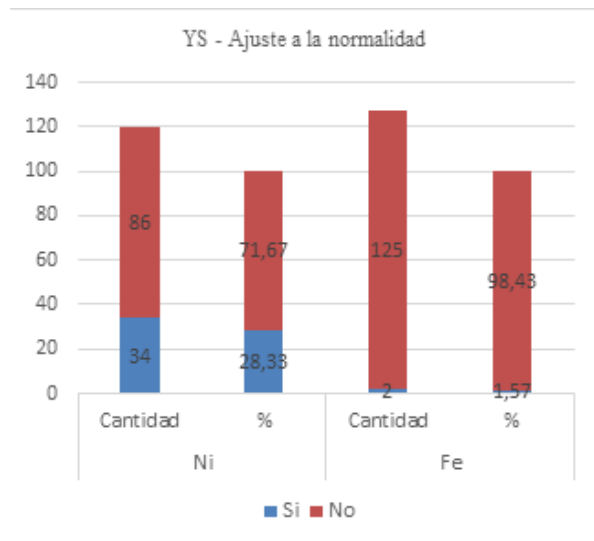
Esta misma estrategia se implementó para el Hierro. Se nota que no existen direcciones en las cuales se cumpla el ajuste a la normalidad con mayor frecuencia que el rechazo. Esta variable presenta solo dos direcciones con valores relativamente notables del comportamiento normal en YN, una dirección en YS y dos para YO. Se nota que para los yacimientos YO y YS en la dirección noroeste se acentúa el comportamiento normal del Níquel. Los resultados de la Tabla No 3 se resumen en la Tabla No 4 para cada variable por yacimientos.

Tabla IV. Resumen del análisis por variables y yacimientos

Yacimiento	Ajuste	Ni		Fe	
		Cantidad	%	Cantidad	%
YN	Si	6	5,13	2	1,77
	No	111	94,87	111	98,23
	Total	117	100	113	100
YS	Si	34	28,33	2	1,57
	No	86	71,67	125	98,43
	Total	120	100	127	100
YO	Si	22	20	6	5,45
	No	88	80	104	94,55
	Total	110	100	110	100
	Si	62	17,87	10	2,86
	No	285	82,13	340	97,14
	TOTAL	347	100,00	350	100,00

3.1 Análisis

De la Tabla No 4 se infiere que el **Hierro** no se ajusta a la normalidad en una cantidad de intervalos y direcciones que se consideran significativos, lo que supone que no debe asumirse la *normalidad* en el comportamiento del **Hierro** en estos tres yacimientos y por tanto la aplicación de modelos *no se justifica cuando se exige el cumplimiento de la normalidad*. La variable **Níquel** de igual forma se descarta su comportamiento *normal*, no obstante se confirmó la normalidad en aproximadamente un 18% de los intervalos, distribuidos en los tres yacimientos, en 6 de las ocho direcciones, lo que *no justifica la aplicación de modelos para el níquel que requieran el cumplimiento de la normalidad*, ya que la continuidad de estos comportamientos no se manifiesta.



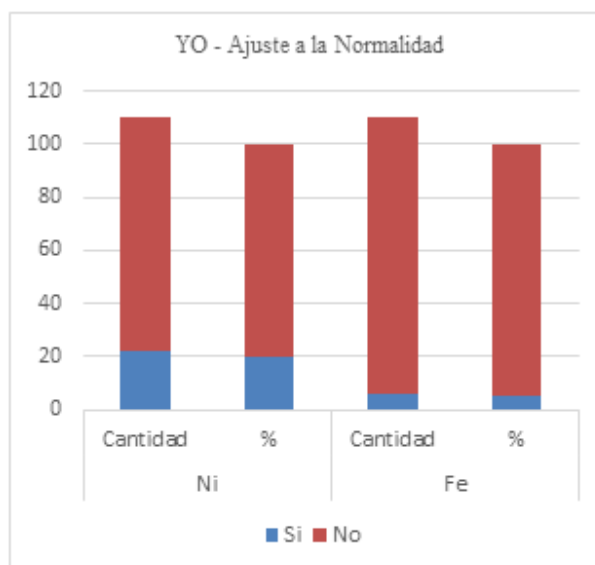


Fig. 5 a, b, c: Comportamiento probabilístico del Ni y el Fe en los yacimiento YS, YN, YO

La Figura 1 ratifica el análisis desprendido de la Tabla No 4. Se puede apreciar como el color rojo que representa los datos no ajustados a la normal es el que predomina.

La discontinuidad de los comportamientos normales en los intervalos para estas variables, muestra la naturaleza entrópica de la geoquímica en ellos, lo que se puede extrapolar a lo mineralógico si se tiene en cuenta que una parte importante de los componentes de estos yacimientos son minerales de Hierro (Vera Yeste, 1979; Rojas Puron, 1994; Wilson, 2003).

Conclusiones

1. Se comprobó que es imposible asumir la normalidad para las variables Hierro y Níquel en los yacimientos estudiados.
2. Se deduce que los modelos geoestadísticos no deben utilizarse directamente en estos tres yacimientos para modelar el Hierro y el Níquel.

Trabajo futuro

1. Aplicar la metodología utilizada a otros elementos químicos que se analizan en los sondeos de exploración.
2. Aplicar el análisis a otros yacimientos.
3. Encontrar variantes de modelado de los yacimientos que no dependan del cumplimiento de una distribución específica o el ajuste a la normalidad.

Agradecimientos

A los colegas Geólogos de la ECG, Lázaro, Licinio, Rafael y León, Julio, Joel, que suministraron la información necesaria y consejos sobre Geología, a Eliacio Guilarte por sus oportunas aclaraciones sobre geoestadística. Un agradecimiento especial a alguien, que incognito para los autores, en el arbitraje de otro artículo enviado a la revista Minería y Geología, señaló como deficiencia lo que aquí se demuestra y que en aquél se había considerado como obvio, de esta forma despertó la inquietud científica que condujo a estos resultados.

Referencias

- Arias-del-Toro J. A, Cuador-Gil J. Q, Lavaut-Copa W.D. 2009. Influencia de la Red de Exploración en la Determinación del Potencial Recuperable de Menas Lateríticas Niquelíferas en un Sector del Yacimiento Pinares Oeste. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN3. La Habana, Cuba, 16-20 de Marzo del 2009. (Memorias) [CD-ROM]. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Barrientos-Domínguez K. 2009. Simulación Condicional Aplicada a Estudio de Redes. CD de Memorias de la III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-P29. ISBN: 978-959-7117-19-3. La Habana.

- Cuador-Gil J. Q., Estévez Cruz E, Waldo Lavaut Copa. 2003a. Definición de Redes Racionales Exploración en Yacimientos Lateríticos Usando Procedimientos Conjuntos de Estimación y Simulación Geoestadística. Cd, Memorias GEOMIN 2003, TGMNI.10. La Habana, 24-28 de Marzo. ISBN: 959-7117-11-8.
- Cuador-Gil J. Q. Estévez-Cruz E, Waldo-Lavaut Copa. 2003b. Propuesta para la Determinación de la Masa Volumétrica en Yacimientos Lateríticos. Cd, Memorias GEOMIN 2003, TGMNI.12. La Habana, 24-28 de Marzo. ISBN: 959-7117-11-8.
- Gentoiu M, Acosta Breal J. 2007. Métodos de estimación geoestadística para el cálculo del espesor de friable en yacimientos lateríticos. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-P33. La Habana, 20-23 de Marzo del 2007. (Memorias) [CD-ROM]. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Goovaerst P. 1997. Geostatistic for natural resource evaluation. Oxford University Press. New York. p. 357.
- Lantuéjól C. 2002. Geoestadísticas Simulation. Model and Algorithms. Springer Verlag, Berlin.
- Lavaut C. 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 en Opción del Grado de Doctor en Ciencias. Archivo E.G.S. Moscú. 1987.
- Lavaut C. W. 2003. La Meteorización de la Ofiolita de Cuba Oriental. Modelos Geológicos y Terminología Cubana. V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología, GEOMIN'2003. La Habana, 24-28 de Marzo. (Memorias) [CD-ROM]. TGMNI.03. ISBN: 959-7117-11-8.
- Lavaut-Copa W. 2004. Patrones de Meteorización de Rocas Ofiolíticas de Cuba Oriental: su Importancia para la Minería. *Minería y Geología*. Nos. 3-4, ISSN 0258 5979.
- Lavaut-Copa W. 2007. Situación Actual del Sistema de Prospección Geológica de Lateritas en Cuba. CD, *Memorias de la II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. MIN2-027: ISBN: 978-959-7117-16-2. La Habana.
- Lavaut Copa W., Lorente M., Recouso Y., Barrientos Domínguez K., Despaigne N., Cadete M., Franco O. 2009. Resultados de la Exploración Geológica del Yacimiento Yagrumaje Sur. MIN2-P28. CD de *Memorias de la III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. MIN2-P29. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Legrá-Lobaina, A. A. et al. 1997. Tres factores que influyen en la exactitud de los resultados de los cálculos de volúmenes geólogo - mineros. *Revista Minería y Geología*. Vol. 14, No 2.
- Matheron G. 1967. *Traite de Geoestatistique appliqué*. París. p. 408.
- Mood A. M, Graybill F.A. 1969. *Introducción a la Teoría de la Estadística*. Ed. Aguilar S.A, Madrid.
- Peña Abreu R.E., Vera-Sardiñas L. O. 2013 b. Identificación de clases patrones para la modelación matemática en yacimientos de cubanos níquel. *Ciencias de la Tierra y Espacio*. Vol. 14 No. 2, julio-diciembre. ISSN 1729-3790. <http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm>.
- Peña Abreu, Ramón Eddie 2007. Modelo matemático para la optimización de las redes de exploración y explotación en yacimientos lateríticos. La Habana, Cuba: *II Convención de Ciencias de la Tierra*, 2007.
- Peña-Abreu R.E, Sam-Palanco C.M. 2013 a. Optimización del Muestreo Tecnológico en Yacimientos Lateríticos Cubanos. *Ciencias de la Tierra y Espacio*. Vol. 14, No.1. <http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm>.
- Raíces, O. 1980. *La teoría de la proyección cónica conforme de Lambert y su aplicación en Cuba*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Rojas-Purón A.L. (1994). Principales Fases Minerales Portadoras de Níquel en los Horizontes Lateríticos del Yacimiento Moa, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Geológicas, ISMM, Moa.
- Trinchet-Almaguer, D. 2010. *Algoritmo paralelo para el modelado de yacimientos lateríticos*. La Habana: Universidad de La Habana, Facultad de Matemática y Computación, 2010.
- Vera-Sardiñas L. O, Legrá-Lobaina. A.A, Medina Arce M. 2001b. Principios básicos para la obtención de redes racionales en la exploración de los yacimientos lateríticos cubanos. *Revista Minería y Geología* Vol. XVII I, No. 1, 2001.
- Vera-Yeste A. 1979. *Introducción a los Yacimientos de Níquel Cubanos*. ORBE, La Habana.
- Wilson M. J. 2004. Weathering of the primary roc-forming minerals: processes products and rates. *Clay Minerals*. No 39. Pág.: 233-266.

Acerca de los autores:

Ramón Eddie Peña-Abreu. Licenciado en Mecánica y Matemática Aplicada en la Universidad de Ucrania. Es Master en Física y Matemática y en Matemática Aplicada, Investigador y profesor Auxiliar. Tiene 24 años de experiencia, 22 de los cuales han sido dedicados a la actividad científica y docente. Ha participado aproximadamente en 10 congresos internacionales y otros eventos. Cuenta con más de 20 artículos publicados y miembro de varias sociedades científicas y presidente de la filial Moa de la Sociedad Cubana de Geología. Fue miembro del comité científico de varios eventos, como el Congreso de Matemática y Computación (COMPUMAT), el Congreso Nacional de Reconocimiento de Patrones (RECAPT) y las Convenciones cubanas de Ciencias de la Tierra. Actualmente se desempeña como jefe de dos proyectos en el Centro de Investigaciones del Níquel en Moa, Holguín, Cuba.

Eudis Antonio Perdomo-Orellana. Es profesor asistente, ha participado en tres proyectos de Investigación uno de ellos como jefe de proyecto y en dos servicios. También ha participado en eventos científicos nacionales e internacionales, GEOMOA 2012, GEOCIENCIAS 2013, CINAREM 2013; en GEOMOA 2012 además fue tribunal en la comisión de informática. Es miembro de la Sociedad Cubana de Geología. Ha recibido varios postgrados, inglés, metodología de la Investigación, Técnicas de programación avanzada, etc.

ANEXO 1. Rutina en Visual C++, en la que se codifica las formulas 1 y 2 y el procedimiento de identificación de las direcciones en cada muestra respecto al centro del yacimiento.

```
void Direccion()
{
    for(int i=0;i<=rowCount;i++)
    {
        Datos=gcnew array<String^,1>(2);
        Datos[0]=gcnew String(dataGridView1[0,i]->Value->ToString());
        Double corxcambiante=Double::Parse(dataGridView1[1,i]->Value->ToString());
        double corycambiante = Double::Parse(dataGridView1[2,i]->Value->ToString());
        double corxfija = 702600.004;
        double coryfija = 220100.554;
        double distanciacx = abs(corxfija - corxcambiante);
        double distanciacy = abs(coryfija - corycambiante);
        float angulo = (360/(pi*2))* atan2(distanciacy,distanciacx);
        if (coryfija < corycambiante)
        {
            if (corxfija <= corxcambiante)
            {
                if(angulo < 45)
                {Datos[1]= gcnew String("E");}
                else
                {Datos[1]= gcnew String("NE");}
            }
            if (corxfija > corxcambiante)
            {
                if(angulo < 45)
                {Datos[1]= gcnew String("NO");}
                else
                {Datos[1]= gcnew String("N");}
            }
        }
        if (coryfija >= corycambiante)
        {
            if (corxfija <= corxcambiante)
            {
                if(angulo < 45)
                {Datos[1]= gcnew String("SE");}
                else
                {Datos[1]= gcnew String("S");}
            }
            if (corxfija > corxcambiante)
            {
                if(angulo < 45)
                {Datos[1]= gcnew String("O");}
                else
                {Datos[1]= gcnew String("SO");}
            }
        }
        nuevaTabla->Rows->Add(Datos);
    }
}
```