

# Simulación Secuencial de una Variable Categórica – Zona Supérgena – Proyecto de Cobre Río Blanco - Perú

José Terrones Alvarado(\*)  
Jacques Deraisme (\*\*)

(\*) GEOVAL PERU S.A.C., Geoestadístico Principal

(\*\*) GEOVARIANCES, Gerente Técnico.

## RESUMEN

El modelamiento geológico de la zona supérgena en un pórfido de cobre es muy importante, si observamos que presenta las mejores leyes del depósito.

Por un lado tenemos la estimación de los contenidos metálicos, pero por otro esta el volumen al que se asignarán estas leyes calculadas. El volumen de una unidad mineralizada se obtiene a partir de las secciones y/o plantas geológicas, así como la experiencia del modelador. Todo lo que se materializa en los planos y secciones son líneas y áreas determinísticas que dependen de la persona que interpreta.

Debido a la topografía abrupta del yacimiento, en zonas tenemos un amplio espaciamiento entre taladros y un importante control estructural, así es difícil asegurar la continuidad de una unidad litológica siguiendo un patrón particular.

**La forma de un cuerpo mineral define su volumen y consecuentemente el contenido metálico, de allí la importancia de modelar y/o simular las formas de los cuerpos mineralizados complejos.**

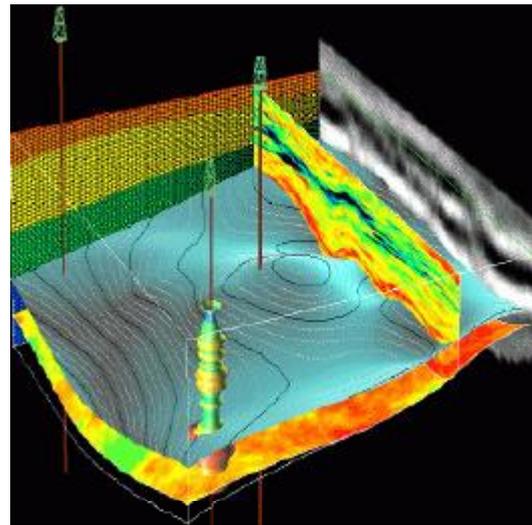
Sin desvirtuar la experiencia del geólogo, consideramos necesario utilizar herramientas de ayuda a la interpretación que brindan los métodos de **simulación condicional secuencial geoestadística de variables categóricas** como la roca o mineral. En este caso nos interesa la zona supérgena (SG) donde existen dos concepciones, estas se superponen a los

resultados de la simulación y el volumen que tenga mayor probabilidad de ser zona SG será el cuerpo mas aceptable de nuestro modelamiento.

## INTRODUCCIÓN

El problema para modelar estructuras, cuerpos u objetos que están asociados a depósitos minerales o reservorios petrolíferos, consiste en que solo disponemos de parte de la información de estos depósitos: afloramientos, perforaciones, mediciones indirectas (geofísica), y otros (Fig. 1). Estamos familiarizados de hacer modelamiento, estimación de recursos y diseño de mina por ejemplo con programas que están presentes en el mercado local desde hace algunos años. Los

mismos que por su carácter industrial entregan soluciones prácticas aproximadas no rigurosas.



**Fig. 1**

Es común trabajar sobre geometrías regulares, ejes coordenados ortogonales, transformar coordenadas, rotar, proyectar un objeto a un plano principal si tenemos un pórfido por ejemplo y, sobre un plano particular si tenemos pliegues o vetas. Esto se llama **folding** y **unfolding**, donde podemos hacer geoestadística y estimar, luego regresar al sistema coordenado original. Esto es un artificio, pues pensamos que la deposición se efectuó antes o después de la deformación y las propiedades se conservan.

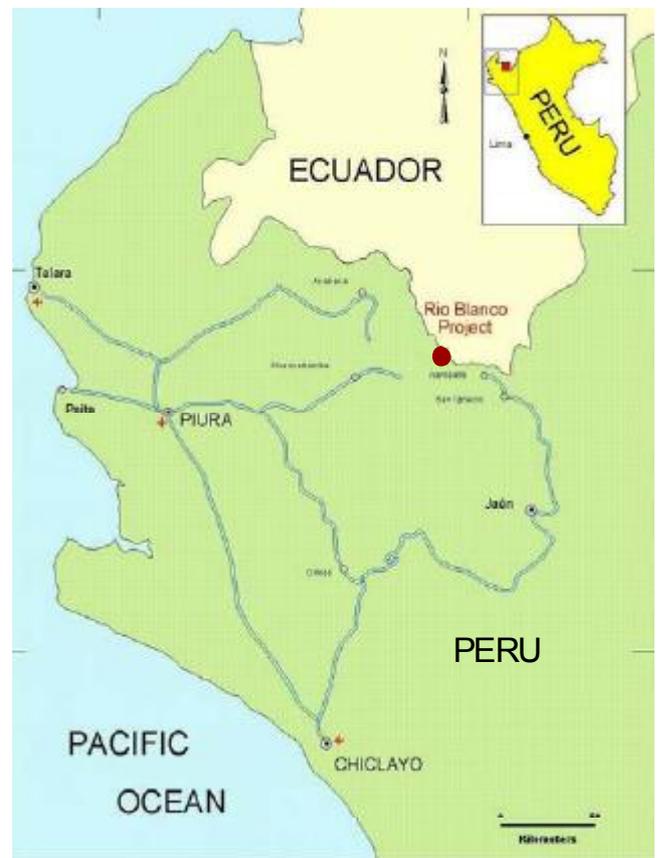
Sin embargo, para calcular las anisotropías de las variables de interés (leyes, litología, porosidad, potencia, etc.), no siempre tenemos ejes regulares, esto es particularmente en geoestadística muy cierto.

El objetivo del presente trabajo es ayudar a elegir un modelo geométrico de una unidad geológica mineralizada por ejemplo un cuerpo silicificado o como en este caso el cuerpo de la zona supérgena del proyecto Río Blanco. *Lo que se pretende es calcular un volumen probabilísticamente aceptable que responda a criterios estructurales y litológicos al mismo tiempo.*

## GENERALIDADES

El Proyecto Río Blanco está ubicado en el Distrito del Carmen de la Frontera, Provincia de Huancabamba, Región Piura, en la Republica del Perú (Fig. 2).

El yacimiento principal del Proyecto se ubica a una altura de 2,200 y 2,800 metros sobre el nivel del mar, en las coordenadas geográficas,  $4^{\circ} 52' 40''$ . 28 de latitud Sur y  $79^{\circ} 21' 9''$ , de longitud Occidental en el cerro Henry`s Hill, en cuya cumbre se ha establecido el campamento RB7, complementando el inicial denominado Henry`s Hill.



**Fig. 2**

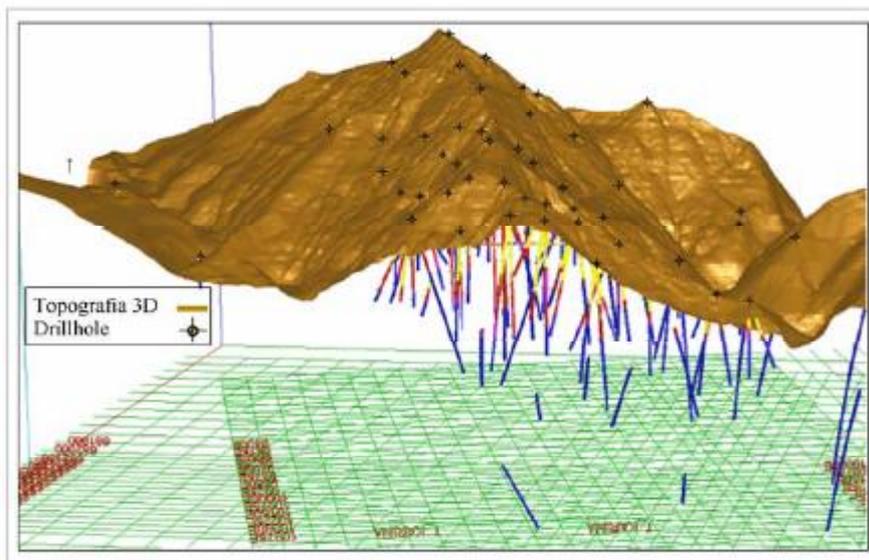
## Geología del Yacimiento

El modelo geológico conceptual del proyecto Rio Blanco es de un complejo intrusivo multifases con un pórfido cuarcífero central, el cual intruye tardíamente el complejo pórfido feldespático. Brechas ígneas en el área de los recursos pueden representar múltiples generaciones. La alteración es predominantemente fílica la cual es sobrepuesta por zonas potásicas. En los márgenes del sistema mineralizado las leyes de la zona de alteración potásica dentro de la propilítica tienen valores de cobre bajos. El complejo es tardíamente intruído por diques pórfíricos dacíticos.

Se ha desarrollado una capa de Supérgeo (SG) sobre el complejo intrusivo, y el control primario es la topografía. El control estructural debe aportar mayor información sobre la forma de este zoneamiento.

## INFORMACION BASICA Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los datos utilizados corresponden a los logeos de lo taladros del zoneamiento de la mineralización, definida esta por criterio mineralógico y solubilidad de cobre. Un estudio separado fue la incorporación de la información proveniente de los túneles, con el correspondiente efecto de soporte para leyes y litología.



**Fig. 3**

La metodología para asignar valores a la variable de interés es similar a la de indicadores, es decir 0 si el punto cae en una zona de desmonte, y 1, si el punto cae en una zona **supérgena** en color magenta (Fig. 3).

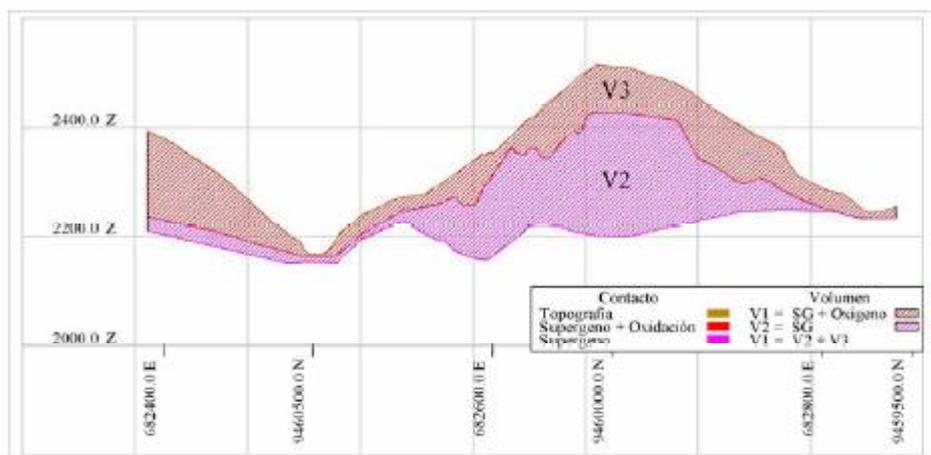
*Los grupos de datos usados fueron de taladros diamantinos y de las 2 galerías de exploración.*

Los taladros diamantinos fueron compositados a intervalos uniformes de 5m y 7.5m de longitud, y se hicieron pruebas para elegir el mejor intervalo. Para cada intervalo se determino la categoría de desmonte/mineral según el código de roca correspondiente a la zonación del yacimiento.

### El problema

El cuerpo de la zona supérgena tiene dos modelos relativamente distintos en su parte superior, proveniente de dos concepciones. Una de ellas incorpora un control estructural importante además del control topográfico.

Para lograr nuestro objetivo de dar un volumen probabilístico aceptable, se definió la base límite de oxidación y sobre esta línea la línea límite entre óxidos y zona supérgena, La figura 4 ilustra sobre que volúmenes trabajaremos:



**Fig.4**

Según el gráfico, definimos  $V1 = V2 + V3$  o la suma de los volúmenes de supérgeno y óxidos, sobre el límite teórico de oxidación. *Nosotros debemos encontrar si este V2 que toma en cuenta los dos controles es altamente probable en términos de probabilidades calculadas.*

## LA SIMULACIÓN CONDICIONAL SECUENCIAL

El programa ISATIS utilizado para este estudio produce una simulación de la variable categórica (una litología por ejemplo), cuyo proceso describimos a continuación. El programa toma en cuenta las fallas si existen al ingreso de datos en el radio de búsqueda secuencial.

El rango de variación de la data ingresada es dividido en un juego de intervalos. Cada intervalo corresponde a una fascies, con su proporción global asociada (o frecuencia).

Toda la data es primero migrada al nodo más cercano y serán los datos primarios. Los nodos de los bloques siguientes son “escaneados” usando un camino aleatorio. Un radio de búsqueda es establecido centrado en un bloque cualquiera, de la cual su extensión es un radio dado en número de bloques. Dentro del radio de búsqueda, el procedimiento busca la data en los nodos ya simulados, de los cuales el conteo máximo será especificado por el usuario. La búsqueda es completada decreciendo la distancia a través de la función covarianza, la que asegura que la data más cercana correlacionada con el objetivo será tomada primero.

Luego los datos son codificados en grupos de indicadores. Para cada intervalo el indicador es fijado en 1 si los datos pertenecen a este intervalo y 0 en caso contrario.

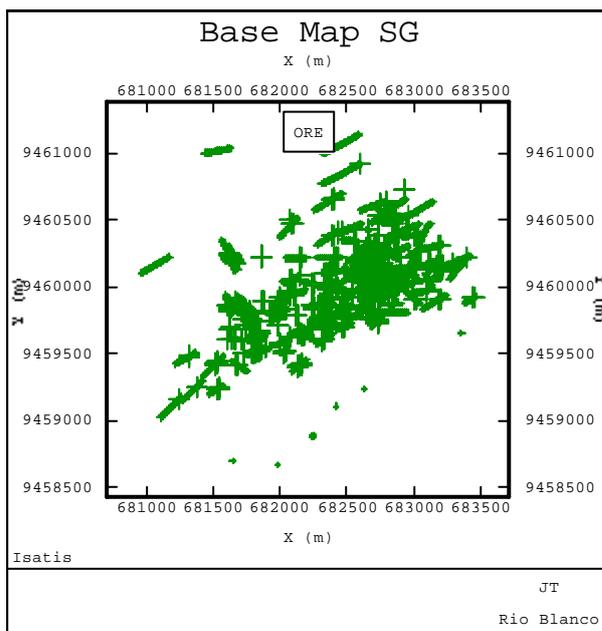
Una característica adicional ha sido adicionada en el programa el cual toma la proporción teórica en cuenta. El radio de búsqueda alrededor de un nodo específico puede terminar sin valores (ni primaria ni simulada). La simulación

luego se vuelve no condicional. El resultado es entonces asignado de las proporciones.

La estimación no necesariamente cae entre 0 y 1. Ellos son simplemente truncados a un valor positivo y normalizado posteriormente. En el nodo objetivo, el vector de esta estimación (para todos los intervalos) es considerado como una función de probabilidad acumulativa, condicionada a la información cercana. Luego asignamos números aleatorios uniformemente entre 0 y 1 y lo comparamos con la función de probabilidad acumulada. El valor simulado corresponde al rango del intervalo al cual el valor aleatorio pertenece.

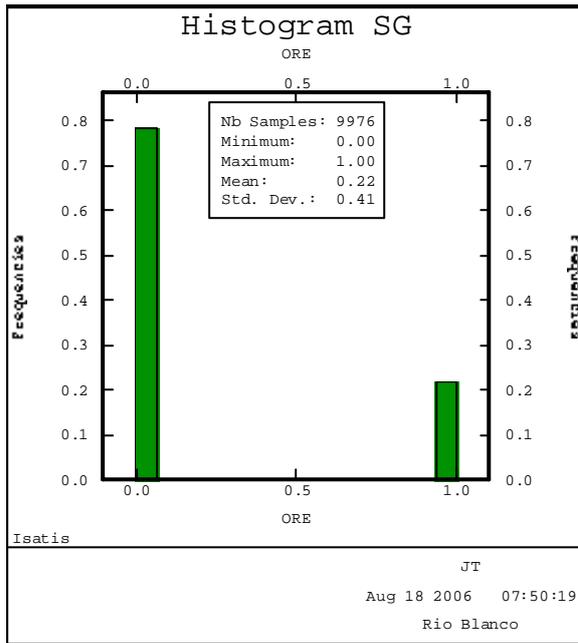
El siguiente paso consiste en hacer un cokrigeage tomando en cuenta la información previa, la que requiere un modelo multivariable consistente. Para simplicidad el modelo es construido empezando por un modelo genérico (usualmente basado en una fascies representativa), de acuerdo a su meseta para cada variable. De hecho como no consideraremos el cálculo de varianzas de estimación, esta concordancia no es necesaria.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS



**Fig. 5**

La figura 5 muestra la distribución de los datos codificados como supérgeno (SG), en una vista de planta. Los puntos laterales corresponden a logueos de taladros de geotecnia, también utilizados para el modelamiento.



**Fig. 6**

Los datos del zoneamiento debidamente compositados presentan el histograma de la figura 6 a la izquierda, con 9974 muestras válidas código "1", una varianza asociada de 0.41 moderada.

### Variografía

Una herramienta que nos ayuda mucho son los planos variográficos. Estos nos permiten determinar los ejes de las posibles anisotropías, evitándonos trabajar múltiples direcciones independientemente. El paso para el cálculo de la función variograma en 2D está en función al espaciamiento entre muestras, así sobre este plano dibujamos los ejes que automáticamente nos grafica el variograma experimental correspondiente a la dirección elegida (Fig. 7).

La función define el paso en número de sectores angulares, y se ubican los planos en un punto definido por el usuario.

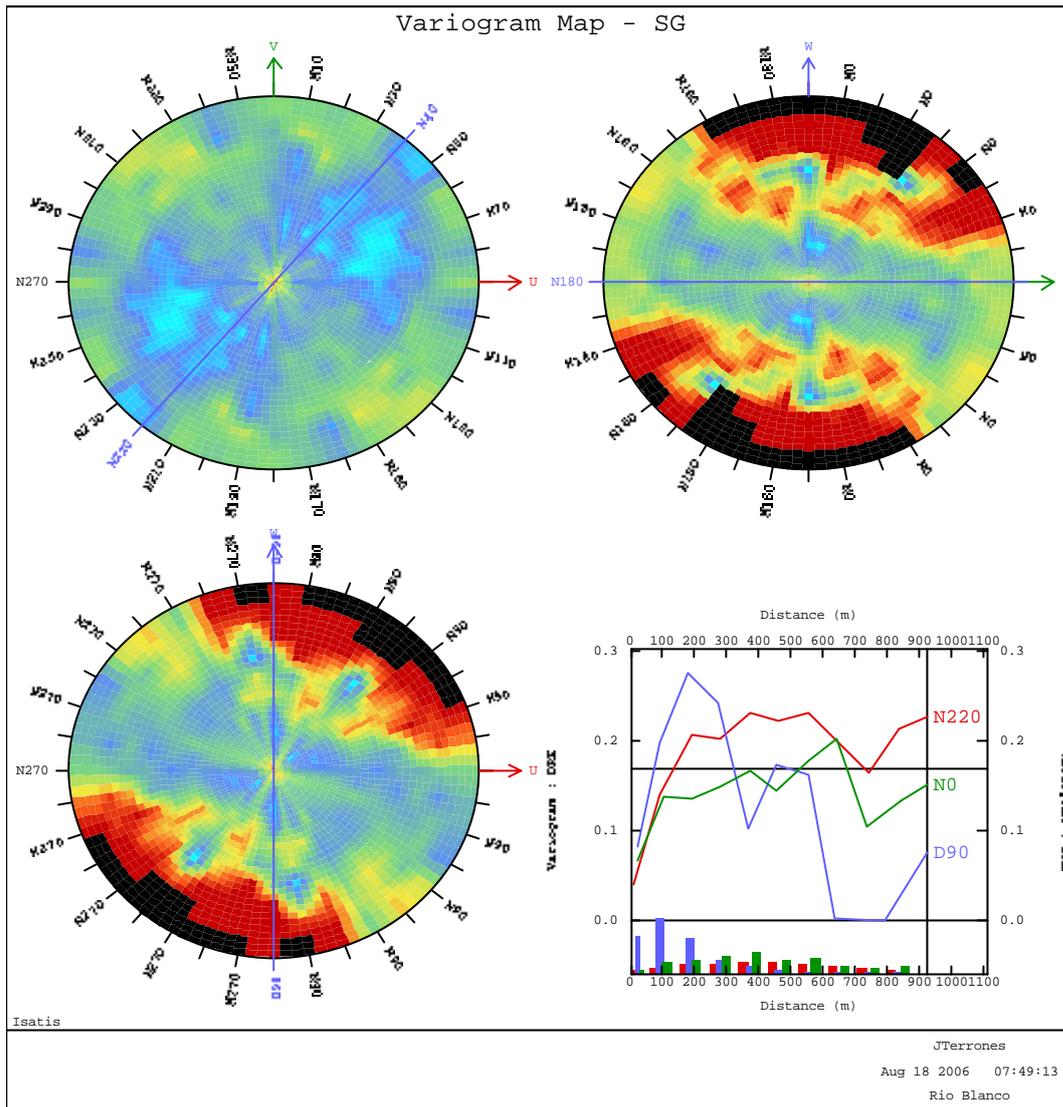
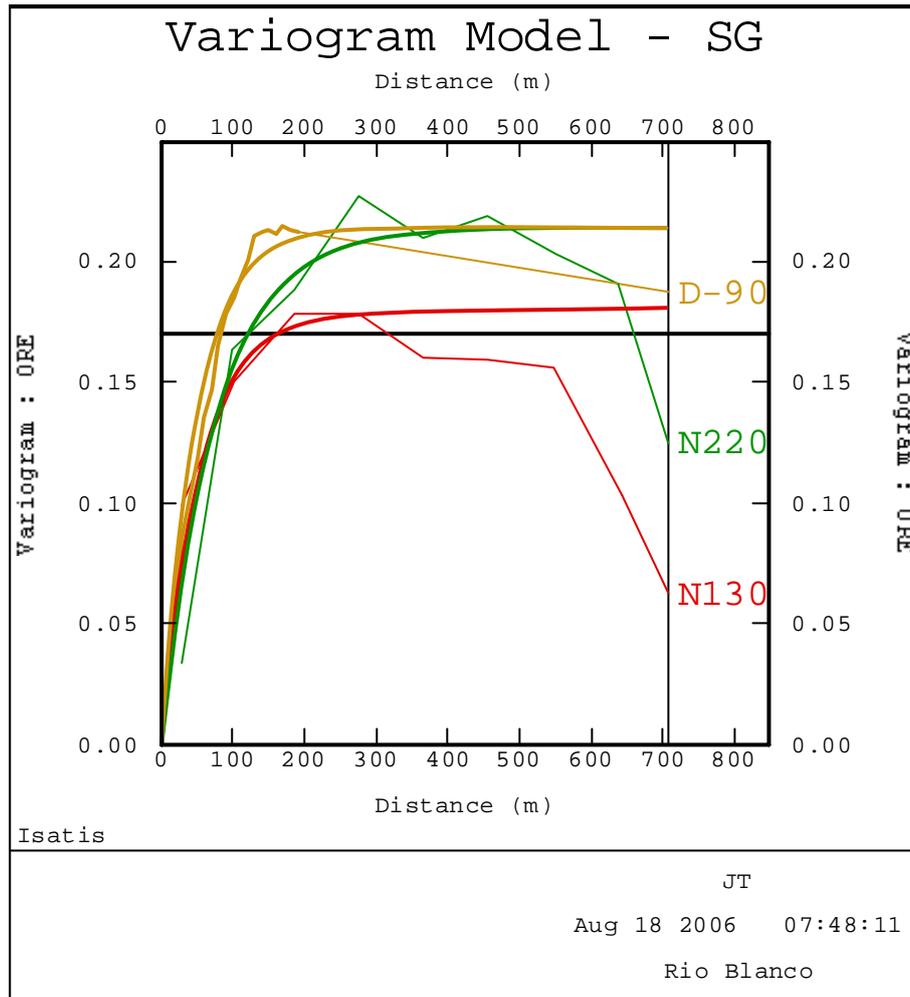


Fig. 7 Plano variográfico zona supérgena.

El variograma teórico modelado fue un exponencial cuyas características se aprecian en la figura 8 , la función correspondiente es como sigue:

$$\gamma(h) = 0.18 \exp(160, 210, 145) + 0.04 \exp(30000, 330, 150)$$



**Fig. 8**

### Modelo de Bloques

Se definió un modelo de bloques 20x20x7.5m en un paralelepípedo de lados paralelos a las direcciones E-W y N-S, de tal manera que este engloba toda la extensión del cuerpo. La extensión del modelo de bloques es de 2580, 2400 y 832.5 m en los ejes X, Y, y Z respectivamente.

### Desarrollo de la simulación condicional secuencial

Los parámetros usados en la Simulación Condicional secuencial de Indicadores, en formato ISATIS, se muestran en la figura 12. Se corrieron 10 simulaciones diferentes, cada una dando un resultado distinto, y para resumir

resultados entregamos una vista tridimensional con 3 planos de probabilidades. El procedimiento ha sido descrito anteriormente.

## RESULTADOS

Los resultados luego son exportados al software de la empresa y visualizados según las figuras 9 y 10, Los volúmenes evaluados son:

### Volúmenes determinísticos

V1 m3			288`518,893
V2 m3			<b>81`824,996</b>

### Probabilidades

Cut of probab.	Average prob.	M3
<b>p 0.4</b>	<b>0.59</b>	<b>111`230,995</b>
p 0.5	0.66	80`849,997
p 0.6	0.73	57`266,998
p 0.7	0.85	23`429,999

### Resultados basados en estadística simple

SG/OX en taladros = <b>98`096,423 m3</b>
--

Encontramos un volumen mayor de la zona supérgena a una probabilidad de 0.60, pero si queremos incrementar la certeza a una probabilidad de 0.70 por ejemplo reencontramos nuestro volumen que toma en cuenta los 2 controles antes mencionados. Elegimos el modelo o volumen que toma en cuenta fundamentalmente el control estructural.

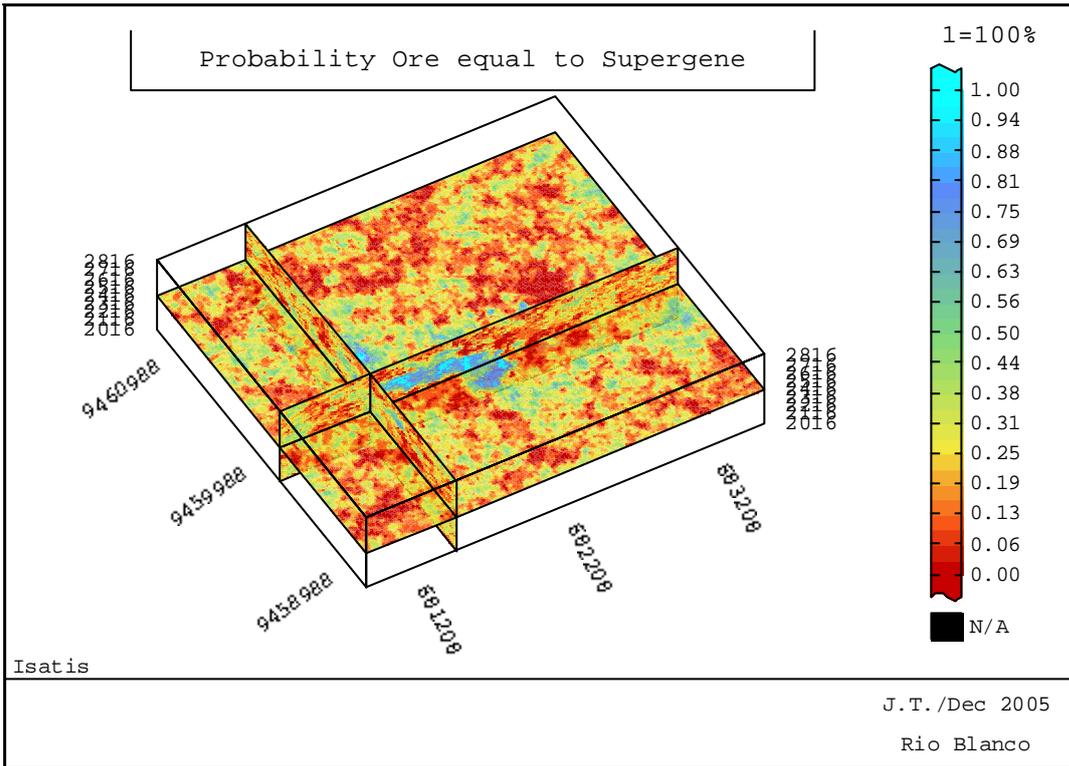


Fig. 9

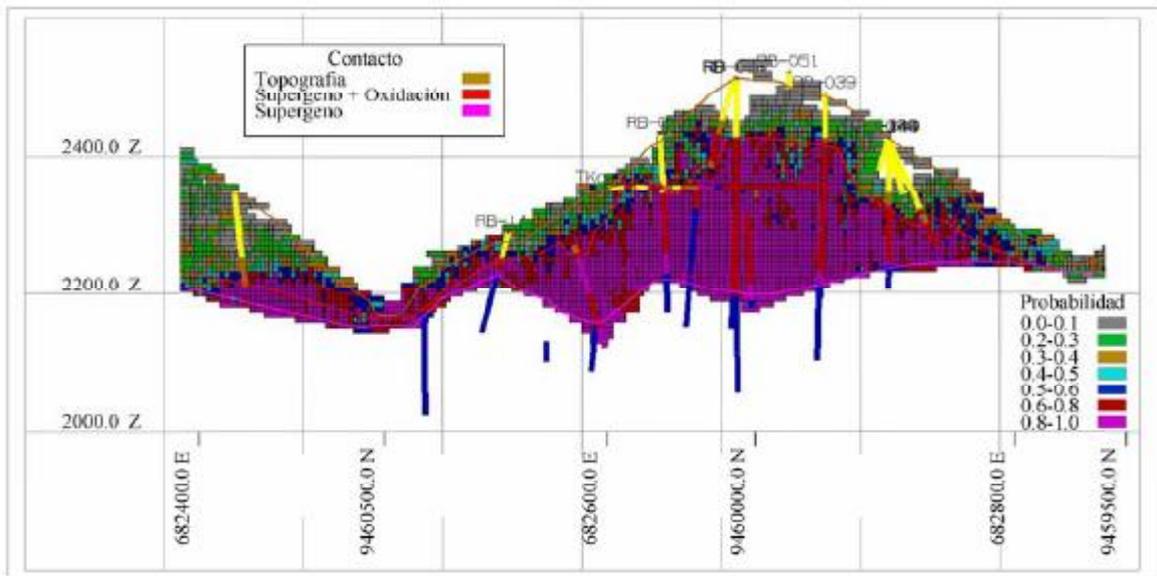


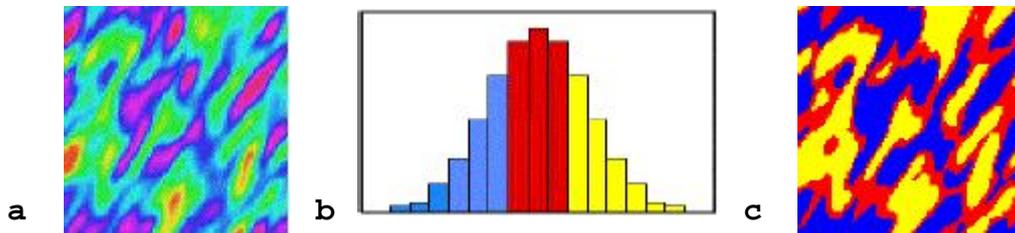
Fig. 10

## APLICACIONES FUTURAS

Se puede generar aparte de las múltiples realizaciones (10) del código de roca supérgeno, la combinación con otras unidades. Hemos generado dos códigos en nuestro estudio 0 y 1, centrándonos en la zona codificada con 1.

El método de simulación condicional por gaussiennes seuillées ha sido desarrollado con la finalidad de simular una variable categórica como por ejemplo las unidades litológicas de formaciones sedimentarias, principalmente del sector petrolero

La simulación se construye a partir de una variable gaussienne la cual se transforma por medio de un valor de umbral para obtener la simulación de la variable categórica donde las características de este umbral dependerán de las proporciones de cada litología (Fig. 11).



**Figure 11 – La transformación de los valores gaussiennes en variable categórica (litología) por medio de un umbral (M. Armstrong).**

La aplicación de la simulación por gaussiennes seuillées nos permitirá de estudiar las delimitaciones a partir de una visión estocástica de **varias unidades geológicas** de manera de medir el riesgo asociado a las delimitaciones de estas.

Analizar y dar una perspectiva estocástica a los límites entre las diferentes zonas de alteración supérgena (en este caso), las cuales tendrán un impacto

económico durante los primeros años de explotación de la mina (Cuantificar y determinar el tipo de material que será enviado a la planta de tratamiento).

El resultado de las simulaciones dependerá de la densidad de la información de tal forma que nos permita tomar decisiones a largo plazo para las posibles fases de explotación del yacimiento. Sin embargo en muchos proyectos no se tiene suficiente información, y ese es reto de desarrollo y aplicación de esta técnica.

## CONCLUSIONES

- Alta probabilidad no significa necesariamente alto volumen de un modelo particular.
- El tonelaje asociado a un volumen es muy importante ya que da el contenido metálico. Por mas complejas que sean las formas de los cuerpos mineralizados, siempre debemos utilizar herramientas que respeten ya sea un plegamiento, una chimenea o forma circular. Luego validarla por este procedimiento.
- Una característica de esta técnica es tener un buen conocimiento de la geología del depósito y de la metodología en si mismo, lo que puede ser una desventaja por su especialización.
- Amplio campo de aplicaciones.

## Agradecimientos

En especial a Minera Majaz subsidiaria de Monterrico Metals por permitir esta publicación, y al personal de Geoval Perú para la elaboración del artículo.

## Referencias

- ISATIS Guide Manual, 2005
- Sequential Simulation SG/HY J.Terrones 2005, internal report Minera Majaz S.A.
- J.Chilès & P. Delfiner: “Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty”, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, INC., 1999

Fig. 12: Modulo de la Simulación Condicional de Indicadores en ISATIS

