

PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA OBTENCIÓN DE REDES RACIONALES EN LA EXPLORACIÓN DE LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS CUBANOS

BASIC PRINCIPLES FOR OBTAINING RATIONAL MESH IN THE EXPLORATION
OF THE LATERITE DEPOSITS FROM CUBA

ORTELIO VERA SARDINAS
ARÍSTIDES ALEJANDRO LEGRÁ LOBAINA
MARCOS MEDINA ARCE

E-mail: overa@ismm.uni.com.cu
Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez

RESUMEN: En este trabajo se enuncian los principios básicos que se deben tener en cuenta al definir cualquier procedimiento a fin de determinar una red racional de muestreo para realizar la exploración de los yacimientos lateríticos cubanos. Estos principios parten de la unidad entre el nivel del conocimiento al cual se aspira, las características de los parámetros que se estudian (en particular la variabilidad) y el modelo que se emplee para representar y estudiar el comportamiento de estos parámetros. Se acentúa la necesidad de modelar sobre soportes de bloques o paneles, en lugar de hacerlo sobre soportes puntuales, así como la conveniencia de usar redes regulares.

Palabras claves: Redes, muestreo, exploración, modelos.

ABSTRACT: In this paper are explained the basics principles to keep in mind upon defining any procedure in order to determine a rational mesh to obtain samples, in order to carry out the exploration of the laterite deposits from Cuba. These principles part from the characteristics of the parameters that are studied (in particular the variability), the unit between the level of the knowledge to we are aspired, and the model that is employed in order to represent and study the behavior of these parameters. The necessity of modeling panels on supports of blocks is accentuated instead of making it on punctual supports as well as the convenience of using regular mesh.

Key words: Mesh, Sample, Exploration, Models.

INTRODUCCIÓN

Las principales insuficiencias de los trabajos realizados en relación con la racionalización de redes en la exploración de los yacimientos lateríticos cubanos, pueden resumirse de la manera siguiente:

- No está sistematizado el análisis para obtener el conjunto de variables sobre el que se definen la racionalización y las técnicas matemáticas para definir la variabilidad de cada una de ellas.
- Los métodos utilizados hasta el momento están enfocados, generalmente, hacia la determinación por fórmulas estadísticas de los lados de una red "óptima" cuadrada, rectangular, etc., solución equivalente a obtener el número de pozos en un área dada, la cual es una respuesta global pero parcial del problema, puesto que no se precisa la mejor posición geométrica de los nuevos puntos de muestreo.

- No se tiene un procedimiento completo y eficiente en el sentido que exige la explotación de estos yacimientos en sus diferentes etapas y que contenga los criterios suficientes para racionalizar la red, de manera científicamente argumentada.

En este trabajo se definirán los principios básicos que se deben tener en cuenta para el establecimiento de redes racionales, de manera que se tenga la base teórica para el diseño de un procedimiento general que permita la determinación de estas redes en los yacimientos lateríticos cubanos.

SOBRE EL ANÁLISIS GEOLÓGICO INTEGRAL GENERAL

Hasta el momento, en la aplicación de las redes de exploración para el estudio de los yacimientos lateríticos en las diferentes etapas, ha primado el principio de analogía, independientemente de que se han realizado

determinados estudios para el establecimiento de sus densidades.

La práctica ha demostrado que constituye un error asumir como similares dos yacimientos por el simple hecho de presentar algunos rasgos coincidentes; por lo tanto, aplicar redes de exploración sólo por analogía significa correr el riesgo de no obtener la correspondencia necesaria entre el modelo que se elabora y la realidad geológica del yacimiento, lo que incidiría significativamente en el grado de conocimiento de los recursos y reservas y, por lo tanto, en la eficiencia del proceso de minería. Todo esto justifica la necesidad de que, además de considerar posibles analogías, se realice el estudio geológico detallado e integral del yacimiento antes de proceder a la aplicación de cualquier procedimiento matemático, de manera que ambos análisis, geológico y matemático, deben complementarse y no contraponerse. La obtención de los modelos geológicos en las etapas o fases preliminares, sirve de base para la determinación de las redes en las fases subsiguientes.

Deben formar parte del análisis geológico previo, sobre todo, aquellos fenómenos que influyen en la variabilidad de los parámetros geológico-industriales, entre los cuales debe prestársele atención a:

- Rasgos litoestratigráficos.
- Características de las rocas del substrato.
- Características hidrogeológicas.
- Tectonismo de la zona.
- Geomorfología del yacimiento.
- Características geoquímicas de la corteza.
- Carácter *in situ* o redepositado del corte laterítico.
- Otros rasgos particulares de interés.

DEFINICIONES DE LOS CONCEPTOS BÁSICOS DEL PROCEDIMIENTO

El conocimiento de ciertos parámetros $P_1, P_2, P_3, \dots, P_k$, por ejemplo, contenidos de níquel, hierro y cobalto, potencia de mineral útil, etc., definidos en cierto dominio geométrico plano D (que representa el área que ocupa un yacimiento o una parte de él, como por ejemplo un bloque administrativo de 300 m x 300 m), es un proceso que se realiza en m etapas $E_1, E_2, E_3, \dots, E_m$ de la exploración y explotación de los recursos geológico-mineros que contienen el dominio D y es, este proceso, uno de los elementos principales que garantiza el desarrollo de una minería eficiente.

Generalmente, se acepta que a cada parámetro P_i se le asocia en cada etapa E_j una *cota de error permisible en la modelación* e_{ij} , por lo cual debe definirse la matriz:

$$ER = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdot & \cdot & e_{1k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ e_{m1} & \cdot & \cdot & e_{mk} \end{bmatrix}$$

De manera que cada fila representa una etapa o fase de exploración y cada columna un parámetro. El error e_{ij} ,

generalmente se expresa de forma porcentual aunque esto puede variarse.

Es usual definir para cada yacimiento el número y nombres de las etapas; sin embargo, en nuestra opinión, no se ha hecho de manera completa y sistemática la elección de los parámetros P_1, \dots, P_k en los yacimientos lateríticos cubanos para cada etapa.

El conocimiento del yacimiento se obtiene al pasar de una etapa a la otra (de una fila a otra de la matriz), lo que garantiza que el conocimiento de cada parámetro P_i en cada etapa E_j tenga un error máximo de modelación permitido, definido por e_{ij} .

Hasta el presente se ha trabajado de manera que el paso de una a otra etapa se realiza, en general, atendiendo al parámetro más variable, y se han considerado iguales los valores de los errores permisibles de modelación de todos los parámetros de cada etapa, lo cual es una simplificación que provoca que los resultados no sean suficientemente exactos.

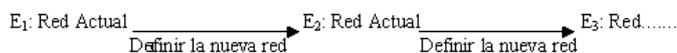
Ahora bien: ¿Qué es conocer el parámetro P_i en la etapa E_j ?

La respuesta a esta pregunta es compleja y se asume que se conoce un parámetro P_i en la etapa E_j cuando es posible, con la información disponible en la etapa E_j , obtener un modelo de P_i tal que en cualquier subdominio seleccionado sobre D para esa etapa, los valores modelados de P_i tienen un error máximo, menor o igual que e_{ij} . De esto se infiere que el valor de la información disponible está relacionado con el modelo que se use, por lo que se justifica la necesidad de usar los mejores modelos disponibles para estimar, y utilizar el mejor método de estimación. En la determinación del modelo, influye de manera directa la selección de las propiedades que se deben medir y, de manera indirecta, la posible cantidad y las posibles posiciones de los puntos de muestreo.

Para lograr conocer los parámetros P_i en la etapa E_j el problema principal, como veremos más adelante es el definir cuántas y dónde deben tomarse las muestras lo cual, se reitera, depende fundamentalmente, además de la existencia de condiciones reales para realizar el muestreo, de la complejidad de los parámetros P_i , de los errores permisibles e_{ij} y del modelo que se use.

En la etapa E_1 , los valores de e_{i1} se toman lo suficientemente grandes como para asumir la densidad de la red de muestreo y la posición de los puntos de manera heurística por el método de analogía, usando criterios expertos sobre la base de la experiencia en yacimientos semejantes, lo cual se acepta en esta investigación como correcto.

El asunto consiste ahora en definir la nueva red de muestreo de la etapa E_{j+1} si se conocen los datos de la etapa anterior E_j ($j=1, \dots, m-1$). Gráficamente, el proceso del conocimiento de una propiedad P en el dominio que se analiza, en su relación con las redes de muestreo, se puede ilustrar como sigue:



Esto significa que el conocimiento de los parámetros P_i en las diferentes etapas E_j pasa por la obtención de nueva información a través de un nuevo muestreo que, para el problema que se analiza, es equivalente a una densificación de la red de muestreo, ya que no es posible reubicar los muestreos anteriores. Se debe aclarar que esta densificación no tiene necesariamente que ser regular en el dominio D . Es obvio que por factores temporales y económicos esta nueva red tiene que ser óptima en cuanto a su cantidad y calidad.

Una buena red o **red racional**, desde un punto de vista pragmático, se puede definir como aquella, donde la correcta posición geométrica de un número relativamente mínimo de puntos de muestreo permite la ejecución de las mediciones con bajos gastos y con un alto aporte de la información requerida para un modelo dado.

En nuestra opinión, resolver *exactamente* este problema (o sea, obtener una red óptima) es posible pero aún no se conoce el modo de hacerlo para las complejas condiciones de los yacimientos lateríticos cubanos, pero consideramos que se puede obtener una aproximación suficientemente buena de esta solución para dar respuesta a las necesidades de la práctica geológico-minera actual; esto se describe a continuación.

MÉTODO PARA LA DENSIFICACIÓN ÓPTIMA DE REDES

El procedimiento para llevar a cabo la racionalización de las redes de exploración trae consigo una serie de pasos que se enumeran a continuación:

Paso 1: Definición de los parámetros P_i y de las Etapas E_j

Lo primero que debe realizarse en la etapa E_1 es definir explícitamente los parámetros y etapas en que se desarrollará el reconocimiento del dominio que se estudia. Estos parámetros deberán revisarse siempre, al pasar de una etapa a otra.

Los parámetros se definen básicamente atendiendo a:

- Definición de los elementos químicos que se extraerán para el proceso postminero.
- Definición de otros elementos químicos que intervienen positiva o negativamente en la extracción de los elementos del inciso anterior.
- Determinación de relaciones importantes del enlace químico y de otro tipo entre los elementos de los dos incisos anteriores.
- Determinación de las propiedades físicas del mineral que se envía al proceso postminero y que intervienen en el comportamiento del mismo en ese proceso.
- Determinación de las condiciones de yacencia del mineral en el dominio, haciendo énfasis en las características geométricas de cada mineralización y en los elementos más importantes estudiados en el análisis geológico integral.

Por ejemplo, para el caso de la explotación de los yacimientos lateríticos que realiza la Empresa Coman-

dante Ernesto Che Guevara (ECECG) se ha determinado que el elemento principal que se extraerá es el níquel, por lo cual el conocimiento de su distribución espacial es imprescindible; el cobalto, que hasta hace relativamente poco tiempo no se le concedía el nivel de importancia del níquel, en estos momentos tiene una alta significación debido a que se comercializa su valor junto al del níquel en los concentrados que se producen pero, además, se proyecta la construcción en nuestro país de una refinería de este metal por lo que su importancia seguirá creciendo.

El conocimiento del contenido de hierro tiene un gran significado tecnológico debido a que su presencia define en buena medida la eficiencia del proceso metalúrgico y junto al Ni constituye el conjunto de elementos químicos que resulta tecnológicamente imprescindible conocer.

Para el proceso amoniacoal (CARON) que se utiliza en la ECECG no reviste importancia decisiva el comportamiento de otros elementos químicos, pero sí el tipo de mineral en que se presentan los ya mencionados, ya que para algunos tipos como la goethita, el proceso extractivo es sumamente eficiente, lo que no sucede en otros como la magnetita. En la actualidad no se tiene el conocimiento mineralógico con la precisión requerida para que intervenga en el control consciente del proceso metalúrgico.

En el proceso de lixiviación ácida que se utiliza en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba, Moa Níquel S.A., tienen gran importancia los elementos nocivos al proceso tecnológico, tales como la sílice y el magnesio.

Dentro de las propiedades físicas es la masa volumétrica la que, sin duda, tiene la mayor importancia; sin embargo, se han aceptado tradicionalmente como correctos y suficientes los datos adquiridos en el muestreo de las cuatro paredes de los pozos criollos, diseñados (y ejecutados en Punta Gorda y otros yacimientos) a partir de un análisis estadístico, datos que según nuestro criterio, son insuficientes para caracterizar dicha propiedad. Partiendo de estos datos, los esfuerzos se han concentrado en tratar de obtener valores medios por zonas y por capas tecnológicas o modelos en función de los elementos químicos Ni, Fe y Co, y de las coordenadas geográficas planas. En nuestra opinión, es ésta una propiedad que merece un análisis especializado, pues en todo cálculo de recursos que se realice en estos yacimientos la masa volumétrica interviene como un elemento fundamental.

La humedad es otra propiedad que se ha estudiado en este yacimiento, pero no se han aplicado sistemáticamente los resultados de estos estudios aunque el mineral que es enviado al proceso industrial en la ECECG tiene un alto porcentaje de humedad, lo cual encarece de forma notable la transportación y alarga, encareciéndolo también, el proceso de secado; por tanto, no podemos dejar de enfatizar en la necesidad de estudiar con profundidad esta propiedad que, por demás, sabemos que es extremadamente dinámica espacial desde el punto de vista temporal.

En la planta Comandante Pedro Sotto Alba, se considera también el parámetro sedimentación, que refleja la velocidad de precipitación de las partículas sólidas a partir de la pulpa del mineral útil.

Algunas propiedades geofísicas han cobrado importancia en los últimos tiempos y son aquellas que están relacionadas con la posibilidad de detectar la configuración del fondo del cuerpo mineral que, como se conoce, es en extremo variable y donde los modelos teóricos a partir de propiedades geoquímicas que lo predicen tienen un alto grado de incertidumbre. Lo mismo puede decirse con la determinación de algunos cuerpos de intercalaciones. Al parecer, según los resultados de varios trabajos experimentales realizados por la Empresa Geominera de Oriente y por el Departamento de Geofísica del ISPJAE, estas propiedades geofísicas continuarán aumentando su papel protagónico en la exploración de estos yacimientos.

Lo anterior está relacionado con la determinación de los límites geométricos del cuerpo mineral, que se basa en la determinación de los límites tridimensionales de las capas tecnológicas, por ejemplo: Escombros Superior, Mineral útil, Escombros Intermedio y Escombros Final; a partir de los tipos tecnológicos: Laterita de Balance, Serpentinita de Balance, Serpentinita Dura, etc; en bloques administrativos de 300 m x 300 m y en dominios geológicos de los yacimientos.

Las capas tecnológicas se definen a partir del modelo geológico que se tenga de la zona y de las condiciones que se impongan a otras variables; por ejemplo, en estos momentos se considera mineral útil en la ECECG aquel material que tiene una concentración de níquel mayor o igual que 0,9 % y mayor o igual que 12 % de Fe. Nótese que no se imponen otras condiciones, pues para estos valores la empresa, con la tecnología que posee, produce con cierta eficiencia económica. No obstante, estos límites geométricos son variables en el tiempo en dependencia de los avances tecnológicos que puedan ocurrir, así como de la relación entre los precios de los insumos de la empresa, la eficiencia del proceso y los precios de sus productos en el mercado. Otro elemento que se considera en esta geometrización es la llamada potencia mínima de intercalaciones estériles, la cual indica el rango mínimo de potencia para considerar un cuerpo real de material no mineral como intercalación tecnológica y viceversa. El carácter dinámico de la definición de las capas tecnológicas y, por tanto, de la potencia del mineral útil y del escombros superior, debe tenerse en cuenta en la estrategia de la optimización de redes ya que estas potencias deberán ser obtenidas para cualquier definición de la red de muestreo.

Respecto a las etapas, deberán definirse atendiendo a las necesidades planteadas por el sistema estatal de control de recursos y reservas, y por las necesidades de la industria minera.

En Cuba están establecidas, desde 1998, las fases generales de los trabajos geológico-mineros de la forma siguiente:

- I. Trabajos de reconocimiento
- II. Investigaciones geológicas
 - a. Prospección
 - b. Exploración (puede dividirse en General y Detallada)
- III. Explotación
- IV. Procesamiento
- V. Comercialización

El desarrollo de todas estas fases es variable, en dependencia del grado de complejidad geológica de la región, yacimiento o sector objeto de estudio

El problema relacionado con la densidad de las redes de exploración tiene una incidencia primordial en la segunda y tercera fases, donde es necesario definir las etapas que se considerarán en el conocimiento del dominio geológico, lo cual estará supeditado a las variables o parámetros para estudiar.

Paso 2: Precisar las necesidades de mejorar el conocimiento de cada parámetro P_i

Deben definirse las zonas del dominio donde se necesita conocer el valor de P_i con el error definido para cada nueva etapa. Esto implica la necesidad de definir en ésta un nuevo conjunto de paneles en los cuales es necesario mejorar el conocimiento, lo cual puede orientar posteriormente sobre una versión preliminar de la nueva red de muestreo. Nótese que para un dominio D los paneles siempre son disjuntos y deben cubrirlo completamente. El tamaño de los paneles depende de varios factores relacionados con el grado de conocimiento que se desee tener en cada etapa y del modelo que se utilice.

Mantener un solo tamaño de panel y estimar sobre él los valores de los parámetros y los errores correspondientes tiene el inconveniente de que los cálculos, con una cantidad de datos de muestreo cada vez mayor, se hacen más complejos y menos exactos, pero además una sola medida de panel no responde a las necesidades de encontrar las zonas anómalas y de ir respondiendo a las necesidades de la planificación de la explotación. Por el contrario, si aumentamos el número de paneles que cubren el dominio de manera que el tamaño de estos paneles sea cada vez menor, aumenta la cantidad de veces que hay que calcular, pero cada cálculo es más simple y más exacto; además, se pueden detectar anomalías y estos paneles irán definiendo de manera natural las Unidades Básicas Mineras.

No debe descartarse la posibilidad de definir paneles con otras formas geométricas (triangulares, rectangulares o rómbicas) e incluso de diferentes formas regulares e irregulares, lo cual planteará formas más complejas de calcular posteriormente ciertos valores sobre cada panel.

Para el caso de las *exploraciones geológicas* que tienen el objetivo de definir si los recursos de un dominio pueden ser considerados dentro de las categorías establecidas, las necesidades del conocimiento de las propiedades tienen un *carácter más bien general* y el principio que se usa es el de obtener mayor conocimiento, para que los valores conocidos de los parámetros que se es-

tudian sean más exactos y además sirvan como base para la obtención de nuevo conocimiento a través de modelaciones o para la propuesta de nuevos estudios.

No sucede exactamente de la misma manera en la *explotación minera*, donde el objetivo final es mantener un flujo continuo de mineral que sea estable por su cantidad y por su calidad (parámetros geoquímicos, humedad, etc.) hacia la planta que procesa, por lo que en este caso el conocimiento tiene un *carácter extremadamente dinámico* desde los puntos de vista espacial y temporal, y la falta de este conocimiento tiene consecuencias negativas inmediatas para toda la empresa. Esto nos demuestra la necesidad de incluir en nuestro análisis el caso del muestreo dinámico óptimo durante la fase de explotación.

De forma semejante, se puede argumentar la necesidad de definir de manera óptima los *muestreos durante los procesos de restauración o de saneamiento ambiental* cuando se reparan los daños que causan los trabajos de minería o de otro tipo que realizan estas empresas.

Paso 3: Creación de un escalafón de los parámetros P_i atendiendo a su variabilidad

En este paso deberá realizarse un estudio completo de las variabilidades para cada parámetro P_i , a partir de la información disponible sobre ellos, con el objetivo de definir el orden o escalafón de variabilidad de dichos parámetros.

Se propone que los elementos para analizar sean:

- Coeficientes de Variación. Calculados sobre la base de:
 - I. Media aritmética.
 - II. Media geométrica.
 - III. Mediana.
 - IV. Media cuadrática.
- Coeficiente de variabilidad de Pearson en las direcciones verticales y horizontales.
- Determinación de la estructura de los datos, separando la componente aleatoria de la componente determinística (sí existe), mediante la realización de los análisis de tendencia.
- Análisis de la Informatividad de los parámetros, considerando la separación de los datos en dos grupos que en los casos analizados pueden definirse a partir de un *cutoff* o ley de corte industrial o de otro tipo, de manera que las mediciones que se analizan queden divididas en dos grupos disjuntos. En la literatura aparecen denominados como Meníferos y No Meníferos (Lepin y Ariosia, 1986).

Para este análisis se aplicarán dos métodos explicados en el trabajo antes citado:

- I. Método de Rodionov.
- II. Método de Garanin.

La importancia de estos métodos está en que proporcionan valiosa información sobre la calidad de los datos, la cual permite valorar su influencia en los resultados que se obtengan con la modelación utilizada.

- Análisis de covarianza y de componentes principales entre todas las variables y grupos de ellas. En este paso pueden crearse nuevas variables que reflejen la variabilidad de un grupo o de todas las variables originales y esto no sólo tiene la ventaja de sintetizar el trabajo, sino que además permite detectar relaciones importantes entre los parámetros.
- Variabilidad Geoestadística de cada variable original o creada.

Para el estudio geoestadístico se seguirán los pasos siguientes:

- I. Determinar variogramas, anisotropía, zona de influencia y tipo de *kriging* para utilizar. El variograma puede indicar, si tiene efecto parábola, la existencia de un fenómeno no estacionario y, por tanto, la presencia de un *trend*. Debe realizarse una prueba de validación cruzada usando *kriging* puntual. Cuando el variograma de un parámetro presenta alcance y meseta entonces se puede aprovechar esta información para definir la distancia máxima entre dos puntos de muestreo.
- II. Obtener, de ser posible, el error promedio en cada panel de la etapa actual y en el dominio D por el método de zona de influencia para la red actual.
- III. Obtener el error de calcular el *kriging* de bloque en el dominio.

En este caso, la intención es conocer cómo se comporta este modelo con respecto al modelo clásico de Zona de Influencia. Teóricamente, en la medida en que la variabilidad disminuya ambos modelos serán igualmente eficientes.

Aunque cada uno de los elementos de los incisos anteriores es importante, se han ido enumerando en orden creciente de importancia.

La variabilidad de cada parámetro P_i debe definirse atendiendo a los resultados de todos los análisis, y es en este momento donde se precisa el llamado *personal experto* para realizar colectivamente la evaluación final, tal como se define en la Clasificación de Recursos y Reservas de Minerales Útiles Sólidos (ONRM, 1998). Algo imprescindible es hacer una nueva valoración de los errores permisibles de la matriz de error ER, aunque esto conduzca a tener que reajustar varios criterios y repetir algunos cálculos. Este proceso de aproximaciones sucesivas garantiza la corrección de insuficiencias y deficiencias en el trabajo de estas etapas.

Si la red actual es irregular es conveniente realizar, como parte del conocimiento general que se debe tener, un análisis de dicha irregularidad mediante el Método de Triangulación que básicamente consiste en triangular en el plano horizontal los puntos de muestreo, lo cual debe hacerse con el Método de Delaunay, que logra que los triángulos obtenidos sean tan parecidos como sea posible a triángulos isósceles y luego de calcular las áreas de estos triángulos, se valoran los parámetros estadísticos del conjunto de valores de las áreas, lo cual caracteriza la regularidad de la red (Legrá y otros, 1998;

Legrá, 1999). Esto es necesario, ya que *en las redes regulares los errores por kriging disminuyen con respecto a las redes irregulares* (García, 1988). Asumiremos, por tanto, la necesidad de obtener en cada nueva etapa, redes cada vez más regulares, lo que no implica que necesariamente la nueva red sea completa e igual para todas las zonas, pues no sólo se trata de lograr que se realicen más cómodamente los cálculos, sino que también aumente la exactitud de los resultados que se obtienen a partir de que la posición de los puntos de muestreo aporten la mayor cantidad de información posible.

Paso 4: Comprobar para cada parámetro P_i , si la red actual satisface (o no satisface), con el modelo seleccionado, el nuevo grado del conocimiento que se necesita

Para esto se pueden aplicar, por ejemplo los algoritmos siguientes:

- a. Número Rojo de Osedsky (Lepin y Ariosa, 1986).
- b. Análisis de Errores por *kriging* de bloque.

Paso 5: Establecimiento de los posibles nuevos puntos de muestreo

Se establece una nueva malla regular de puntos que podrán ser parte del posible muestreo.

Primero se calcula el número máximo de puntos posible de una nueva red. Los nuevos puntos pueden estar distribuidos en un rectángulo cuyos vértices están determinados por los valores mínimos y máximos de las variables x e y . Esta distribución debe realizarse de acuerdo con las proporciones de los lados del rectángulo y tratando que compongan una red regular. Si se eliminan algunos o todos los puntos que están fuera de la frontera del dominio (cosa que no siempre es conveniente hacer) y los que coinciden con puntos de la red actual que analizamos, quedarán los posibles puntos de la nueva red de muestreo.

El conjunto de posibles nuevos puntos puede ser esgrimido de otras maneras:

1. Definir que la red regular que los mismos definen tenga forma triangular, rectangular, romboidea, exagonal, etc., en dependencia de la forma del sistema de paneles que se ha definido.
2. Definir que la red de puntos sea irregular, pero que responda desde otro punto de vista a la solución del problema.

Paso 6: Determinación de la nueva red

Para la determinación de la nueva red se asume un modelo adecuado que presente las herramientas matemáticas necesarias y que sea capaz de reflejar las características esenciales de la variabilidad del parámetro que se estudia.

Dentro de los modelos geoestadísticos, el *kriging* es una opción que se debe considerar, pues es el mejor estimador lineal insesgado al minimizar la varianza de estimación (Chica Olmo, 1989; García, 1988), por lo que *mediante el error de kriging de bloque se reflejará la*

confiabilidad del conocimiento nuevo que se obtendrá con la nueva red y este valor puede ser el que defina la credibilidad de la red que simularemos en los nuevos puntos propuestos en el Paso 5.

Ahora deberán agregarse a la red actual de muestreo los puntos de la nueva red que se propone y esto deberá hacerse de manera que primero se agreguen los puntos que faciliten que disminuyan, en la modelación, los errores mayores que se tienen en los paneles.

Paso 7: Determinación de la concentración óptima de puntos

Para la determinación de una red racional de puntos se parte del momento en que a la red actual se le han adicionado los puntos necesarios que permiten satisfacer, con el modelo seleccionado, el nuevo grado del conocimiento que se necesita en el nuevo conjunto de paneles. Esto no significa que no pueda obtenerse otra red mejor, lo cual se puede comprobar usando una red más densa y repitiéndose los pasos 4, 5 y 6. Si se repite este proceso varias veces, entonces se podrá definir cuál de las redes es mejor, atendiendo a la cantidad de nuevos puntos que se tengan en cada una de ellas, a los errores que se esperan y a la relación de estos puntos de la nueva red con propiedades cualitativas y cuantitativas no consideradas en la formulación matemática del Modelo Geológico Integral para el dominio analizado y que, por supuesto, tengan algún interés para el geólogo y el minero.

Hemos dicho que cada nueva red será más densa que la anterior, puesto que perseguimos obtener una mejor ubicación geométrica de los puntos de muestreo sólo deben dejarse los puntos imprescindibles; sin embargo, se pueden tomar nuevas redes menos densas que la que hemos analizado si sospechamos que esta última está sobredimensionada en su papel de red más racional.

Todo este procedimiento puede parecer sumamente complejo y que precisa de un largo y laborioso trabajo de cálculo matemático, pero estas dificultades no existen cuando se automatizan los pasos descritos y es entonces cuando *prima el conocimiento geológico, minero y tecnológico* de quienes ejecutan la tarea.

Valoración de casos particulares

- A. Cuando se quieren obtener nuevos puntos de una red con el fin de mejorar localmente el nivel de información mediante un nuevo muestreo, tal como sucede en el muestreo permanente que se realiza en los frentes de minería de las empresas de Moa, conviene utilizar el Método del Punto Ficticio (Chica Olmo, 1989).
- B. Cuando se trata de un parámetro con una variabilidad muy pronunciada, tal que al tomar el nuevo conjunto de paneles y la nueva red de muestreo, se obtengan valores relativamente altos para los errores de estimación, entonces se debe definir una red más densa, pero si se está ante el límite que imponen los factores económicos y temporales, la situación puede complicarse y en este caso debe proponerse un nuevo procedi-

miento que facilite el análisis en subdominios más pequeños.

Definición de una nueva red de muestreo cuando se tienen redes óptimas obtenidas a partir de dos o más parámetros originales o compuestos

Si no se ha podido definir un solo parámetro que exprese la variabilidad de los originales y, por tanto, se tienen dos o más redes óptimas, entonces se pueden definir tres tipos de respuestas generales a esta problemática:

1. Desarrollar todas las redes óptimas propuestas, lo cual significa una alta inversión en tiempo y dinero. Esto es equivalente a obtener una sola red uniendo las que se tienen. Esta opción es adecuada si las redes propuestas para todos los parámetros son regulares y se han tomado sobre sistemas de paneles iguales en una etapa dada.
2. Desarrollar aquella que tenga mayor significación atendiendo a la importancia tecnológica del parámetro, aunque necesariamente debe considerarse el escalafón de su variabilidad.
3. Intentar obtener por criterios analíticos una nueva red a partir de las anteriores, de manera que no sea la simple unión entre ellas sino que optimice, de alguna manera, el número de puntos de muestreo. En esta investigación no se da respuesta a este problema.

CONCLUSIONES

Antes de comenzar el trabajo de optimización del muestreo es necesario definir:

- a) El conjunto de parámetros y etapas.
- b) La matriz ER de los errores permisibles de modelación.
- c) El modelo que se usará.

Luego debe realizarse el estudio de la variabilidad de los parámetros y la creación de nuevos parámetros compuestos, lo que optimiza el estudio y, por tanto, de manera directa, la red.

Para concretar la obtención del conocimiento de un parámetro a partir de las muestras es necesario definir el

conjunto de paneles que para una etapa E, permite concluir si se conoce o no en dicha etapa el parámetro P según un modelo dado. El uso del *Kriging de Bloque* puede garantizar un nivel alto de conocimiento del parámetro P en el dominio, lo cual no sucede con los estimadores puntuales.

Un aspecto que debe ser ineludiblemente contemplado es el relacionado con el perfeccionamiento de nuestro modelo en relación con el desarrollo del muestreo en el campo, es decir, que en la misma medida en que se obtienen datos reales del nuevo muestreo propuesto, éstos deberán incorporarse a nuestros análisis y de manera inmediata se corregirán las expresiones de nuestros modelos matemáticos, lo cual, como se conoce, se refleja en la obtención de un pronóstico más cercano a la realidad geológica; de esta manera se podrán obtener correcciones de la red de muestreo. Es evidente que el plan de desarrollo del muestreo en el campo deberá responder (siempre que sea posible) al criterio de realizar primero el muestreo en los puntos donde mayor sea el error de estimación esperado.

BIBLIOGRAFÍA

- CHICA OLMO, M.: "Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales", 387 pp., Tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada, 1989.
- GARCÍA, PEDRO A.: *Geostatística operacional*, 145 pp., Ministerio de Minas y Energía, Departamento de Producción Mineral, Brasilia, 1988.
- LEGRÁ LOBAINA, ARÍSTIDES A., R. GUARDIOLA ROMERO Y M. NOA BORGES: "Triangulación óptima de redes arbitrarias mediante un algoritmo iterativo y estimación de mediciones geólogo - mineras a partir de la misma", *Revista Tecnológica Serie Níquel 2* (1):1-8, 1998.
- LEGRÁ L., A. A. Y R. GUARDIOLA ROMERO: "Contribución a la práctica del análisis variográfico y la estimación por Kriging", *Minería y Geología* 16 (2):83-93, 1999.
- LEPIN, O. V., I. J. ARIOSA: *Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de los yacimientos minerales sólidos*, Primera y Segunda Partes, 528 pp., Ed. Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, 1986.
- ONRM (Oficina Nacional de Recursos Minerales): *Clasificación de recursos y reservas de minerales útiles sólidos*, 12 pp., MINBAS, Ciudad de La Habana, 1998.