

Modelación de los contenidos de hierro en yacimientos lateríticos heterogéneos de níquel y cobalto. Caso de estudio, yacimiento Moa Oriental

(RESUMEN DE TESIS DOCTORAL / 2006)

Adrián Martínez Vargas¹ / amvargas@ismm.edu.cu

INTRODUCCIÓN

La industria del níquel y el cobalto es una de las fuentes de ingreso más importantes de Cuba; se nutre de las menas procedentes de varios yacimientos de cortezas lateríticas, minadas a cielo abierto. Desafortunadamente los mejores depósitos han sido prácticamente agotados, aún así, las empresas involucradas en esta industria pretenden aumentar los volúmenes de producción, por lo que se enfrentan al reto de "explotar con eficiencia yacimientos más complejos, menos potentes y más variables".

La minería se planifica con el objetivo de extraer racionalmente menas con las cualidades que requieren las plantas metalúrgicas que las procesan; para el control de dichas cualidades los contenidos de hierro constituyen uno de los parámetros más empleados. La planificación se realiza a partir de modelos, pues el yacimiento real no se conoce hasta que no es explotado. Modelar en este caso se refiere al proceso de obtener ecuaciones matemáticas que expliquen el comportamiento espacial de una variable y con ella estimar o simular los valores de la misma en un soporte v determinado, donde v puede ser un punto o unidades de selectividad minera. Por tal motivo, de la precisión y la calidad de la información resultante del

proceso de modelación depende en gran medida la rentabilidad minera, tal y como se muestra en el esquema siguiente:



Estos yacimientos son heterogéneos, con menas oxidadas y silicatadas, que tienen una composición química y mineralógica contrastante y desigual distribución de los elementos portadores útiles y nocivos. Por otra parte, el desigual comportamiento de los elementos químicos mayoritarios (hierro, magnesio y sílice) en las distintas clases litológicas provoca que el error de sus estimadores aumente, como consecuencia de la mezcla de poblaciones estadísticas y geoestadísticas.

En la actualidad existe la tendencia de disminuir el volumen de la unidad de selectividad minera. La primera empresa en el territorio que realizó cambios en este sentido fue "Moa Nickel S.A.", en sus minas se sustituyó el antiguo método de extracción por área de influencia de los pozos de la red cuadrada de 33.33m por la explotación en bancos, con unidades de selectividad de sección cuadrada de 8.33 m de ancho y 3 m de altura. Dicho cambio presupone un uso más racional de los recursos, pero trae aparejado un aumento del error de estimación local; este fenómeno es perfectamente explicado por la teoría clásica de las geoestadísticas

lineales, la cual plantea que el volumen donde se estima es inversamente proporcional a la varianza del error de estimación.

Estas consideraciones sugieren adoptar un modelo matemático que explique el comportamiento espacial de los contenidos de hierro en cada litología; dicho modelo debe permitir deducir técnicas más robustas de estimación y simulación en soporte de bloques pequeños, con errores inferiores y más estables que los obtenidos con los métodos de kriging ordinario, tradicionalmente empleados en este tipo de yacimiento. Por tal motivo se parte de un enfoque aleatorio del fenómeno y se emplean las geoestadísticas para dar solución al problema que se presenta a continuación.

Problema científico de la investigación

Este trabajo se centra en: la necesidad de modelar con mayor precisión, en soporte de bloque, los contenidos de hierro de yacimientos lateríticos heterogéneos de níquel y cobalto, compuestos por menas oxidadas y silicatadas.

Objeto de estudio

Como objeto de estudio se seleccionó *un sector del yacimiento Moa Oriental* de un kilómetro cuadrado de área.

Hipótesis

Martínez y Pérez, 2005, comparan diferentes técnicas de interpolación y llegan a la conclusión de que casi todos los métodos geoestadísticos, así como, el inverso al cuadrado de la distancia brindan resultados similares en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, lo que se puede generalizar a los depósitos lateríticos de la región. También concluyen que la principal causa del aumento del

error de la modelación es la mezcla de poblaciones estadísticas con propiedades diferentes. Partiendo de estas observaciones se formula la hipótesis siguiente:

Es posible aumentar la precisión con que se estima y simula el contenido de hierro, en las unidades de selectividad minera, si se parte de un modelo que explique la desigual variabilidad espacial que tiene esta variable en cada litología del perfil laterítico.

Objetivo de la investigación

La obtención de un modelo que permita estimar con mayor precisión los contenidos de hierro en las unidades de selectividad minera, considerando que éste tiene desigual variabilidad espacial en las distintas clases litológicas del perfil laterítico.

Teniendo en cuenta que la modelación de las litologías de las lateritas de la región es un problema sin resolver, como objetivo colateral se plantea:

Obtener un método robusto para la determinación de la composición litológica de las unidades de selectividad minera.

Novedad Científica

Las novedades científicas de este trabajo se pueden dividir en dos grupos, en el primero se recogen aquellas que constituyen un aporte a las geoestadísticas como ciencia o son aplicaciones de interés general:

- A. El método creado para obtener el modelo de los variogramas multivariados con datos puramente heterotópicos y su aplicación en el cokrigeage, este último se consideraba imposible bajo dicho contexto.
-

- B. El enfoque multivariado aplicado para resolver el problema de la mezcla de poblaciones estadísticas, que incluye dos elementos principales: la ecuación que describe el comportamiento del hierro en el perfil laterítico y la deducción del estimador de cokrigeage a partir de ella. El estimador de cokrigeage puede considerarse un nuevo método de estimación, aunque se introducen artificios matemáticos con el objetivo de implementarlo a partir de métodos existentes.
- C. El empleo de variables auxiliares densamente muestreadas en la simulación de las gaussianas, como parte de la simulación de variables categóricas bajo el contexto gaussiano truncado. En este caso solo se muestran algunas consideraciones teóricas, deducidas a partir de la definición del método por parte de otros autores, como Armstrong, et al., 2003.
- D. La propuesta de tres aplicaciones de la información de georadar para modelar yacimientos lateríticos de níquel y cobalto:
- La modelación del fondo empleando georadar como variable secundaria en el cokriging con colocación o como drift en el krigeage con drift externo.
 - La modelación de las litologías empleando la simulación en el contexto gaussiano truncado y el georadar como variable auxiliar.
 - La simulación de los bloques flotantes (*boulders*) empleando el georadar como proceso de intensidad de Poisson.

En el segundo grupo se encuentran las novedades de interés nacional, donde se destaca:

- A. La introducción de la simulación en el contexto gaussiano truncado para modelar las litologías de las lateritas ferro-niquelíferas de Cuba Oriental.
- B. El desglose que se realiza del contenido general del hierro en la unidad de selectividad minera, en los contenidos de hierro asociados a cada litología.
- C. El empleo de límites implícitos en las proporciones de las litologías, como parte del modelo geométrico de los yacimientos lateríticos.

Todos estos aspectos son discutidos en las siguientes páginas, repartidas en tres capítulos donde se muestran: las cuestiones generales de la investigación, los fundamentos teóricos de los métodos propuestos y la aplicación práctica al objeto de estudio.

CAPÍTULO I ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE INVESTIGACIONES PRECEDENTES SOBRE LA MODELACIÓN Y OTROS TEMAS RELACIONADOS

Introducción

En este capítulo se analizan temas diversos como la geología de los yacimientos de lateritas ferro-niquelíferas; la modelación de éstos y la relación que tiene dicho proceso con la prospección geológica, la minería y la metalurgia; también se analizan trabajos relacionados con la estimación de recursos y modelación matemática de yacimientos lateríticos cubanos y el estado actual de la geoestadística en la esfera mundial.

Geología de los yacimientos de menas lateritas

Elias, 2002, plantea que las lateritas ricas en níquel y cobalto son el producto de la meteorización intensa de rocas ultramáficas en la superficie terrestre, bajo condiciones climáticas húmedas; el resultado es el perfil laterítico formado por capas o estratos de material meteorizado sobreyaciendo la roca madre (Figura I.II.1); también muestra una clasificación general de las lateritas, en la que se destacan tres grupos principales: las lateritas oxidadas, compuestas fundamentalmente por óxidos e hidróxidos de hierro; las lateritas arcillosas y las silicatadas. Según esta clasificación el sector objeto de estudio es de lateritas oxidadas, donde la transformación mineralógica que ocurre durante su formación explica las tendencias globales de los elementos mayoritarios, entre ellos el hierro.

Una clasificación más completa es la mostrada por Golightly, 1979, p.15, la cual está en función del clima, la roca madre y el drenaje, aspectos que considera de mayor importancia en la formación del perfil; según esta clasificación el sector caso de estudio es de perfil ecuatorial húmedo, sobre rocas altamente serpentinizadas en áreas bien drenadas; dichas condiciones implican un perfil formado por una zona de limonita y otra de saprolita, la garnierita solo es importante localmente y la estructura con predominio de bloques flotantes (*boulder*) está ausente o muy poco representada.

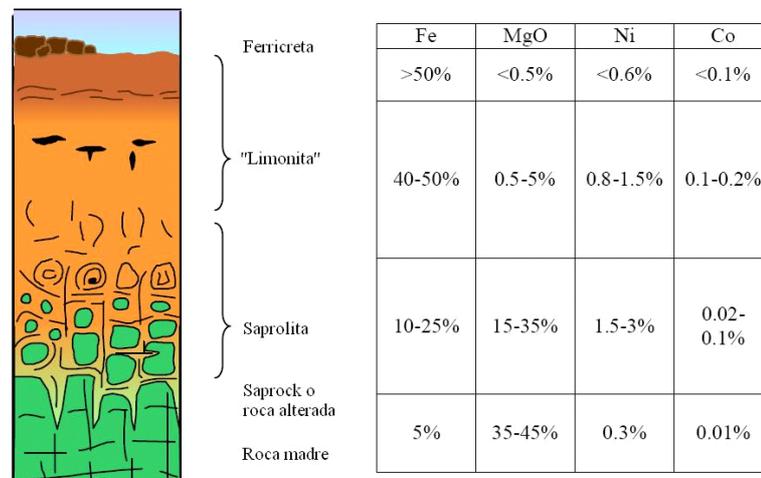


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1
 Perfil laterítico típico y contenidos promedio de elementos químicos,
 tomado de Elías, 2002

Geología de la región

Según Iturralde-Vinent, 1996 la geología de Cuba se caracteriza por la existencia de dos elementos estructurales fundamentales: el cinturón plegado y el neoaútóctono; el cinturón plegado está formado por terrenos oceánicos y continentales de edad Pre Eoceno Medio; las unidades oceánicas están compuestas por los arcos de islas volcánicas del Cretácico y el Paleógeno y los materiales pertenecientes al cinturón ofiolítico septentrional; las rocas ultrabásicas de este último dieron origen, por meteorización, a los yacimientos de lateritas ferro-niquelíferas.

En Cuba Oriental las ofiolitas están asociadas a la Faja Mayarí Baracoa, sus afloramientos están separados en tres complejos: Mayari Cristal, Moa Baracoa, Sierra del Convento (Iturralde-Vinent, 1996); el complejo ofiolítico Moa Baracoa muestra un corte completo, pero en el sector seleccionado del yacimiento Moa Oriental solo aparecen representadas las peridotitas con texturas de tectonitas, con un predominio de rocas harzburgíticas.

Geología del yacimiento Moa Oriental

El yacimiento Moa Oriental, además de ajustarse a las clasificaciones antes mostradas, también es de tipo laterítico-saprolítico o de perfil completo (Ariosa, 2002); se encuentra ubicado dentro del bloque morfotectónico El Toldo (Rodrigues, 1998).

Los contactos entre los principales horizontes del perfil laterítico son complejos y transicionales, por ello es casi imposible establecerlos con precisión a partir de superficies; la obtención de dichos límites también se afecta por la existencia de bloques. Por otra parte, la variedad de fenómenos existentes sugiere una complejidad del basamento y la corteza mayor a la reflejada en las perforaciones; el volumen de información geológica sobre el basamento es insuficiente, al igual que la información relacionada con aspectos específicos de la corteza.

La modelación de los yacimientos de menas lateríticas cubanos y su relación con la prospección geológica, la minería y el proceso metalúrgico

Campos, Guerra y Gé, 2005 exponen algunas dificultades que ha tenido la exploración de los yacimientos lateríticos cubanos hasta inicio de los 90, muchas de estas han sido heredadas y son irremediables, un ejemplo de ello es la insuficiente cantidad de elementos medidos en la red de exploración de 33.33m. La minería está marcada por la tendencia a la explotación por bancos, equipamiento relativamente ligero y un alto grado de selectividad de la minería; esto implica un cambio importante en cuanto al tamaño de la unidad de selectividad minera, lo que provoca un aumento del error de estimación, a causa del efecto soporte (Armstrong, 1998). El extracción metalúrgica se realiza con lixiviación ácida a presión (PAL), donde la composición mineralógica juega un papel importante

en la eficiencia; por ello resulta conveniente modelar la litología, la que se emplea además para controlar la calidad de la masa minera, junto a contenidos de algunos elementos químicos, como el hierro, el magnesio, la sílice, entre otros.

Una novedad en la exploración de los yacimientos lateríticos es el uso de métodos geofísicos, fundamentalmente de georadar (GPR) y sondeo eléctrico vertical en la variante de polarización inducida (SEV-PI), estos pueden emplearse como variables auxiliares para la modelación con técnicas geoestadísticas de: el fondo, usándolas como drift externo o variable colocada; las litologías, empleándolas como drift externo o variable colocada durante la modelación de las gaussianas en el contexto gaussiano truncado; y para modelar los bloques flotantes con simulación booleana, donde pueden definir el proceso de intensidad de Poisson.

Comentarios sobre el estado actual de la geoestadística en la esfera mundial

El estudio sistematizado de la geoestadística gira en torno a varias técnicas básicas, las que se pueden clasificar dentro de cinco grupos: geoestadística lineal, geoestadística no estacionaria, geoestadística multivariada, simulaciones y geoestadística no lineal.

La geoestadística lineal univariada constituye la base de la geoestadística en general, está relacionada con el estudio de las variables regionalizadas que satisfacen la hipótesis estacionaria de segundo orden o la intrínseca. Las técnicas de estimación más utilizadas son el kriging ordinario y el simple.

Las variables aleatorias regionalizadas (VR) no son más que realizaciones de las Funciones Aleatorias (FA), definidas como $Z(x, \omega)$, pero usualmente denotada como $Z(x)$; x denota las

coordenadas en el dominio $D \subset R^n$ donde está definida y ω denota las realizaciones de las VR en el espacio probabilístico (Ω, A, P) (Chilès y Delfiner, 1999, p.12). En el caso de yacimientos heterogéneos pueden existir varios espacios probabilísticos (Ω, A, P) diferentes; lo que hace inestable las definiciones de estacionaridad de segundo orden y la intrínseca, por ende, también se hacen inestables los métodos de estimación y simulación empleados para modelar $Z(x)$ y sus realizaciones; esto explica el incremento del error en la estimación de los contenidos de hierro de los yacimientos lateríticos.

Dentro del grupo de técnicas de las geoestadísticas no estacionarias se encuentra el kriging con drift externo, el cual es particularmente útil cuando se tiene información extra con alta densidad de muestreos, como contrapartida de este método existe el cokriging con colocación, ubicado en el grupo de las geoestadísticas multivariadas.

La geoestadística multivariada presupone la existencia de dos o más variables espacialmente correlacionadas; las herramientas estructurales son similares, por lo tanto se dispone de matrices de covarianzas espaciales y de variogramas, las que se modelan bajo el modelo intrínseco o el lineal de correogionalización.

Asociado a las geoestadísticas multivariada aparece el concepto de heterotropía, que indica que en un sistema multivariado solo ha sido medida una variable en algunos de los n puntos con coordenadas x .

Bleines, et al., 2004, p 637, define la simulación de una FA en un dominio determinado como una realización del modelo que la describe, que reproduce su variabilidad estadística y geoestadística (histograma y variograma). Existen varios métodos de simulación; para modelar las litologías, el más apropiado es la simulación en el

contexto gaussiano truncado; esta puede combinarse con el modelo de funciones aleatorias basadas en objetos, el cual es uno de los más apropiados para simular los bloques flotantes en una corteza laterítica.

Bajo el término de geoestadística no lineal se agrupan las técnicas que implican una transformación no lineal de los datos; estas se crearon para modelar variables que luego de transformadas pueden ser tratadas con técnicas lineales, para modelar indicatrices y para estimar recursos.

Estas son las técnicas más conocidas en las geoestadísticas; muchas de las posibilidades que brindan aún no han sido empleadas en Cuba. En la literatura internacional no se encontró una solución explícita para resolver el problema de la mezcla de poblaciones estadísticas, cuando estas son difíciles de separar.

Conclusiones del capítulo

- 1) Es necesario considerar los contenidos de hierro asociados a cada clase litológica como variables diferentes, para modelarlos en las unidades de selectividad minera, debido a que las transformaciones mineralógicas que tienen lugar durante la formación de las lateritas ferro-niquelíferas gobiernan el comportamiento de los elementos mayoritarios, entre ellos el hierro.
 - 2) Las diferencias entre algunos yacimiento de lateritas ferro-niquelíferas de Cuba es bien explicada por las clasificaciones de Elias, 2002, y Golightly, 1979; estas también permiten definir un modelo geólogo-genético representativo y sencillo que caracteriza adecuadamente las lateritas del sector del yacimiento Moa Oriental seleccionado como objeto de estudio;
-

dicha clasificación es inapropiada para algunos yacimientos, considerados como atípicos.

- 3) La poca potencia y la alta variabilidad del yacimiento Moa Oriental afecta la minería y la metalurgia de sus menas, por tal motivo las unidades de selectividad minera definidas como paneles de 33.33x33.33m, a toda la potencia del perfil, se remplazaron por unidades de solo 8.33x8.33x3m; dicha disminución del tamaño aumenta los errores de estimación, por lo que se requieren métodos más precisos para modelar los contenidos de hierro.
 - 4) Para modelar los contenidos de hierro de forma precisa, empleando técnicas geoestadísticas, es necesario separar las poblaciones estadísticas mezcladas, las que en este caso están definidas por los contenidos asociados a cada litología. Dicho planteamiento se basa en la definición de función aleatoria y las definiciones de hipótesis estacionaria de segundo orden, así como la intrínseca, las cuales se vuelven inestables si existe mezcla de poblaciones estadísticas.
 - 5) Es necesario crear un modelo o método que considere de forma explícita funciones aleatorias y variables aleatorias regionalizadas con mezcla de poblaciones estadísticas, para disminuir el error de estimación de los contenidos de hierro. A pesar del desarrollo alcanzado por la geoestadística, a nivel internacional, no se tienen referencias de modelos o métodos con tales características.
 - 6) Se concluye que el empleo de técnicas geoestadísticas permite hacer un mejor uso de la información geofísica de GPR y SEV-PI, si esta es empleada como variable auxiliar en la modelación de las superficies que limitan los contactos entre
-

algunos horizontes del perfil laterítico, en la simulación tridimensional de las litologías en el contexto gaussiano truncado y como proceso de Poisson en la simulación basada en objetos, la que permite modelar los bloques flotantes de roca dura.

CAPÍTULO II

PARTE TEÓRICA: PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS PARA LA MODELACIÓN

Introducción

La modelación de los contenidos de hierro se ve afectada por la mezcla de poblaciones estadísticas, las que están asociadas a los distintos tipos litológicos que componen el perfil laterítico; por otra parte resulta complicado definir los límites entre cada una de las litologías, debido a su naturaleza transicional, su forma compleja y su elevada variabilidad espacial. A esto se suma que no existe ningún método explícitamente destinado a modelar variables afectadas por mezclas de poblaciones estadísticas difíciles de separar. En este capítulo se muestran los aspectos teóricos creados para solucionar estos problemas que atañe a la investigación.

Modelación de yacimientos lateríticos

Martínez y Pérez, 2000, p.21, dividen los modelos de yacimientos en los componentes siguientes: el modelo geólogo-genético, el geométrico y el matemático o de bloques. En su conjunto explican las particularidades del yacimiento modelado, lográndose la estimación y simulación eficaz del fenómeno analizado.

El modelo genético recoge toda la información geológica relacionada con el yacimiento objeto de estudio con el objetivo de hacer un uso máximo de la geología durante la modelación matemática y definir que cualidades geológicas deben reflejar los modelos resultantes.

El modelo geométrico tiene como objetivo separar el depósito de las *rocas de caja* y subdividirlo, de forma tal que los límites espaciales de cada subzona constituyan campos geométricos D, donde las variables regionalizadas caractericen poblaciones estadísticamente

homogéneas; dichos límites pueden representarse a partir de superficies (límites explícitos) y a partir de las proporciones de las litologías en las unidades de selectividad minera; estos últimos fueron utilizados para dar solución al problema de la complejidad de los contactos entre las distintas clases litológicas.

El modelo numérico o de bloques no es más que el conjunto de soportes de volumen v sobre el cual se estiman o simulan las variables regionalizadas. En los yacimientos de menas lateritas de níquel y cobalto los más empleados son el modelo de paneles y el modelo de bloques clásico.

Estimación de variables

Los contenidos, las distribuciones estadísticas y las continuidades espaciales de los elementos químicos, en cada horizonte del perfil laterítico, difieren como consecuencia de los cambios en la composición mineralógica y otros factores que controlan el proceso de lateritización. Este fenómeno adquiere mayor relevancia en el caso de los elementos mayoritarios (hierro, magnesio y sílice) y trae como resultado mezclas de poblaciones estadísticas y geoestadísticas, que dificultan el análisis estructural y aumentan el error de las estimaciones; para mitigar su efecto se propone un modelo multivariado que considera los contenidos de hierro en cada grupo litológico como variables diferentes, una explicación teórica de dicho modelo se muestra a continuación.

Modelo general propuesto

Sea $Z(x)$ una función aleatoria, $p_i(x)$ la proporción de la litología i en el punto con vector de coordenadas x y $1_i(x)$ la función indicatriz correspondientes a la litología i , para separar las poblaciones

estadísticas en el soporte puntual se propone la combinación lineal siguiente:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n p_i(x)Z_i(x) = \sum_{i=1}^n 1_i(x)Z_i(x) = Z_{i_0}(x)$$

considerando como conocidas las proporciones $p_i(x)$ el estimador queda:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n p_i(x)Z_i^*(x) = \sum_{i=1}^n 1_i(x)Z_i^*(x) = Z_{i_0}^*(x)$$

donde la función indicatriz se define como:

$$1_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i = i_0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

y $Z_{i_0}^*(x)$ es el estimador de la VR correspondiente a la litología i_0 en el punto x

El estimador $Z^*(x)$ no depende de las proporciones de las litologías ni de los indicadores, pero estos deben conocerse a priori en cada posición x , además, se deben considerar determinísticas.

Se decide emplear un modelo discretizado del soporte v , debido a que este modelo para el soporte de bloques requiere asumir que las proporciones son homogéneas en v , además, los variogramas medios en v dependen de las proporciones.

Estimación de los contenidos de los elementos químicos, según el modelo propuesto

El cokrigeage se define partiendo del modelo general propuesto para el soporte puntual, el estimador es:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n p_i(x_0)Z_i^*(x_0) = \sum_{i=1}^n 1_i(x_0)Z_i^*(x_0) = \sum_{i=1}^n 1_i(x_0) \sum_j^m \lambda_j^i Z_j^*(x_j)$$

como solo existe una litología i_0 en x_0

$$Z^*(x_0) = Z_{i_0}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \sum_j^m \lambda_i^j Z_i^*(x_j)$$

$$\text{donde } \sum_j^m \lambda_i^j = \begin{cases} 1 & \text{si } i = i_0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Para estimar los contenidos medios de hierro en v , a partir del estimador puntual, se emplea un modelo de discretización regular: primeramente se estiman los valores de hierro por litología en cada punto de discretización q , usando cokriging ordinario puntual; luego, se calculan las medias de los q valores estimados en el bloque v , para cada variable $Z_i^*(v)$; por último, para obtener el estimador del contenido global de hierro en el soporte de bloques discretizado, según el modelo general propuesto, se emplea la expresión $Z^*(v) = \sum_{i=1}^{n_i} p_i(v) E^*[Z_i^*(v)]$. Esta metodología también puede emplearse para simular los contenidos de hierro en el soporte v , en lugar de estimarlos.

Las proporciones son estimadas o simuladas y aportan un error extra, por tal motivo la metodología propuesta se recomienda solamente para los casos donde el error aumenta considerablemente a causa de las mezclas de poblaciones estadísticas, o se pretende tratar de conocer los contenidos asociados a cada litología en los bloques v .

Procedimiento para determinar el modelo de variograma multivariado, en el caso de datos puramente heterotópicos

Debido a que los datos que definen el modelo propuesto son puramente heterotópicos resulta imposible calcular los variogramas

experimentales cruzados (Wackernagel, 1998, p. 159); esto no implica la indefinición del modelo de variabilidad espacial; para obtener el modelo se propone un método basado en el principio de prueba y error; el procedimiento consiste en crear arbitrariamente un listado de modelos candidatos y seleccionar de ellos el que mejores resultados muestre en la validación cruzada, la solución no es única y el listado debe definirse cuidadosamente teniendo en cuenta criterios orientativos, obtenidos a partir del análisis del fenómeno físico y otras herramientas alternativas, como el pseudo variograma cruzado; también deben tenerse en cuenta las propiedades de los modelos admisibles.

La variabilidad espacial se modela bajo dos contextos fundamentales: la coregionalización intrínseca y la lineal, en ambos casos la suma de las estructuras están acotadas por la desigualdad $b_{ii}b_{jj} - b_{ij}^2 \geq 0 \forall i,j$; dicha propiedad reduce considerablemente el campo de existencia de los modelos candidatos.

El procedimiento a seguir es: calcular los componentes directos de los variogramas experimentales multivariados; ajustarlos, bajo el modelo lineal o intrínseco de coregionalización, asumiendo las varianzas cruzadas b_{ij} con $i \neq j$ como nulas; realizar un análisis del fenómeno físico, e investigar otros criterios orientativos, para determinar a priori el grupo de modelos que se comparará; definir el listado de estructuras que serán comparadas, considerando posibles iteraciones; realizar validación cruzada con cada uno de estos modelos y seleccionar el más adecuado; si resulta evidente la convergencia hacia una estructura en específico se repite el procedimiento a partir del cuarto paso, tratando de refinar el modelo.

Un artificio alternativo para modelar dichos variogramas es la reconstrucción de la base de datos, pasando a dos dimensiones o regularizando las muestras; de esta manera se elimina el problema de la heterotropía pura total o parcialmente.

Estimación de las proporciones de las litologías en el volumen v

En el campo de las geoestadísticas existen dos contextos fundamentales para modelar las litologías: el kriging o la simulación de los indicadores y la simulación en el contexto gaussiano y plurigaussiano truncado

Muchas veces el kriging y la simulación de los indicadores no reproducen la textura real de las litologías y sus contactos, otra desventaja es que son muy sensibles al muestreo selectivo, lo que implica que los sondeos de exploración deben cortar todos los horizontes del perfil laterítico.

Las gaussianas truncadas constituyen un enfoque más elaborado, el cual permite modelar depósitos formados por litologías con relaciones complejas; su principal ventaja está en la capacidad de controlar la naturaleza y aspecto de los contactos entre las litologías, incluso, evita aquellos que no son admisibles; también puede reproducir la textura original del yacimiento simulado; en ocasiones es necesario combinarlo con otros métodos de simulación basados en objetos para modelar algunas litologías con características especiales, como los bloques flotantes.

Uno de los pasos de este método es la simulación de las gaussianas, donde se propone utilizar variables auxiliares densamente muestreadas de GPR y SEV-PI para mejorar la calidad de la simulación; para ello se pueden emplear diferentes combinaciones de cosimulación con colocación y simulación con drift externo.

Otros modelos

El modelo general propuesto quizás pueda ser remplazado por uno, que disminuya de forma implícita el efecto de las mezclas de poblaciones estadísticas; dicho método debe estar definido en el contexto multivariado, y debe tener en cuenta los elementos mayoritarios del perfil laterítico.

Conclusiones del capítulo

- 1) Se muestra que el enfoque sistémico de la modelación de yacimientos minerales, formado por tres componentes básicos, el modelo geólogo-genético, el geométrico y el matemático, permite integrar de forma eficiente la información geológica durante la modelación matemática.
 - 2) El modelo geólogo-genético puede ser expresado por medio de los modelos geométricos y matemáticos, y en especial, por el modelo matemático que describe el comportamiento del hierro en el perfil laterítico, si este es sencillo y representativo.
 - 3) Los límites implícitos en las proporciones de las litologías constituye una novedad en cuanto a la geometrización de yacimientos con límites complejos; permite evitar la necesidad de modelar las complicadas, variables y mal definidas superficies que limitan cada horizonte del perfil laterítico, cuyo error de modelación es usualmente elevado.
 - 4) El modelo matemático que se propone para describir el comportamiento del hierro en el perfil laterítico permite deducir un estimador que disminuye el error de estimación, a partir de la separación de los contenidos por litología. Debido a que la litología controla el comportamiento de los elementos
-

químicos mayoritarios del perfil laterítico, este modelo puede ser generalizado al caso del magnesio y la sílice; además, brinda un mayor grado de información, pues permite conocer los contenidos asociados a cada litología en la unidad de selectividad minera.

- 5) El método interactivo propuesto para modelar los variogramas multivariados a partir de datos con heterotopía pura permiten realizar el cokrigeage en el caso heterotópico puro, considerado hasta entonces sin solución.
- 6) Se propone, como método geoestadístico más apropiado para modelar las litologías, la simulación en el contexto gaussiano truncado, el cual nunca antes se ha utilizado para modelar los yacimientos ferro-niquelíferos cubanos y no se tiene referencia de su aplicación en otros yacimientos similares, de otras regiones del mundo; su efectividad puede ser mejorada a partir del empleo de variables auxiliares densamente muestreadas (GPR y SEV-PI)
- 7) La discretización de las unidades de selectividad minera, que se propone, permite estimar las proporciones de las litologías simuladas en el contexto gaussiano truncado, además posibilita el uso de softwares comerciales para implementar los estimadores deducidos a partir del modelo matemático que se definió para describir el comportamiento del hierro en el perfil laterítico.

CAPÍTULO III
MODELACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE HIERRO
EN UN SECTOR DEL YACIMIENTO MOA ORIENTAL

Introducción

Se seleccionó como caso de estudio un sector de un kilómetro cuadrado de superficie, situado al oeste del yacimiento Moa Oriental, ubicado en Moa, provincia Holguín, Cuba, en el coexisten tres campañas de exploración: R33, R16 y R66, las dos últimas solamente se ensayaron en la zona económica del perfil laterítico y llegan hasta el tope de las saprolitas; antes de utilizar estos datos se chequeo cuidadosamente la existencia de posibles errores y duplicados.

Las litologías se clasifican por los códigos 1, 2, y 3 para la zona de las limonitas, 4 para la saprolita y 7, 17 y 47 para las rocas del basamento; por su similitud estos se simplificaron a L1 para los códigos 1 y 2, L3 para el código 3 y L7 para las rocas ultrabásicas que conforman el basamento

Análisis estadístico

La calidad de los datos está afectada por la existencia de tres campañas de exploración, perforadas, descritas y analizadas por compañías, laboratorios y técnicas analíticas diferentes, no obstante los contenidos de hierro son comparables.

Para el análisis estadístico se consideró R33 como una muestra representativa, donde no se pone de manifiesto el muestreo preferencial introducido por los pozos de las campañas de exploración R16 y R66; el análisis estadístico de los contenidos de hierro se realizó de forma global y por clases litológicas, en los resultados se aprecian diferencias considerables, que indican la presencia de mezclas de poblaciones estadísticas. El cálculo de las proporciones de las litologías en R33 indica que las saprolitas solo ocupan un 5% de la potencia de la corteza.

Modelo geométrico

En este acápite se analizan los límites que se definen a través de superficies, en tal caso se encuentran el techo y el fondo del depósito; éstas se modelaron con rejillas regulares finas que se denominan Modelo Digital del Terreno (MDT) y Modelo Digital del Fondo (MDF). Los variogramas direccionales mostraron una marcada ausencia estacionaridad, por ello, como estimador se empleó el kriging IRF-k.

Modelo matemático

Este modelo comprende el soporte v , el modelo matemático que explica de forma general el comportamiento del hierro en el depósito y la estimación de los contenidos de hierro; además incluye las proporciones de las litologías en v . Para su confección se tuvo en cuenta que la forma del depósito es similar a un gran manto estratificado y plegado, cuyos pliegues siguen la superficie topográfica. El intervalo de muestreo es de un metro y la distancia mínima entre pozos es de 11.30 m; el material duro con alta granulometría es eliminado por un proceso de cribado.

Análisis estructural

El comportamiento espacial de los contenidos de hierro puede estar enmascarado por la morfología del depósito y por la influencia de la mezcla de poblaciones estadísticas, así como, por el carácter puramente heterotópico de los datos que describe el modelo general propuesto.

Los variogramas experimentales, calculados a partir del yacimiento referido a una superficie horizontal ("datos desplegados"),

mostraron menor drift, estructuras más continuas y menor varianza que aquellos calculados en el sistema de coordenadas real; tampoco mostraron anisotropía en la dirección horizontal; estos se calcularon hasta una distancia de 1000 m, con espaciado (lags) de 66.66 y 33.33 metros y corte vertical (slicing heigh) de 0.5 m; en la dirección vertical el cálculo se realizó a lo largo de las líneas de pozos con lag de 1 m. Las variables utilizadas fueron los contenidos de hierro en L1, L3, L4 y global; se pudo apreciar que el variograma del contenido global de hierro, el cual posee mezcla de poblaciones estadísticas, sobrestima la variabilidad espacial.

El modelo general propuesto para describir el comportamiento de los contenidos de hierro en el perfil laterítico está definido a partir de las combinaciones lineales:

$$Fe(x) = p_1(x)Fe_1(x) + p_3(x)Fe_3(x) + p_4(x)Fe_4(x)$$

$$Fe(v) = p_1(v)Fe_1(v) + p_3(v)Fe_3(v) + p_4(v)Fe_4(v)$$

Dicho modelo está caracterizado por una base de datos con heterotopía pura, por ello, para ajustar el variograma multivariado se siguió la metodología propuesta en el acápite II.VI; El ajuste se realizó en dos variantes: el método interactivo y a partir del variograma de los datos transformado por regularización a intervalos de muestreo de 2m.

Como criterio para comparar los modelos candidatos, donde se incluye el univariado de los contenidos de hierro, se emplearon los errores obtenidos con validación cruzada de tipo jackknife, para ello se extrajo poco más de 100 pozos, esparcidos en toda el área estudiada. La selección del modelo más apropiado se realizó tomando como criterio las varianzas y las medias de los errores de la validación cruzada.

Los mejores resultados se obtuvieron para el modelo arbitrario A4, no obstante, las diferencias entre las medias y las varianzas de los errores asociadas a los variogramas multivariados es pequeña. El estimador univariado del hierro tiende a ser sesgado e inestable, pues cambia considerablemente con la adición o sustracción de las muestras de L7, las que solamente ocupan un ínfimo porcentaje en el depósito; los errores se incrementan cuando se pasa de L1 a L4 (Tabla III.IV.1).

El krigage (univariado) tiende a minimizar la media del error global, pero el error, visto localmente, se incrementa considerablemente, y con el su varianza. En el contexto multivariado propuesto, el que presupone homogeneidad de las variables y la separación previa de poblaciones desiguales, el error es más estable a medida que pasamos de un horizonte a otro (Figura III.IV.1).

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1**
 Resultado de la validación cruzada, en términos de error

¡Error! Vínculo no válido.

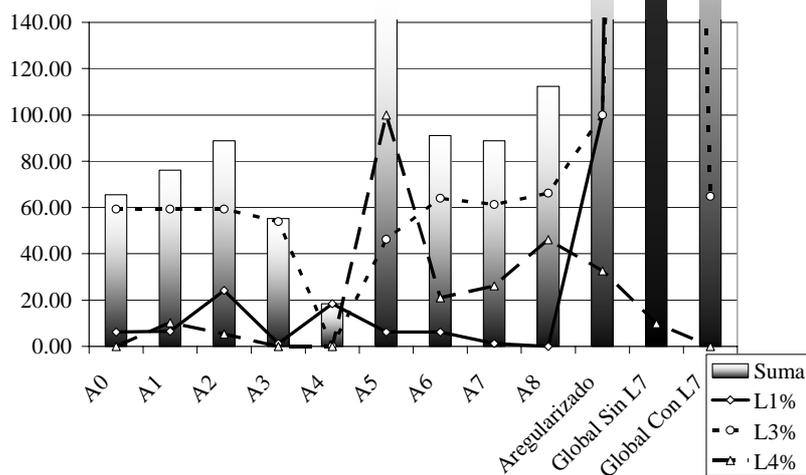


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2**
 Varianza de los errores en porcentaje y su suma (considerando los modelos A0 -8 y A Regularizado)

Determinación de las proporciones de las litologías

El krigeage indicador se realizó bajo el contexto multivariado, para probar este método se realizó la validación cruzada empleando los mismos puntos y procedimientos mostrados en el acápite anterior; los resultados fueron muy imprecisos para el soporte puntual, además, los errores se incrementan hacia las litologías que ocupan el menor porcentaje, por lo que el método es desechado.

Las proporciones se calcularon en el contexto gaussiano truncado; para ello los bloques v se discretizaron con 36 puntos, ordenados regularmente, en una rejilla fina, cada 4.16m en la dirección horizontal y 1.00m en la vertical. Las muestras se discretizaron a 1m de longitud, además se agregaron algunas ficticias de la clase litológica L7 al final de los pozos de R33, para garantizar una estimación robusta de las curvas de proporciones verticales (CPV).

Con las CPV regionalizadas se calcularon las proporciones a priori en cada uno de los puntos de discretización de los bloques v , empleando el krigeage con modelo lineal. El *lithotype rule* fue diseñado teniendo en cuenta las características geológicas del depósito, dado por una sucesión de horizontes desde L1 hasta L7; los contactos entre dos litologías no contiguas están asociados a la poca potencia o no existencia de horizontes intermedios. Solo una gaussiana es empleada, su variograma fue modelado con dos estructuras esféricas, las que reflejan adecuadamente la textura del depósito en las simulaciones no condicionadas.

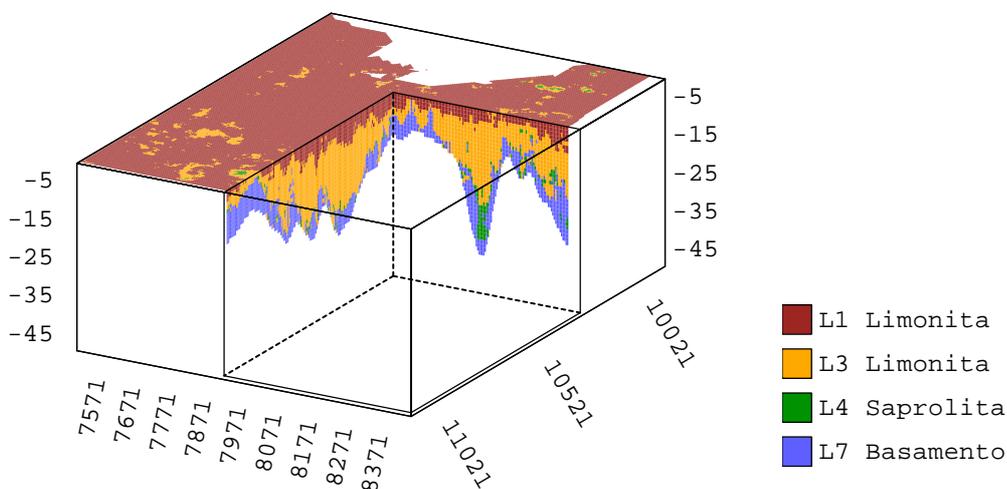


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3
Primera realización de la simulación gaussiana truncada; vista 3D seccionada

Se simularon condicionalmente 30 realizaciones en los puntos de discretización (Figura III.IV.2); para cada una de dichas realizaciones se calcularon las proporciones de las litologías en las unidades de selectividad minera v .

Estimación de los contenidos de hierro

Una vez, disponibles las proporciones, se realizó la estimación de los contenidos de hierro correspondientes a cada una de las litologías en los puntos de discretización de los bloques v , para ello se utilizó el modelo de variograma A4; los valores en soporte de bloque se calcularon por promediación y el contenido global en v se obtuvo a partir la expresión:

$$Fe(v) = p'_1(v)Fe_1(v) + p'_3(v)Fe_3(v) + p'_4(v)Fe_4(v)$$

$$= \frac{p_1(v)Fe_1(v) + p_3(v)Fe_3(v) + p_4(v)Fe_4(v)}{1 - p_7(v)}$$

$$\sum_{i=1,3,4} p'_i(v) = 1$$

Los contenidos correspondientes a L7 no se tienen en cuenta, pues esta litología es separada antes de ser procesada, su proporción permite rectificar el volumen de los bloques v . Para cada una de las treinta realizaciones de las proporciones se obtiene una de $Fe(v)$, cuyas variaciones están asociadas a la simulación de las litologías; aunque en este caso se empleó la estimación, también es posible simular los contenidos de $Fe_i(x)$.

Para comparar los resultados también se realizó la estimación en el contexto univariado y se calcularon las diferencias entre ambos métodos. Las mayores diferencias están asociadas en gran medida al filtrado por el cokriging de los contenidos de hierro en L7; no obstante, el comportamiento global es similar en ambos casos. Como medida de la incertidumbre en la estimación se emplearon la desviaciones estándar de las realizaciones de $Fe(v)$ y la diferencia entre éstas y el estimador univariado, en ambos casos los resultados son similares; la incertidumbre en la modelación es mayor hacia el horizonte saprolítico.

La disponibilidad de varias realizaciones permite analizar la probabilidad $P\{Fe(v) > 35\%\}$, y brindar resultados de recursos, de forma similar a los obtenidos con métodos geoestadísticos no lineales. También se pueden calcular 30 realizaciones de los tonelajes de metal y mena a partir de las expresiones siguientes:

$$Q\{Fe(v)\} = v(p_1(v)Fe_1(v) + p_3(v)Fe_3(v) + p_4(v)Fe_4(v))$$

$$T\{Fe(v)\} = v(d_1p_1(v)Fe_1(v) + d_3p_3(v)Fe_3(v) + d_4p_4(v)Fe_4(v))$$

Donde d_i representan las densidades asociadas a cada litología.

Conclusiones del capítulo

- 1) Se demuestra, mediante la validación cruzada, que la estimación de los contenidos de hierro obtenida a partir del

modelo propuesto es más precisa que la realizada con el kriging ordinario univariado; este último es el método utilizado en la actualidad para modelar la mayoría de los elementos químicos de los yacimientos de lateritas ferromanganesíferas.

- 2) En el modelo propuesto, la disminución del error está fundamentalmente favorecida por la separación de los contenidos de hierro por litología y en menor medida por el ajuste adecuado de las estructuras cruzadas de los variogramas puramente heterotópicos.
 - 3) El modelo propuesto, además de minimizar el error global, minimiza el error por litología, lo que hace que la distribución espacial de los errores sea más estable. El kriging univariado solo minimiza el error global, pero tiende a concentrar los mayores errores locales hacia las saprolitas.
 - 4) El método interactivo que se creó para modelar los variogramas multivariados puramente heterotópicos funciona y permite disminuir el error de estimación de los contenidos de hierro, gracias a su empleo en el cokriging puramente heterotópico, el cual se consideraba sin solución hasta el momento, debido a la no existencia de modelo de variograma.
 - 5) En el sector caso de estudio se definen satisfactoriamente los límites implícitos en las proporciones de las litologías, obtenidas con simulación gaussiana truncada, a pesar de que solo se utilizó la información litológica disponible en los sondeos de exploración durante la modelación.
 - 6) El uso de la simulación gaussiana truncada permitió modelar adecuadamente las litologías en tres dimensiones, empleando solamente la información disponible en los pozos; además, se
-

muestra que ésta no es afectada por el muestreo selectivo que introducen las campañas de exploración R16 y R66 y la estructura variable y heterogénea del perfil laterítico quedó reflejada en los resultados.

- 7) Se demuestra que la determinación de las proporciones de las litologías empleando el método de estimación o simulación de las indicatrices no brinda resultados precisos y no reproduce la textura propia del perfil laterítico, además, tiende a subestimar las litologías menos abundantes, como L4 y es severamente afectado por el muestreo selectivo introducido por R16 y R66.
- 8) El modelo de bloques obtenido es más informativo que los anteriormente utilizados y refleja las particularidades del modelo geólogo-genético; en cada unidad de selectividad minera se conocen: las proporciones de las litologías y los contenidos de hierro asociados a ellas; el volumen rectificado con las proporciones de las rocas del basamento; también se filtran los contenidos correspondientes a esta litología, la cual no es procesada por la planta metalúrgica.
- 9) Se muestra que, gracias al uso de simulaciones, se conocen criterios de incertidumbre calculados a partir de la varianza de las realizaciones simuladas y la distribución estadística en cada unidad de selectividad minera, lo que permite brindar los resultados en forma de probabilidades por encima de un *cutoff*, como lo hacen las técnicas geoestadísticas no lineales, diseñadas para la estimación de recursos.

CONCLUSIONES

Se obtiene por primera vez, un modelo matemático para describir el comportamiento de los contenidos de hierro en el perfil laterítico, lo que permite realizar estimaciones más precisas que las obtenidas con el kriging ordinario univariado, tradicionalmente empleado para modelar esta variable; además, la distribución de los errores es más estable, pues los minimiza de forma global y por clases litológicas; a la vez que brinda resultados más informativos, en cada unidad de selectividad minera, desglosando el contenido global en contenidos correspondientes a cada litología; permitiendo filtrar los contenidos de las rocas no procesadas y recalcular el volumen en función de las proporciones de las litologías.

Se concluye que la simulación en el contexto gaussiano truncado que se propone constituye un método robusto para modelar las litologías en las unidades de selectividad minera, las que se requieren para implementar el modelo general propuesto, debido a que refleja la estructura propia del perfil laterítico y no es afectada de forma considerable por el muestreo preferencial y la desigual abundancia de las clases litológicas en el depósito, siendo por primera vez su aplicación en los yacimientos lateríticos cubanos.

Se obtiene, por primera vez y constituye uno de los aportes científicos del trabajo, el modelo matemático multivariado, empleando un modelo geólogo-genético representativo del perfil laterítico; lo que ha permitido expresar el comportamiento de los contenidos de hierro; este procedimiento asegura un uso apropiado de la información geológica durante la modelación matemática.

Se aplica, como resultado novedoso, el método de ajuste interactivo, permitiendo dar solución al problema de la indefinición de las estructuras cruzadas de los variogramas y el cokriging en el caso de datos puramente heterotópicos, el cual aparece como un

problema colateral asociado al modelo general propuesto, permitiendo realizar estimaciones con cokrigeage puramente heterotópico, considerado hasta entonces sin solución.

Un aporte científico del trabajo lo constituye el empleo de límites implícitos en las proporciones de las litologías, lo que permite describir los contactos complicados e imprecisos entre los horizontes del perfil laterítico; este artificio matemático facilita implementar el modelo propuesto con mayor precisión, al evadir la necesidad de modelar los límites expresados en forma de superficies, los cuales son variables, mal definidos y con elevados errores de estimación.

Se concluye que el empleo de los métodos geoestadísticos permite hacer un uso más eficiente de la información geofísica de SEV-PI y GPR, si éstas son consideradas como variables auxiliares; se destacan tres aplicaciones principales:

la modelación de las superficies que limitan las rocas del basamento, las saprolitas y las limonitas, empleando krigeage con drift externo o cokrigeage con colocación, los que excluyen el problema de la falta de precisión de estos métodos geofísicos;

la modelación de las litologías bajo el contexto gaussiano truncado empleando la información de GPR y SEV-PI como drift externo o variables colocadas durante la simulación de las gaussianas

la simulación booleana para modelar los bloques flotantes de las rocas duras, donde la información de GPR es usada como proceso de intensidad de Poisson; este método geoestadístico es prácticamente imposible de realizar empleando solamente los pozos de exploración.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda probar la aplicabilidad de este método a otros elementos mayoritarios del perfil lateríticos, como sílice y el magnesio, los que presentan el mismo problema de mezcla de poblaciones estadísticas controladas por las litologías; se recomienda estudiar su aplicabilidad a otros elementos como el níquel, en tal caso, aunque el error no disminuya, es posible separar los contenidos asociados a la menas silicatadas y las oxidadas en las unidades de selectividad minera, las cuales no liberan con la misma facilidad el níquel durante el procesamiento metalúrgico.
 - 2) Se recomienda probar la efectividad del método para otros yacimientos lateríticos, con modelos geólogo-genéticos diferentes y también a otros tipos genéticos de yacimientos, donde la estimación se vea afectada por la mezcla de poblaciones estadísticas.
 - 3) Se recomienda realizar la demostración práctica de la aplicabilidad de este método, debido a las posibilidades que sugiere el empleo de información geofísica de GPR y SEV-PI como variables auxiliares, en la modelación geoestadística; para ello es necesario definir la forma adecuada de post-procesamiento de dicha información, para hacerla más representativa en la simulación de las gaussianas truncadas y como proceso de intensidad de Poisson en la modelación booleana. En este sentido también resulta recomendable investigar el patrón adecuado de la posición de los perfiles de GPR y los sondeos de exploración de explotación.
 - 4) Se recomienda investigar la posibilidad de automatizar u optimizar el ajuste de las estructuras cruzadas en el método propuesto para modelar los variogramas multivariados
-

puramente heterotópicos; en tal caso, la lógica fuzzy y las redes neuronales pudieran ser herramientas adecuadas para dicho propósito.

- 5) Se recomienda deducir paso a paso todo el sistema de ecuaciones y realizar las demostraciones matemáticas necesarias para la aplicación del cokrigeage deducido a partir del modelo propuesto, en soporte de bloques sin discretización, debido a que las covarianzas en soporte de bloques se afectan por las proporciones de las litologías.
 - 6) Se recomienda comparar e investigar en detalle los modelos alternativos multivariados con el modelo propuesto y la posibilidad de fusionarlos. Dichos modelos incluyen los contenidos de los elementos químicos mayoritarios del perfil laterítico, al fusionarse con el modelo general propuesto es posible que se logre una modelación más precisa e informativa que la obtenida en este trabajo.
 - 7) Se recomienda investigar los problemas de adquisición de información, fundamentalmente en lo referente a: el número y nombre de los elementos químicos medidos; el empleo de técnicas analíticas diferentes, en datos que se utilizan mezclados; y falta de uniformidad en la clasificación de las litologías. Estos aspectos tienen implicaciones negativas en diferentes etapas de la prospección, exploración y explotación de los yacimientos lateríticos.
 - 8) Se recomienda que las empresas mineras que realicen investigaciones más detalladas sobre la geología de los depósitos, antes de comenzar a explotarlos; el poco conocimiento geológico de los yacimientos, en especial del basamento, afecta el proceso de modelación.
-

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA BREAL JORGE E, GENTOIU MARIA, LAVAUT COPA WALDO, GUERRA MARCIAL, DUSSAC TAMAYO ORLANDO, FERNÁNDEZ LÁZARO, 2005: "Resultados de la utilización del georadar (GPR) en la evaluación de yacimientos lateríticos en Cuba Oriental", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, III Congreso de Geofísica (GEF5-p44).

ARIAS DEL TORO JOSÉ, PÉREZ CAMPOS MABEL, CAMPO CORDERO MARTA, 2005: "Determinación de la continuidad de la mineralización del horizonte de serpentinitas duras (SD) en el yacimiento Yamanigüey", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minería (MIN3-6).

ARIOSA IZNAGA JOSÉ DANIEL, 2002: "Modelos de yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co asociados a las ofiolitas del macizo Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental", ISMM, Moa (Ph. D), p. 138.

ARMSTRONG MARGARET, GALLI ALAIN G., LE LOC'H GAËLLE, GEFFROY FRANÇOIS, ESCHARD RÉMI, 2003: "Plurigaussian Simulations in Geosciences". Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, p 149.

ARMSTRONG MARGARET, 1998: "Basic Linear Geostatistics". Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, p 153.

BELETE FUENTES ORLANDO, TORRES TAMAYO PEDRO OSCAR, CARTAYA PIRES MADAY, 2005: "Estudio de la efectividad de los equipos de extracción en el yacimiento Moa Oriental", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minería (MIN1-4).

BLEINES C., DERAISME J., GEFFROY F., JEANNÉE N., PERSEVAL S., RAMBERT F., RENARD D., TORRES O., TOUFFAIT Y., 2004: "ISATIS Software Manual", 5th Edition, Geovariances, Avon, France (Reference Guide, www.geovariances.com), p. 711.

BUTT, C.R.M. AND ZEEGERS, H., 1992: "Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Subtropical Terrains". (Handbook of

Exploration Geochemistry, Volume 4, G.J.S Govett, Editor). Elsevier, Amsterdam, 605pp.

CAMPOS CORDERO MARTA, GUERRA CORREOSO VILMA, GÉ ROCHE WILDER, 2005: "La fase de investigación geológica en función del desarrollo sostenible de la industria minera del níquel en Cuba", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-9).

CARIDAD BRUGUERA AMARÁN NOEL, COTO PÉREZ ORQUÍDEA, RODRÍGUEZ GAMBOA JUAN, FERNÁNDEZ MARISMA EULICER, 2005: "Nuevos avances y tendencias en el desarrollo de tecnologías para el procesamiento de minerales de níquel y cobalto", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-2).

CHANG RODRÍGUEZ ALFONSO, RAVELO LESCAILLE REY, GONZÁLEZ PONTÓN RUBEN B., RODRÍGUEZ CATALÁ ALFREDO, LUGO ARAGÓN REINEL, GONZÁLEZ HERNÁNDEZ ALFREDO, RUBANTE MARTÍN DANIA, EYMIL ROMERO ELIGIO, GONZÁLEZ PACHECO VICTORIA, SÁNCHEZ FIGUEREDO RICARDO, 2005: "Reporte sobre zonas de alta alúmina y diques gabroides en el deposito laterítico San Felipe", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-26).

CHILÈS JEAN-PAUL, DELFINER PIERRE, 1999: "Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty" Jhon Wiley & Sons Inc., p. 695.

CRUZ OROSA ISRAEL, DÍAS GONZÁLES J. ANDRÉS, 2002: "Determinación de los dominios geológicos del yacimiento Moa Oriental", ISMM, Departamento de Geología, Moa (Trabajo de diploma), p. 80.

CUADOR GIL JOSÉ QUINTÍN, 2002: "Estudios de Estimación y Simulación Geoestadística para la Caracterización de Parámetros Geólogo - Industriales en el Yacimiento Laterítico Punta Gorda", Universidad de Pinar del Río (Ph. D), p. 120.

DAVID MICHEL, 1977: "Geostatistical Ore Reserve Estimation", Ansterdan Oxford New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

- DEUTSCH CLAYTON V., JOURNEL ANDRÉ G., 1998:** "GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide" Second Edition, Oxford University Press.
- DUBOIS GRÉGOIRE,** "The AI-GEOSTATS FAQ list, www.ai-geostats.org, 1998.
- ELIAS M., 2002:** "Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation, in Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis, and Exploration" Cooke, D.R., Pongratz, J., eds, Centre for Ore Deposit Research (Special Publication 4. Univ. Of Tasmania, 205 220.)
<http://www.csaaus.com/documents/public/publications/godpaper.pdf>.
- GEMCOM®, 1999:** "User's Manual", (Software manual) Gemcom Software International Inc. , 901 – 580 Hornby Street, Vancouver, British Columbia, V6C 3B6, Canada.
- GENTOIU MARIA, ACOSTA JORGE, LAVAUT COPA WALDO, HERNÁNDEZ RANSAY ALFREDO, 2005:** "Aplicación de la geoestadística en el cálculo de recursos de los yacimientos ferro-niquelíferos de Moa, con la integración de los resultados geofísicos", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN3-1)
- GERTH, J., 1990:** "Unit-cell dimensions of pure and trace metal-associated goethite", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: pp. 363-371.
- GLEESON S.A., BUTT C.R.M., ELIAS M., 2003:** "Nickel laterites: A review", SEG Newsletter, Number 54, www.segweb.org.
- GOLIGHTLY, J. P. 1979:** "Nickeliferous Laterites: A general Description", International Laterite Symposium, New Orleans, Louisiana, February 19 to 21, Published by Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering, Inc., Session 1, p. 3-23.
- GOLIGHTLY, J.P., 1981:** "Nickeliferous laterite deposits", *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: pp. 710-735.
-

- GÓMEZ GONZÁLEZ ORESTES, ESTÉVEZ CRUZ ELMIDIO, CUADOR GIL JOSÉ QUINTÍN, 2005:** "Modelaje geológico y de recursos del yacimiento "Pastelillo" utilizando el krigeaje de indicadores", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VI Congreso de Geología (GEO 14-20)
- GONZÁLEZ PONTÓN RUBÉN B, CHANG RODRÍGUEZ ALFONSO, RAVELO LESCAILLE REY, RODRÍGUEZ CATALÁ ALFREDO, LUGO ARAGÓN REYNEL, GONZÁLEZ HERNÁNDEZ ALFREDO, RUBANTE MARTÍN DANIA, EYMIL ROMERO ELIGIO, GONZÁLEZ PACHECO VICTORIA, SÁNCHEZ FIGUEREDO RICARDO, 2005:** "Interrelación SiO₂, sílice libre y mineralización níquelífera en el depósito de lateritas San Felipe, Camagüey.", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-13).
- GOOVAERTS PIERRE, 1997:** "Geostatistics for Natural Resources Estimation", Oxford University Press, p. 483.
- HUANG YUANTU, WONG PATRICK, GEDEON TOM, 1998:** "Spatial Interpolation Using Fuzzy Reasoning and Genetic Algorithms", Journal of Geographic Information and Decision Analysis, vol. 2, no. 2, pp. 204 -214.
- ITURRALDE-VINENT M.A., 1996:** "Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba". IGCP, la Habana (Project 364, Special Contribution n.1.).
- LANTUÉJOUL CHRISTIAN, 2002:** "Geostatistical simulation: Models and Algorithms". Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York. p 256.
- LANTUÉJOUL CHRISTIAN, 2005:** "Simulations" Centre de Géostatistique – Ecole des Mines de Paris (CFSG course).
- LAVAUT COPA W. 1998:** "Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental", Minería y Geología No. 15, pág. 9-16.
- LAVAUT COPA WALDO, 2005:** "Problemática del estudio geológico de los principales yacimientos lateríticos de Cuba Oriental", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-15).
-

- LE LOC'H GAËLLE, 2005:** "Multivariate Geostatistics" Centre de Géostatistique – Ecole des Mines de Paris (CFSG course).
- LEGRÁ LOBAINA ARÍSTIDES ALEJANDRO, 1999:** "Metodología para el pronóstico, planificación y control integral de la minería en yacimientos lateríticos", ISMM, Moa (Ph. D), p. 185.
- LINCHENAT, A. AND SHIROKOVA, I, 1964:** "Individual characteristics of the nickeliferous iron (laterite) deposits of the northeastern part of Cuba (Pinares de Mayari, Nicaro and Moa)", International Geological Congress, 24th, Montreal 1964, pt. 14, sec. 14, pp 172-187.
- LYNX MINING SYSTEMS®, 1998,** "MicroLYNX Reference Manual, (Software manual) Soarich Pty Ltd ACN 009 120 576, Lot 50 Sudbury Close, Clifton Beach, North Queensland, Australia 4879, <http://www.lynxmining.com.au>.
- MARTÍNEZ VARGAS ADRIAN, 2005:** "Iron grades estimation in heterogeneous lateritic deposit", Centre de Géostatistique – Ecole des Mines de Paris, p. 54.
- MARTÍNEZ VARGAS ADRIAN, PÉREZ MARTÍNEZ YUSNEURIS, 2000:** "Metodología para la modelación de yacimientos residuales de níquel", ISMM, Departamento de Geología, Moa (Trabajo de diploma), p. 185.
- MARTÍNEZ VARGAS ADRIAN, PÉREZ MELO NIURKA, 2005:** "¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto?", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minería (MIN3-4).
- MARTÍNEZ-VARGAS ADRIÁN, LEGRÁ-LOBAINA ARÍSTIDES A., FERRERA-ALBA NORBERTO, MENA-MATOS LUIS F., 2003:** "Determinación de un modelo digital de la topografía original en el yacimiento Punta Gorda". Revista Minería y Geología, Numero 3-4, Vol. XVIII, p 103-119.
- MATHERON GEORGE, 1965:** "Les variables regionalisées et leur estimation". Paris, Masson. 306pp.
-

- MENÉNDEZ T. J., ALMAGUER F. A., RODRÍGUEZ R., GUILLERMO M. M., 1990:** "Composición sustancial de las menas; Resultados de la exploración orientativa y detallada del yacimiento Moa Oriental", Informe Geológico emitido por Geominera Oriente, ONRM Moa.
- MUÑOZ GÓMEZ JOSÉ NICOLÁS, OROZCO MELGAR GERARDO, ROJAS PURÓN ARTURO , CRUZ OROSA ISRAEL, 2005:** "Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda: implicaciones técnica – operativas durante la explotación", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-6).
- OLEA RICARDO A., 1999:** "Geostatistics for engineers and earth scientists" Kluwer Academic Publishers, p. 303.
- ORTIZ GONZÁLES MILAGRO, 1991:** "Características petrográficas de las rocas del basamento; Resultados de la exploración orientativa y detallada del yacimiento Moa Oriental", Informe Geológico emitido por Geominera Oriente, ONRM Moa.
- PAINHO MARCO, BAÇÃO FERNANDO, 2000:** "Using Genetic Algorithms in Clustering Problems", Geocomputation2000, <http://www.geocomputation.org/2000/GC015/Gc015.htm>.
- PEÑA ABREU RAMÓN EDDIE, RODRÍGUEZ CARDONA ADIS, HERNÁNDEZ RAMSAY ALFREDO, 2005:** "Estudio estadístico multivariado para una muestra tecnológica", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-27).
- PIMENTEL OLIVERA HIGINIO, GÓMEZ GONZÁLEZ ORESTES, GALA CASTRO TERESA, ESTÉVEZ CRUZ ELMIDIO, CUADOR GIL JOSÉ Q., DE LA TORRE ARMANDO, 2005:** "Evaluación geólogo-económica de las menas oxidadas del yacimiento de oro-cobre Golden Hill", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VI Congreso de Geología (GEO 13-7).
- PROENZA-FERNÁNDEZ JOAQUÍN A., 1997:** "Mineralizaciones de cromitas en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento Merceditas", Universitat de Barcelona, (Ph. D), p. 227.
-

- RENARD DIDIER, 2005:** "Non stationary geostatistic" Centre de Géostatistique – Ecole des Mines de Paris (CFSG course).
- RIVOIRAR JACQUES, 1990:** "Introduction to disjunctive kriging and nonlinear geostatistics", Centre de Géostatistique – Ecole des Mines de Paris (Informe interno, C-143), p. 89.
- RIVOIRAR JACQUES, 1994:** "Introduction to disjunctive kriging and nonlinear geostatistics", Oxford University Press, p. 181.
- RODÉS GARCÍA HUMBERTO, NOA UTRIA RENÉ, 2005:** "Determinación de las leyes de corte marginal y económica en yacimientos de corteza de intemperismo ultramáfica", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-31).
- RODRÍGUEZ ENRÍQUEZ TOMAS, GUERRA CORREOSO VILMA, 2005:** "Sistemas de explotación minera utilizados en la industria del níquel en Cuba", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN1-P38).
- RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ JOELIS, CABRERA ILEANA, ALONSO JOSÉ A., MARTÍN BÁRBARA, 2001:** "Acerca del primer hallazgo del mineral ernieniquelita $\text{NiMn}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ en Cuba", TECNOMAT.
- RODRÍGUEZ INFANTE ALINA, 1998:** "Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica", ISMM, Moa (Ph. D), p.
- ROJAS PURÓN ARTURO, OROZCO MELGAR GERARDO, VERA SARDINAS ORTELIO, MUÑOZ GÓMEZ JOSÉ NICOLÁS, ARDERÍ ARTURO, 2005:** "Caracterización mineralógica y geoquímica de las fases minerales de Mn portadoras de Co en perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-5).
- SMIRNOV V.I., 1982:** "Geología de Yacimientos minerales", Editorial Mir, Moscú, p. 654.
- TEIXIDÓ TERESA, 2005:** "Prospección Geofísica Superficial" Universidad de Granada, (Curso de doctorado en ingeniería geológica), p. 89.
-

VERA SARDIÑAS LEÓN ORTELIO, 2001: "Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa", ISMM, Moa (Ph. D).

VILLAVICENCIO GARCÍA BÁRBARO, 2005: "Una aplicación de redes neuronales artificiales en registros geofísicos de pozos", I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VI Congreso de Geología (GEO 14-3).

WACKERNAGEL HANS, 1998: "Multivariate Geostatistics" 2nd edition, Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, p. 291.