

MODELAJE GEOLÓGICO Y DE RECURSOS DEL YACIMIENTO PASTELILLO UTILIZANDO EL KRIGEAJE DE INDICADORES

Geological and resources modelling of the Pastelillo deposit using indicator kriging

Elmidio ESTEVEZ-CRUZ¹, Orestes GOMEZ-GONZALEZ², José Q. CUADOR-GIL³

¹Universidad de Pinar del Río Email: estevez@geo.upr.edu.cu (2) PROYEST

RESUMEN-En ocasiones la complejidad y variabilidad de un yacimiento mineral hace difícil establecer dominios geológicos homogéneos que puedan ser utilizados para aplicar control geológico a la estimación de los parámetros más relevantes. La imposibilidad de crear un modelo geológico con unidades bien definidas conduce a trabajar con poblaciones heterogéneas, lo cual degrada considerablemente la calidad de las estimaciones. Tal es el caso de Pastelillo, yacimiento de materia prima para cemento, en el que es difícil reproducir la geometría de los distintos tipos tecnológicos utilizando el método tradicional de correlación geológica. Las distintas litologías que conforman el yacimiento están completamente mezcladas tanto en el plano como en la vertical y estos frecuentes cambios faciales provocan una gran variabilidad litológica y tecnológica en el yacimiento. Teniendo en cuenta lo anterior se propone emplear un método de interpolación espacial que permita hacer estimaciones en presencia de poblaciones complejas. En el artículo se establece un modelo tecnológico y de recursos para el yacimiento Pastelillo a partir del empleo de una técnica de estimación de la geoestadística no lineal: el krigeaje de indicadores.

Palabras clave: Krigeaje de indicadores, Semivariogramas de indicadores, Modelaje Geológico

ABSTRACT - Very often the complexity and variability of a mineral deposit makes difficult to define homogeneous geologic domains that can be used to apply geological control to the estimation of the most important parameters. The fact, that it is not possible to create a geologic model with very well defined units, leads to work with a complex population and considerably downgrades the estimation quality. The cement raw material deposit Pastelillo is a typical case study where it is difficult to reproduce the geometry of the different technological types using the traditional method of geologic correlation. The different lithologies forming the deposits are mixed up as much in the plane as for the vertical direction. These frequent facial changes cause a great lithological and technological variability in the deposit. Considering this fact, it is proposed to use an interpolation method that allows estimating in the presence of complex populations. This paper focuses on the solution to the problem of establishing a technological and resources model of Pastelillo deposit, which involves the use of nonlinear geostatistical estimation technique: the indicator kriging.

Key words: Indicator Kriging, Indicators Semivariograms, Geological Modelling

INTRODUCCIÓN

La estimación de recursos/reservas no es más que la determinación, con el mínimo error posible, de la cantidad de mineral/metal existente en el yacimiento. Para ello el geólogo debe interpretar la geología del yacimiento, estimar el comportamiento espacial de los componentes útiles dentro del mismo y presentar la información a las partes interesadas haciendo uso de los sistemas de clasificación de recursos y reservas.

La creación del modelo geológico es uno de los pasos de mayor importancia y responsabilidad que se realizan durante la estimación de recursos y reservas. Durante la interpretación, el conocimiento que se posee sobre la estructura y la continuidad de la ley y la geología se representa en forma de dominios o zonas geológicamente homogéneas, creándose un modelo tridimensional de los mismos que representa su posición y forma.

Unido a un muestreo representativo y análisis confiables, la interpretación es una de las etapas más críticas en la estimación de recursos/reservas, de manera que mucho de los errores cometidos en el cálculo están relacionados con la aplicación incorrecta de los principios geológicos, con el trazado de límites erróneos del yacimiento mineral y con la incapacidad de generar un cuerpo lo suficientemente continuo que cumpla con los requerimientos de la minería. Normalmente los errores potenciales asociados con una interpretación geológica incorrecta e inapropiada son una magnitud de orden superior que los errores asociados con la estimación de la ley (Stephenson y Vann, 1999).

Owens (1993) sostiene que las diferencias sustanciales que en ocasiones existen entre las reservas estimadas y lo que realmente se extrae, son provocadas por el contorno incorrecto de los cuerpos minerales o por el tratamiento inadecuado de los datos de ley y potencia dentro de los contornos, mientras Arseneau y Roscoe (2000) reconocen que el principal problema en la estimación de recursos no radica en el método de estimación empleado, sino en el establecimiento de la continuidad de la mineralización y la ley dentro del yacimiento.

Las dificultades en la interpretación y creación del modelo geológico están relacionadas con la cantidad limitada de datos disponibles en el momento de realizar la estimación y con la variabilidad propia de la mineralización que se estudia. La interpretación geológica tradicionalmente se ha desarrollado mediante la construcción de planos y secciones en los cuales se representa la morfología, dimensiones y propiedades del yacimiento (Popoff, 1966). El modelo

se genera a partir de la correlación geológica de un dominio o unidad, primero entre pozos de una misma sección y posteriormente entre los distintos perfiles. Este método de interpretación no ha perdido vigencia y se encuentra implementado en los sistemas de modelaje geológico-minero actuales. Una vez concluida la interpretación de los diferentes dominios, el geólogo construye el modelo de recursos discretizando la geometría tridimensional de cada dominio y rellenándolo con bloques (modelo de bloque). Los límites de los distintos dominios se emplean para aplicar control geológico a la estimación y evitar cambios gradacionales de la variable estimada entre dos dominios contiguos.

Existen yacimientos en los que por su complejidad geológica resulta prácticamente imposible separar dominios geológicos homogéneos que posean una clara coherencia espacial. En los yacimientos de materias primas para cemento que aparentemente son muy simples, la cuestión se complica por los cambios faciales tanto laterales y verticales que se manifiestan en los mismos. Este problema se acentúa cuando se introducen las exigencias de la materia prima que estipula la industria y es necesario entonces generar un modelo tecnológico del yacimiento.

En Pastelillo, yacimiento de materia prima para cemento, el CaO que define los distintos tipos tecnológicos es un parámetro extremadamente inestable, lo cual provoca gran variabilidad litológica tanto por la vertical como por la horizontal e impide la correlación tecnológica incluso para redes densas de pozos.

Este hecho, reconocido por otros autores (Martínez y otros, 2002), constituye un inconveniente pues es prácticamente imposible, empleando los métodos tradicionales de interpretación geológica, establecer cuerpos de los distintos tipos tecnológicos lo suficientemente continuos que puedan ser utilizados posteriormente durante el modelo de recursos. Este artículo aborda la solución dada al problema de establecer un modelo tecnológico y de recursos para el yacimiento Pastelillo a partir del empleo de una técnica de estimación de la geoestadística no lineal como es el krigeaje de indicadores (KI en lo adelante). Los resultados obtenidos pueden ser generalizados a otros yacimientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El yacimiento Pastelillo se localiza a unos 75 km al norte de la ciudad de Camagüey y a 1 km de la ciudad de Nuevitas. Ha sido estudiado exhaustivamente, los primeros trabajos datan del 1955, mientras que las últimas investigaciones se realizaron en el 2002. Esta investigación hizo uso de

toda la información recogida en las campañas de perforación realizadas en el mismo (Tabla 1). La base de datos con 3709 muestras fue confeccionada en MsAccess y contiene las coordenadas, la descripción litológica y los valores de los óxidos que caracterizan la calidad de la materia prima (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y MgO).

Previo al procesamiento, las muestras fueron regularizadas a intervalos de 5 m. La longitud del compósito se seleccionó considerando la altura del banco de explotación en el yacimiento 15 m y el intervalo medio de muestreo 2,13 m.

Inicialmente se intentó confeccionar el modelo geológico a partir de una serie de cortes orientados en la dirección norte - sur. Para lograr este objetivo las muestras regularizadas fueron codificadas atendiendo a los valores del CaO que se corresponden con los distintos tipos tecnológicos (caliza, caliza margosa, marga, fuera de balance y estéril) diferenciados en el yacimiento.

La figura 1 muestra un perfil representativo donde se muestra el tipo tecnológico de cada intervalo muestreado. Los cambios bruscos de los distintos tipos tanto a lo largo de un mismo pozo como en la horizontal impiden la correlación tecnológica y la creación de cuerpos lo suficientemente grandes que puedan ser aprovechados por la minería.

Esta variabilidad tecnológica es reflejo de la variabilidad litológica y los frecuentes cambios faciales que se manifiestan en el yacimiento (figura 2). Como no es posible en este caso concreto hacer la interpretación a partir de la correlación geológica tradicional, se decidió recurrir a un método geoestadístico que tome en consideración la imposibilidad de separar y tratar independientemente los distintos tipos de rocas.

Las litologías no poseen coherencia espacial y están completamente mezcladas tanto en el plano como en la vertical. El KI es un método no paramétrico que resuelve el problema de estimar datos de distribuciones no normales, además de aplicarse en aquellos casos donde se manifiestan varias poblaciones (tipos de mineralización o litologías) y donde no es posible su separación (Glacken y Blackney, 1998; Lemmer, 1984 ; Chica-Olmo, 1989).

Geología del yacimiento

El yacimiento Pastelillo se localiza en el área donde afloran las rocas de la Fm. Nuevitas de edad P₂³, la cual está formada fundamentalmente de arriba hacia abajo por calizas, calizas margosas, margas calcáreas y margas.

Las rocas en el yacimiento poseen una pequeña inclinación de unos 3°- 6 ° N-NE. Las calizas claras son algo duras, en su parte superior están fuertemente oxidadas por el intemperismo y son algo clásticas. Las cavernas de un diámetro de 10-15 cm están rellenas por arcillas y fragmentos de calizas hidroxidadas por el intemperismo.

Las calizas margosas se presentan de color amarillento y con una dureza media. Las margas calcáreas presentan poca dureza y color gris claro y oscuro. Las margas presentan color algo verdoso y las mismas constituyen la parte baja del corte y por su quimismo se correlaciona con las margas calcáreas.

En el yacimiento no se observan pliegues ni fallas, pero las rocas están agrietadas. Las direcciones predominantes del agrietamiento son NE-SO y NO-SE, con predominio de las grietas abiertas, incluso rellenas de arcilla actual o fósil, pero existen además grietas ocultas o de compresión.

El yacimiento es sedimentario; las rocas se depositaron en profundidades neríticas en talud lejos de las tierras emergidas, lo cual se evidencia en la pureza y blancura de las rocas y sus sedimentos finos, en estas aguas había restos de organismos como espículas de esponjas, corales, foraminíferos bentónicos, algas, moluscos, etc., los cuales fueron depositados junto a los detritos carbonatados. Todos los fósiles son del Mioceno Inferior, parte baja de la formación Colón o Jaruco.

Las rocas del yacimiento sufrieron procesos de recristalización, así como en algunas partes existe una incipiente dolomitización, sobre todo en las zonas de caliza dura con mayor contenido de óxido de magnesio en las cuales se retiene el agua superficial o fluye mayor cantidad de ésta.

Elementos sobre el KI

El KI no es más que el krigeaje ordinario (simple) de los indicadores calculados en los distintos cutoff o valores umbrales (Issaks y Srivastava, 1989; Goovaerts, 1998). El método es no paramétrico y resuelve el problema de estimar datos de distribuciones no normales, además se aplica en aquellos casos donde existe mezcla de varias poblaciones (tipos de mineralización o litologías) y donde no es posible su separación (Annels y Al-Hassan, 1994; Turcanaza, 1999). Para cada uno de los cutoff seleccionados se emplea un modelo de variograma diferente, esto permite una gran flexibilidad, típica solamente de este método, pues logra separar y usar en la estimación la estructura espacial de las distintas partes de la distribución.

El KI fue propuesto por Journel (1983) y posteriormente refinado por Lemmer (1984). Desde entonces se ha convertido en una de las técnicas de más amplio uso en la industria minera (Glacken y Blackney, 1998). Este método proporciona la probabilidad de que el valor de una variable en un punto x_0 o el valor medio en un volumen centrado en la localización x_0 sea superior a un determinado contenido (Turcanaza, 1999).

Su esencia consiste en estimar por krigeaje (simple u ordinario) variables transformadas de acuerdo al formalismo de indicadores. Este formalismo permite transformar una variable numérica en "1" y "0" usando uno o varios valores límites, es decir, uno o varios contenidos tomado como referencia, lo anterior se puede expresar según la siguiente expresión.

$$1_{Z(x) \geq Zc_i} = \begin{cases} 1 & \text{si } Z(x) \geq Zc_i \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

donde: $1_{Z(x) \geq Zc_i}$ representa el valor que asume la variable en cada localización medida x_i después de transformada de acuerdo a la condición de si el valor $Z(x)$ es mayor o igual al valor límite Zc_i , a este valor límite también se le llama ley de corte o indicador (Deutsch y Journel, 1998). Los valores límites Zc_i pueden estar representados por los contenidos que delimitan un tipo de mena determinado de otro. De este modo se debe obtener una variable transformada por cada indicador. Este procedimiento puede ser utilizado también en variables categóricas, por ejemplo, la presencia o ausencia de un tipo de roca o mineralización (Turcanaza, 1999).

Una vez realizada la transformación es necesario desarrollar, para cada variable obtenida, el proceso de análisis estructural de igual modo a como se realiza en variables numéricas continuas, primero se calculan los semivariogramas de indicadores y posteriormente se ajustan modelos teóricos de semivariogramas. La expresión para el cálculo de los semivariogramas de indicadores es:

$$\gamma_I(h) = \frac{1}{2 N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [1(x) - 1(x+h)]^2$$

y los modelos teóricos de semivariogramas son los mismos modelos autorizados definidos en la literatura básica de Geoestadística. Si existe un sólo valor límite, se realiza el proceso de análisis estructural para la variable transformada a partir de este valor, la cual puede presentar un comportamiento isotrópico o anisotrópico, lo anterior conduce posteriormente al KI. Pero si

existe más de un valor límite, se modela la variabilidad espacial para cada variable obtenida, lo que conduce al KI múltiple. Cuando por falta de información se hace imposible obtener semivariogramas de indicadores con estructuras definidas, puede ser utilizado una aproximación que en muchas situaciones produce buenos resultados (Issaks y Srivastava, 1989), esto es, un modelo de semivariograma de indicador de la mediana para todas las leyes de corte asumida en lugar de uno por cada indicador, es decir, desarrollar el proceso de análisis estructural sobre una sola variable transformada por el mismo formalismo de indicador pero tomando como referencia el valor de la mediana de los datos originales como valor límite.

Este procedimiento se conoce como KI de la mediana. El KI cualquiera sea la variante puede ser utilizado en su forma simple u ordinaria a partir de los sistemas que se muestran a continuación.

KI simple.

$$\text{Estimador: } (I_{Y(x) \geq Z_c})^{KS} = \sum_{i=1}^n \lambda_i (I_{Y(x_i) \geq Z_c}) + \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) E[I_{Y(x_i) \geq Z_c}]$$

$$\text{Sistema: } \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{Y(x) \geq Z_c}(x_i, x_j) = C_{Y(x) \geq Z_c}(x_i, v) \quad j = 1, \dots, n$$

$$\text{Varianza de Estimación: } \sigma_{Y(x) \geq Z_c}^2 = C(v, v) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{Y(x) \geq Z_c}(x_i, v)$$

Sistema KI ordinario

$$\text{Estimador: } (I_{Y(x) \geq Z_c})^{KS} = \sum_{i=1}^n \lambda_i (I_{Y(x_i) \geq Z_c})$$

$$\text{Sistema: } \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{Y(x) \geq Z_c}(x_i, x_j) + \mu = \gamma_{Y(x) \geq Z_c}(x_i, v) \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\text{Varianza de Estimación: } \sigma_{Y(x) \geq Z_c}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{Y(x) \geq Z_c}(x_i, v) - \gamma(v, v) + \mu$$

Corrección de relación de orden

Los resultados obtenidos de esta manera cuando se utilizan diferentes valores límites presentan una pequeña dificultad que no se observan de forma explícita en el cálculo, es decir, se deben respetar las siguientes relaciones (Issaks y Srivastava, 1989):

1.- Las proporciones obtenidas para cualquier valor de corte no deben ser menores que 0 ni mayores que 1, $1_{Z>Z_c}^*(x) \in [0,1]$.

2.- Cuando se utilizan varios valores de corte, la proporción estimada para un indicador no debe ser mayor que la proporción estimada para un indicador superior, $1^*(v_i) \leq 1^*(v_j)$ si $v_i \leq v_j$

Existen otros métodos como el inverso de la distancia que siempre satisface estas condiciones, sin embargo, el krigeaje no las garantiza de forma estricta, de modo que los resultados obtenidos por KI pueden no cumplir con las condiciones anteriores. Si las desviaciones aunque numerosas son pequeñas en magnitud, en el orden del segundo o tercer decimal, lo que es común, se pueden utilizar algunos algoritmos que resuelven estos problemas.

Se debe tener en cuenta que las correcciones no deben modificar sustancialmente la serie original de valores construidos, apenas lo mínimo necesario para que conformen una distribución acumulativa lícita. Según la primera relación es posible producir estimaciones negativas o mayores que 1. En esta situación es posible ajustar estas estimaciones en límites apropiados, es decir, las estimaciones negativas pueden ser llevadas a 0 y estimaciones mayores que 1 pueden ser fijadas a 1. En la segunda relación, como las proporciones estimadas para cada valor límite son calculadas de forma independientes, existe la posibilidad de que la estimación con un valor de corte no sea consistente con otra.

Una vía para detectar esta condición es que la suma de las proporciones para cada localización sea igual a 1, la corrección que se propone es chequear cada par de estimaciones en sucesivos valores de corte y ajustar ambos a su valor medio si estos no satisfacen esta relación de corrección de orden.

Estimación de contenidos

Una vez obtenidos los valores estimados por KI y corregida la relación de orden es posible utilizar estos para calcular el contenido del bloque en cuestión a partir de la siguiente expresión:

$$Z^*(v) = \sum_{i=1}^n (1_i^*(x) - 1_{i+1}^*(x)) Z_i$$

Donde: 1_i^* es el valor estimado en la localización i utilizando el KI, Z_i es el contenido medio del intervalo (Z_{c_i} y $Z_{c_{i+1}}$) y n es el número de valores límites utilizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo geológico se generó sobre la base de un modelo de bloque, donde en cada celda se estima la probabilidad de que el bloque pertenezca a un determinado tipo tecnológico. Para restringir el modelo de bloque (40 x 40 x 15 m) se definió un modelo geométrico que comprende toda la zona estudiada del yacimiento.

El análisis exploratorio de datos consistió en la caracterización estadística de cada variable, para esto se calcularon los principales estadígrafos (tabla 2), y se construyó el histograma (figura 3). Aunque el tratamiento se realizó para todos los óxidos se presenta solamente los resultados del CaO pues éste define el modelo tecnológico del yacimiento.

Los resultados de la prueba KS y la forma simétrica del histograma demuestran que los valores de CaO en el yacimiento se ajustan a un modelo de distribución normal. Aparentemente esta distrución no presenta problemas de homogeneidad, pero su distribución espacial es muy compleja. Se puede interpretar que cuando existen muchos datos, estos se ajustan a una distribución normal de acuerdo con el Teorema Central del Límite. El análisis estructural se realizó en 2 etapas.

En la primera se caracterizó la continuidad espacial del CaO en los distintos tipos tecnológicos, mientras que la segunda se dirigió a los Indicadores que definen los límites entre los distintos tipos tecnológicos. Los semivariogramas direccionales para la variable CaO en los tres tipos tecnológicos principales muestran que aún cuando existen estructuras espaciales definidas, el Efecto de Pepita en todos los casos es superior al 75% de la varianza de los datos, lo cual es una evidencia de la alta variabilidad espacial a pequeñas distancias de esta variable.

Estos resultados de la variografía corroboran la alta variabilidad tecnológica presente en el yacimiento, la cual como se ha explicado anteriormente dificulta la interpretación geológica por el método convencional de simple correlación. El análisis estructural, en una segunda etapa, se llevó a cabo para las variables indicadores de CaO, las cuales se definen por valores de corte que separan los distintos tipos tecnológicos: Estéril (E), Fuera de balance (FB), Marga (M), Caliza margosa (CM) y Caliza (C) los cuales se muestran en el esquema de la figura 4.

Se crearon cuatro variables indicatrices, a partir del formalismo de indicadores ya descrito. La variable a partir de la cual se crean los indicadores en nuestro caso es el CaO, y para el valor de corte se toman los valores que definen los tipos tecnológicos, creando cuatro variables de indicadores, como se indica a continuación:

$$I_{Z \geq 40.00} = \begin{cases} 1 & Z \geq 40.00 \\ 0 & \text{Si no} \end{cases} \quad I_{Z \geq 42.30} = \begin{cases} 1 & Z \geq 42.30 \\ 0 & \text{Si no} \end{cases}$$

$$I_{Z \geq 44.80} = \begin{cases} 1 & Z \geq 44.80 \\ 0 & \text{Si no} \end{cases} \quad I_{Z \geq 47.60} = \begin{cases} 1 & Z \geq 47.60 \\ 0 & \text{Si no} \end{cases}$$

A cada una de la variables de indicadores anteriores se le realizó el análisis estructural. Los semivariogramas fueron calculados inicialmente en cuatro direcciones en el plano: 0° , 45° , 90° y 135° , además del omnidireccional, también fue calculado el semivariograma en la dirección vertical para completar el análisis de variabilidad en tres dimensiones. En los semivariogramas que se muestran en la figura 5 se representan las direcciones de mayor y menor continuidad en el plano, 0° y 45° respectivamente, así como el omnidireccional y el vertical. Posteriormente se ajustaron modelo teóricos a los semivariogramas experimentales.

En los semivariogramas mostrados anteriormente se observan estructuras definidas y con similar comportamiento en todas las direcciones, es por este motivo que se considera el comportamiento isotrópico en el plano, para todas las variables indicatrices tratadas y finalmente un comportamiento anisotrópico entre el plano del yacimiento y la dirección vertical. Los modelos teóricos ajustados se muestran a continuación:

Indicatriz $I_{Z \geq 40.00}$ $G(h) = 0.060 + 0.042 \text{ Exp}(130,130,30)$

Indicatriz $I_{Z \geq 42.30}$ $G(h) = 0.07 + 0.10 \text{ Exp}(70,70,8)$

Indicatriz $I_{Z \geq 44.80}$ $G(h) = 0.090 + 0.152 \text{ Exp}(50,50,8)$

Indicatriz $I_{Z \geq 47.60}$ $G(h) = 0.0136 + 0.0800 \text{ Exp}(100,100,18)$

Donde Exp representa el modelo exponencial.

Estimación por KI

Los métodos de estimación espacial, incluyendo el Krigeaje, tienden a suavizar la variabilidad espacial real de la ley al pasar de una litología o mineralización a otra. La única forma de eliminar esta deficiencia es restringiendo el proceso de estimación al volumen que ocupa el dominio o unidad geológica, o sea, aplicar discriminación poblacional o control geológico a la estimación (Turcanaza, 2000, Houlding , 1994).

Como no es posible en este caso concreto crear un modelo tecnológico del yacimiento y realizar la estimación de forma independiente dentro de cada unidad o dominio geológico, se optó por emplear KI, el cual para cada uno de cutoff seleccionados emplea un modelo de variograma diferente, logrando separar y usar en la estimación la estructura espacial de las distintas partes de la distribución.

El elipsoide de búsqueda utilizado para la estimación fue de 550.0, 550.0 y 30.0 m en las direcciones X, Y y Z respectivamente. Para la estimación de cada elemento por bloque se utilizó, como mínimo 2 y un máximo de 16 muestras dentro del volumen de búsqueda. Esto garantiza la inexistencia en la estimación de ponderaciones negativas. Se obtiene de esta forma la probabilidad de ocurrencia de los tipos tecnológicos en bloques de 40 x 40 x 15 m., para cada variable de indicadores.

Corrección de orden

Antes de estimar del contenido de CaO en cada uno de los bloques a partir de la probabilidad de ocurrencia de los tipos tecnológicos y el valor medio de la variable para cada tipo, se procedió a chequear que las proporciones estimadas para cada ley de corte cumpliera con los requerimientos de relación de orden anteriormente descritos. Cada una de las incongruencias detectadas fue corregida siguiendo la metodología propuesta por Issaks y Srivastava (1999).

Fue necesario hacer correcciones al 20 % de los bloques donde se realizaron estimaciones por cada valor de corte, lo cual no es significativo (Issaks y Srivastava, 1999). Posteriormente se estimó el contenido de CaO en cada uno de los bloques y atendiendo al valor se clasificaron en tipos tecnológicos. La figura 6 muestra un perfil del modelo de bloque con orientación norte – sur, donde se muestra el CaO estimado por KI, y el tipo tecnológico a que pertenece. Las estimaciones obtenidas han permitido clasificar a los bloques en una categoría tecnológica determinada, aunque la estimación se ha realizado en un soporte o volumen $40 \times 40 \times 15 \text{ m}^3$ que provoca un suavisamiento de la variable estimada, se observa la variabilidad espacial de los

distintos tipos tecnológicos. El modelo de bloque que contiene la información del tipo tecnológico y la variación espacial del CaO fue validado empleando los procedimientos siguientes:

a) Comparación visual del contenido de CaO en el modelo de bloque y en los valores regularizados en los pozos. Para realizar la comparación el modelo fue cortado en perfiles y planos de nivel. Existe buena correspondencia entre los valores de CaO en el modelo y en los pozos.

b) Comparación de los valores medios del CaO en el modelo de bloque y en los pozos de perforación. La tabla 3 muestra que las diferencias estimadas no son significativas, el valor máximo reportado es de 2.70 %

Normalmente para validar el modelo de recursos también se emplea un método alternativo de estimación, en este caso, se descartó la posibilidad de emplear el Inverso de la Distancia y el Krigeaje Ordinario, pues su aplicación sin control geológico hace imposible comparar los resultados.

CONCLUSIONES

1. Existen yacimientos en los que se hace imposible definir el modelo geológico debido a la alta variabilidad espacial de los parámetros geológico – industriales. En los mismos no se pueden emplear métodos tradicionales de correlación geológica y se hace necesario la búsqueda de alternativas para su modelación.
2. El estudio variográfico del CaO combinado con el análisis de toda la información geológica del yacimiento corroboró la gran variabilidad tecnológica del mismo y la dificultad de generar un modelo geológico por método tradicional que pueda ser usado para restringir la estimación en el modelo de recursos.
3. Los resultados obtenidos demuestran que el KI es una solución eficiente para la modelación tecnológica y de recursos en yacimientos de materia prima para cemento donde se manifiesta una alta variabilidad tecnológica provocada por los frecuentes cambios faciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Annels, A. E. y Al-Hassan, S., 1994. Mineral Resource Evaluation II, Methods and cases histories, Geological Society (Special Publication) 79 :157-169.
- Arseneau, G. J y Roscoe, W. E., 2000. Practical Applications of Geology to Resource/Reserve Estimation, Mining Millennium, Toronto , Canada,
- Chica-Olmo, M., 1987. Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Exploración de los Recursos Minerales, Tesis Doctoral, Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 387 pp.
- Deutsch, C. V. and Journel, A. G., GSLIB., 1998. Geoestadistical Software Library and User's Guide", Oxford University Press, New York.
- Glacken, I. M. y Blackney, P. C. J., 1998. A practitioners implementation of indicator kriging. The Geostatistical Association of Australasia, "Beyond Ordinary Kriging" Seminar, October 30th, 1998, Perth, Western Australia. 12 p, 1998.
- Goovaerts P., 1998. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York.
- Houlding, S. W., 1994. 3D Geoscience Modelling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Hong Kong, 309 Pp.
- Issaks, E., y Srivastava, R.M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 561 p,
- Journel, A.G., 1983. Non-parametric estimation of spatial distribution. International Association for Mathematical Geology Journal, 15, : 445-468.
- Lemmer, I.C. 1984., Estimating local recoverable reserves via IK. In: Geostatistics for Natural Resources Characterization (eds G. Verly et al.) Reidal, Dordrecht, pp. 349-364,
- Martínez, M. H., Pérez-Acosta, J., Felipe-Reyes. J., Torres, J., y Pereda, O., 2002. Recálculo de Reserva del yacimiento Pastelillo. Informe. ONRM. La Habana, 31 pp.
- Owens, O, y Armstrong, W.P., 1993. Ores Reserves- The Four Cs, Exploration Mining Geology, 2(1): 49-52.
- Popoff, C.C., 1966. Computing reserves of Mineral deposits: principles and conventional methods. Washinton , Bureau of Mines. 113p
- Stephenson, P. R. y Vann, J., 1999. Common sense and good communication in mineral resource and ore reserve estimation, mineral resource and ore reserve estimation - The AusIMM guide to good practice (Ed: A C Edwards).The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 13-20, 2001.
- Turcanaza, E., 1999. Evaluación de Recursos y Negocios Mineros, Instituto de Ingenieros de Deutsch, C. V. & Journel Minas de Chile, en Impresos universitaria, S.A, 350 p.

FIGURAS Y TABLAS

Tabla 1. Campañas de perforación en el yacimiento Pastelillo

Etapa	Cantidad de pozos	Metros perforados (m)	Red utilizada (m)
Cia. Morro 1955	15	435,20	≈ 200 x 200
Prospección Orientativa 1962	19	621,50	Irregular
Exploración Orientativa 1968	74	2077,80	≈ 200 x 200 ≈ 100 x 100
Exploración Detallada 1981	57	847,25	≈ 200 x 200 ≈ 100 x 100
Exploración Detallada 1990	102	2353,30	≈ 100 x 100 ≈ 60 x 60
Exploración de Explotación 2002	60	2228,85	≈ 75 x 50
Total	327	8563,90	

Tabla 2. Datos estadísticos del CaO.

	CaO
Número de valores válidos	1080
Mínimo	27,65
Máximo	55,90
Rango	28,25
Media	45,96
Mediana	46,07
Varianza	18,86
Desviación Estándar	4,34
Coefficiente de variación	0,09
Coefficiente de asimetría	-0,28
Curtosis	-0,08
Estadígrafo K-S calculado	0,02
Estad. K-S, alpha=.10	0,04
Estad. K-S, alpha=.05	0,04
Estad. K-S, alpha=.01	0,05

Tabla 3. Comparación del contenido medio de CaO en los compósitos de 5 m y en el modelo de bloque

Variable	Valor medio de los compósitos de 5m (%)	Valor medio en el modelo de bloque	Diferencia estimada (%)
CaO_yacimiento	45,96	44,72	2,70
CaO_caliza	50,42	49,26	2,30
CaO_caliza margosa	46,13	46,12	0,02
CaO_margas	43,62	43,61	0,02

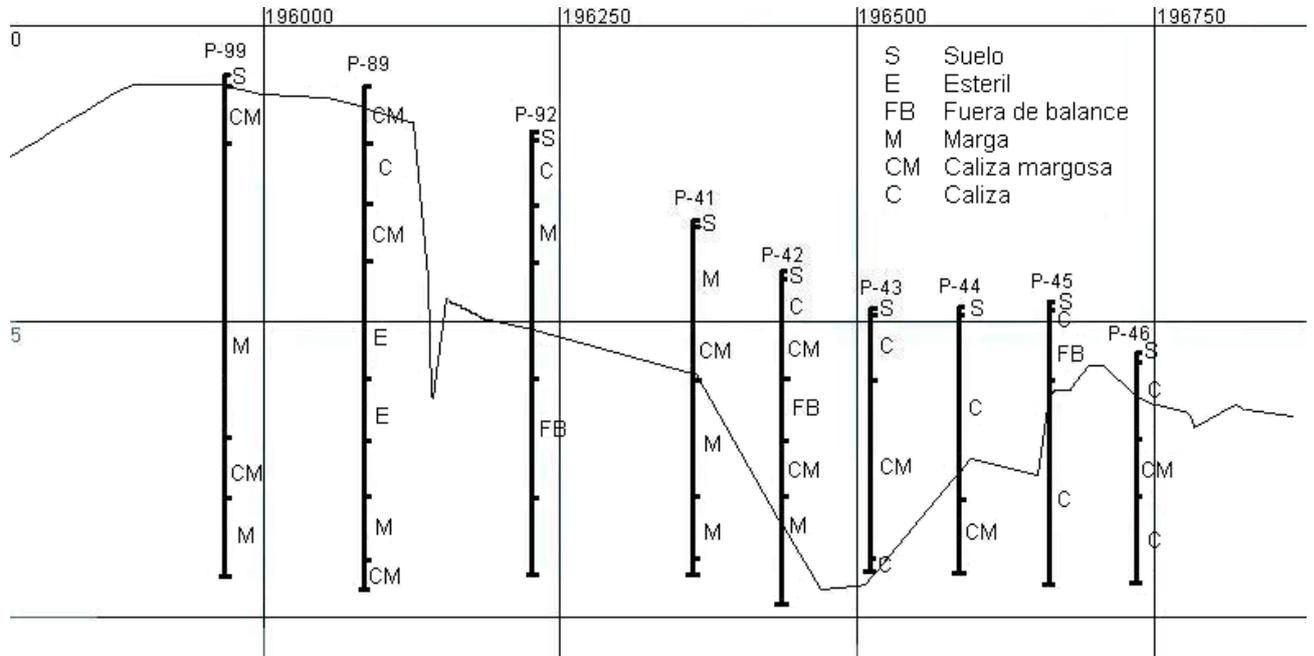
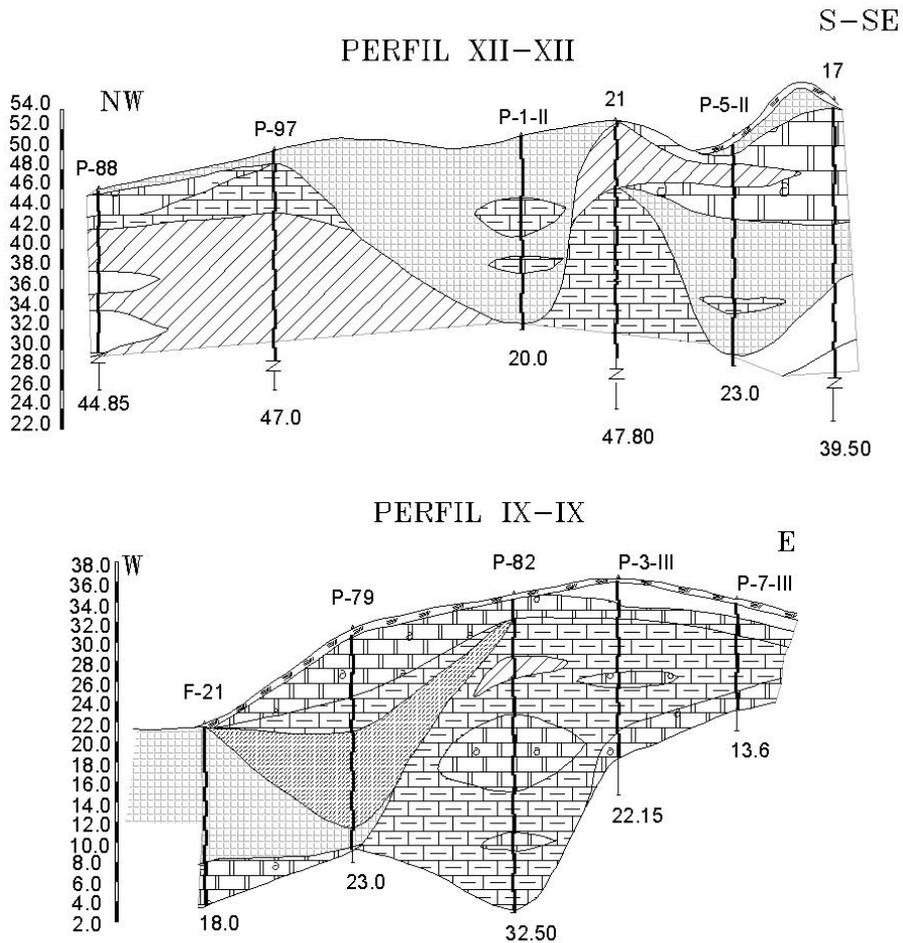


Figura 1: Perfil tecnológico, coordenada 888980 este



LEYENDA

-  Capa vegetal.
-  Caliza (CaO > 53.2%).
-  Caliza margosa (CaO 50.4-53.22%).
-  Marga carbonatada (CaO 47.6-50.4%).
-  Marga carbonatada (CaO 42.0-47.6%).
-  Marga (CaO < 42%).
-  Arcilla.
-  Nombre del pozo.
-  Intervalo de muestreo

Figura 2: Perfiles Geológicos

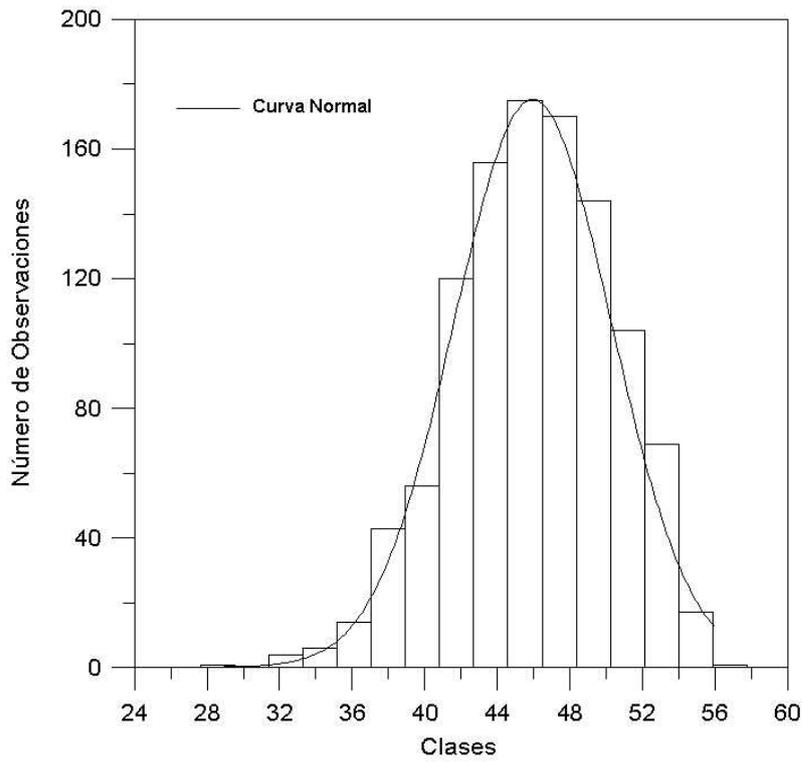


Figura 3: Histograma del CaO

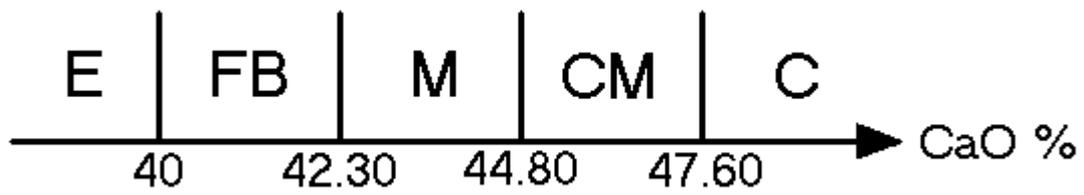


Figura 4: Valores de corte que definen los tipos tecnológicos

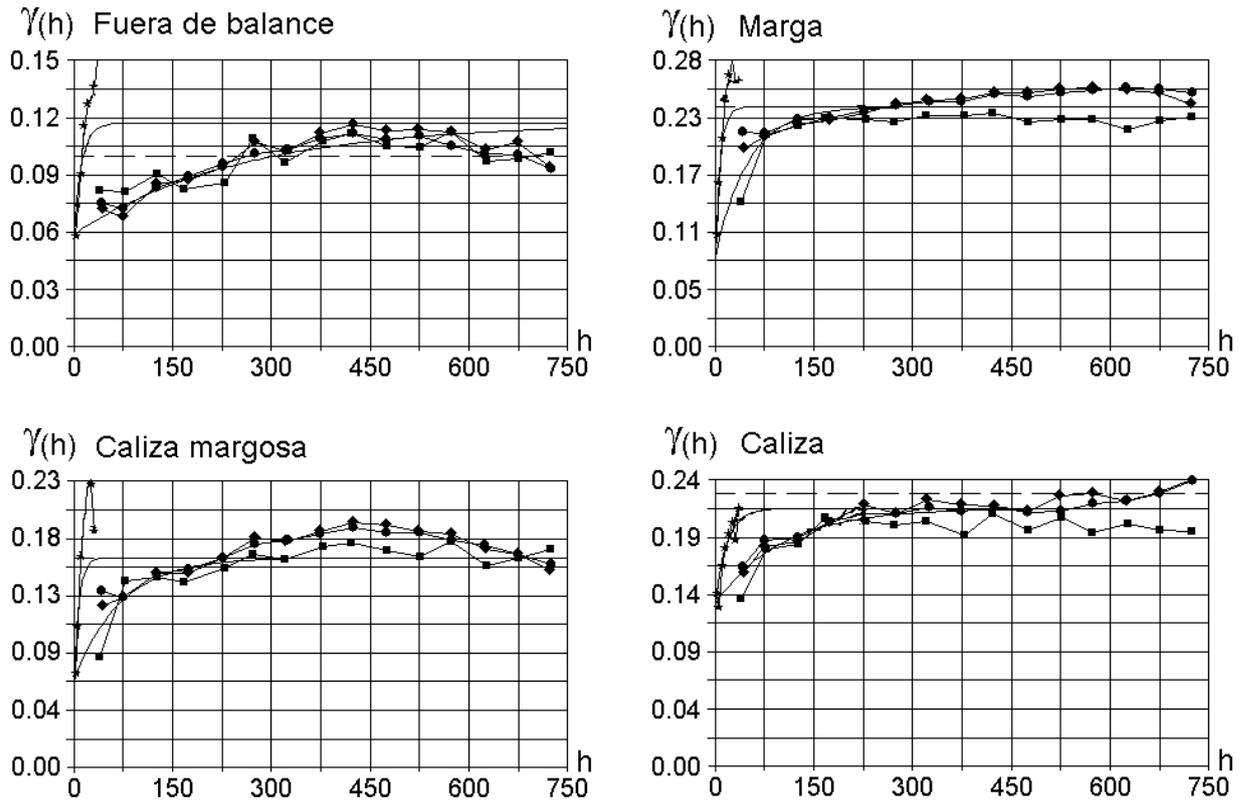


Figura 5: Semivariogramas de indicadores

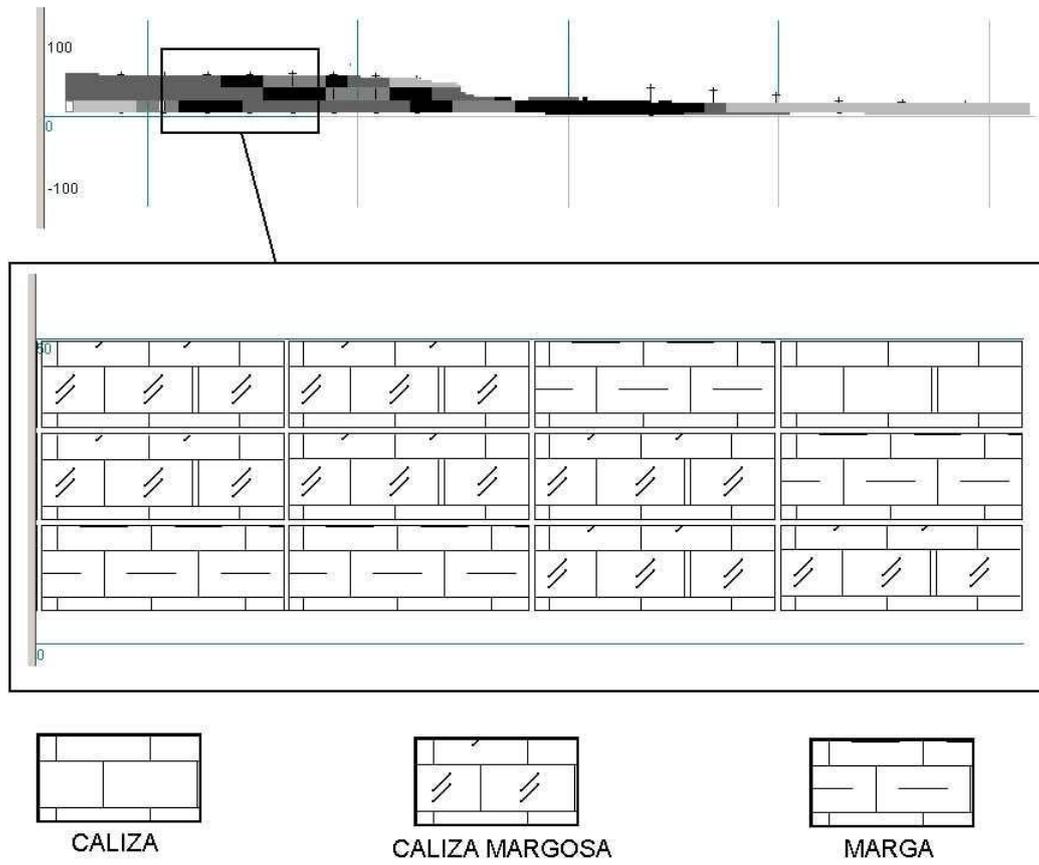


Figura 6: Perfil del modelo de bloques