

Evaluación de Recursos Mineros. Importancia económica y estado del arte.

Marco Antonio Alfaro Sironvalle USS

Resumen

En la actualidad se dispone de una serie de métodos y paquetes computacionales que realizan cálculos automáticos de evaluación de recursos mineros, los cuales van desde la interpretación geológica hasta la simulación condicional en un depósito. Sin embargo poco se dice acerca de las condiciones y las limitaciones en las cuales estas nuevas técnicas pueden ser aplicadas.

I. Introducción.

Debido al reciente avance de las herramientas computacionales dedicadas a la estimación de recursos mineros (DataMine, Gemcom, MineSigh, Vulcan, Seequent, etc.), se hace necesario estudiar los peligros que implica no utilizar, de manera adecuada las opciones que ofrecen estos paquetes computacionales. En este trabajo se discuten los últimos avances de la geoestadística, haciendo énfasis en las condiciones de aplicación para cada técnica analizada.

II. Las herramientas de la geoestadística moderna.

Numerosas son las herramientas que ofrece la geoestadística moderna. Aquí sólo se estudiarán algunas de las más importantes:

II.1. Variograma o correlograma.

Los paquetes computacionales proporcionan la posibilidad de calcular el variograma y el correlograma. El ejemplo siguiente, tomado de un sondaje en la mina de cobre Alemão, Brasil, ilustra la situación:

Sea un sondaje muestreado a intervalos regulares, por ejemplo cada metro con las leyes siguientes, las cuales muestran una deriva o tendencia con crecimiento sistemático (figura 1):

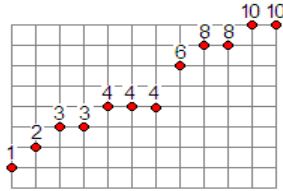


Figura 1: Sondaje simplificado, ley de cobre. Equidistancia entre datos contiguos = 1 metro.

La figura 2 muestra el correlograma y el variograma asociados a estos datos:

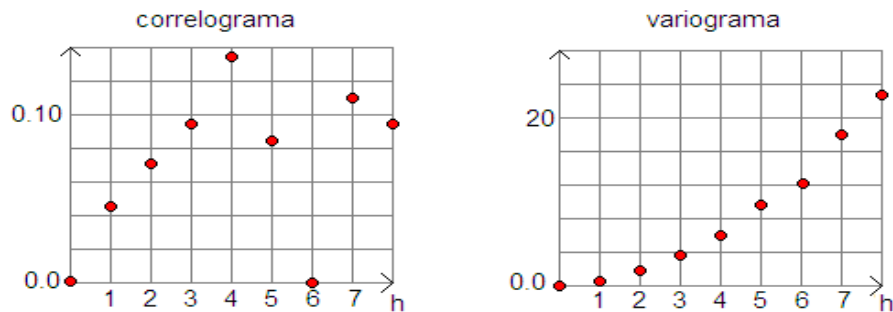


Figura 2: Correlograma y variograma.

Se observa entonces que:

- El correlograma tiene un efecto de pepita en el origen mientras que el variograma es parabólico en el origen.
- El correlograma nunca alcanza la meseta teórica de 1.0, en particular, a diferencia del variograma, el correlograma no muestra la tendencia de los datos.
- El correlograma muestra una periodicidad inexistente en el paso 6. Esto se debe a que los datos distantes de 6 unidades tienen una relación lineal ($Z(x+6) = 2Z(x)+2$), luego, para esta distancia, a diferencia del variograma, el correlograma es nulo.

II.2. Control geológico en la estimación de recursos.

Se utiliza un modelo geológico en la estimación de los recursos mineros en la definición de la geometría tridimensional de las zonas mineralizadas, las cuales se considera que tienen las mismas propiedades y se llaman unidades geológicas. La figura 3 muestra las unidades geológicas en una planta (2587.5 msnm) de la mina Gabriela Mistral:

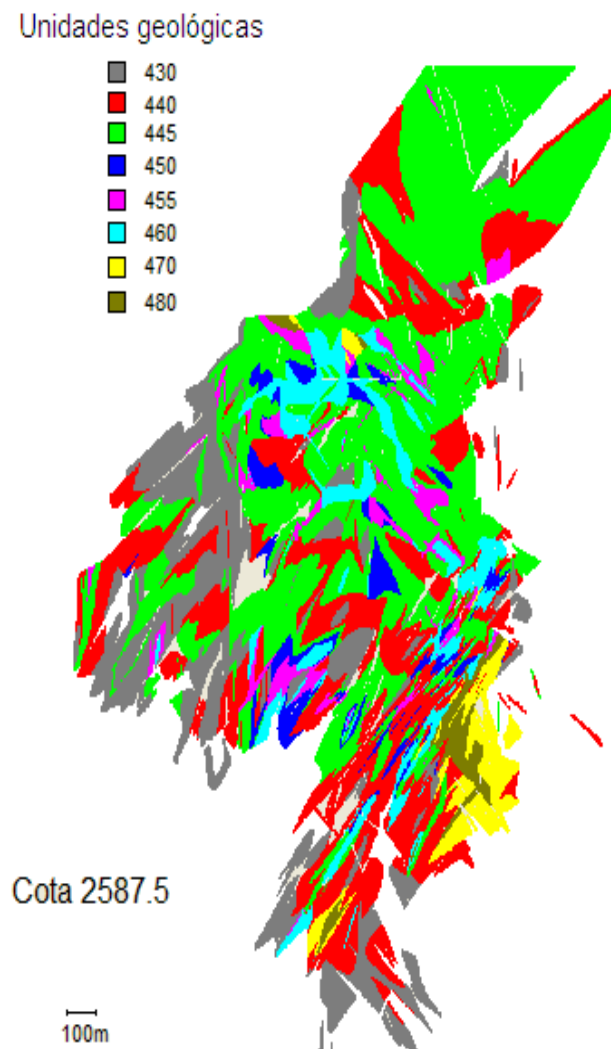


Figura 3: Modelo geológico (códigos de las unidades), mina de Cu oxidado.

Una práctica habitual para estimar los recursos consiste en utilizar estos modelos geológicos usando “fronteras duras” (para estimar un bloque localizado

en una misma unidad geológica, sólo se utilizan los compósitos que están dentro de la unidad), o bien “fronteras blandas” (en este caso se utilizan compósitos de la(s) unidades(s) contigua(s)). Se debe mencionar también que existen fronteras “suaves”, combinación de las anteriores.

Surge entonces la pregunta ¿en qué condiciones se pueden usar fronteras duras o blandas?

Para dar respuesta a esta pregunta se considerará una mina de cobre con dos unidades: una con alteración potásica (con leyes de Cu del orden de 1.0%) y la otra con alteración propilítica (con leyes de Cu del orden de 0.5%). Sea x_0 un punto a estimar. Las figuras 4(a) a 4(c) resumen diferentes situaciones:

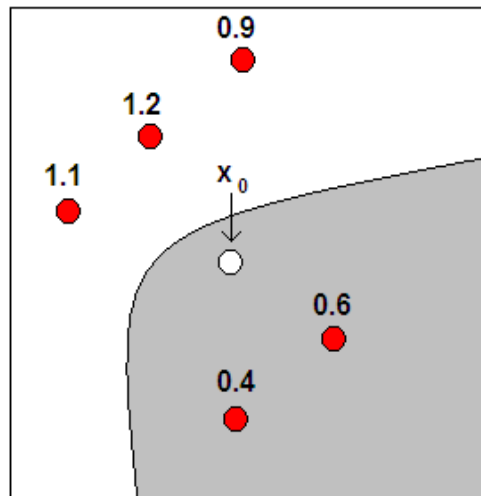


Figura 4(a): En blanco unidad potásica, en gris unidad propilítica.

En este caso es claro que la ley estimada en x_0 debe ser del orden de 0.5%. Sin embargo aquí se realizó otra estimación quizás más importante que es la interpretación de la frontera entre estas dos unidades.

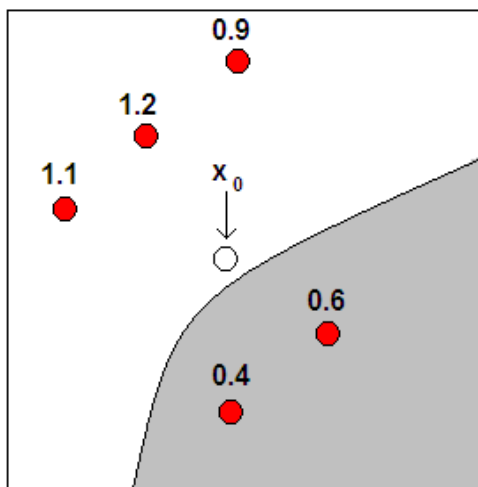


Figura 4(b): Cambio de frontera.

Si la frontera fuera la de la figura 4(b), entonces la ley en x_0 sería del orden de 1.0%.

Se concluye entonces que las fronteras duras se justifican cuando se conoce perfectamente la frontera entre ambas unidades.

Aún en el caso de conocer perfectamente la frontera, en algunos casos tampoco se justifica (figura 4(c)):

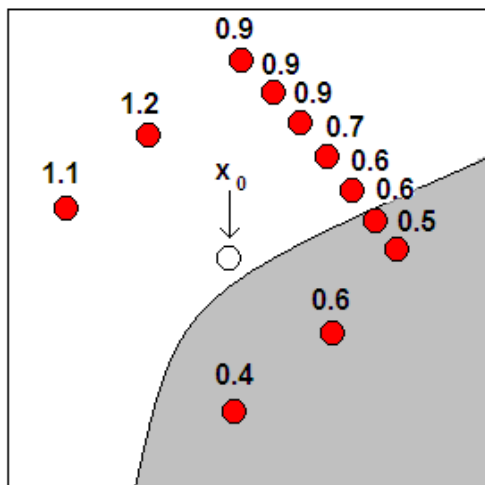


Figura 4(c): Dependencia de las leyes de una unidad a otra.

En consecuencia, las fronteras duras se justifican cuando:

“Se tiene una discontinuidad geológica, es decir las leyes son independientes de una unidad a otra y la frontera es perfectamente conocida”.

En particular en el método de las envolventes utilizando una ley de corte numérica, no se pueden usar fronteras duras porque existe una dependencia entre una unidad y la otra y la frontera no es conocida.

Algunos autores afirman que las fronteras duras se justifican cuando:

“Existe un cambio abrupto en las leyes de ambas unidades”.

El ejemplo siguiente muestra que lo anterior no es verdadero: Se considerará el caso de una variable que vale 0 o 1 (lo que se conoce en geoestadística como indicador). El cambio de 0 a 1 es abrupto y no se justifican las fronteras duras para estimar los bloques (figura 5):

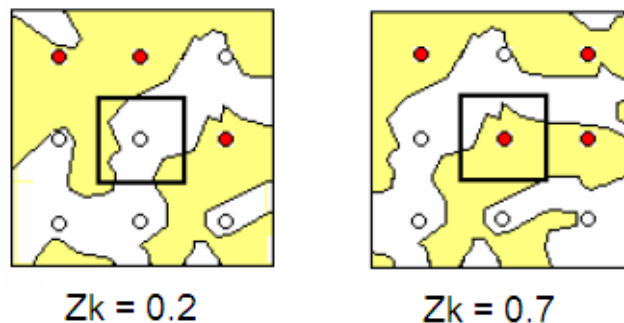


Figura 5: Unidad de ley 1 en amarillo. En blanco la ley 0. La frontera entre ambas unidades es desconocida. Resulta obvio que hay que usar datos externos, en caso contrario, se producen sesgos.

La figura 6 muestra otro problema no bien estudiado: los errores de interpretación de un cuerpo geológico:

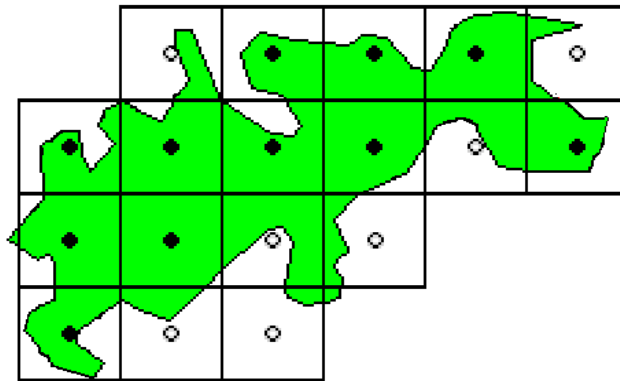


Figura 6(a): Cuerpo real (desconocido), mineral y estéril, sondajes positivos y negativos. Es la zona mineralizada de la Oficina Ossa.

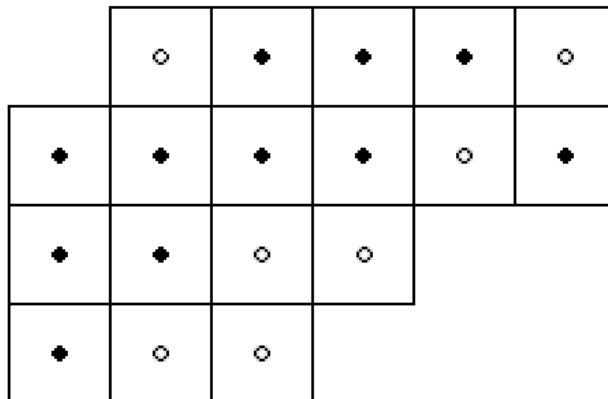


Figura 6(b): La interpretación geológica debe realizarse con esta información.

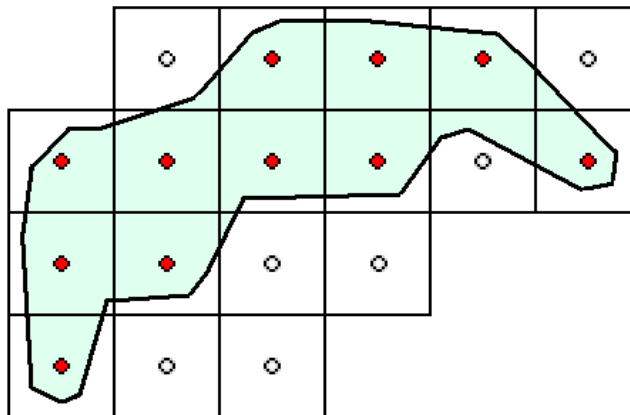


Figura 6(c): Interpretación del cuerpo mineralizado. No es biunívoca.

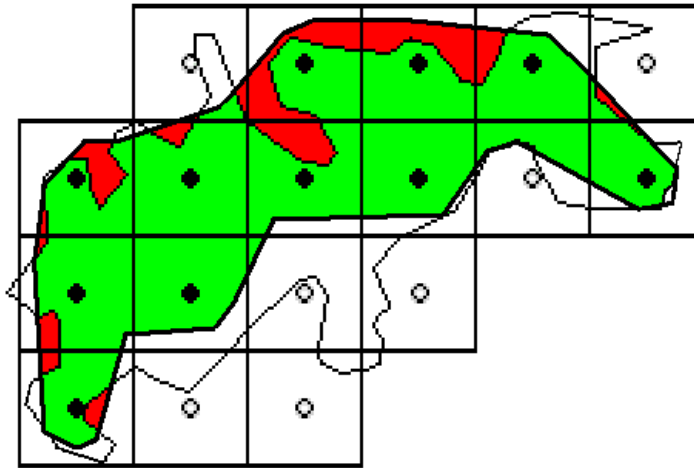


Figura 6(d): Se observa que hay estéril en la zona interpretada y mineral fuera de ella, luego el tonelaje y la ley media de la zona interpretada como mineral, están sobreestimados. La importancia económica es fundamental.

II.3. La simulación condicional de leyes en un depósito minero.

Contrariamente a lo que se piensa, la simulación condicional no es una herramienta nueva: la teoría fue desarrollada en la década de los 70 (las dos primeras publicaciones acerca de simulaciones condicionales datan de 1974).

Las aplicaciones prácticas de las simulaciones condicionales son numerosas: cálculo de errores de estimación, estudios de fluctuación de leyes, aplicación de fórmulas económicas en la planificación minera, categorización de recursos, dilución, etc.

La simulación condicional consiste en construir otra versión del fenómeno mineralizado, la cual posee el mismo histograma y el mismo variograma que los datos disponibles, además de estar condicionada por estos datos. Es decir, donde existen datos, simulación y realidad coinciden. La simulación condicional tiene la misma variabilidad que la realidad. La figura 7 muestra una simulación condicional en una planta de la mina de cobre de Lomas Bayas junto al krigeado:

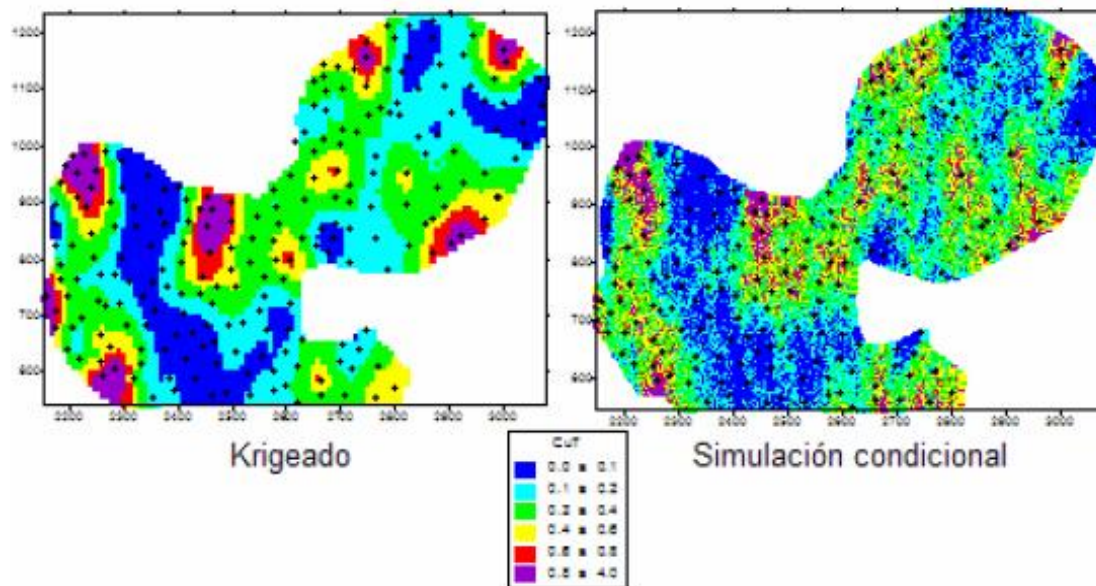


Figura 7: Krigado y simulación condicional. Se observa que el krigado “alisa” la realidad.

Existe toda una matemática que permite obtener simulaciones condicionales, con las condiciones mencionadas. Estas simulaciones se basan en una extensión del método de Montecarlo.

La figura 8 muestra el caso en el cual la anamorfosis conduce a leyes lognormales: Se observa que la reproducción del variograma no está asegurada

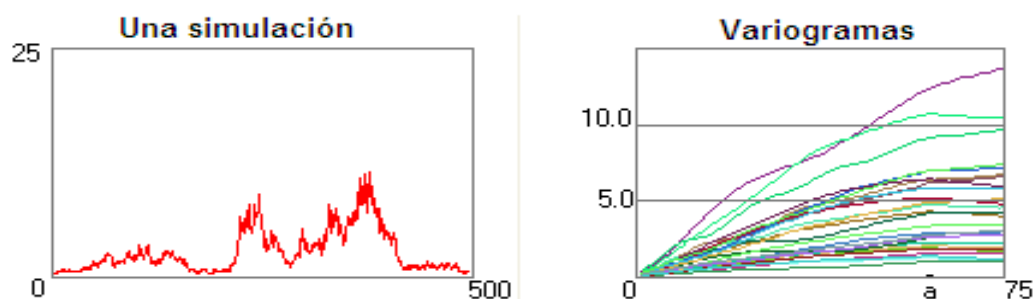


Figura 8: Simulación lognormal, variograma esférico con alcance a . A la izquierda los variogramas obtenidos con varias simulaciones.

Lo anterior deja una incertidumbre acerca de las simulaciones no gaussianas (caso más común en la práctica).

Para más detalles acerca de este importante problema, ver M. Alfaro 2008.

En la actualidad es también común simular la geología. Uno de los métodos más utilizados es el plurigaussiano, el cual transforma dos simulaciones gaussianas en una simulación de la geología, considerando relaciones de contacto entre las diferentes unidades (figura 9):

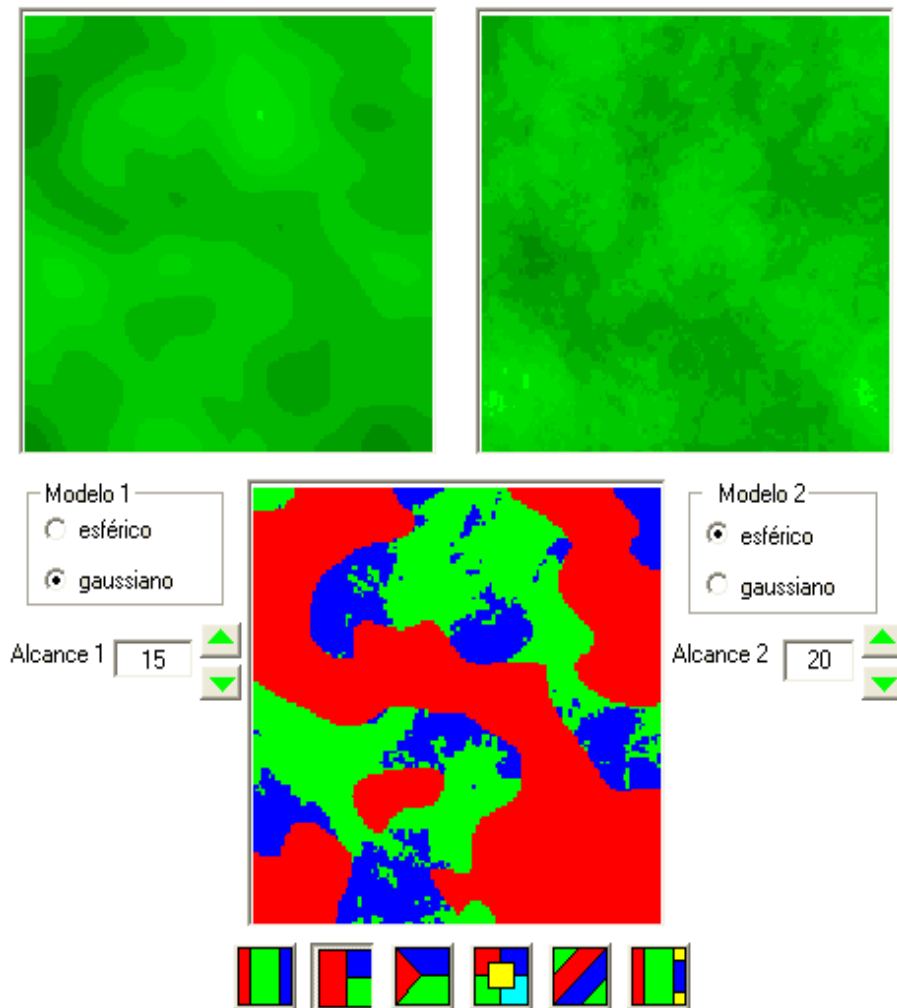


Figura 9: Simulación plurigaussiana de tres unidades geológicas. Las relaciones de contacto se definen en las “banderas” inferiores.

En este trabajo no se aborda el importante problema (no muy bien estudiado y estandarizado) de la categorización de los recursos. En la actualidad no existe un método que conduzca a un consenso en la industria minera. Para las empresas mineras que cotizan en la bolsa, la categorización de los recursos y las reservas es de vital importancia económica.

La figura 10 muestra la categorización de los recursos de Gabriela Mistral en medidos, indicados e inferidos:

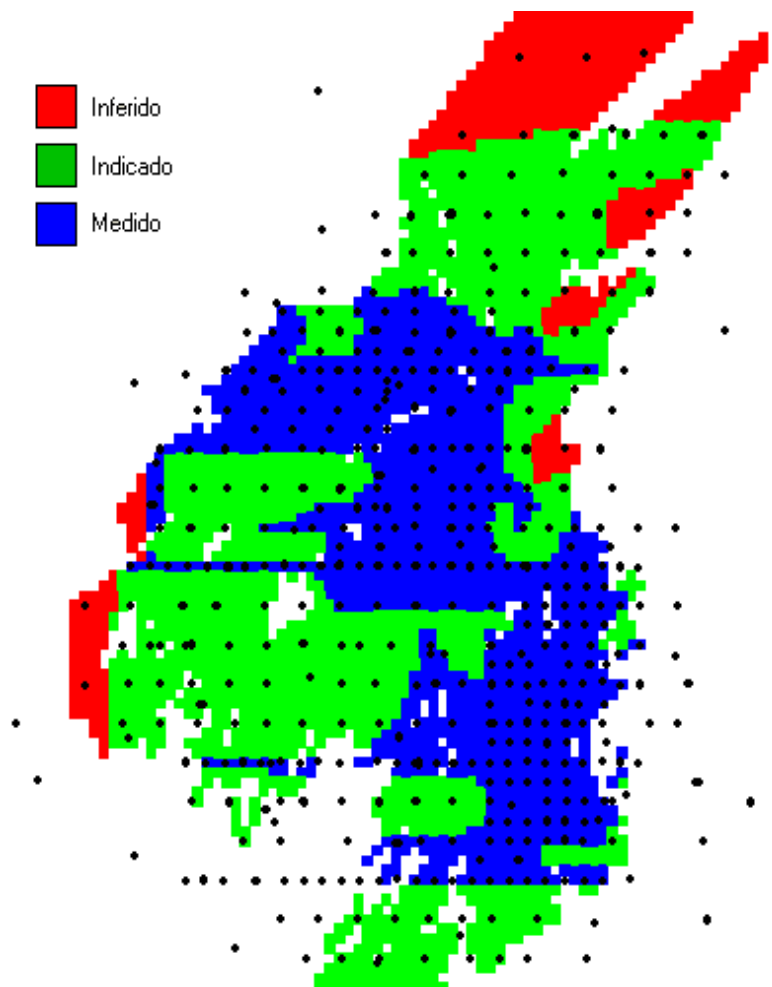


Figura 10: Categorización de los recursos en mina Gabriela Mistral.

II.4. Machine Learning.

Este problema lo hemos resuelto al calcular el error de estimación de un conjunto de bloques (en algunos casos unos millones de bloques) con unos miles de compósitos, problema que hemos resuelto sin utilizar aproximaciones, nuestro cálculo es exacto, utilizando aprendizaje automático, con una programación computacional óptima (Figura 11)

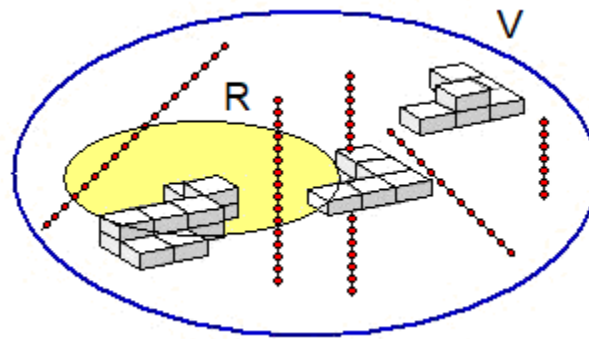


Figura 11: Cálculo del error de estimación de leyes de Cu, de cobre fino y de tonelaje en un plan minero de una mina de cobre

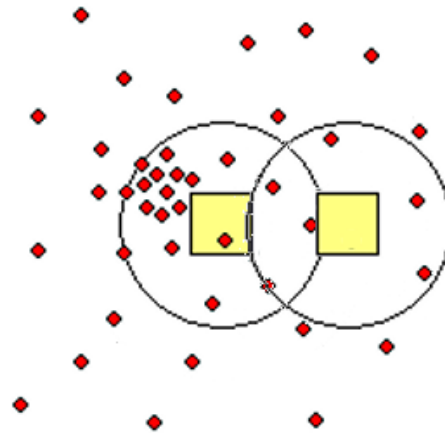
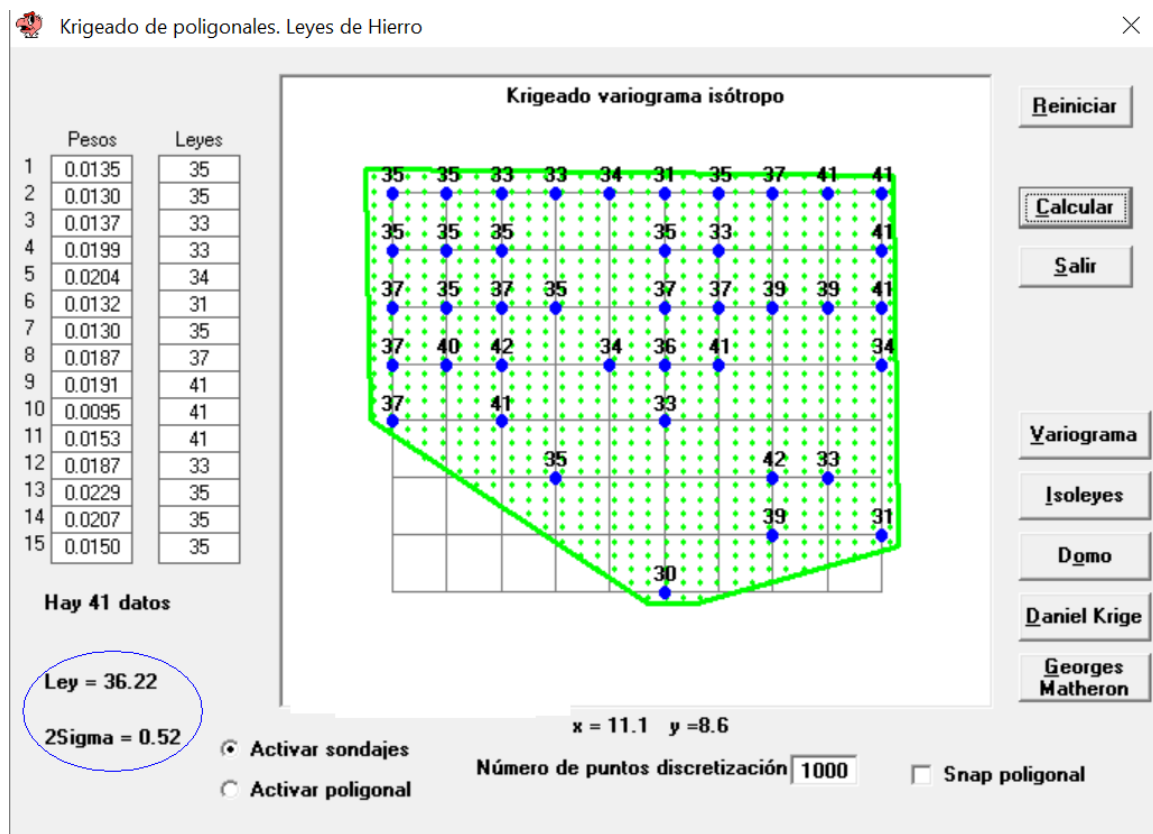


Figura 12: Ambos bloques no comparten los mismos datos y se produce que el krigeado parcial no coincide con el krigeado de toda la base de datos (krigeado completo) que es el verdadero óptimo.

II.5. Inteligencia artificial

Hemos construido un programa computacional que muestra la inteligencia artificial del método geoestadístico del kriging.

Se puede aplicar al kriging completo: calcular la ley de un bloque o zona utilizando toda la base de datos. Como el método es óptimo, no se necesita ni radios de búsqueda ni mínimos, ni máximos, ni octantes, ni mínimo de sondajes, ni máximo de compósitos por sondaje etc. (usar estos conceptos implica sesgos y artefactos en las estimaciones). Para el naturalista este kriging completo es ideal: el ser humano casi no interviene sino la inteligencia artificial del método.



II.6. Geometalurgia

En la actualidad, para planificar la explotación de la mina se utilizan los modelos geo-metalúrgicos (también geo-mecánicos), de recuperaciones metalúrgicas, de durezas (de RQD y FF), los cuales permiten cambiar la secuencia de explotación (privilegiando sectores más blandos, de mejor recuperación metalúrgica, de roca

más competente, etc.). La aplicación de la geoestadística a este tipo de variables tiene la dificultad que algunas de ellas no son aditivas (la media no tiene sentido), luego hay que hacer desarrollos de física matemática.

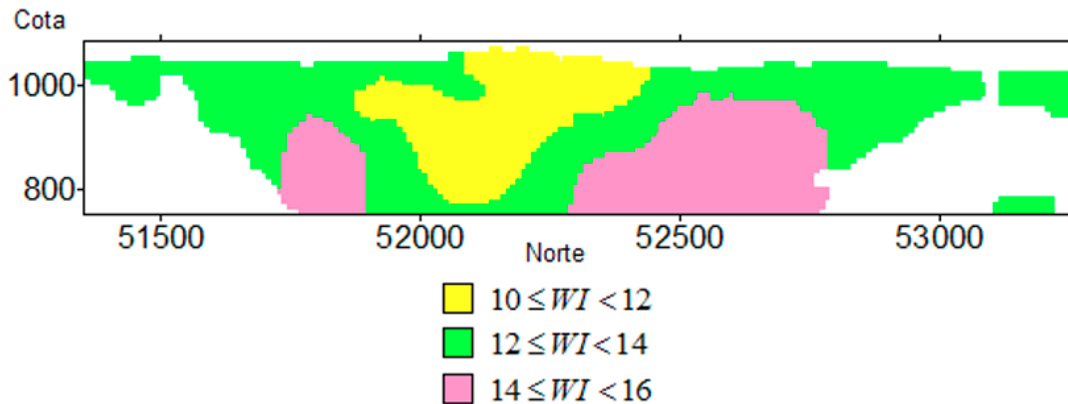


Figura 13: Modelo del índice de Bond (W_i) en la mina Carmen de Andacollo, en un perfil.

III. Conclusiones.

Lo más importante para una empresa minera no es la planta, sino más bien, los recursos y las reservas, los cuales deben ser estimados de manera adecuada, en caso contrario se pueden producir sesgos con consecuencias económicas que pueden significar grandes pérdidas. Lamentablemente las investigaciones actuales en geoestadística han derivado hacia la parte matemática y hacia métodos poco robustos, sin consolidar problemas de gran importancia económica como los tratados en este trabajo. No nos hemos referido a los problemas de muestreo minero, de gran importancia económica. Se puede comprobar que nuestras minas y plantas están plagados de especímenes, es decir muestras intrínsecamente sesgadas.

IV. Bibliografía

- G. Matheron: Estimar y Elegir. ETS Minas, París. Traducción al español por Marco Alfaro, 2018
- G. Matheron: Las variables regionalizadas y sus aplicaciones. ETS Minas, París. Traducción al español por Marco Alfaro.