

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**MODELAMIENTO DE RECURSOS DE UN YACIMIENTO
TIPO EXÓTICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PEDRO NICOLÁS ELISSETCHE CORREA

**PROFESOR GUÍA:
XAVIER EMERY**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS
EDUARDO MAGRI VARELA**

**SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE DE 2010**

RESUMEN

En la minería actual, la mayor parte de los proyectos mineros contempla una etapa de exploración y evaluación de recursos. Se comienza con una toma de muestras, como lo es una campaña de sondajes para poder interpretar las litologías y alteraciones presentes, definir las zonas minerales más relevantes y describir la distribución de leyes de elementos de interés, de tal forma de llegar a un modelo de evaluación del yacimiento.

Para determinar el potencial económico de un yacimiento existen herramientas y técnicas geoestadísticas de evaluación y modelamiento de recursos tales como el kriging o la simulación condicional. La primera permite hacer una estimación insesgada y precisa de las leyes, obteniéndose un modelo suavizado que no representa la variabilidad. La segunda posibilita realizar un estudio de la incertidumbre de los valores involucrados en los atributos geológico-minero-metalúrgicos y tener análisis de riesgos a considerar para la toma de decisiones.

En esta memoria, se aplican simulaciones geoestadísticas para cuantificar los recursos minerales de un yacimiento perteneciente a Antofagasta Minerals SA (AMSA), ubicado en la Región de Antofagasta, Chile, el cual ha sido interpretado, recientemente en diez dominios minerales y evaluado por kriging a través de información de sondajes. Utilizando un algoritmo de simulación para variables categóricas, específicamente el algoritmo secuencial de indicador, se construye once modelos alternativos de dominios minerales. Luego se utiliza un algoritmo de simulación de variables continuas (secuencial gaussiano) para obtener once modelos de bloques para leyes de cobre total y cobre soluble, cada uno asociado con un modelo particular de dominios minerales. Se realiza la validación comparando las realizaciones con los datos originales, el modelo de kriging y el modelo geológico interpretado. Finalmente se construyen curvas tonelaje-ley para cuantificar los recursos para distintas leyes de corte.

Considerando una ley de corte de 0.2% en cobre soluble, se obtiene para los modelos de simulaciones que, en promedio, hay 53 millones de toneladas con ley media de cobre soluble de 0.86%, en contraste con los 50 millones de toneladas de ley media 0.73% entregadas por el método de kriging, lo que entrega una diferencia aproximada de 90.000 toneladas de cobre fino.

Así, existen zonas en el yacimiento donde la diferencia entre el modelo de kriging y los modelos simulados son relevantes. Debido a esto, es recomendable nuevas campañas de sondajes enfocadas en estas áreas para obtener información de mejor calidad que permita reducir la incertidumbre. También sería interesante considerar la mineralización de ganga como una de las variables a simular, para así tener modelos predictivos del comportamiento de cada bloque en los futuros procesos metalúrgicos.

ABSTRACT

Currently, most mining projects begin with an exploration stage and resource assessment. It starts with a drill hole sampling campaign in order to interpret the lithologies, to define the most important mineral areas and to describe the grade distribution of elements of interest.

Geostatistical tools and techniques are available for evaluating mineral resources, such as kriging or simulation. The former provides an unbiased estimate of mineral grades, obtaining a smoothed model that does not reproduce the true variability. The latter allows assessing the uncertainty in the values of the attributes involved in geological-mining-metallurgical modeling (such as grades and lithologies) and performing risk analysis for decision-making.

In this thesis, geostatistical simulation is applied to quantify the mineral resources in a deposit located in the second region of Chile and owned by AMSA (Antofagasta Minerals SA), which has already been interpreted into ten mineral domains and evaluated by kriging from the information of a drill hole data base. Using a simulation algorithm for categorical variables, specifically the sequential indicator algorithm, eleven alternative models of the mineral domains are constructed. Then, an algorithm for simulating continuous variables (sequential Gaussian algorithm) is used to obtain eleven block models for total copper and soluble copper grades, each one associated with a particular model of mineral domains. Validation is done by comparing each of the simulation outputs with the original data and with the interpreted model of mineral domains. The grade-tonnage curves are finally computed in order to quantify the resources at several cutoff grades in the economically most interesting mineral domains.

Considering a cutoff grade of 0.2% in soluble copper, an average of 53 million tons is obtained for the simulated models with a 0.86% average grade of soluble copper, whereas the 50 million tons with 0.73% average grade of soluble copper are delivered by the Kriging model.

There are areas of the deposit where the differences between kriging and simulation models are relevant, so that it is recommended a new drilling campaign in these areas in order to get additional information and to reduce uncertainty. In addition to the grade models, it would also be interesting to consider the waste mineralization like another variable to simulate, to make predictive models of the behavior of each block in the future metallurgical processes.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo entregado a través de toda la carrera y porque siempre estuvieron presentes cuando los necesité. Especialmente mis padres porque nunca me presionaron, y al contrario, me motivaron a través de los años y siempre me dieron la opción de elegir. Incluyo también a mis cuñados, en especial a Pablo por ayudarme con el inglés. También a la Rosita por la paciencia estos años.

A mis amigos y compañeros de la universidad porque hicieron que este camino fuera más fácil y feliz, en esta importante etapa de mi vida.

A Coni, porque desde el principio fue parte importante de este trabajo y siempre me apoyó y me ayudó con su experiencia.

A mis amigos del colegio por los grandes momentos que hemos pasado estos años y porque siempre me tuvieron paciencia cuando le di prioridad a la universidad en vez de a ellos.

A los profesores de mi comisión, especialmente al profesor Xavier Emery por su excelente disposición, sus consejos y su paciencia para enseñar, su ayuda en las traducciones, etc. También agradecer las correcciones a esta memoria junto a los profesores Brian Townley y Eduardo Magri.

Gracias también a los profesores del departamento de Ingeniería de Minas por estos años de aprendizaje y disposición.

A Juanita Vergara por su simpatía y ayuda en los trámites en estos años en el departamento de Ingeniería de Minas.

Finalmente a Antofagasta Minerals por darme las facilidades para la realización de esta memoria y porque siempre pusieron a mi disposición la información necesaria. Especialmente a Esteban Acuña que me acompañó a lo largo de todo el proyecto.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Motivación.....	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Alcances.....	3
2 ANTECEDENTES	4
2.1 Modelamiento de Recursos Geológicos.....	4
2.1.1 Tipos de Yacimientos.....	6
2.1.2 Unidades geológicas.....	6
2.2 Conceptos básicos de geoestadística.....	8
2.2.1 Función Aleatoria	8
2.2.2 Momentos	9
2.3 Métodos de Estimación Local	10
2.4 Métodos de Simulación.....	11
2.4.1 Modelos de funciones aleatorias	13
2.4.2 Modelo Multigaussiano (leyes minerales)	13
2.4.3 Modelos de Variables Categóricas (unidades geológicas)	14
2.4.4 Criterios de Validación	15
3 METODOLOGÍA.....	17
4 CASO DE ESTUDIO	22
4.1 Presentación del yacimiento	22
4.2 Presentación de los datos	23
4.3 Estudio exploratorio.....	25
4.4. Modelamiento de Unidades Geológicas.	32
4.4.1 Análisis Variográfico	34
4.4.2 Probabilidades locales de ocurrencia de unidades geológicas.	37
4.4.3 Simulación Secuencial de Indicadores	39
4.5. Modelamiento de leyes.....	44

4.5.1 Análisis Variográfico	44
4.6. Procesamiento de resultados.....	59
4.7 Comparación con Modelo de Kriging.....	62
5 CONCLUSIÓN	67
6 REFERENCIAS.....	68
7 ANEXOS	69
Anexos 1: Probabilidad de Ocurrencia de unidad geológica.....	69
Código MATLAB.....	72
Anexos 2: Simulación de Leyes.....	73
Anexos 2.1: Código MATLAB: Asignación de Modelos de simulación de Leyes a Modelo de Unidades Geológicas:	73
Anexos 2.2: Código MATLAB Transformación de base de datos con unidad geológica, cobre total y cobre soluble y exportación de datos:	74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Ilustración de Dominios geológicos.....	6
Figura 2: Ilustración de Alteraciones.....	7
Figura 3: Ilustración de Mineralogías.....	7
Figura 4: comparación de perfiles, leyes reales, leyes estimadas por kriging y leyes simuladas.	11
Figura 5: Metodología. Diagrama de Flujos.	21
Figura 6: Ubicación de zona de estudio.	22
Figura 7: Ilustración del yacimiento. Zonas de Óxidos Crisocola, Óxidos Negros, Lixiviados, Óxidos Verdes e Hipógeno.	25
Figura 8: Mapas de muestras de exploración. Vistas Isométrica, Planta, Perfiles Este-Cota y Perfil Norte-Cota..	26
Figura 9: Histogramas de leyes de cobre total y cobre soluble (sondajes no desagrupados).	28
Figura 10: Histogramas desagrupados de leyes de cobre total y cobre soluble.	28
Figura 11: Curvas Tonelaje Ley para los sondajes desagrupados, para cobre soluble y total.	29
Figura 12: Gráfico de dispersión: cobre soluble vs cobre total. La recta en rojo representa la regresión lineal.	30
Figura 13: Gráfico de dispersión: cobre insoluble vs cobre soluble.....	31
Figura 14: Modelo Geológico determinístico, Vista Planta (construido por AMSA).....	32
Figura 15: Modelo Geológico determinístico, Vista Perfil Este-Cota (construido por AMSA).	32
Figura 16: Modelo Geológico determinístico, Vista Perfil Norte-Cota (construido por AMSA).....	33
Figura 17: Variogramas experimentales y modelados para estéril y minerales lixiviados.	35
Figura 18: Variogramas experimentales y modelados para mineral hipógeno y parcial lixiviado.....	36
Figura 19: Variogramas experimentales y modelados para minerales supérgenos y mixtos.....	36
Figura 20: Variogramas experimentales y modelados para óxidos verdes y óxidos crisocola.	36
Figura 21: Variogramas experimentales y modelados para óxidos negros y lixiviados con cobre.	37
Figura 22: Imagen probabilidad de ocurrencia de estéril.	38
Figura 23: Imagen probabilidad de ocurrencia de minerales lixiviados.....	38
Figura 24: Modelo de Bloques determinístico. Vista Planta (Este-Norte)	39
Figura 25: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°1. Vista Planta (Este-Norte)	40
Figura 26: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°2. Vista Planta (Este-Norte)	40
Figura 27: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°3. Vista Planta (Este-Norte)	41
Figura 28: Modelo de Bloques determinístico. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota).....	41
Figura 29: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°1. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)	42
Figura 30 : Modelo de Bloques probabilístico, realización n°2. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)....	42
Figura 31: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°3. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)....	43
Figura 32: Variogramas experimentales y modelados para óxidos verdes (Cobre insoluble y cobre soluble).....	45
Figura 33: Variogramas experimentales y modelados para óxidos crisocola (Cobre insoluble y cobre soluble).....	46
Figura 34: Modelos de leyes puntuales para unidad geológica Lixiviados. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble	46

Figura 35: Modelos de leyes puntuales para unidad geológica Óxidos Verdes. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble	47
Figura 36: Modelos de leyes puntuales para unidad geológica Óxidos Crisocola. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble	47
Figura 37: Modelos de leyes rebloqueadas para unidad geológica Lixiviados. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble.	48
Figura 38: Modelos de leyes rebloqueadas para unidad geológica Óxidos Verdes. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble.	48
Figura 39: Modelos de leyes rebloqueadas para unidad geológica Óxidos Crisocola. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble	48
Figura 40: Modelos de bloques simulados (Sim1). Vistas en Planta, cobre soluble y total.	49
Figura 41: Modelos de bloques simulados (Sim2). Vistas en Planta, cobre soluble y total.	49
Figura 42: Modelos de bloques simulados (Sim3). Vistas en Planta, cobre soluble y total.	50
Figura 43: Promedio Simulaciones. Vistas en Planta, cobre soluble y total.	50
Figura 44: Vistas Kriging. Vistas en Planta, cobre soluble y total.	50
Figura 45: Modelos de bloques simulados (Sim1). Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.	51
Figura 46: Modelos de bloques simulados (Sim2). Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.	51
Figura 47: Modelos de bloques simulados (Sim3). Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.	51
Figura 48: Promedio Simulaciones. Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.	52
Figura 49: Vistas Kriging. Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.	52
Figura 50: Modelos de bloques simulados (Sim1). Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.	52
Figura 51: Modelos de bloques simulados (Sim2). Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.	53
Figura 52: Modelos de bloques simulados (Sim3). Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.	53
Figura 53: Promedio Simulaciones. Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.	53
Figura 54: Vistas Kriging. Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.	54
Figura 55: Histogramas Sondajes desagrupados. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.	56
Figura 56: Histogramas simulación 1. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.	56
Figura 57: Histogramas simulación 2. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.	57
Figura 58: Histogramas simulación 3. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.	57
Figura 59: Histogramas Sondajes desagrupados. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.	57
Figura 60: Histogramas simulación 1. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.	58
Figura 61: Histogramas simulación 2. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.	58
Figura 62: Histogramas simulación 3. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.	58
Figura 63: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para todo el yacimiento.	59
Figura 64: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Verdes.	60
Figura 65: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Crisocola.	61
Figura 66: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Verdes.	63
Figura 67: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Crisocola.	64
Figura 68: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para el total del yacimiento simplificado.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Inventario de Sondajes	23
Tabla 2: Estadísticas básicas de los datos no desagrupados, separados por unidad geológica.	27
Tabla 3: Estadísticas básicas de los datos desagrupados, separados por unidad geológica.....	27
Tabla 4: Cantidad de Bloques y porcentajes para cada unidad geológica.	34
Tabla 5: Parámetros de cálculo de variogramas experimentales	35
Tabla 6: Validación simulaciones. Proporciones de unidades geológicas en las simulaciones.....	44
Tabla 7: Parámetros de cálculo de variogramas experimentales.	45
Tabla 8: Validación de Simulaciones respecto a Sondajes desagrupados. Caso cobre soluble.	54
Tabla 9: Validación de Simulaciones respecto a Sondajes desagrupados. Caso cobre total.	55
Tabla 10: Validación de Simulaciones respecto al modelo de Kriging. Casos cobre soluble y total.	55
Tabla 11: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Total del yacimiento, caso CuS.....	60
Tabla 12: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Óxidos Verdes, caso CuS.	61
Tabla 13: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Óxidos Crisocola, caso CuS.	62
Tabla 13: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Óxidos Crisocola, caso CuS.	62
Tabla 14: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de fino modelos simulados (simplificados) y modelo kriging. Óxidos Verdes, caso CuS.....	63
Tabla 15: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal modelos simulados (simplificados) y modelo kriging . Óxidos Crisocola, caso CuS.	64
Tabla 16: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal modelos simulados y modelo kriging. Total Yacimiento, caso cobre soluble.....	66

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La gran demanda global de metales estos últimos años ha provocado un fuerte aumento en los precios de estos, permitiendo la apertura y existencia de múltiples proyectos en todo el mundo y en particular en países mineros como Chile. Estos desafíos requieren de mayor precisión cada día, que se garantice a los inversionistas la recuperación de su capital al menor plazo. Para lograrlo se necesita comenzar con modelos mineros, en particular del yacimiento estudiado, que cuantifiquen cada uno de sus atributos de la mejor manera posible, tanto para leyes de elementos de interés, litologías presentes, características geometalúrgicas, entre otros.

Comúnmente después de la etapa de exploración se realiza una evaluación de recursos, a partir de la toma de muestras, como por ejemplo, una campaña de sondajes. Una vez obtenida, se cuantifica los atributos presentes considerando además su ubicación espacial. Posterior a esto, es común que se utilicen técnicas geoestadísticas de estimación o modelamiento de recursos, tales como el kriging, el cual consiste en una interpolación de datos que suele dar una imagen suavizada de la realidad del yacimiento, o simulaciones, las que basadas en la teoría de funciones aleatorias buscan crear escenarios verosímiles que reproducen la variabilidad espacial de los atributos de interés del yacimiento. Se impone que los valores conocidos en los sitios de muestreo sean reproducidos en estos modelos, es así como se habla de “simulación condicional”.

Dada su simpleza es lógico que la herramienta kriging sea más utilizada en la industria hoy en día. Sin embargo las simulaciones condicionales han ganado espacio gracias a los avances tecnológicos que permiten tener resultados en menor tiempo, además de que por sus características otorgan otro tipo de información que el kriging, como lo son los estudios de la variabilidad de los atributos, los análisis de riesgos o de incertidumbre, entre otros aspectos.

Un factor importante de estudiar y sobretodo en yacimientos de minerales exóticos, es la influencia de las distintas mineralogías en los valores de leyes, los límites entre estas unidades y la incertidumbre que se tiene en los tonelajes, pues es donde se encuentra actualmente el mayor error entre las estimaciones y los resultados obtenidos en la explotación misma.

De este modo es de bastante utilidad simular las unidades geológicas, además de las leyes presentes de un yacimiento. Para ello, se puede utilizar la simulación secuencial de indicadores, en la cual se codifica en variable binaria cada una de las unidades geológicas. Asimismo, para la simulación de variables continuas, en particular las leyes minerales, se suele emplear el modelo multigaussiano, el cual corresponde a un modelo de función aleatoria caracterizado por una distribución espacial multigaussiana. A partir de estos, se pretende caracterizar la variabilidad espacial de leyes, así como cuantificar la cantidad y calidad de recursos considerando además la incertidumbre presente en las unidades geológicas.

Este trabajo pretende reproducir algunos atributos geológicos de un yacimiento tipo exótico ubicado en las cercanías de Sierra Gorda en la Región de Antofagasta, el cual es parte de un proyecto que se encuentra en su fase de ingeniería de perfil y ha sido estudiado sólo con métodos convencionales.

1.2 Motivación

Es necesario un respaldo, mediante simulaciones, de los modelos creados en base a métodos de estimación por kriging.

Los métodos de estimación en la actualidad no proporcionan la información necesaria para describir adecuadamente el comportamiento de los atributos de interés, tales como leyes, en los yacimientos mineros, debido a que entregan valores “suavizados” que no reproducen la variabilidad espacial de los valores reales.

Además, siendo el yacimiento en cuestión de tipo exótico, tiene que estudiarse en detalle los límites de unidades geológicas, dada su relevancia en cuanto a las características geo-metalúrgicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo consiste en modelar la incertidumbre en los recursos de un yacimiento tipo exótico.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos se encuentran:

- Modelar incertidumbre en las unidades geológicas.
- Modelar incertidumbre en leyes de cobre total y cobre soluble.
- Validar los modelos de incertidumbre.
- Determinar curvas tonelaje-ley.
- Comparar modelos convencionales (kriging y modelo geológico) vs simulaciones.

1.4 Alcances

Se dispone de una base de datos perteneciente a una campaña de sondajes de un yacimiento ubicado en la Región de Antofagasta, Chile. Este yacimiento es de tipo pórfido cuprífero rodeado de mineralización exótica, y se ha estimado utilizando el método kriging de indicadores para sus unidades geológicas y kriging ordinario para sus leyes de cobre total y cobre soluble, teniéndose así también un modelo de bloques.

El estudio considera la evaluación de los recursos de cobre total y cobre soluble utilizando simulación condicional, en este caso con el modelo multigaussiano. Se tomará el algoritmo secuencial dado su rapidez. Además se considerarán especialmente las variables geológicas que es donde se encuentra la mayor incertidumbre, por lo que se deberá definir los límites entre nueve unidades geológicas.

Se realiza una simplificación de la zona del yacimiento a modelar, tomándose las zonas con mayor variabilidad como prioritarias y dejándose de lado zonas profundas de mineralización primaria. Esto dado el tiempo de cálculo y la imposibilidad técnica del manejo de datos.

Aunque se tienen análisis de compuestos consumidores de ácido como lo son: CO₃, aluminio soluble, cloro soluble, entre otros, los ensayos de consumo de ácido ya no se hacen debido a que no se han obtenido buenos resultados.

2 ANTECEDENTES

2.1 Modelamiento de Recursos Geológicos

Actualmente los yacimientos que afloran a la superficie son muy escasos, resultando la interpretación geológica mucho más compleja dada la dificultad de obtener información.

Las tomas de muestras se realizan utilizando sondajes, estos consisten en perforaciones de pequeño diámetro y gran longitud (hasta 1.200 m), que se efectúan para alcanzar zonas inaccesibles desde la superficie. Las técnicas más utilizadas en la actualidad son la perforación con recuperación de testigos (diamantina) y la recuperación del detrito (aire reverso). Para la primera, se utiliza una tubería engastada en diamantes en la punta o corona, obteniéndose un cilindro de roca de un diámetro entre dos y cinco pulgadas. Asimismo la segunda se realiza con una herramienta (tricono) que va triturando la roca, la que permite obtener trozos de hasta 1 cm.

Las muestras obtenidas a partir de los sondajes generalmente se extraen a distinto soporte, es decir, se obtienen los datos medidos para muestras de distintos tamaños, por lo que es necesaria una etapa de composición, en la que se fija un tamaño determinado, para no mezclar “compósitos” de distintos soportes que no sean concordantes entre sí. En general las características medidas son:

- Litologías
- Alteraciones
- Leyes de minerales de interés
- Porcentajes de impurezas
- Recuperaciones metalúrgicas
- Densidades.

A partir de estas características, es posible crear modelos analizando las plantas y secciones de los yacimientos, agrupando tendencias de datos, en donde se generan interpretaciones espacialmente consistentes, acorde a la conceptualización geológica-genética del yacimiento, entre otras características. De este modo, se pueden crear triangulaciones o sólidos tridimensionales que respeten las interpretaciones en secciones, plantas e interceptos de sondajes. Esto es recomendable para caracterizar volúmenes en cuerpos de geometría compleja. Asimismo es posible crear modelos geológicos en que por ejemplo, se agrupen zonas por concentraciones de leyes económicas o por litologías y alteraciones que constituyan unidades geológicas, como se ve en este caso en estudio.

Entre las dificultades que se pueden encontrar están:

- Tipo de límites presentes: duros, blandos, transicionales
- Incertidumbre en la extensión de las unidades
- Incoherencias entre datos y modelo geológico interpretado
- Discretización en bloques (ej.: para vetas angostas)

El estudio variográfico es una herramienta básica utilizada por los geólogos y geoestadísticos que permite tener una integración entre la geología y estadística. Entre sus principales finalidades está la de confirmar la distribución de leyes interpretada a través de la geología.

Otro de los temas relevantes es la optimización de la malla de muestreo, tópico que ha sido estudiado mucho tiempo por geólogos y geoestadísticos. Se debe tener en consideración si es que la información disponible es de exploración, es decir, sin datos muestreados previos disponibles, caso en el que se debe partir con una grilla muy grande e ir rellenando ésta a partir de la información geológica y de variogramas. Además también se debe distinguir entre la exploración en las cercanías de una mina o lugar explorado previamente. Así se puede considerar distintos tamaños de grillas para ver la que se ajusta mejor para la exploración. También es posible aplicar simulaciones condicionales para ver cuál es la precisión de las mediciones de las características de interés como tonelaje recuperable, contenido metálico, leyes medias, entre otros parámetros.

La elección de los dominios o unidades geológicas es otro de los temas relevantes a considerar. Estos dominios corresponden a zonas estadística y geológicamente homogéneas. Se distingue entre dos tipos de dominios:

- Dominios definidos por geología: Con bordes duros, basados en el criterio geológico como litología, mineralogía, entre otros. Estos dominios no necesariamente están correlacionados con las leyes. A través del estudio variográfico se puede reagrupar los dominios que muestran comportamientos similares y transiciones graduales en las leyes.
- Dominios definidos por Leyes: Utilizados para diferenciar entre lo que es mineral y lastre.

2.1.1 Tipos de Yacimientos

Existen distintos tipos de yacimientos definidos comúnmente por sus procesos geológicos, entre los cuales destacaremos, dada la importancia en este estudio, los pórfidos cupríferos y los yacimientos de minerales supérgenos.

- **Pórfido Cuprífero:** Depósito de baja ley de cobre que siempre está asociado a stocks, pero puede estar en esquistos, calizas silicificadas y rocas volcánicas. Los minerales cupríferos típicamente están en granos diseminados y/o en vetillas en un gran volumen de roca, superior en algunos casos a las 1000 millones de toneladas con leyes de cobre entre 0.5 y 1%, además de otros metales.
- **Yacimientos Exóticos:** Depósitos originados por migración lateral asociada a pórfidos cupríferos. Generalmente producto del proceso de enriquecimiento secundario que ha afectado a los sistemas porfíricos exhumados en ambientes áridos a semiáridos. La mineralización de óxidos de cobre generalmente ocurre cementando gravas aluviales y en menor grado recubriendo los planos de fracturas de las rocas basales donde descansan estas gravas.

2.1.2 Unidades geológicas

Los volúmenes en donde las variables a estudiar tienen un comportamiento que tiende a la homogeneidad se definen como Unidades Geológicas (UG). Estos dominios abarcan múltiples características a considerar, tales como litologías, alteraciones, mineralizaciones, estructuras, características metalúrgicas, entre otras variables.

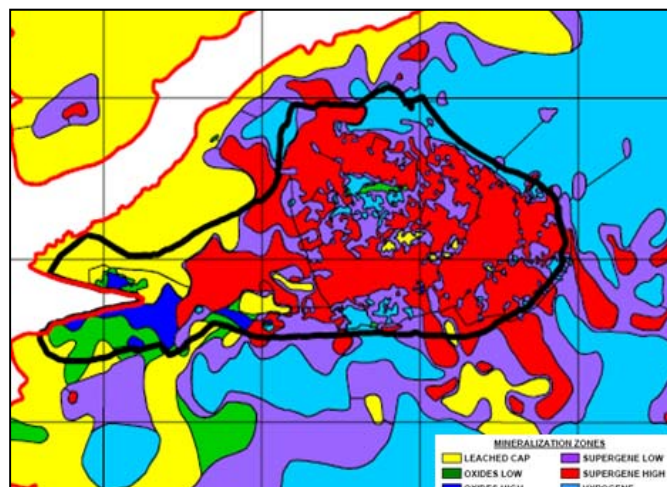


Figura 1: Ilustración de Dominios geológicos.

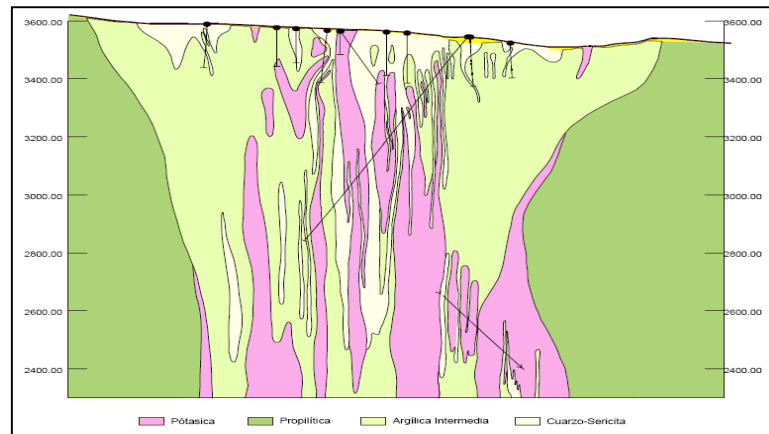


Figura 2: Ilustración de Alteraciones.

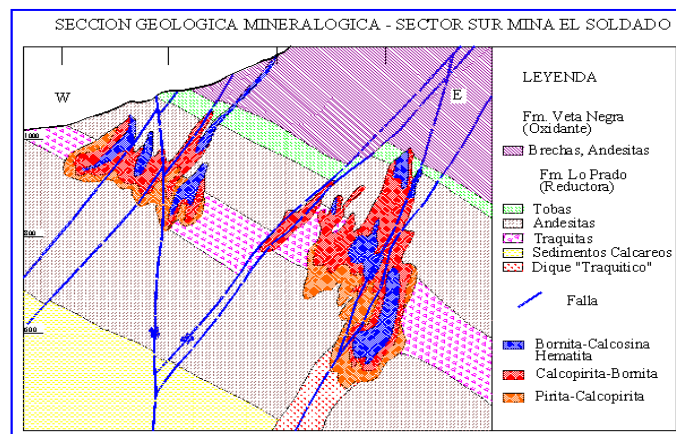


Figura 3: Ilustración de Mineralogías.

Para determinar las zonas minerales debe existir una interpretación geológica, en donde haya una conceptualización genética y fenomenológica del yacimiento en estudio, además de considerar el orden de eventos de mineralización.

Los dominios geológicos de estimación se deben agrupar de acuerdo a características geológicas relevantes (dependiendo el uso que se le dará al modelo), además se debe tomar en cuenta el número de datos razonable para inferir los parámetros estadísticos de la población y los perfiles de contacto entre unidades, es decir, el comportamiento de las variables consideradas al cruzar una frontera geológica.

Uno de los problemas más comunes a los que se ven enfrentados los geólogos e ingenieros es a la diferencia entre los valores estimados y reales en los contactos entre dominios, esto debido a que las fronteras modeladas comúnmente son más suaves que las reales. Para reducir esta incertidumbre se debe verificar la consistencia entre la información estimada/modelada y los datos disponibles. Además

se pueden realizar más sondeos focalizados para tener más y mejor información. Otra alternativa es considerar distintos escenarios, ya sea definidos por el geólogo o por simulaciones estocásticas.

2.2 Conceptos básicos de geoestadística

La Geoestadística se desarrolló originalmente para determinar la relación recurso/reserva de un yacimiento mineral. Se define como “la aplicación de la teoría de variables regionalizadas”, que consiste en un enfoque estadístico a la estimación que presenta algún grado de dependencia espacial entre las variables, en particular leyes, de los depósitos minerales.

Dependencia espacial se refiere a que las variables (leyes) medidas para dos muestras cercanas son probablemente similares. En zonas de altas leyes, debiesen ser ambos de alta ley y en zonas de bajas leyes, análogamente ambos debiesen ser de baja ley.

Las variables regionalizadas consisten en una función numérica que represente un atributo en cada ubicación en el espacio. Es difícil determinarlas completamente y con exactitud dada su variabilidad. Comúnmente se denota como $z(x)$ a un valor de la variable regionalizada, dado x como la posición en el espacio. Las leyes de minerales son un ejemplo de variable regionalizada.

2.2.1 Función Aleatoria

Una función aleatoria es una descripción probabilística de la distribución espacial de una variable regionalizada. Es un medio útil en la geoestadística ya que incorpora el concepto de componentes aleatorios y estructurados a la variabilidad espacial de la variable, como por ejemplo la ley.

Se interpreta cada valor de la variable regionalizada $z(x)$ como una realización de una variable aleatoria $Z(x)$. El conjunto de variables aleatorias $\{Z(x), x \in R^3\}$ constituye una función aleatoria la que se caracteriza por una distribución espacial. Dado un grupo de puntos (x_1, \dots, x_n) :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*$$

$$\forall z_1, \dots, z_n \in \mathbb{R}, \forall x_1, \dots, x_n \in D \subset \mathbb{R}^3$$

$$F(z_1, \dots, z_n; x_1, \dots, x_n) = \text{Prob}(Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_n) < z_n)$$

Existen algunas hipótesis simplificadoras que son utilizadas para determinar la distribución espacial. Estas son:

- Hipótesis de estacionaridad: La distribución espacial es invariante por traslación en el espacio, lo que quiere decir que se asume cierta homogeneidad en las propiedades de la variable regionalizada dentro del dominio.
- Hipótesis de Ergodicidad: Es posible hacer una aproximación de las esperanzas matemáticas (medias sobre las realizaciones) por un promedio en el espacio.

2.2.2 Momentos

Los momentos son parámetros sintéticos que resumen la distribución espacial de una función aleatoria. Los momentos más relevantes son:

Esperanza: En general, la Esperanza de una función aleatoria Z depende del punto x considerado. Se denomina usualmente como $m(x)$ ya que representa la media alrededor de la que se distribuyen los valores de las distintas realizaciones.

- $E [Z(\mathbf{x})] = m(\mathbf{x})$

Varianza: La varianza es una medida de dispersión de la variable aleatoria $Z(x)$ en torno al valor esperado. Asimismo se utiliza la desviación estándar que corresponde a la raíz cuadrada de la varianza.

- $\text{var}[Z(\mathbf{x})] = E \{ [Z(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x})]^2 \}$

Covarianza: La covarianza es una medida de dispersión conjunta de dos variables aleatorias.

- $\text{cov}[Z(\mathbf{x}_1), Z(\mathbf{x}_2)] = E [Z(\mathbf{x}_1) \times Z(\mathbf{x}_2)] - m(\mathbf{x}_1) \times m(\mathbf{x}_2)$

Variograma: El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado la dispersión entre dos datos a diferentes distancias.

- $\gamma (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \text{var}[Z(\mathbf{x}_1) - Z(\mathbf{x}_2)]/2$

El variograma es la principal medida de similitud utilizada con fines geoestadísticos, entre otras cosas permite detectar direcciones de anisotropía, variabilidad con la distancia, correlación espacial, entre otros aspectos. Bajo la hipótesis de estacionaridad, la esperanza y la varianza son constantes (no

dependen del punto x), mientras que la covarianza y el variograma sólo dependen de $h=x_1-x_2$ (vector separando dos puntos).

2.3 Métodos de Estimación Local

Existen distintos métodos que buscan predecir el valor de la variable regionalizada utilizando para ello los datos circundantes. Asimismo es posible predecir el valor promedio de la variable en un soporte mayor que el soporte de los datos (por ejemplo, los bloques de selección minera).

Entre las metodologías más comunes de estimación, se encuentran: estimador del vecino más cercano, inverso de la distancia y kriging. Este último resulta más preciso que los otros, dado que minimiza el error de estimación.

El término Kriging se aplica a un rango de métodos de estimación (puntual o de bloques) que dependen de la minimización de los errores de estimación, definidos comúnmente por el procedimiento de mínimos cuadrados. Se conoce como el mejor estimador lineal insesgado, o por su sigla BLUE (**B**est **L**inear **U**nbiased **E**stimator). Esto está dado por las siguientes restricciones,

- Linealidad: Estimador es una combinación lineal de los datos ubicados en una vecindad.
- Insesgo: El valor esperado del error debe ser cero.
- Mejor Estimador: El objetivo es minimizar la varianza del error cometido en la estimación.

A diferencia de los estimadores tradicionales, considera no sólo la configuración geométrica de datos, sino también su continuidad espacial (variograma). También cuantifica la precisión de la estimación a partir de la varianza de kriging.

Entre los distintos métodos que se incluyen en el término general Kriging, destacan el kriging simple (media conocida), kriging ordinario (media desconocida) y el kriging de indicador (para variables categóricas). Las principales propiedades del kriging son:

- Interpolación Exacta: La estimación de un sitio con dato obtiene el medido en ese sitio.
- Redundancia: El kriging tiene en cuenta la redundancia de los datos. Muchos datos agrupados tienen casi el mismo peso que un dato en el centro de este agrupamiento.
- Suavizamiento: La dispersión de los valores estimados es menor que la dispersión de los valores verdaderos. Esto está dado porque los promedios obtenidos para cada estimación tienden a sub estimar valores altos y a sobre estimar valores bajos (por regresión).

- Insesgo: El kriging es insesgado a nivel global, sin embargo puede contener sesgo condicional, el cual se ve reducido tomando muchos datos en la vecindad de kriging, sin embargo aumenta la suavización.

La Varianza de Kriging sólo depende de la configuración geométrica de los datos y su continuidad espacial. No considera los valores de los datos, por lo que no se refleja el llamado efecto proporcional, es decir, no se refleja la mayor dispersión que ocurre generalmente en zonas de altas leyes.

2.4 Métodos de Simulación

Los métodos de Simulación entregan otro espectro del problema y permiten corregir alguna de las deficiencias anteriores a la hora de modelar la variable regionalizada.

Simulación en contexto minero significa imitación de condiciones. Generalmente involucra un intento de crear un arreglo de valores que reproducen la misma variabilidad real que la variable regionalizada, así se tienen las mismas características estadísticas generales que los datos originales (reproducción de histograma, variograma, entre otros). La figura 2 expone un ejemplo de la diferencia entre el kriging y una realización. Si bien ni el kriging ni la simulación en este caso son convincentes respecto a la realidad, claramente la simulación da cuenta de la volatilidad a diferencia del kriging.

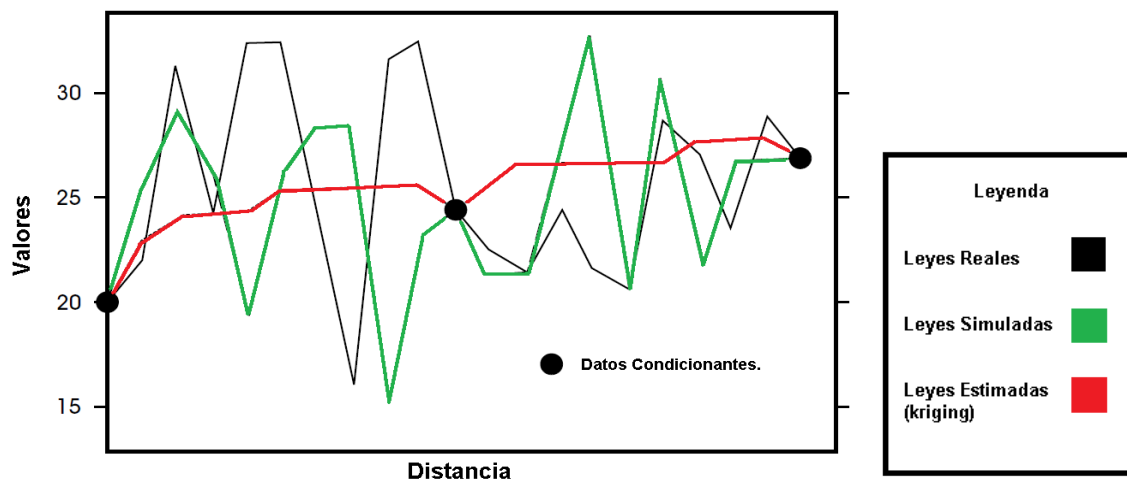


Figura 4: comparación de perfiles, leyes reales (negro), leyes estimadas por kriging (rojo) y leyes simuladas (verde).

La idea de simular se basa en la generación de una serie de realizaciones de una misma función aleatoria, esto, siguiendo la lógica de que la variable regionalizada es una realización más de esta

función. Cada una es un escenario posible y permite tener una idea de la realidad además de realizar la cuantificación de la incertidumbre.

Es importante tener en cuenta por qué las simulaciones son necesarias cuando los datos y las estimaciones existen. Entre otros usos, es posible por ejemplo, estudiar los escenarios más y menos favorables, hacer análisis de riesgos y cuantificar incertidumbre en los valores desconocidos. También permite a diferencia del kriging, estimar sin sesgo funciones no lineales sobre la variable, por ejemplo: recursos recuperables sobre una ley de corte.

Se distinguen dos tipos de simulaciones:

- Simulación condicional: reproduce la variabilidad de la variable regionalizada y además respeta su valor en los puntos muestreados, lo que entrega una imagen realista.
- Simulación no condicional: reproduce la variabilidad de la variable regionalizada sin tomar en cuenta los datos muestreados (no los impone).

Se consideran los siguientes objetivos para la simulación:

- El estudio de la continuidad de leyes
- Fronteras entre unidades geológicas e incertidumbre en su posición
- Optimización de los planes de muestreo para exploración avanzada
- Evaluación de métodos de estimación de recursos/reservas
- Planificación Minera
- Optimización de Molienda
- Análisis de riesgo financiero

En resumen, los aspectos a considerar del problema de simulación condicional son:

- Definir un modelo de función aleatoria
- Tener herramientas para inferir sus parámetros y validarlos
- Construir realizaciones
- Condicionar las realizaciones a los datos disponibles

2.4.1 Modelos de funciones aleatorias

Existen dos tipos de enfoques para simular funciones aleatorias: el de los modelos paramétricos y no paramétricos.

Los modelos no paramétricos buscan crear imágenes cuyas propiedades se asemejen a las observadas con los datos disponibles (histograma, variograma, variogramas de indicadores), sin especificar totalmente la función aleatoria. Un ejemplo es el algoritmo secuencial de indicadores. A veces pueden presentar inconsistencias matemáticas, en casos en que las propiedades de las realizaciones dependan de factores externos, como por ejemplo el número total de sitios simulados, la configuración geométrica de los datos, entre otros.

Para los modelos paramétricos, la función aleatoria queda determinada por un número pequeño de parámetros. El modelo más utilizado es el modelo multigaussiano, en este la distribución espacial que caracteriza la función aleatoria queda determinada completamente a partir de la media de los datos y de su función de covarianza o su variograma.

Para casos no multigaussianos, el desarrollo de modelos paramétricos ha sido muy escaso, solo siendo utilizado para el modelamiento de variables categóricas, como son los casos de los modelos plurigaussiano y booleano.

2.4.2 Modelo Multigaussiano (leyes minerales)

Se requiere transformar los datos originales a valores que tengan un histograma gaussiano estándar, con media igual a cero y varianza uno (aunque se puede imponer una varianza distinta). Este paso se denomina anamorfosis gaussiana. La principal hipótesis del modelo se basa en que los datos transformados siguen una distribución multigaussiana. Esto significa que toda combinación lineal ponderada de sus valores sigue una distribución normal.

El modelo posee dos propiedades interesantes, entre las cuales se tiene que se caracteriza por sus dos primeros momentos (media y variograma) además de que el teorema de límite central facilita la búsqueda del algoritmo de simulación, además produce modelos diseminados. Entre las limitaciones del modelo se encuentra que no reproduce patrones como conectividad, anisotropías locales ni agrupamiento de valores extremos.

Entre los algoritmos de simulación usados habitualmente se encuentra el método secuencial, de descomposición matricial (LU), espectral continuo y el de bandas rotantes. Los dos primeros métodos

permiten tener simulaciones condicionales directamente. Para los otros se generan simulaciones no condicionales, luego se aplica un kriging para condicionarlas a un conjunto de datos.

Método Secuencial Gaussiano

El algoritmo consiste en simular el valor en un sitio a partir de su distribución condicional a los datos duros y valores simulados previamente en puntos próximos.

El procedimiento general es el siguiente:

1. Seleccionar un conjunto de datos condicionantes.
2. Transformar datos condicionantes en resultados equivalentes normales.
3. Desarrollar modelos de variogramas para los datos transformados.
4. Proceder con la simulación secuencial gaussiana.
5. Transformación Inversa.
6. Validar la simulación.

2.4.3 Modelos de Variables Categóricas (unidades geológicas)

Las variables indicadores permiten codificar atributos categóricos o discretos, como por ejemplo las unidades geológicas, litologías, umbrales de leyes, etc. Entre los modelos y métodos de simulación se encuentran:

- Modelo Gaussiano truncado
- Modelo plurigaussiano
- Método jerárquico
- Método secuencial de indicadores

Método Secuencial de Indicadores

Este algoritmo no requiere una distribución gaussiana de datos, y usa kriging de indicadores múltiples. El procedimiento es similar al anterior, sin embargo tiene algunas diferencias:

1. Seleccionar datos condicionantes

2. Seleccionar umbrales (UG, leyes de corte, litologías) y transformar a variable indicador (“0” ó “1”)
3. Desarrollar variogramas modelados para cada indicador
4. Proceder con la simulación secuencial (Deutsch and Journel, 1998)
5. Validar las simulaciones

En este caso, la simulación selecciona al azar sitios con kriging de indicadores múltiples (MIK) usando los datos originales y puntos cercanos ya simulados. Se selecciona un número aleatorio entre 0 y 1 y se simula los indicadores en el sitio de interés a partir de la distribución estimada a partir de MIK.

Se puede utilizar una vecindad móvil para tomar sólo los datos circundantes que tienen más influencia. Se puede utilizar también las medias locales de cada indicador, que representan una probabilidad a priori de ocurrencia de las distintas categorías. La suma de estas probabilidades debe ser igual a “1” y sólo se tendrá probabilidad de ocurrencia mayor que “0” en los dominios que estén presentes en esta vecindad.

2.4.4 Criterios de Validación

Existe más de un criterio de validación de los distintos algoritmos de construcción de realizaciones, estudiando en primera instancia la reproducción en las realizaciones de las propiedades estadísticas de los datos duros.

Se requiere que un número considerable de realizaciones tienda a asemejarse al modelo teórico. Una realización en sí presenta discrepancias con respecto a este modelo, esto debido a las fluctuaciones estadísticas.

Según distintos autores, para validar una simulación como mínimo se debe cumplir con lo siguiente.

1. Reproducción de valores de datos conocidos (condicionamiento).
2. Distribución estadística de atributos de interés.
3. Continuidad espacial caracterizada por el modelo de variograma.

Así mismo se debe seguir los siguientes criterios:

- **Inspección Visual**

Es necesario verificar que haya concordancia de datos, es decir zonas de altas leyes para sectores de datos muestreados de altas leyes y análogamente en sectores de baja ley. Existen herramientas como la validación cruzada que permiten comparar gráficamente los valores simulados con los valores reales de bases de datos de exploraciones. Se puede ver si existe sesgo global o condicional.

- **Reproducción del Histograma**

La distribución univariable o el histograma debe tener características similares que el histograma original desagrupado de los datos.

Se debe revisar la concordancia de las estadísticas principales como la media, mediana y varianza. Además se debe reproducir la forma del histograma y mantener los rangos de valores extremos.

Para todas las realizaciones se espera que el promedio de las medias tienda a la media objetivo, al igual que la media de las varianzas tienda a la varianza objetivo.

- **Reproducción de los Variogramas**

Se puede hacer una comparación entre el modelo teórico y los variogramas experimentales de las realizaciones.

3 METODOLOGÍA

El trabajo encargado por la empresa Antofagasta Minerals (AMSA) y que es tema de esta memoria, consiste en una aplicación práctica de geoestadística en un yacimiento exótico, en la que se simula las leyes de cobre total y cobre soluble tomando en cuenta la influencia de los distintos dominios geológicos presentes, los cuales también son simulados, a partir de un conjunto de datos reales muestreados (sondajes). Estas simulaciones son comparadas con un modelo de kriging proporcionado por la empresa como base, que además cuenta con información del dominio geológico estimado por kriging de indicadores para cada uno de sus bloques.

A continuación se describen los principales pasos de la metodología a seguir:

Análisis de la base de datos:

- Estudio de los parámetros presentes: Identificadores de Sondajes, coordenadas UTM, largo de compósitos, variables geológicas muestreadas, entre otras.
- Se establece objetivos con la empresa (AMSA). Considerando la existencia de poca información de algunos elementos de interés, tales como leyes de oro, plata y de algunas impurezas, entre otros, se selecciona de la base de datos las variables más relevantes a estudiar, descartándose parte de la información dado su poca influencia. De este modo, se toma en cuenta los siguientes parámetros: coordenadas (información espacial), unidades geológicas, leyes de cobre total y de cobre soluble, entre otros.
- Considerando que esta base de datos fue proporcionada por la empresa, se asume como exactos los valores presentes.

Despliegue de datos:

- Despliegue de datos de los sondajes para identificar tendencias en leyes y unidades geológicas presentes.
- Despliegue del modelo geológico y de kriging proporcionados por la empresa, se realizan cortes en plantas y secciones del yacimiento. Se identifican las variables de mayor interés, principalmente unidades geológicas con mayores leyes de cobre total y cobre soluble.

Estudio exploratorio:

- Tiene por objeto descartar datos aberrantes y duplicados, es decir aquellos que no están en los rangos habituales de valores, o que se encuentran espacialmente demasiado cercanos como para considerarse distintos.

- Se realiza un desagrupamiento de los datos para corregir el muestreo irregular.
- Se realiza el cálculo de las estadísticas básicas en base a los datos de sondajes, esto para identificar los rangos de leyes para cada unidad geológica además de las desviaciones estándar y medias de leyes de cobre total y soluble, todo con el objeto de determinar los dominios más interesantes desde el punto de vista económico y, si es posible, hacer una simplificación de los modelos, descartando zonas de poco interés económico y técnico.

Simulación de Unidades Geológicas:

- Se analiza los distintos tipos de simulación de variables categóricas. Principalmente se considera la simulación plurigaussiana además de la simulación de indicadores. Considerando la dificultad de ejecutar la simulación plurigaussiana, debido a la existencia de múltiples variables, se elige la simulación de indicadores.
- Se toma cada una de las nueve unidades geológicas además de la unidad considerada como estéril y se transforma los datos a variable indicador, es decir con valores “0” si es que no existe la unidad ó “1” en el caso en que exista. Una vez realizado esto, se tienen diez bases de datos correspondientes a las nueve unidades geológicas y al estéril, todas con los datos de unidad geológica codificados.
- Se efectúa el análisis variográfico para determinar las direcciones de anisotropía y para establecer los modelos de variogramas que se utilizarán para la construcción de simulaciones de indicadores.
- Para la simulación de indicadores, se analiza los distintos programas eligiéndose la aplicación “SISIM_LM” de GSLIB (Deutsch & Journel, 1998).
- Se construye una vecindad móvil a partir del modelo geológico interpretado, de manera de acotar a un conjunto de datos cercanos las probabilidades de existencia de las unidades minerales. Es decir, cada bloque a simular toma en cuenta la información de los bloques circundantes del modelo geológico, disminuyéndose la posibilidad de tener un modelo muy volátil sin relación con el modelo interpretado. Se toma en cuenta distintas alternativas para tamaños de vecindad.
- En cada bloque, una unidad geológica tendrá asociada una cierta probabilidad entre “0” y “1” de ocurrencia (promedio de las ocurrencias de los bloques circundantes en el modelo interpretado). La suma de las probabilidades de las unidades geológicas debe ser “1”.
- Se mantiene la proporción en peso de las unidades geológicas establecidas en el modelo interpretado, asumiendo que no hay sesgo. Esto se toma como entrada en el programa SISIM_LM.

- Se construyen realizaciones iniciales como prueba y se presentan a los geólogos de la empresa, una vez determinada las dimensiones ideales de la vecindad se da paso a la construcción del resto de las realizaciones.

Validación:

Una vez obtenidas las realizaciones de unidades geológicas, se hace una validación previa a la etapa de simulación de leyes de cobre total y cobre soluble. Esta consta de:

- Una inspección visual de los modelos simulados y la aceptación por parte de los geólogos que respaldan este estudio.
- La reproducción de histogramas.

Independencia de Variables a Simular:

Para comenzar con la etapa de simulación secuencial gaussiana de leyes de cobre total y cobre soluble, la cual se realiza utilizando el programa “SGSIM” de GSLIB, primero se independiza las variables a simular. Dado que el cobre soluble siempre es menor o igual que el cobre total, es indispensable que las simulaciones cumplan con esta condición. De este modo se realiza el siguiente cambio de variable,

$$CuI = CuT - CuS$$

En donde,

CuI = Cobre insoluble (Cobre no Soluble).

CuT = Cobre Total.

CuS = Cobre Soluble.

Dado que el cobre insoluble es independiente del cobre soluble, y teniendo en cuenta que el cobre total es por definición la suma de ambos, se procede con la simulación.

Simulaciones de leyes de cobre soluble y cobre insoluble:

Se considera la simulación de unidades geológicas hecha previamente.

- Se pretende simular modelos de leyes de cobre soluble y cobre insoluble del mismo tamaño que los modelos de unidades geológicas para cada una de los diez dominios. Es decir, se realizan veinte simulaciones para la construcción de cada realización que incluya las simulaciones de cobre soluble, cobre insoluble y las unidades geológicas correspondientes.
- Se hace una elección del algoritmo de simulación a utilizar.
- Para realizar las simulaciones multigaussianas condicionales se utiliza el programa “SGSIM”.
- Se lleva a cabo la transformación gaussiana mediante el programa “NSCORE” de GSLIB.

- Se procede con el análisis variográfico de los datos gaussianos y el modelamiento de los variogramas
- Se realiza la simulación de leyes mediante el programa “SGSIM” de GSLIB.

Construcción de Bases de Datos:

Una vez obtenidas las simulaciones, se ejecuta un programa desarrollado en “MATLAB”, el cual toma todas estas realizaciones y de acuerdo a las simulaciones de unidades geológicas, para cada bloque con unidad determinada, toma el código de “UG” y elige cuál de las bases de datos de leyes corresponde, cada una perteneciente a una unidad y a una de las dos leyes. Esto se realiza para cobre soluble y cobre insoluble.

El mismo programa determina el cobre total, como la suma del cobre soluble más el insoluble, teniendo el modelo de bloques completos con coordenadas UTM, unidades geológicas, leyes de cobre total y de cobre soluble. Para realizar esto se hace el siguiente cambio de variable (inverso),

$$CuT = CuI - CuS$$

En donde,

CuI = Cobre insoluble (Cobre no Soluble).

CuT = Cobre Total.

CuS = Cobre Soluble.

Finalmente se valida de acuerdo a los mismos criterios usados para la simulación de indicadores de unidades geológicas, luego se analizan los resultados obtenidos, estudiándose las realizaciones comparando las medias, histogramas, curvas tonelaje-ley y rangos obtenidos para las zonas más interesantes.

A continuación se presenta el diagrama de flujo que muestra de manera simplificada cada una de las etapas de la metodología utilizada.

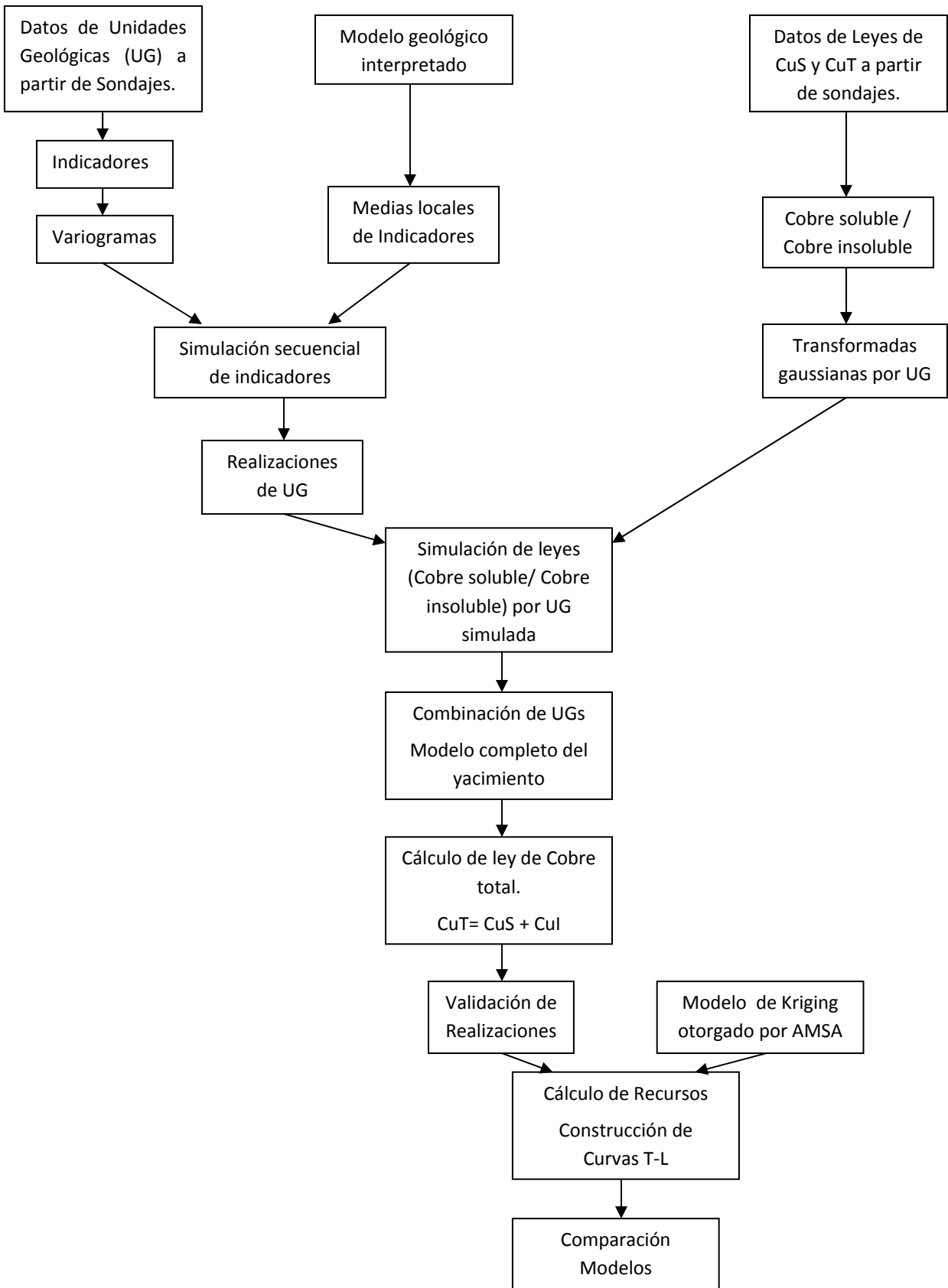


Figura 5: Metodología. Diagrama de Flujos.

4 CASO DE ESTUDIO

4.1 Presentación del yacimiento

La zona estudiada en este trabajo, se encuentra ubicada a unos 60 km al sur de la ciudad de Calama, al Noreste del yacimiento Esperanza, en la comuna de Sierra Gorda, Región de Antofagasta, Chile.



Figura 6: Ubicación de zona de estudio.

El área corresponde a una zona cubierta por gravas y flujos aluviales donde existe un intrusivo diorítico con óxidos de cobre y valores entre 0.2-0.3% Cu.

Antofagasta Minerals realizó un levantamiento magnetométrico terrestre sobre el área confirmando algunas anomalías ya detectadas en estudios anteriores por lo que se propuso una campaña de perforación en el año 2007 (10 pozos aire reverso/4350 m) ejecutada durante enero y febrero de 2008. Su resultado incluyó la intercepción de un sistema tipo pórfido en una zona oxidada significativa.

Entre enero y abril del 2009 fueron perforados 29.676 metros, con lo que se completa un total de 52.123 metros de sondajes, tomando en cuenta las campañas realizadas hasta esa fecha. Posterior a esto se realiza más de 19.000 m de sondajes para Sulfuros y descarte totalizándose 71.959 m perforados. La siguiente tabla (Tabla 1) muestra la cantidad y metros perforados.

Tabla 1: Inventario de Sondajes

Campaña		N° Sondajes	m perforados	N° Muestras	
Fecha	Objetivo			CuT	CuS
Sept-Nov 2009	Sulfuros	9	5360.25	2610	2174
	Descarte	23	7210.00	3000	1728
	Twin	3	339.73	474	470
	Met	5	798.00		
	Infill Ox	28	3486.51	1035	830
Jul-Sept 2009	Met	14	1453.88		
	Geot	9	1186.39	746	604
Ene-Abril 2009	Infill Ox	144	29676.15	12973	7330
2008	Infill Ox	32	12772.00	6386	5005
	Sulfuros	10	4352.00	2176	436
ad 2008	Exploración	20	5323.64	1842	471
		297	71959	31242	19048

Los sondajes, que corresponden a muestras de aire reverso y diamantina, se usaron para interpretar 30 secciones cada 50 m y 13 plantas cada 30 m. Con las secciones se construyó un modelo 3D, el que a su vez, junto a las muestras, es la base del estudio geoestadístico que se lleva a cabo.

4.2 Presentación de los datos

La base de datos proporcionada para realizar este trabajo cuenta con 297 sondajes compositados a 2 metros, con información de:

- Collares
- Desviaciones
- Leyes de cobre total
- Leyes de cobre soluble

- Leyes de oro
- Leyes de impurezas (tales como CO₃, NO₃, ClS, AlS, FeS, MnS y MgS)
- Recuperaciones metalúrgicas
- Densidades
- Mapeos de litología
- Tipo y minerales alteración-mineralización

La base de datos fue revisada a fines de 2009 en cuanto a consistencia e integridad de los datos de coordenadas, desviaciones, leyes y mapeos nuevos e históricos. Para esto se comparó la información digital con los datos duros almacenados.

También se cuenta con un modelo geológico interpretado del yacimiento, el cuál trae información suavizada de las 10 unidades geológicas delimitadas y que se utilizará como base para la realización de la simulación de indicadores.

Por último se tiene una estimación realizada por Kriging para las zonas de mayor relevancia económica del yacimiento, tanto para cobre total como cobre soluble.

La definición de unidades de estimación proviene del análisis geológico-estadístico de la combinación de unidades de litología-alteración-mineralización. En este yacimiento en particular y en el alcance de este trabajo, se trata de un nivel de oxidados de cobre en un sistema de pórfido cuprífero en donde hay dos ambientes principales, la zona del pórfido con mineralización de atacamita – brochantita (zona de baja ley) y la zona de skarn con crisocola – espangolita (zona de alta ley con núcleo de muy alta ley). No obstante esta generalización, ambas zonas minerales se traslapan una a la otra. Además, existen niveles de oxidados negros semejantes en cobre total a los oxidados verdes pero con mayor insolubilidad. La Alteración-mineralización hidrotermal y litología, con certeza, determinan el comportamiento y concentración de cobre, el cual queda definido con precisión con el delineamiento de la zona mineral, tal cual se aprecia en la ilustración.

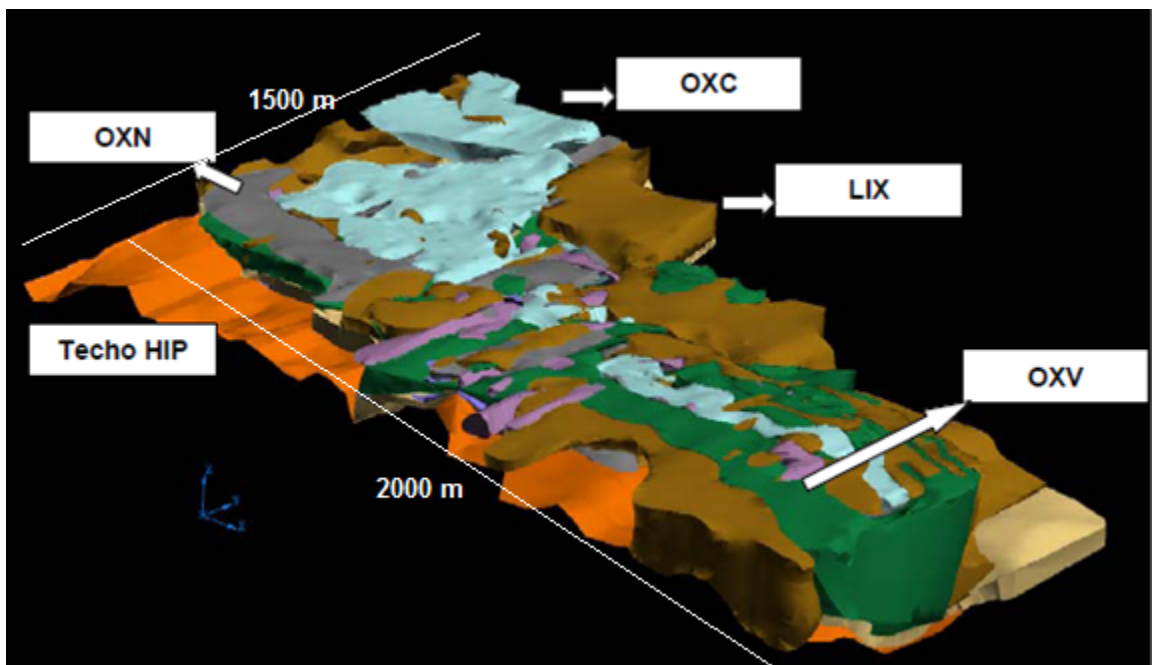


Figura 7: Ilustración del yacimiento. Zonas de Óxidos Crisocola (OXC), Óxidos Negros (OXN), Lixiviados (LIX), Óxidos Verdes (OXV) e Hipógeno.

Dentro de las unidades geológicas presentes se destacan los óxidos crisocola, zona de mayor interés, además, los óxidos verdes, óxidos negros, los minerales mixtos y minerales supérgenos poseen leyes de cobre también destacables, sin embargo los tres últimos contienen menos cobre soluble, por lo cual se hace la distinción entre estas unidades. El resto son los lixiviados, lixiviados con cobre y el mineral hipógeno, este último medido con muy poco datos como para tenerlo en consideración.

4.3 Estudio exploratorio

La base de datos corresponde a varias campañas de sondajes de exploración que contiene leyes de cobre total, cobre soluble y unidades geológicas, la cual se proyecta en un área de 2.500 x 2.500 x 500 metros en las coordenadas Este, Norte y Cota. Los collares están dispuestos en una grilla regular, sin embargo la zona de óxidos presenta mayor densidad de muestreo. La mayor parte de los sondajes son verticales, aunque existen algunos sondajes inclinados en las zonas más apartadas (bordes del modelo). Estos sondajes han sido compositados cada 2 metros.

La base de datos entregada ha sido sometida a controles de calidad por parte de AMSA, por lo que se asume que son muestras con valores exactos.

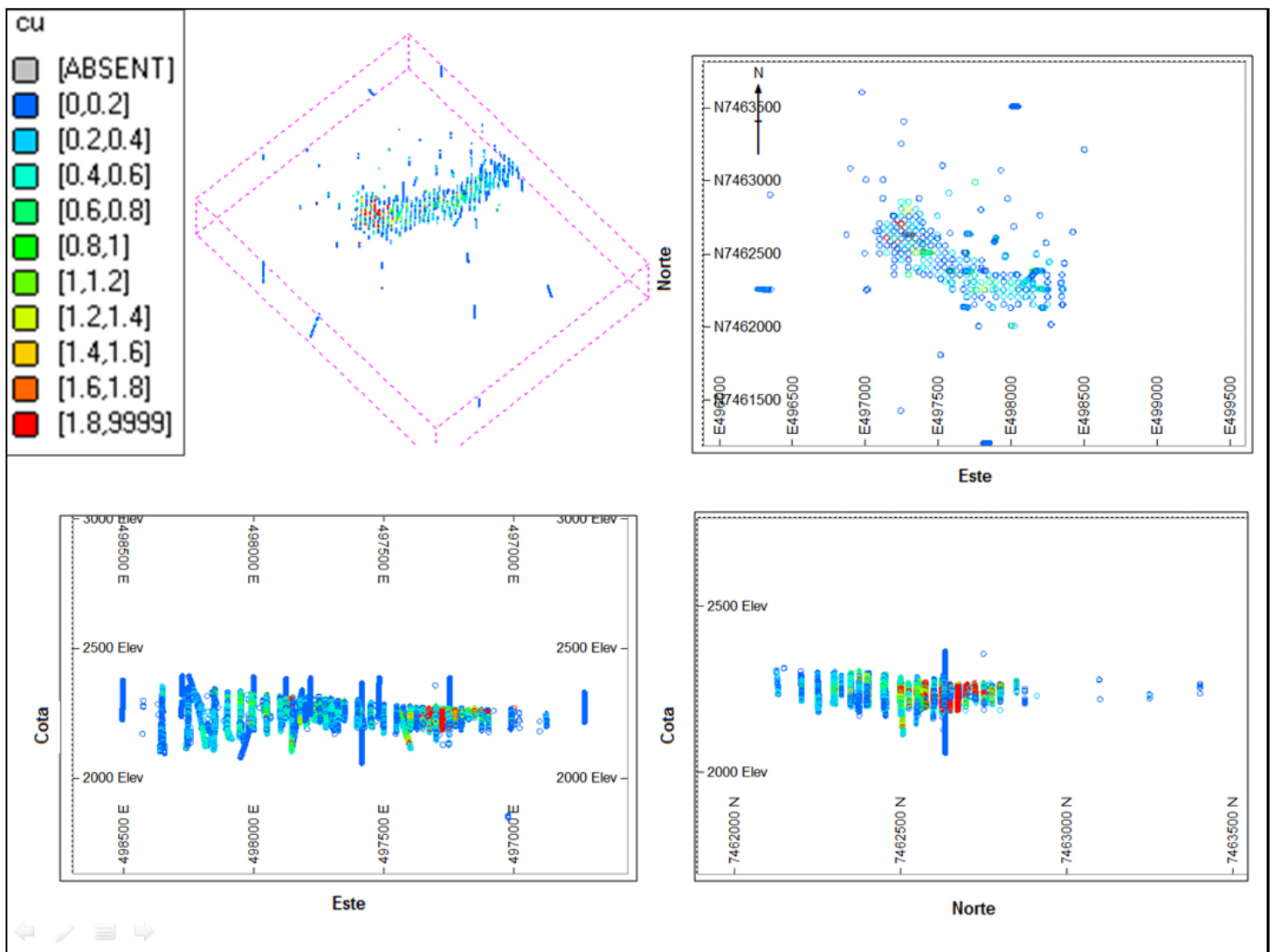


Figura 8: Mapas de muestras de exploración. Vistas Isométrica (Izq. arriba), Planta (der. arriba), Perfiles Este-Cota (izq. abajo) y Perfil Norte-Cota (der. abajo). (Escala: Ley de cobre total).

Se realiza un estudio previo para determinar la existencia de datos aberrantes o duplicados que pudiesen inducir a errores. Dado que existen valores demostrados de leyes de cobre total y soluble del orden de 30%, se considera aberrante un dato sobre 50%, entendiéndose que este es un yacimiento con zonas de leyes de cobre muy altas. Además no se consideran los siguientes datos:

- Que no contengan el valor de cobre total.
- Que no contengan el valor de unidad geológica
- Que contengan cobre total menor que cobre soluble (se considera dato erróneo)

Tomando en cuenta lo anterior, se descartan los datos que tengan alguna de las condiciones anteriores (menos del 0.1%). Respecto a los datos duplicados, considerándose estos datos a una distancia menor a 40 cm de otro, no existe ninguno.

Se desagrupan los datos de sondajes con el objeto de corregir los posibles sesgos debido al muestreo irregular. Para esto se utiliza el método de las celdas, el cual divide las malla muestreada en paralelepípedos del mismo volumen y asigna ponderadores a cada dato dependiendo cuantos hay en cada celda. Se utilizan celdas de 50 x 50 x 30 m³.

Es posible así determinar las estadísticas básicas para los datos desagrupados, considerando la existencia de los nueve dominios geológicos distintos. En la Tabla 2 se presentan las estadísticas básicas para los datos de sondajes. En la Tabla 3 se presentan las estadísticas básicas para los sondajes desagrupados:

Tabla 2: Estadísticas básicas de los datos no desagrupados, separados por unidad geológica.

Datos	N°Datos	CUT				CUS			
		Min	Max	Media	D.S	Min	Max	Media	D.S
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Mineales Lixiviados	1407	0.00	1.16	0.09	0.10	0.00	1.15	0.06	0.07
Mineral Hipógeno	5441	0.00	2.84	0.19	0.21	0.00	2.68	0.15	0.16
Mineral Parcial Lixiviado	846	0.00	2.01	0.21	0.22	0.00	1.90	0.06	0.13
Mineral Supérgeno	241	0.04	1.57	0.35	0.24	0.00	0.71	0.08	0.11
Mixto	366	0.01	8.59	0.32	0.53	0.01	8.45	0.20	0.48
Óxidos Verdes	3139	0.00	19.56	0.42	0.69	0.00	18.95	0.34	0.63
Óxidos Crisocola	1417	0.01	30.70	2.85	4.20	0.01	30.70	2.62	4.11
Óxidos Negros	530	0.02	2.39	0.36	0.33	0.01	2.02	0.19	0.26
Lixiviados con Cobre	193	0.02	0.72	0.19	0.16	0.01	0.55	0.08	0.08
Estéril	15019	0.00	5.55	0.04	0.12	0.00	5.23	0.04	0.10
TOTAL	28599	0.00	30.70	0.47	0.53	0.00	30.70	0.28	0.44

Tabla 3: Estadísticas básicas de los datos desagrupados, separados por unidad geológica.

Datos desagrupados	N°Datos	CUT				CUS			
		Min	Max	Media	D.S	Min	Max	Media	D.S
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Minerales Lixiviados	486	0.00	1.16	0.17	0.13	0.00	1.15	0.07	0.10
Mineral Hipógeno	583	0.04	2.17	0.34	0.34	0.00	0.35	0.02	0.03
Mineral Parcial Lixiviado	558	0.00	2.01	0.27	0.24	0.00	1.90	0.06	0.15
Mineral Supérgeno	202	0.11	1.57	0.37	0.25	0.00	0.59	0.05	0.07
Mixto	278	0.10	8.59	0.41	0.59	0.01	8.45	0.24	0.55
Óxidos Verdes	2698	0.03	19.56	0.48	0.73	0.00	18.95	0.39	0.67
Óxidos Crisocola	1372	0.10	30.70	2.95	4.24	0.01	30.70	2.71	4.15
Óxidos Negros	480	0.06	2.39	0.39	0.33	0.01	2.02	0.20	0.27
Lixiviados con Cobre	139	0.10	0.72	0.24	0.16	0.01	0.55	0.08	0.09
Estéril	1398	0.00	5.55	0.12	0.29	0.00	5.23	0.06	0.24
TOTAL	8194	0.00	30.70	0.77	1.10	0.00	30.70	0.62	1.01

Rápidamente es posible darse cuenta de que los dominios de Óxidos Verdes y Crisocola son los de mayor interés dado la cantidad de datos presentes en comparación al resto. Además se observa que son las unidades que presentan mayores leyes medias para cobre total y cobre soluble. En particular los óxidos crisocola presentan una alta volatilidad lo que es indicador de zona de altas leyes, además de la existencia de leyes medias sobre el 2.5% de cobre.

A continuación se muestra las distribuciones de leyes de cobre total y cobre soluble para los sondeos originales y para los sondeos desagrupados.

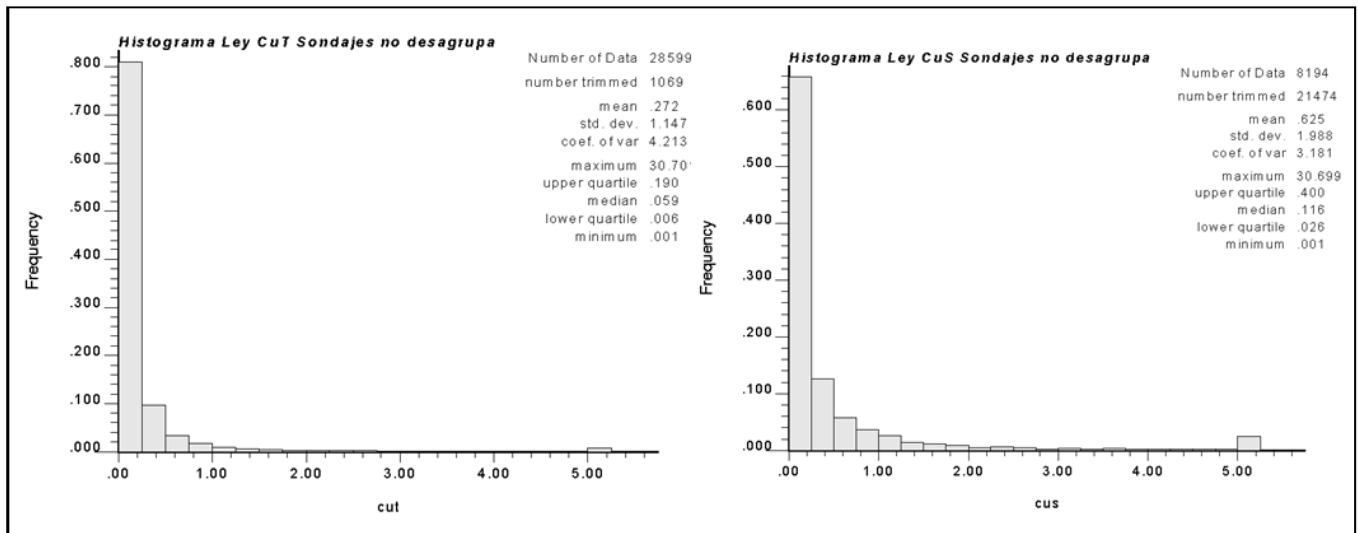


Figura 9: Histogramas de leyes de cobre total y cobre soluble (sondeos no desagrupados).

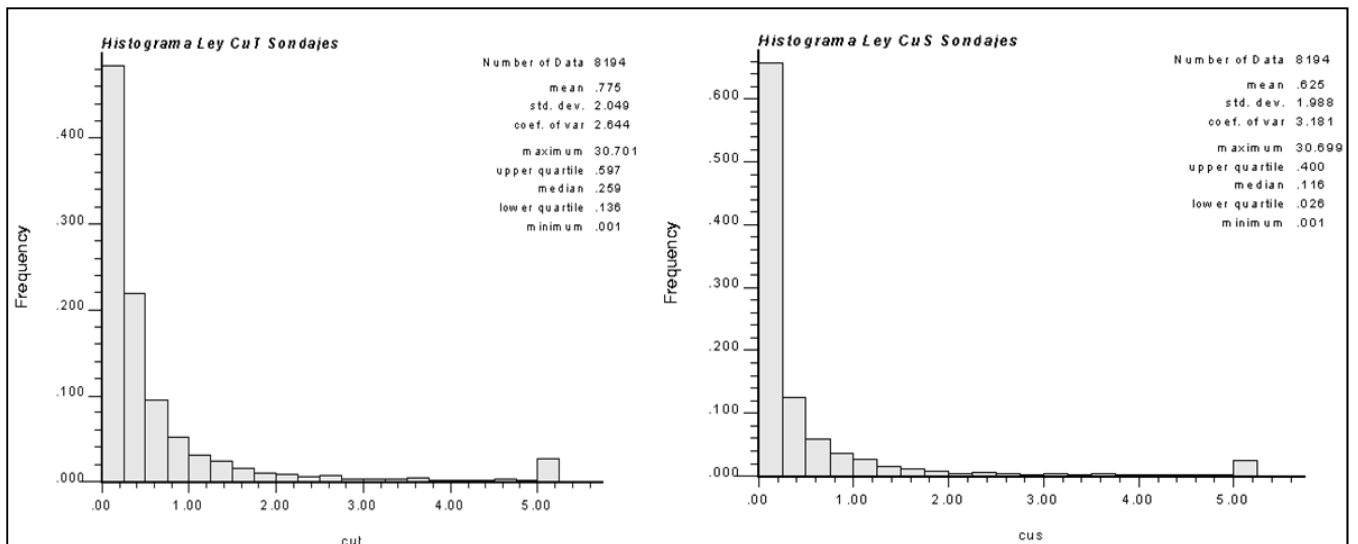


Figura 10: Histogramas desagrupados de leyes de cobre total y cobre soluble.

Las curvas tonelaje ley para los datos desagrupados son las siguientes:

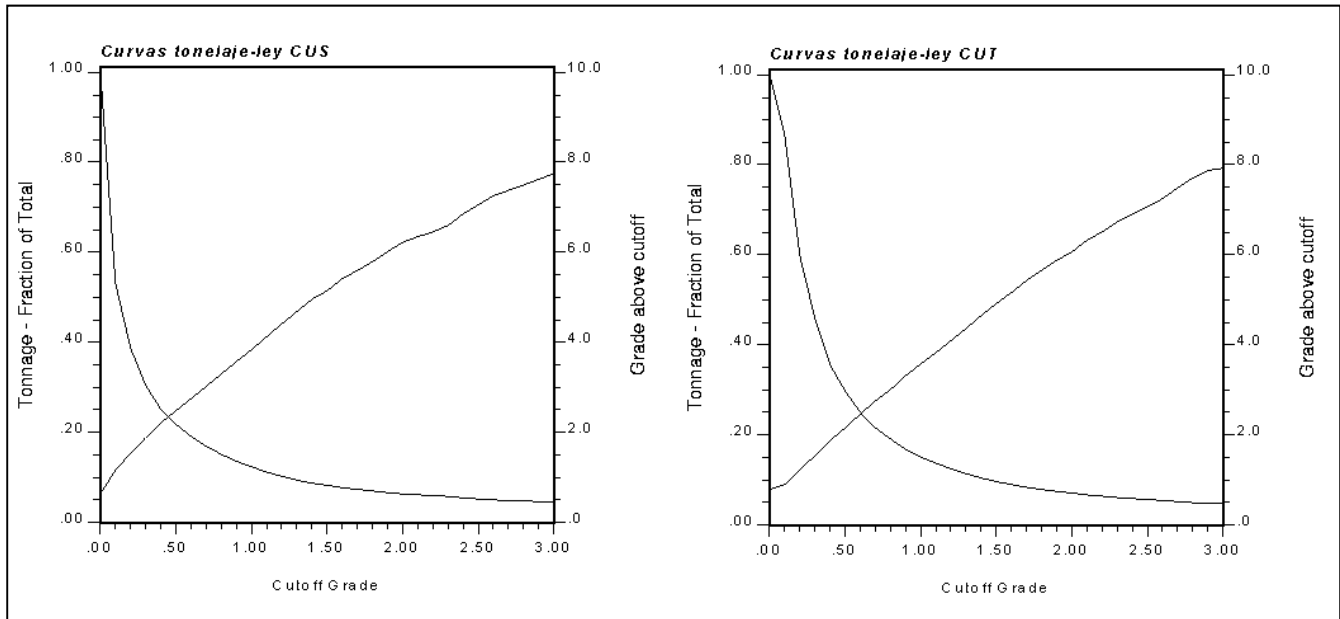


Figura 11: Curvas Tonelaje Ley para los sondajes desagrupados, para cobre soluble y total.

Cerca de un 30% de los compósitos tienen ambos datos de cobre total y cobre soluble. Si bien los valores de cobre total existen en la base de datos para todas las ubicaciones, existen muchos datos faltantes de cobre soluble. Estos se estiman mediante una regresión lineal. Esta regresión se realiza dado que la correlación existente entre estas dos variables es del 99,2%.

La regresión se construye imponiendo que para los casos en que cobre total es "0", se obtenga cobre soluble "0" para evitar errores.

Se obtiene la ecuación $Cobre\ Soluble\ (CUS) = 0.9429 * Cobre\ Total\ (CUT)$ y se completan los valores faltantes.

Si bien se podrían realizar estimaciones de cobre soluble a partir del cobre total para cada una de las unidades geológicas (a través de regresiones lineales independientes), lo que evidentemente mejoraría la precisión, se realiza la simplificación general, siendo los dominios de sulfuros los más perjudicados (menor correlación entre cobre total y cobre soluble). Si bien afecta los resultados, estos dominios son de menor interés económico.

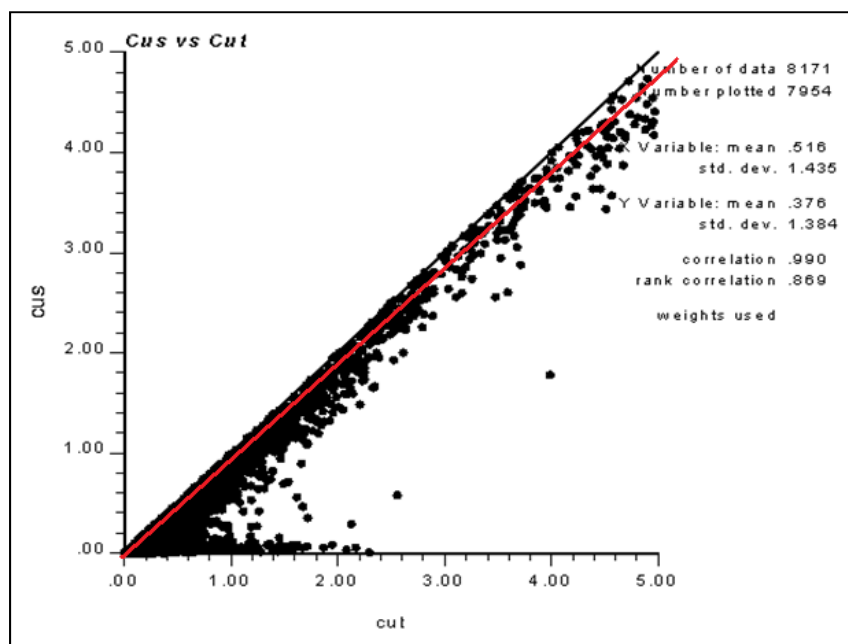


Figura 12: Gráfico de dispersión: cobre soluble vs cobre total. La recta en rojo representa la regresión lineal.

Del gráfico anterior se ve una relación bastante lineal entre el cobre total y cobre soluble. Además es importante tener en cuenta que el cobre soluble es menor o igual al cobre total.

Dado que es necesario simular estas dos variables, y teniéndose presente la restricción de desigualdad, es necesario hacer un cambio de variables para no tener problemas como una simulación que entregue leyes de cobre soluble mayores que cobre total.

De este modo se elige simular las leyes de cobre soluble y cobre insoluble, donde este último es estadísticamente independiente del cobre soluble. Por lo tanto se hace el siguiente cambio de variable:

$$CuI = CuT - CuS$$

El siguiente gráfico muestra que no existe correlación alguna entre estas dos variables.

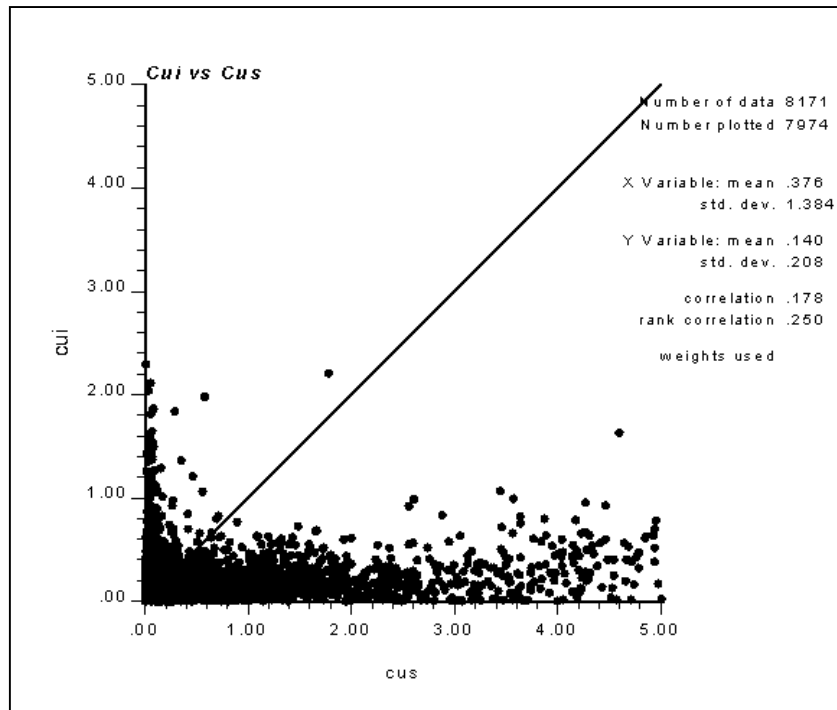


Figura 13: Gráfico de dispersión: cobre insoluble vs cobre soluble.

Luego de simular los valores independientes de cobre soluble y cobre insoluble, se realiza el cambio de variable inverso para obtener los valores de cobre total, que se redefinirá como la suma de las dos variables simuladas. Dado que el cobre insoluble es mayor o igual que cero, todos los valores de cobre total serán mayores o iguales que los de cobre soluble (que también es mayor o igual a cero).

$$CuT = CuS + CuI$$

No hay que olvidar que este yacimiento tiene nueve dominios geológicos distintos definidos además del estéril, por lo que no se puede simular las leyes asumiendo que existe sólo un dominio y que en los límites de cada unidad no hay discontinuidades. Deben realizarse las simulaciones de unidades geológicas y para cada dominio por separado deben realizarse las simulaciones de cobre insoluble y cobre soluble.

4.4. Modelamiento de Unidades Geológicas.

Además de los sondajes, para realizar la simulación de dominios se cuenta con el modelo geológico suavizado y un modelo determinístico (kriging) de leyes construido para zonas aisladas (de mayor importancia económica) del yacimiento, ambos entregados por AMSA.

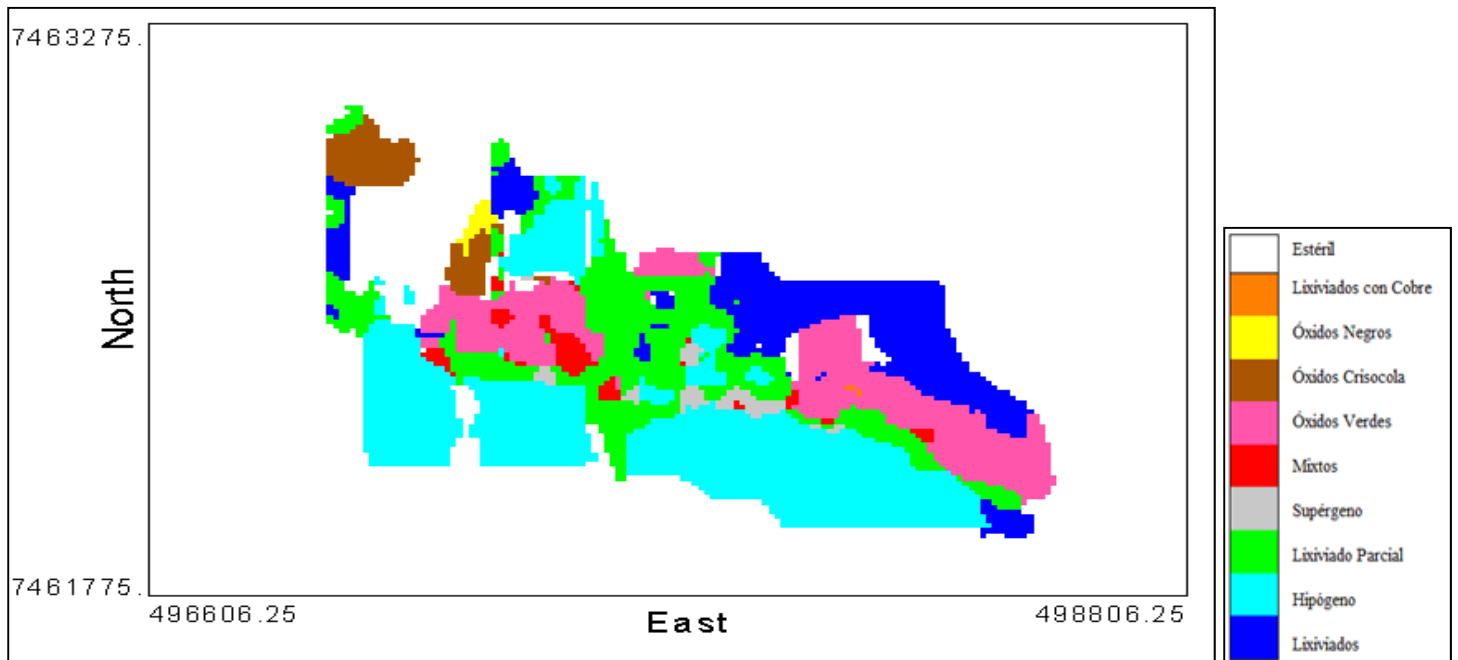


Figura 14: Modelo Geológico determinístico, Vista Planta (construido por AMSA).

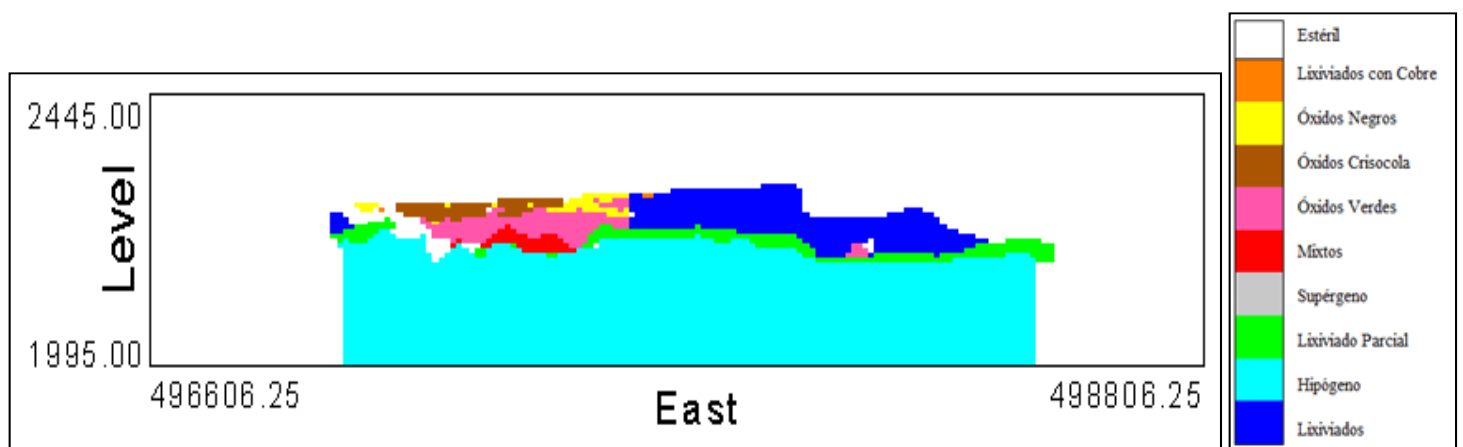


Figura 15: Modelo Geológico determinístico, Vista Perfil Este-Cota (construido por AMSA).

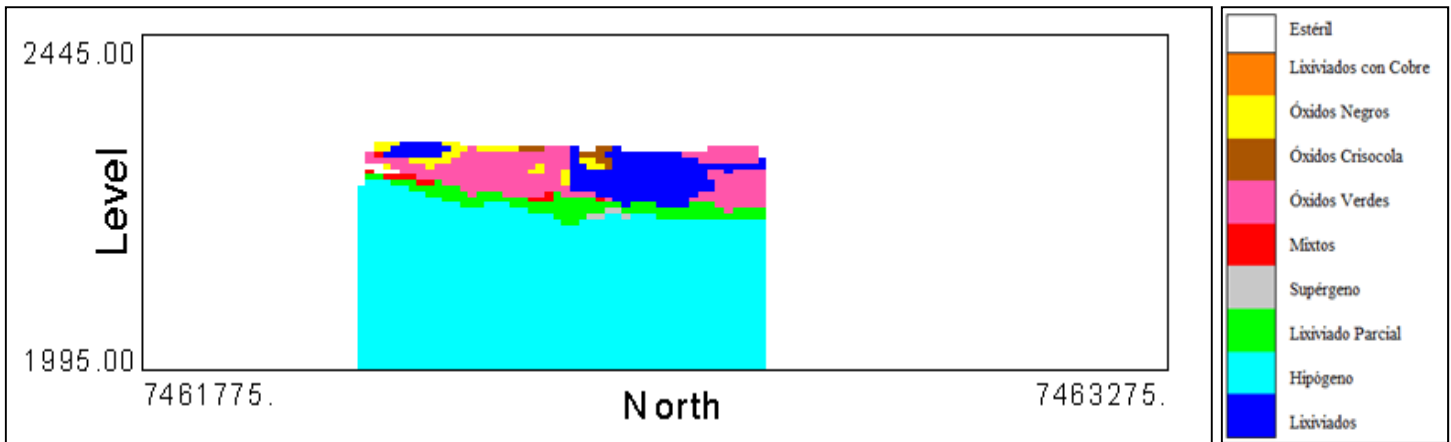


Figura 16: Modelo Geológico determinístico, Vista Perfil Norte-Cota (construido por AMSA).

Dado la dificultad de realizar las simulaciones tanto de unidades geológicas como de leyes, debido a la gran cantidad de datos y la incapacidad computacional para procesarlos, se hace una simplificación del modelo a simular. Para esto, no se toman en cuenta gran parte de los datos de mineral hipógeno presentes en la base del yacimiento, 90 metros que no representan mucha información dado la existencia de muy pocos sondajes a gran profundidad. Tampoco se consideran los datos de estéril que rodean a las unidades geológicas que se encuentren a más de 25 m de distancia de los dominios presentes en el borde del yacimiento. Si bien se elimina gran parte del mineral hipógeno y estéril del modelo original (Modelo geológico interpretado), siguen existiendo zonas significativas con ambas unidades minerales.

De este modo se obtiene una reducción importante de datos, por lo que se hace más factible la reproducción de más realizaciones y no se tomen en cuenta valores que no tienen gran relevancia.

Si bien, a priori pareciera que esta simplificación disminuye la relevancia de estos modelos, en la actualidad las zonas descartadas no representan mayor interés para los estudios que se están llevando a cabo. El mineral hipógeno recién está siendo muestreado con mayor precisión y la mayor incertidumbre se encuentra en los contactos entre unidades geológicas, los que siguen estando presentes y son modelados en este estudio.

El detalle de la cantidad de bloques para cada dominio presente en el modelo geológico se da a conocer en la siguiente tabla:

Tabla 4: Cantidad de Bloques y porcentajes para cada unidad geológica.

Porcentaje de cada UG		
	Bloques	%
Estéril	275,325	62.50
Lixiviados	18,677	4.24
Hipógeno	102,362	23.24
Lix. Parcial	9,203	2.09
Supérgeno	1,200	0.27
Mixto	1,403	0.32
Óx. Verdes	24,656	5.60
Óx. Crisocola	5,384	1.22
Óx. Negros	1,799	0.41
Lix. Con Cobre	487	0.11
Total	440,496	100

Las dimensiones de cada bloque son las siguientes:

Dimensión Este-Oeste: 12.5 metros.

Dimensión Norte-Sur: 12.5 metros.

Dimensión Cota: 7.5 metros.

4.4.1 Análisis Variográfico

Para comenzar con el análisis variográfico se debe hacer una transformación de datos de unidades geológicas a variable indicador. Esto se realiza para cada unidad geológica por separado teniéndose nueve bases de datos distintas.

Se construyen los mapas variográficos para cada unidad geológica, determinando que las anisotropías encontradas se pueden representar en dos variogramas, uno horizontal omnidireccional y otro vertical.

Luego se procede a construir los variogramas experimentales de indicadores para cada dominio, con el propósito de modelar la continuidad espacial de cada uno de ellos.

Así, por ejemplo, para el cálculo del variograma de indicador se tomará lo siguiente:

$$\text{Óx. Verde} = \begin{cases} 1 & \text{si es Óx. Verde.} \\ 0 & \text{si no. (para todo el resto de las UG)} \end{cases}$$

Se definen los siguientes parámetros:

Tabla 5: Parámetros de cálculo de variogramas experimentales

	Acimut	Tolerancia Angular	Dip	Tolerancia Dip	Número de Pasos	Largo de Paso [m]
Dirección Horizontal	0°	90°	0°	22.5°	40	4
Dirección Vertical	0°	90°	90°	22.5°	40	4

Se toman algunas alternativas de largo de paso, finalmente se elige largo de paso de 4 metros dado que aumenta el suavizamiento del variograma para el caso vertical. Dado que los sondajes son verticales (en su mayoría), es lógico que los variogramas sean bastante menos difusos que para la dirección horizontal, debido a que a lo largo del sondaje hay mayor continuidad que entre distintos sondajes.

A continuación se muestra los variogramas experimentales de indicadores generados para todas las unidades geológicas, además se despliegan los modelamientos de cada uno. Para esto se utilizan modelos anidados esféricos y exponenciales.

Las líneas punteadas corresponden a variogramas experimentales y las líneas continuas a variogramas modelados. El color azul representa la dirección vertical y el negro la dirección horizontal.

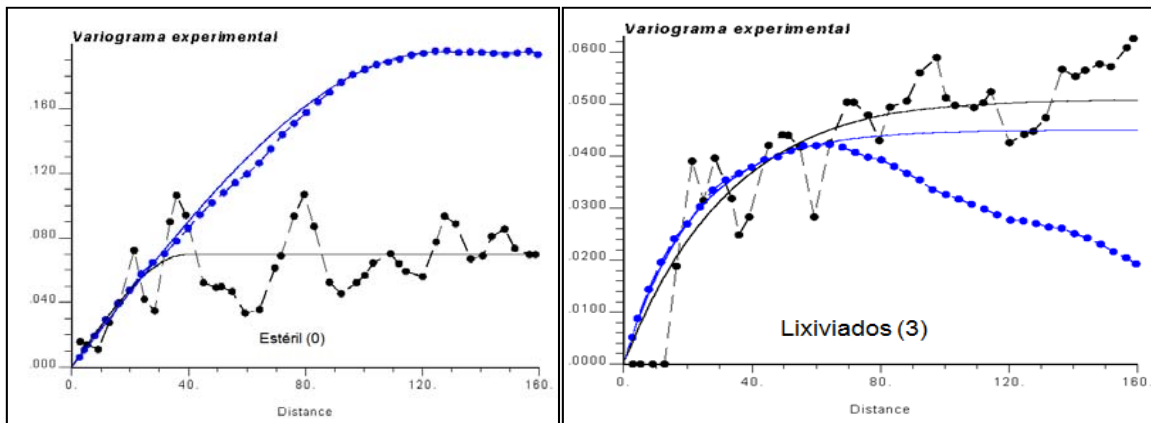


Figura 17: Variogramas experimentales y modelados para estéril y minerales lixiviados.

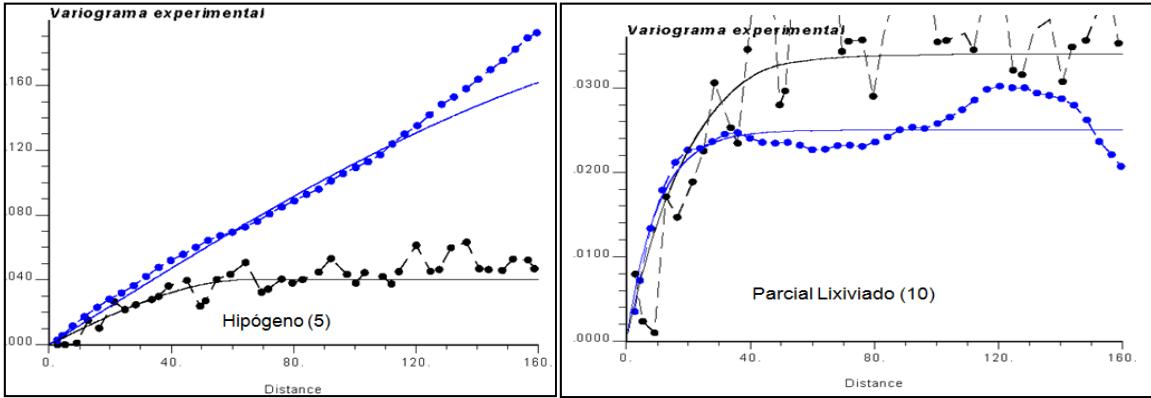


Figura 18: Variogramas experimentales y modelados para mineral hipógeno y parcial lixiviado.

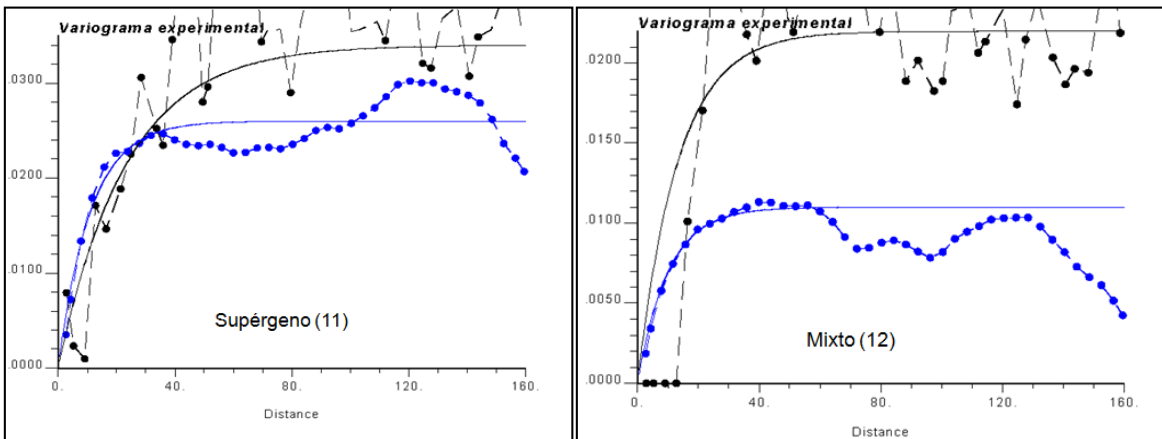


Figura 19: Variogramas experimentales y modelados para minerales supérgenos y mixtos.

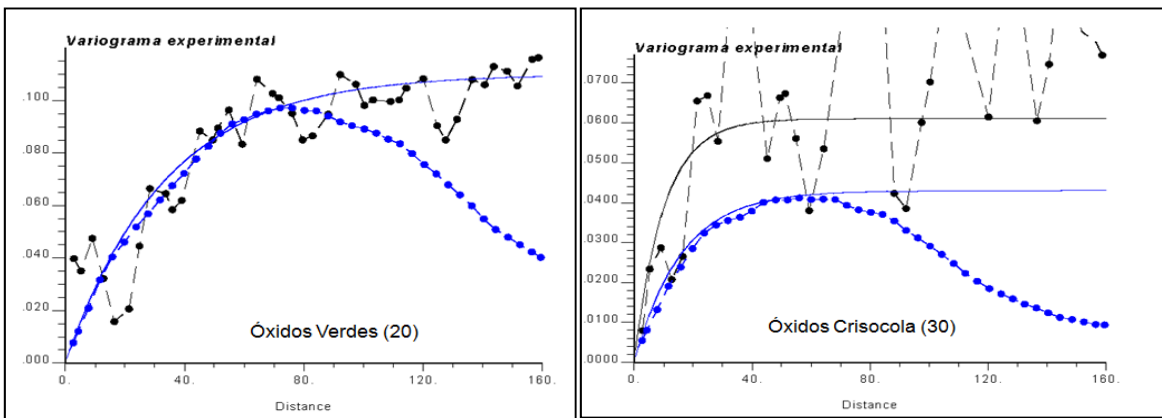


Figura 20: Variogramas experimentales y modelados para óxidos verdes y óxidos crisocola.

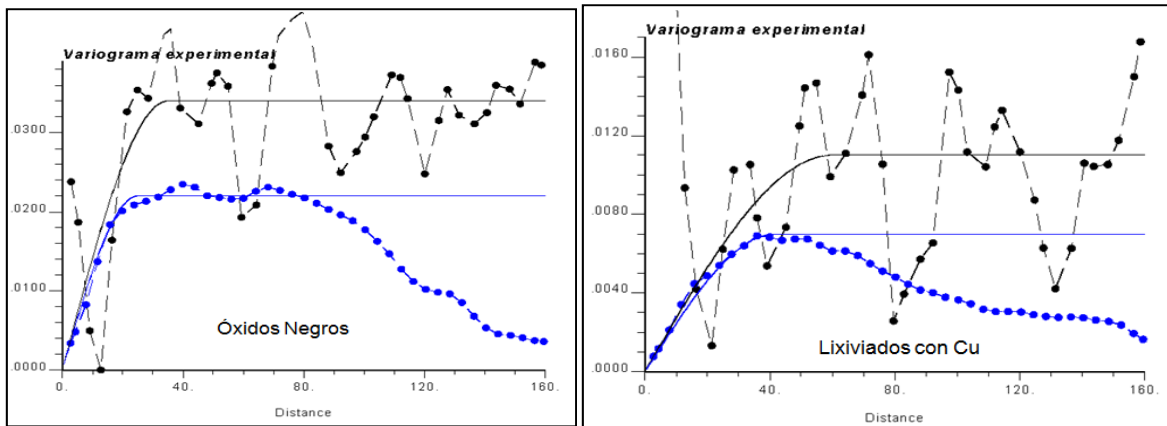


Figura 21: Variogramas experimentales y modelados para óxidos negros y lixiviados con cobre.

Además de distinguirse una diferencia clara entre los variogramas horizontales y los verticales, respecto a la variabilidad, se tiene también la existencia de unidades minerales que presentan mayor continuidad que otras.

4.4.2 Probabilidades locales de ocurrencia de unidades geológicas.

Antes de realizar la simulación de indicadores, se construye una vecindad móvil a partir del modelo determinístico. El objetivo es acotar sólo a los datos circundantes, las probabilidades de ocurrencia de una unidad geológica. Esto se realiza para tener un modelo no muy volátil, que tenga relación con el modelo geológico interpretado.

En los puntos simulados, cada unidad geológica tiene una probabilidad entre “0” y “1” de ocurrir, dependiendo esta, de que unidades geológicas predominen.

Se proponen dos alternativas de vecindad, la primera es de 11x 11 x 11 bloques, es decir se toman un cubo de 1331 bloques para calcular las probabilidades de ocurrencia de cada dominio, teniéndose una matriz de probabilidades.

La otra alternativa propuesta, y que fue en definitiva la que mejor representó lo esperado por los geólogos a cargo del proyecto, fue una vecindad de 7 x 7 x 5 bloques, en que se toma un paralelepípedo recto que abarca 245 bloques para calcular las probabilidades de ocurrencia de cada dominio. Esta alternativa fue más acertada en cuanto a la volatilidad esperada dado los estudios geológicos.

Se despliegan las siguientes imágenes que muestran una planta con la probabilidad de ocurrencia de dos de las unidades geológicas estudiadas.

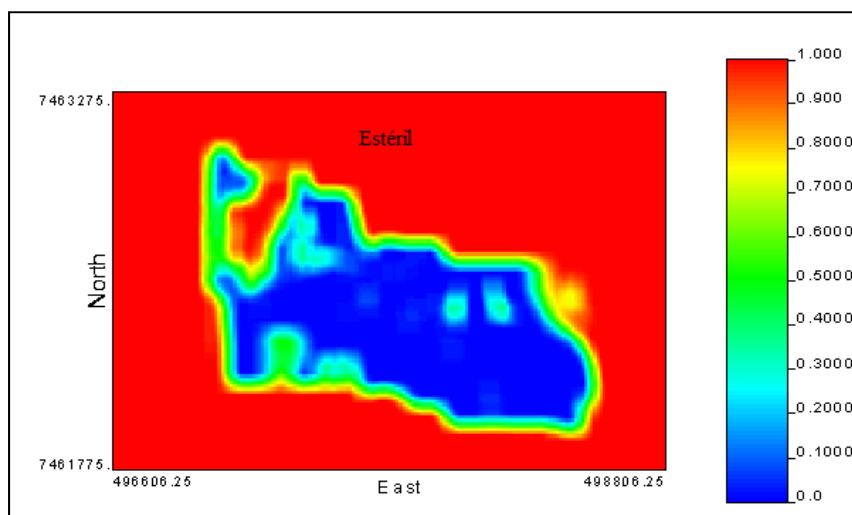


Figura 22: Imagen probabilidad de ocurrencia de estéril.

Se aprecia claramente que la probabilidad de ocurrencia de estéril es “1” en los lugares en que no existe presencia de otra unidad geológica, luego acercándose a la zona con dominios distintos, la probabilidad de ser estéril baja hasta llegar a “0” al centro del yacimiento, en que es muy probable que no haya ningún bloque identificado como estéril entre los 245 bloques circundantes.

En la siguiente imagen se despliega el mismo mapa de probabilidad pero para la unidad geológica de minerales lixiviados. Las imágenes restantes se presentan en los anexos.

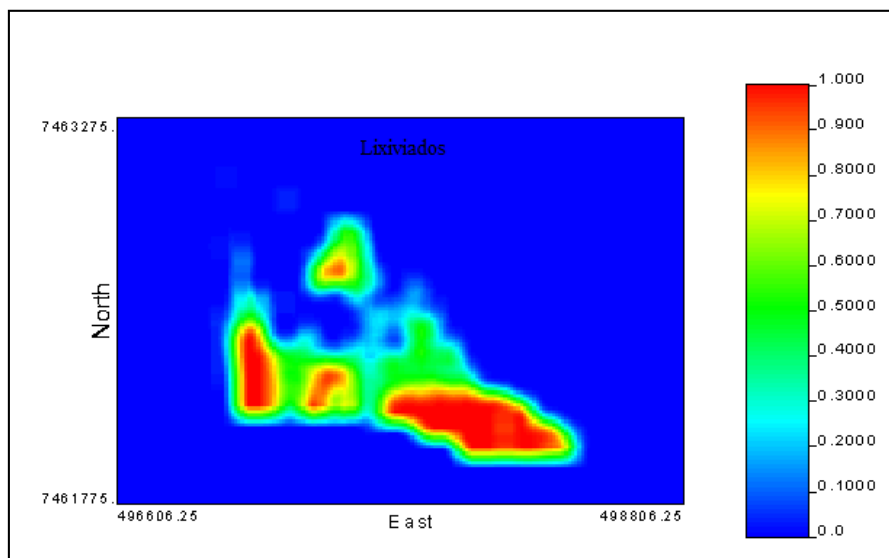


Figura 23: Imagen probabilidad de ocurrencia de minerales lixiviados.

A diferencia de la imagen de estéril, la probabilidad de ocurrencia de minerales lixiviados es mayor al centro del yacimiento y se torna “0” en los bordes, dado que no existen bloques de este dominio.

El modelo de Vecindad se programó utilizando el software “Matlab”. En los anexos se encuentra el código de programación.

4.4.3 Simulación Secuencial de Indicadores

La simulación secuencial de indicadores se ejecuta utilizando el software “sisim_lm” de GSlib. Además de utilizar el modelo de probabilidades locales creado en la sección anterior, se utiliza las proporciones globales de unidades geológicas establecidas en el modelo interpretado, asumiendo inexistencia de sesgo. También utiliza los modelos de variograma creados para cada una de las unidades geológicas.

Se considera que estas realizaciones deben reproducir lo siguiente:

- Datos de sondajes.
- Variogramas de indicador, es decir, continuidad geológica.
- Imágenes similares al modelo geológico, es decir, unidades geológicas y contactos entre ellas.

En total, se construyeron 11 realizaciones de unidades geológicas. A continuación se muestran algunas imágenes de realizaciones junto con el modelo geológico otorgado como base para realizar la comparación:

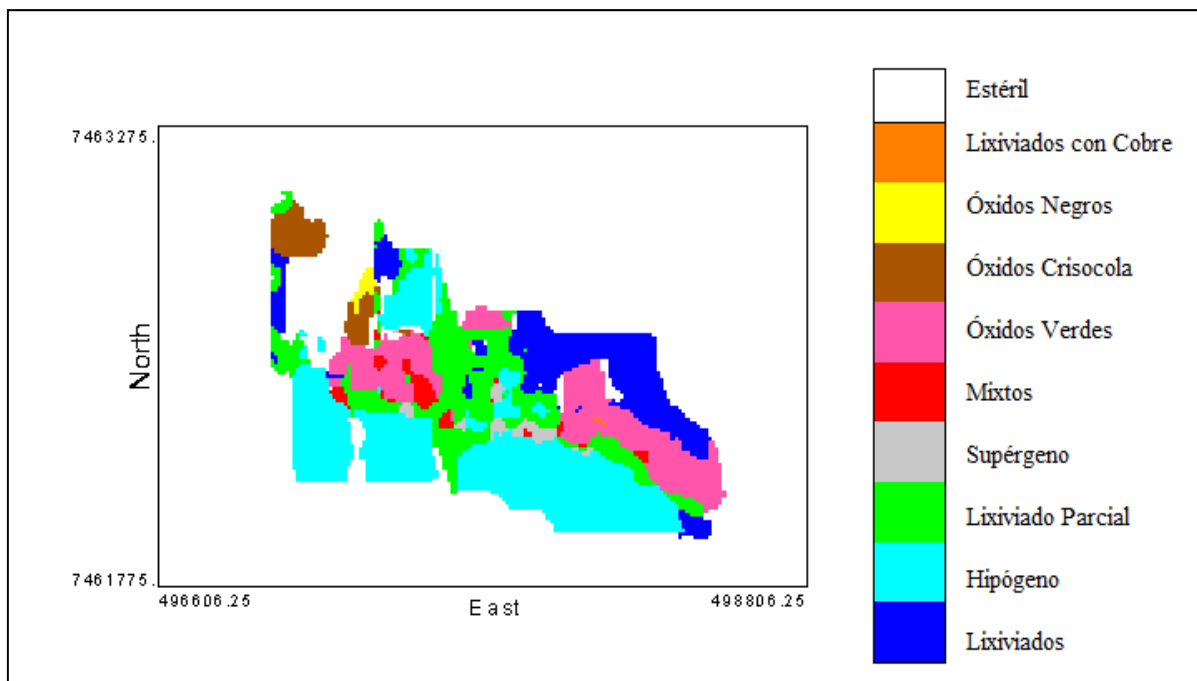


Figura 24: Modelo de Bloques determinístico. Vista Planta (Este-Norte)

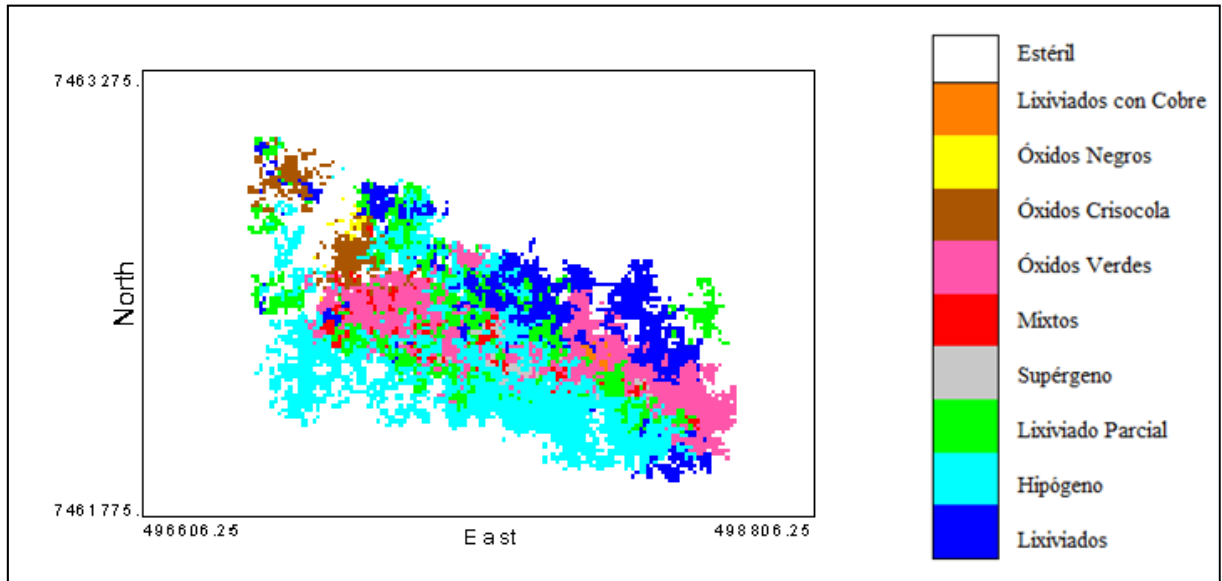


Figura 25: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°1. Vista Planta (Este-Norte)

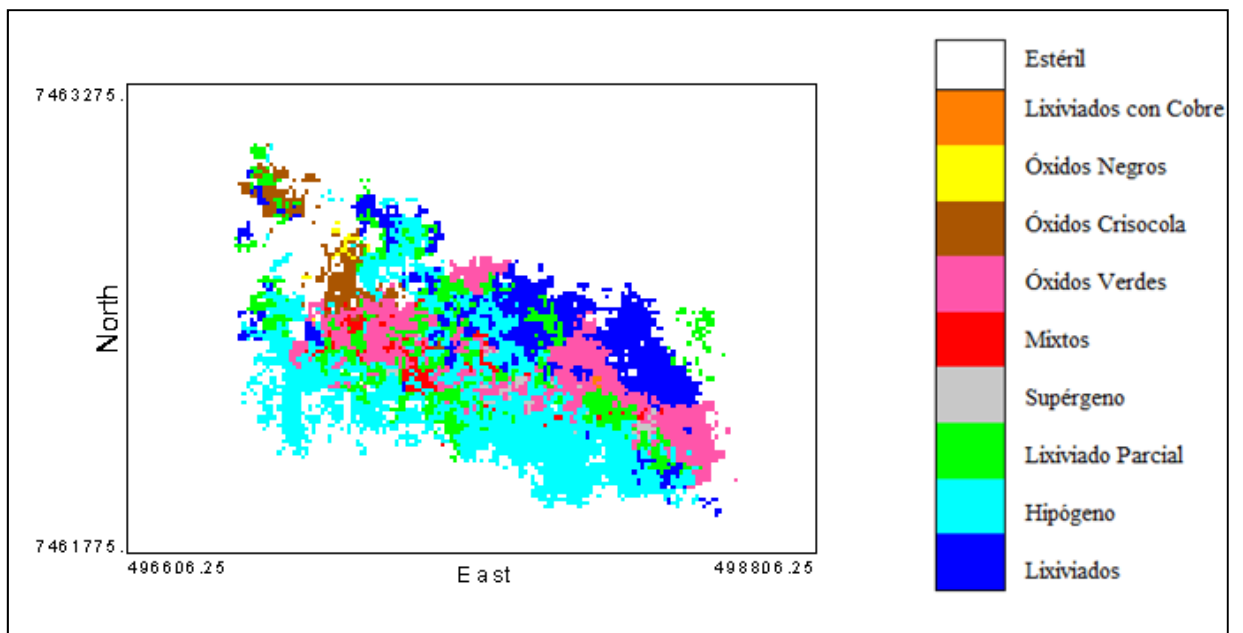


Figura 26: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°2. Vista Planta (Este-Norte)

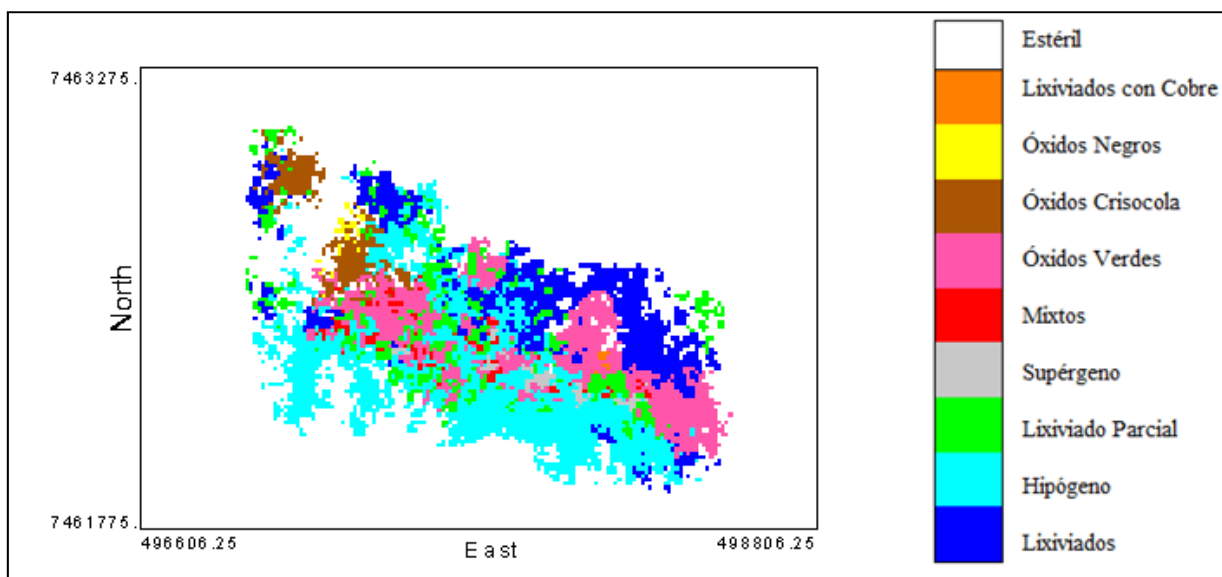


Figura 27: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°3. Vista Planta (Este-Norte)

Además se muestran las imágenes de perfiles Norte-Cota y Este-Cota para los mismos modelos.

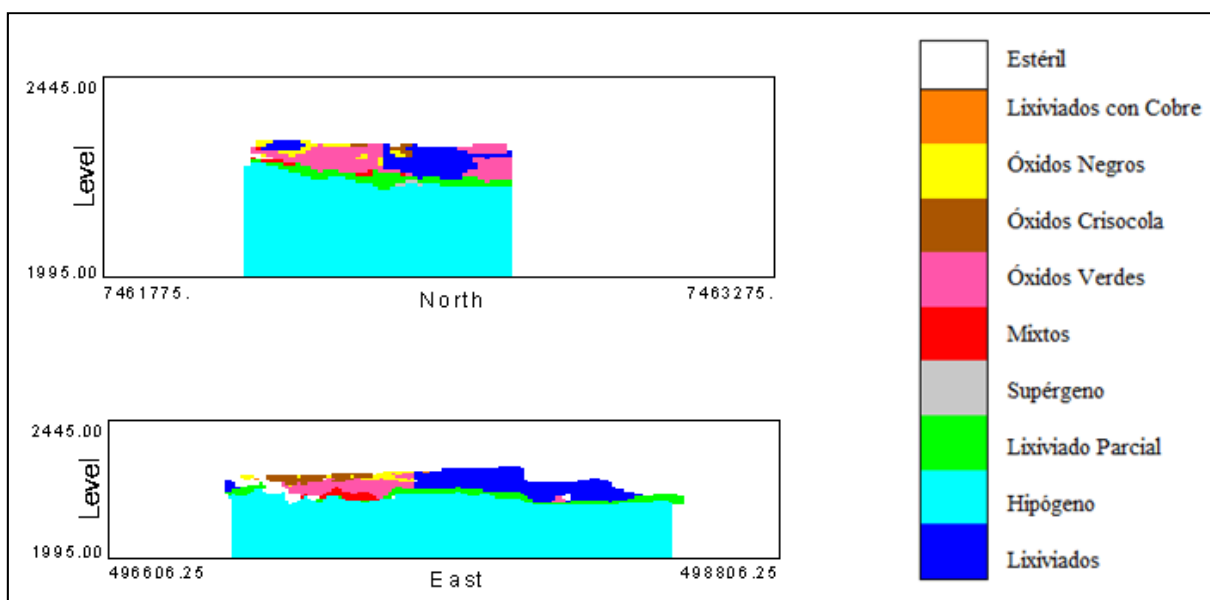


Figura 28: Modelo de Bloques determinístico. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)

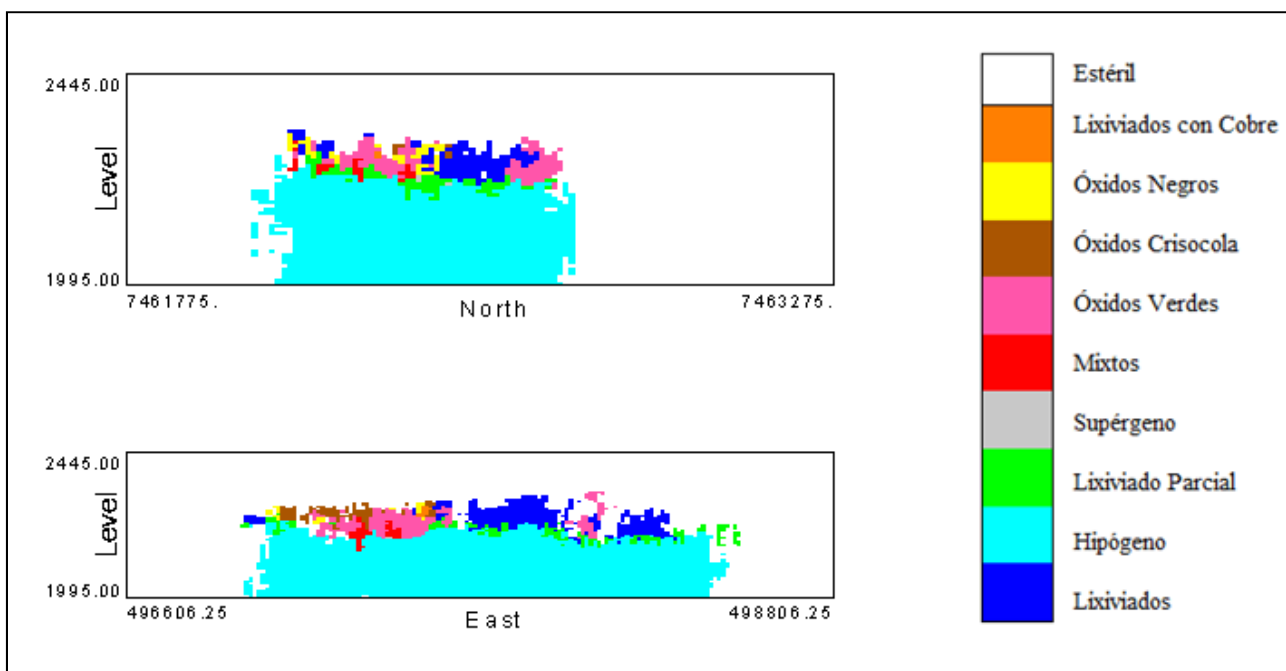


Figura 29: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°1. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)

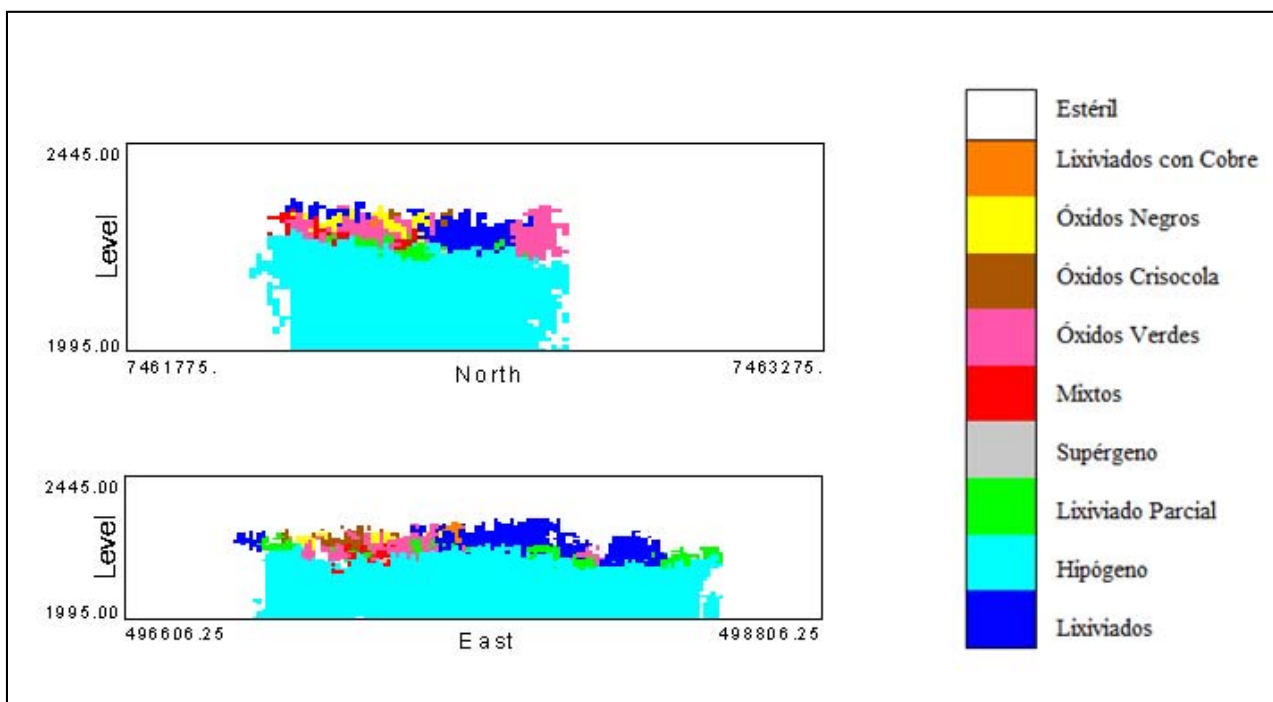


Figura 30 : Modelo de Bloques probabilístico, realización n°2. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)

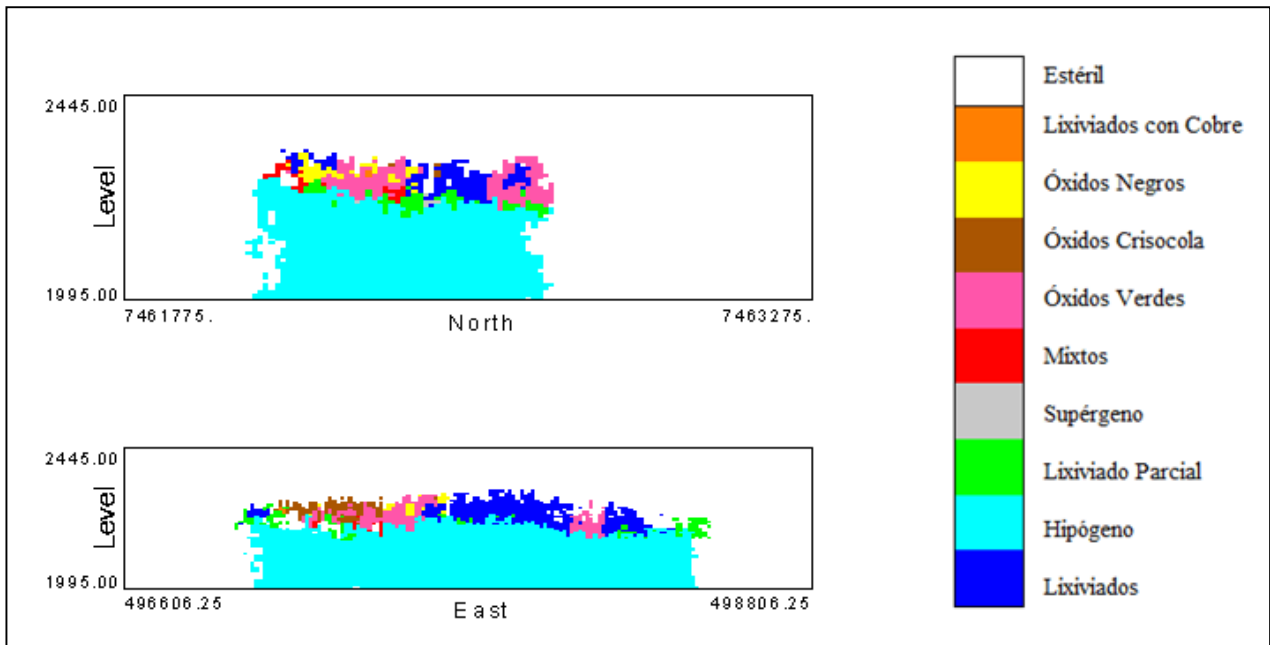


Figura 31: Modelo de Bloques probabilístico, realización n°3. Vista Perfiles (Norte-Cota y Este-Cota)

Lo primero que se realiza para determinar la coherencia entre las realizaciones creadas y el modelo interpretado es notar si existe relación entre la ubicación de los dominios, lo que se reproduce con bastante claridad en cada una de las realizaciones. Además es importante notar lo volátiles que se hacen los contactos entre las unidades geológicas. Esta volatilidad es posible reducirla disminuyendo la vecindad tomada, sin embargo visualmente estas realizaciones fueron validadas por los geólogos del proyecto.

Estas realizaciones reproducen además los datos de sondajes de la base de datos. A continuación se muestra la reproducción de las proporciones para todas las unidades geológicas.

Tabla 6: Validación simulaciones. Proporciones de unidades geológicas en las simulaciones.

Proporciones UG						
UG	Modelo Geológico	Sim1	Sim2	Sim3	Media total Simulaciones	Diferencia Media Sim vs. Modelo Geológico
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Estéril	62.50	63.25	63.05	62.98	62.68	0.28
Lixiviados	4.24	4.26	4.35	4.80	4.44	4.74
Hipógeno	23.24	22.29	22.71	22.60	22.82	1.79
Parcial Lixiviado	2.09	2.05	1.92	1.74	1.89	9.39
Supérgeno	0.27	0.27	0.35	0.36	0.30	11.14
Mixto	0.32	0.30	0.28	0.25	0.29	9.88
Óxidos Verdes	5.60	5.79	5.52	5.35	5.75	2.73
Óxidos Crisocola	1.22	1.16	1.14	1.23	1.18	3.83
Óxidos Negros	0.41	0.43	0.43	0.49	0.44	7.35
Lixiviados con Cu	0.11	0.19	0.26	0.21	0.20	83.92

Se aprecia que las diferencias entre la media de simulaciones (correspondiente al total de las simulaciones) y el modelo geológico no son significativas, exceptuando el dominio de Lixiviados con cobre, en donde hay una diferencia importante de casi 84%. Esto se debe a que ese dominio es demasiado pequeño en comparación a los restantes, y por lo tanto no es de mayor importancia. Para todos los demás dominios, las diferencias son muy poco significativas, por lo que las realizaciones se consideran correctas y no se aprecia sesgo.

4.5. Modelamiento de leyes

4.5.1 Análisis Variográfico

Por cada simulación de unidades geológicas se deben realizar dieciocho simulaciones de leyes, es decir, para cada uno de los nueve dominios hay que simular las leyes de cobre soluble y de cobre insoluble.

Lo primero que se realiza es tomar las bases de datos desagrupadas, separarlas por unidad geológica, y después dividir entre lo que es cobre soluble y cobre insoluble.

Para cada una de las bases de datos por separado se debe realizar la Anamorfosis Gaussiana. Los datos originales tienen un histograma asimétrico, el cual es incompatible con una distribución gaussiana y un modelo multigaussiano. Por este motivo, se requiere hacer una transformación de datos, para que

tengan una distribución gaussiana de media 0 y varianza 1 (aunque puede suponerse una varianza distinta, por ejemplo, asumiendo un modelo modificado con medio 0 y varianza 1.4).

Para esto se utiliza el programa “NSCORE” de GSLib, con el cual se obtiene un archivo con las coordenadas y los valores transformados gaussianos. Obteniendo lo anterior se pueden calcular los variogramas experimentales a través del programa “GAMV” de GSLib.

Se utilizan los siguientes parámetros:

Tabla 7: Parámetros de cálculo de variogramas experimentales.

	Acimut	Tolerancia Angular	Dip	Tolerancia Dip	Número de Pasos	Largo de Paso [m]
Dirección Horizontal	0°	90°	0°	22.5°	40	4
Dirección Vertical	0°	90°	90°	22.5°	40	4

A continuación se muestran algunos de los variogramas experimentales de datos gaussianos para algunas unidades geológicas en particular. Además de los variogramas experimentales, se despliegan los variogramas modelados. Al igual que en el caso anterior, se utilizan los modelos anidados esféricos y exponenciales. El color azul representa la dirección vertical y el negro la dirección horizontal.

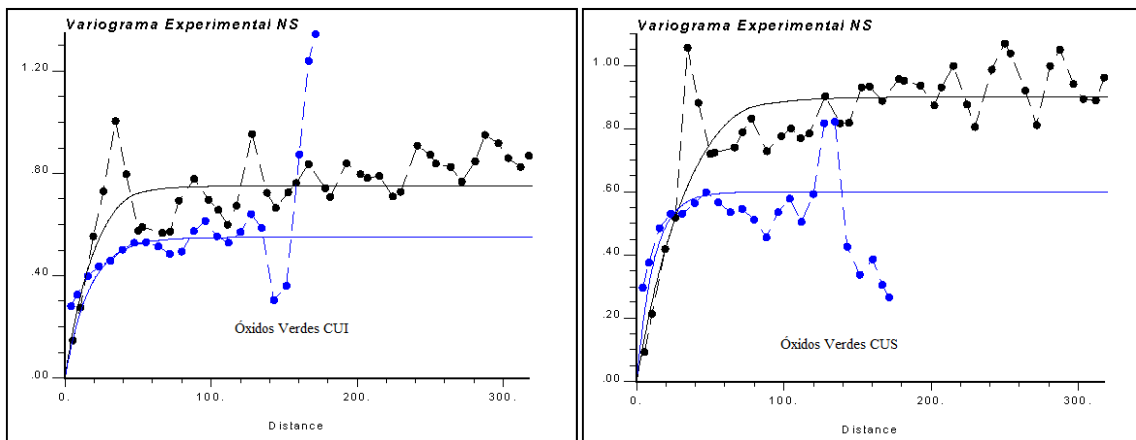


Figura 32: Variogramas experimentales y modelados para óxidos verdes (Cobre insoluble y cobre soluble).

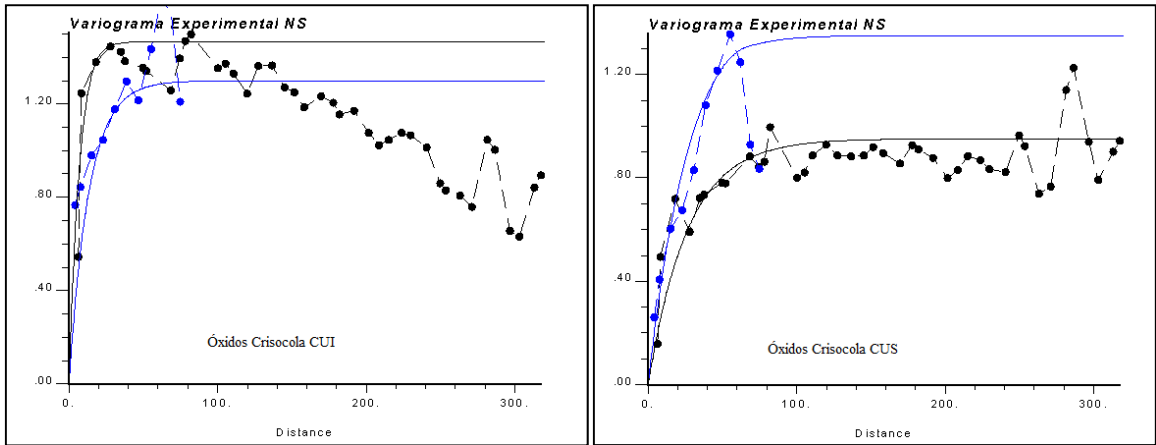


Figura 33: Variogramas experimentales y modelados para óxidos crisocola (Cobre insoluble y cobre soluble).

Las simulaciones de leyes se hacen para un soporte puntual, en donde los puntos están a una distancia de 6.25 metros entre sí para las direcciones este-oeste y norte-sur y a una distancia de 3.75 metros para la cota. Se utiliza este soporte para dar más detalle a las simulaciones. Una vez obtenidos los modelos se hace un rebloqueo a bloques de dimensiones de 12.5 x 12.5 x 7.5 metros como se tiene para el modelo determinístico de unidades geológicas.

A continuación se despliegan imágenes para soporte puntual de simulaciones para distintas unidades geológicas. Hay que tener presente que cada imagen asume que todo el yacimiento pertenece a esta unidad.

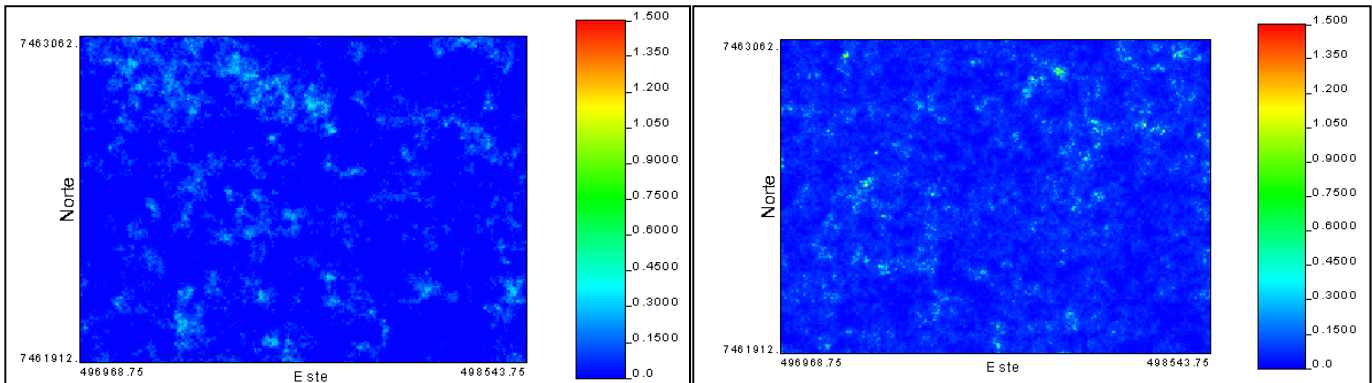


Figura 34: Modelos de leyes puntuales para unidad geológica Lixiviados. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble

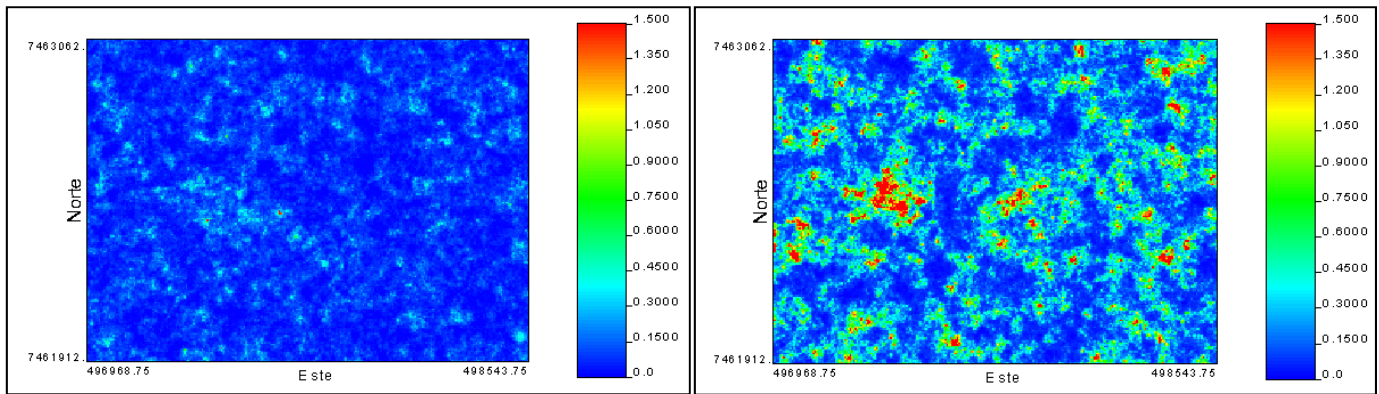


Figura 35: Modelos de leyes puntuales para unidad geológica Óxidos Verdes. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble

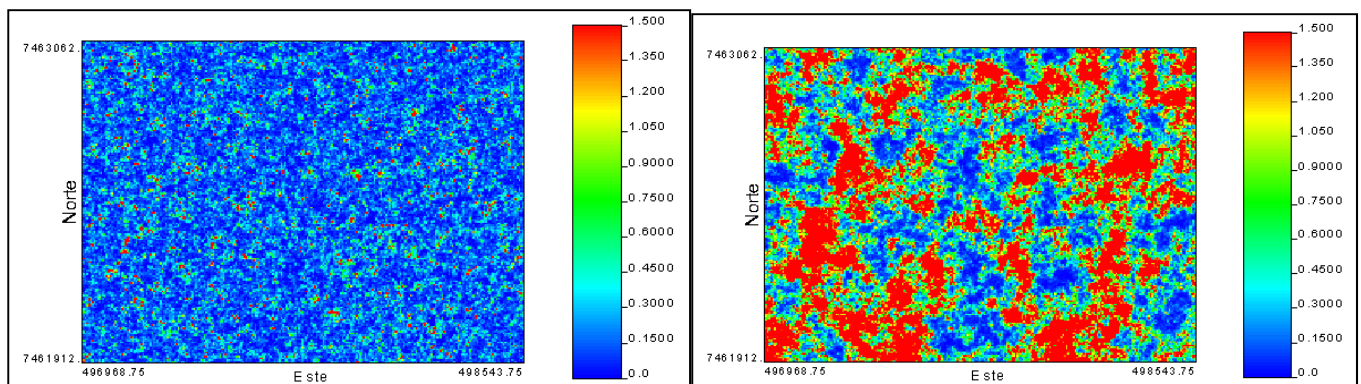


Figura 36: Modelos de leyes puntuales para unidad geológica Óxidos Crisocola. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble

Es posible apreciar que para el cobre insoluble se tienen leyes bastantes más bajas que para el cobre soluble. Esto dado que el cobre soluble es bastante similar al cobre total (cercano al 94%). También es bastante notoria la diferencia existente para las distintas unidades geológicas, ya que para los óxidos crisocola las leyes de cobre soluble son altas, en contraste con lo que sucede para el modelo simulado de minerales lixiviados en que las leyes son cercanas a cero en todo el yacimiento.

El siguiente paso se hace mediante el programa "Blkavg" de GSlib, el cual realiza el rebloqueo a paralelepípedos de dimensiones de 12.5 x 12.5 x 7.5 metros, mismo soporte que el modelo geológico proporcionado. De este modo se obtienen las siguientes imágenes.

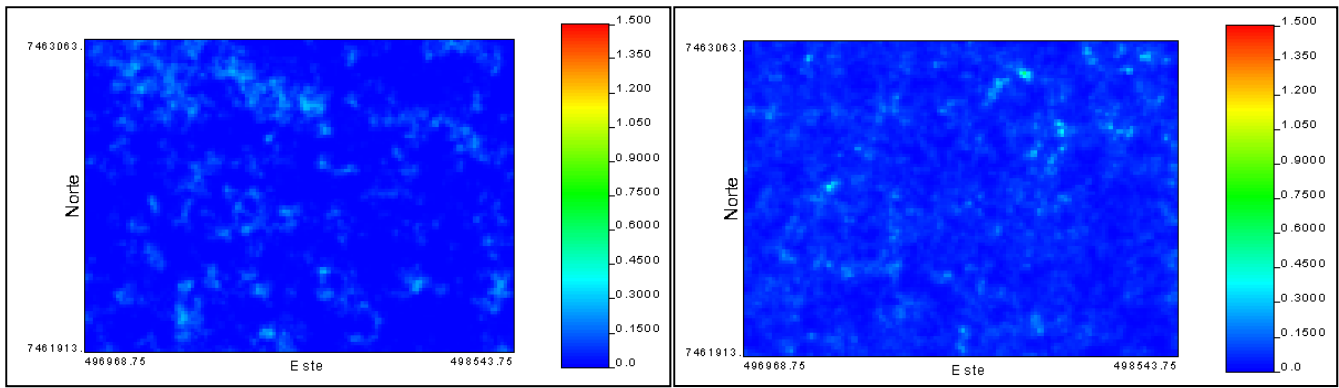


Figura 37: Modelos de leyes rebloqueadas para unidad geológica Lixiviados. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble.

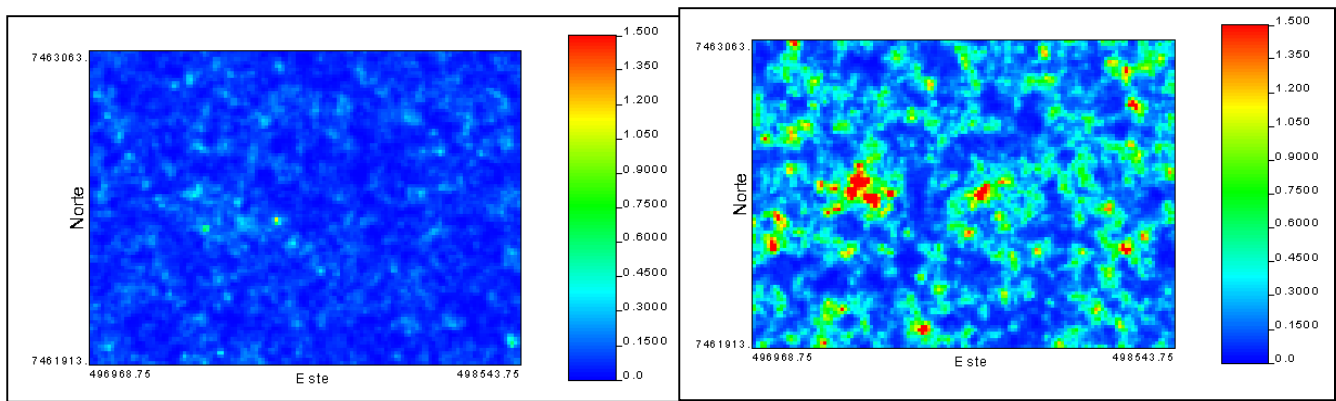


Figura 38: Modelos de leyes rebloqueadas para unidad geológica Óxidos Verdes. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble.

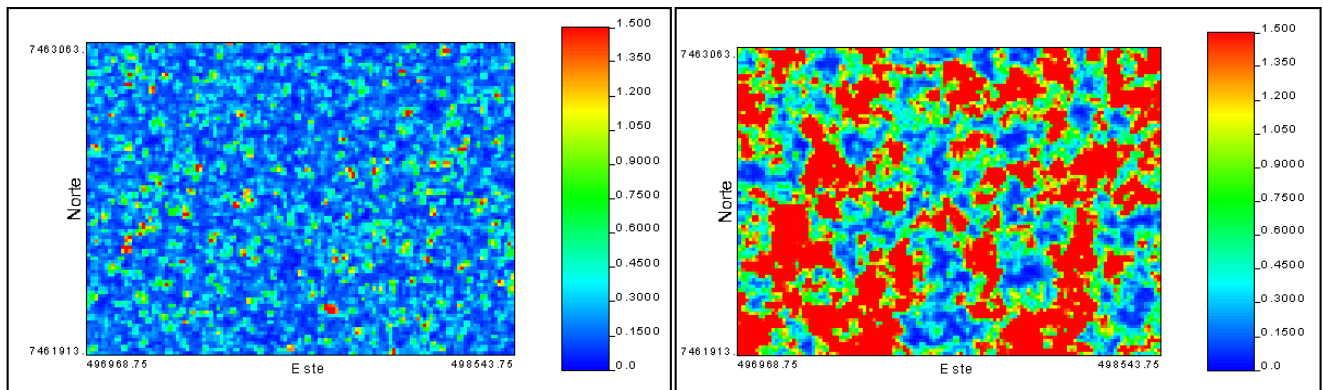


Figura 39: Modelos de leyes rebloqueadas para unidad geológica Óxidos Crisocola. Vistas en Planta Cobre insoluble y Soluble.

Se nota cierto suavizamiento de los mapas al pasar a bloques de mayor tamaño, lo que es lógico considerando que un aumento de soporte hace que la dispersión disminuya, dado que se toma promedios de datos reduciéndose valores extremos.

Para tener simulaciones con unidades geológicas, cobre total y cobre soluble, se realizó un programa simple en el software “Matlab” (ver Anexos) que toma una simulación de unidades geológicas y en cada bloque simulado, toma el código de este dominio y busca entre todas las bases de datos (de leyes por dominio) a cuál dominio corresponde, obteniéndose la ley que hay en la misma ubicación. Esto lo realiza para el cobre soluble y cobre insoluble.

Además se realizó un programa (Anexos) para hacer el cambio de variable inverso, dado que ya están simulados el cobre soluble y cobre insoluble se puede obtener el cobre total como la suma de estos $CuT = CuS + CuI$.

Así se obtienen once bases de datos de modelos de bloques simulados para unidades geológicas, cobre total y cobre soluble.

A continuación se despliegan algunas imágenes de vistas en planta y perfiles de tres simulaciones, además de las imágenes del promedio y del Kriging (el cual está incompleto, pero abarca las zonas de mayor interés).

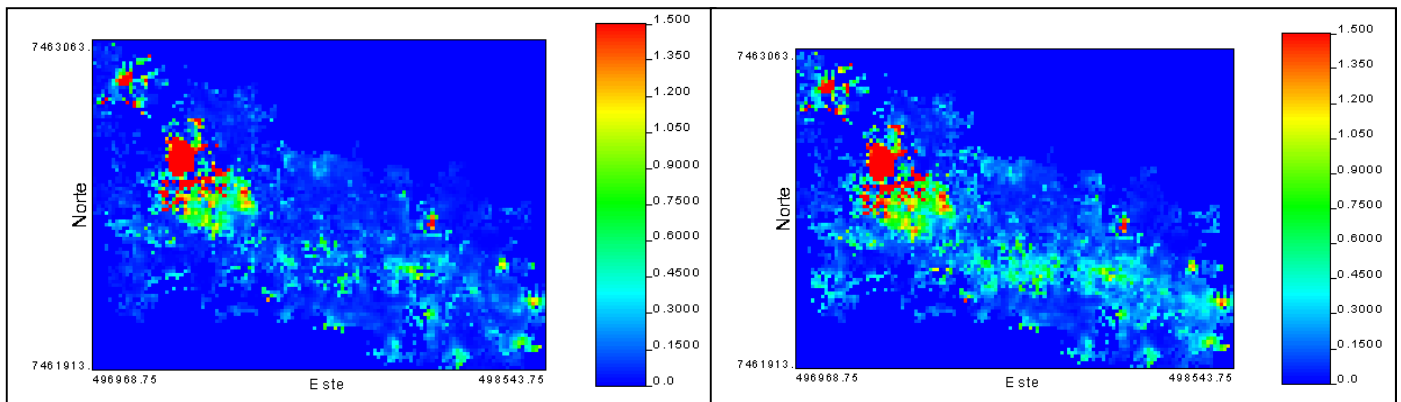


Figura 40: Modelos de bloques simulados (Sim1). Vistas en Planta, cobre soluble y total.

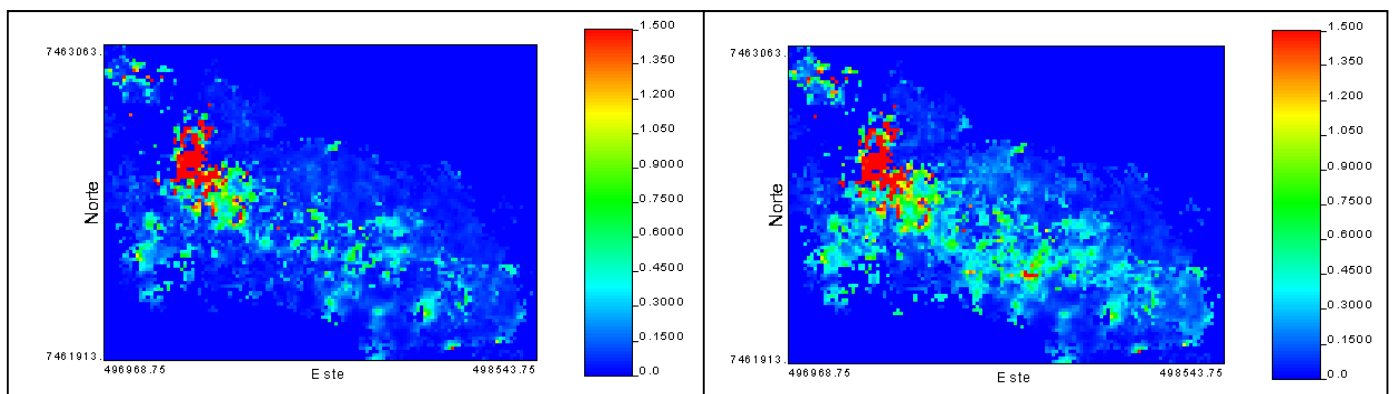


Figura 41: Modelos de bloques simulados (Sim2). Vistas en Planta, cobre soluble y total.

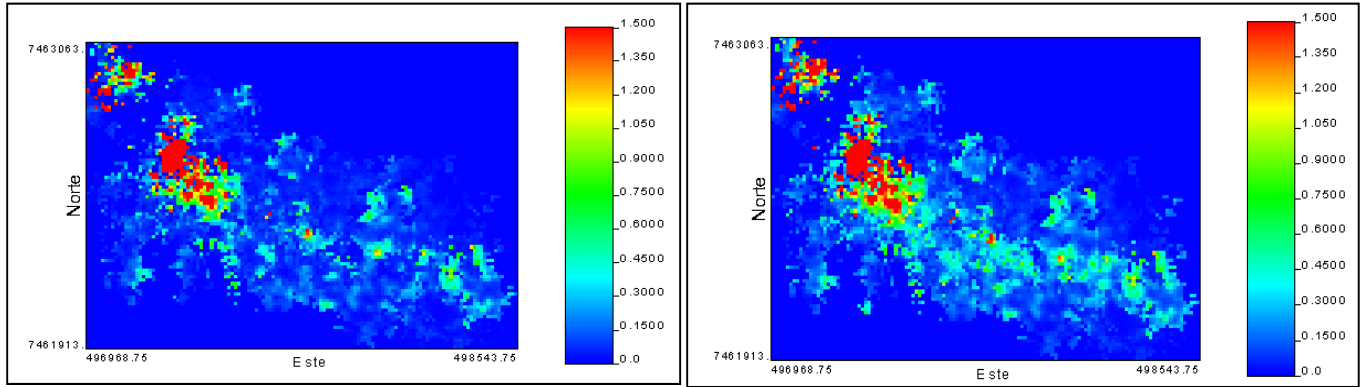


Figura 42: Modelos de bloques simulados (Sim3). Vistas en Planta, cobre soluble y total.

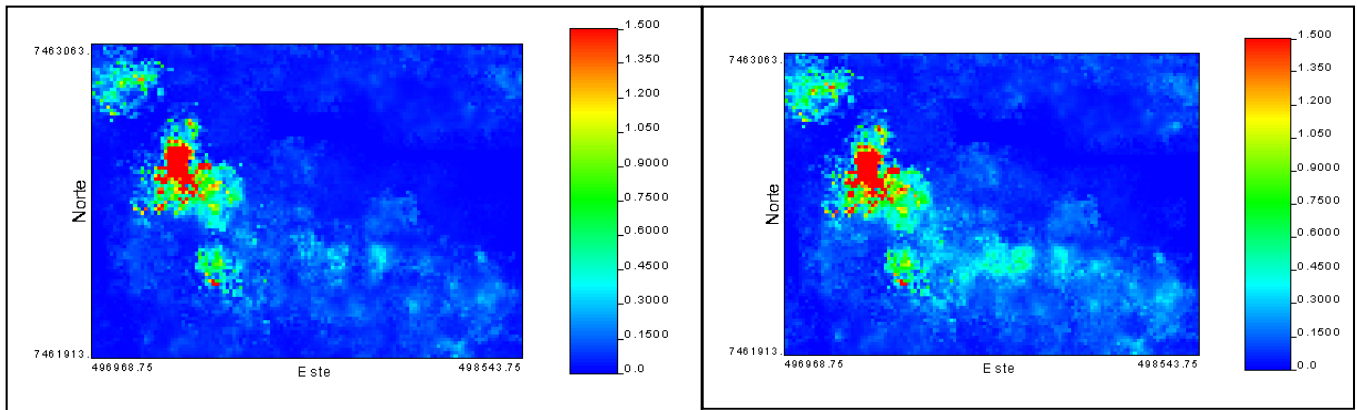


Figura 43: Promedio Simulaciones. Vistas en Planta, cobre soluble y total.

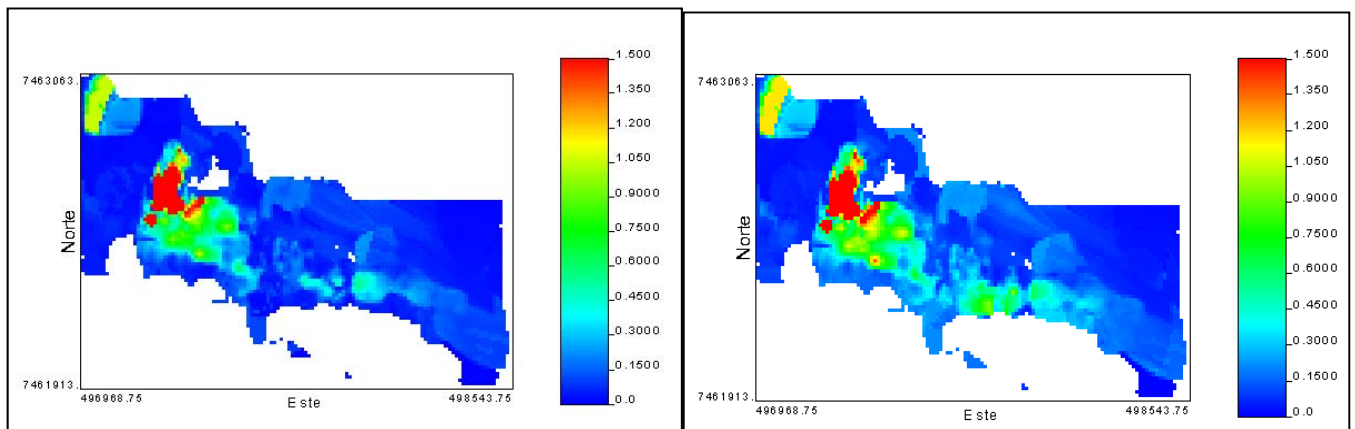


Figura 44: Vistas Kriging. Vistas en Planta, cobre soluble y total.

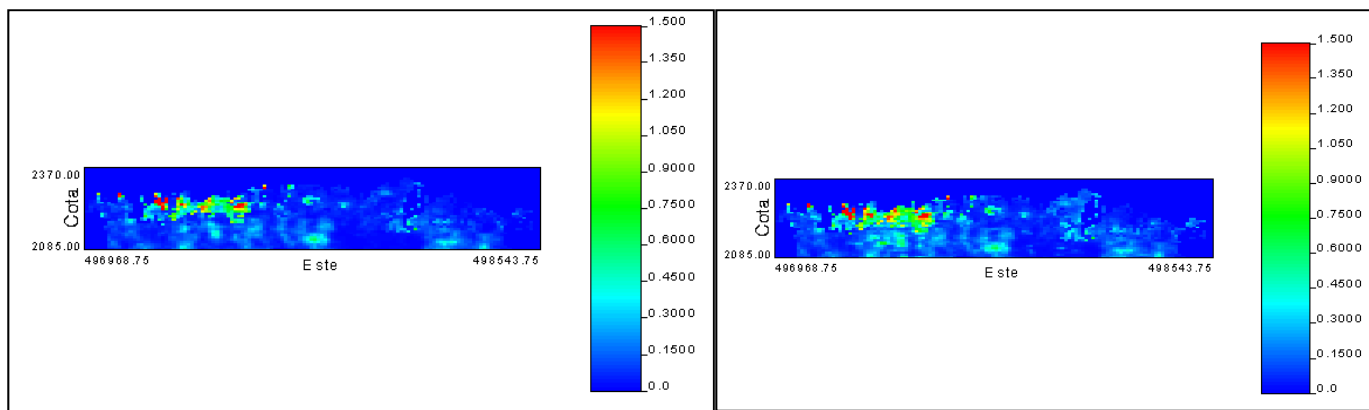


Figura 45: Modelos de bloques simulados (Sim1). Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.

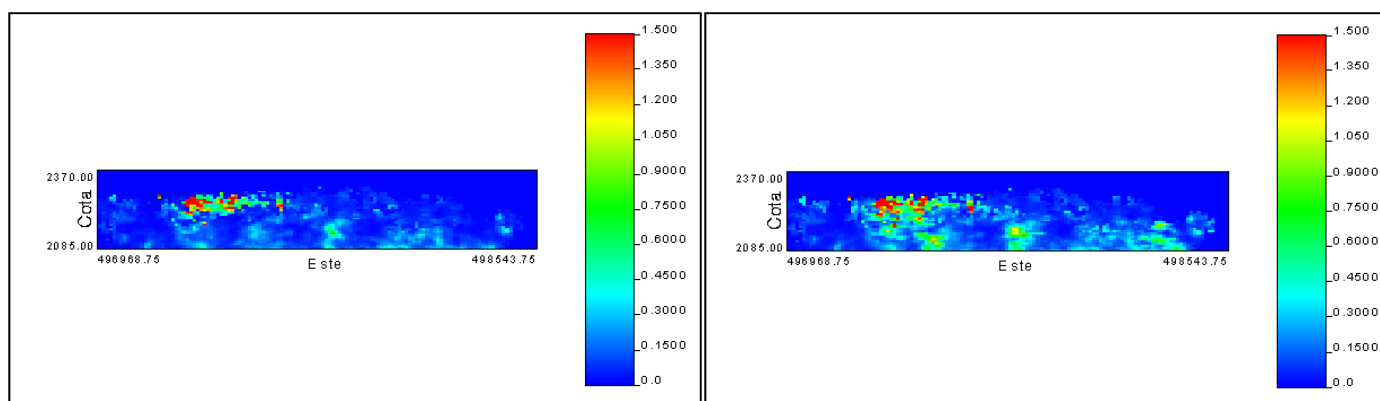


Figura 46: Modelos de bloques simulados (Sim2). Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.

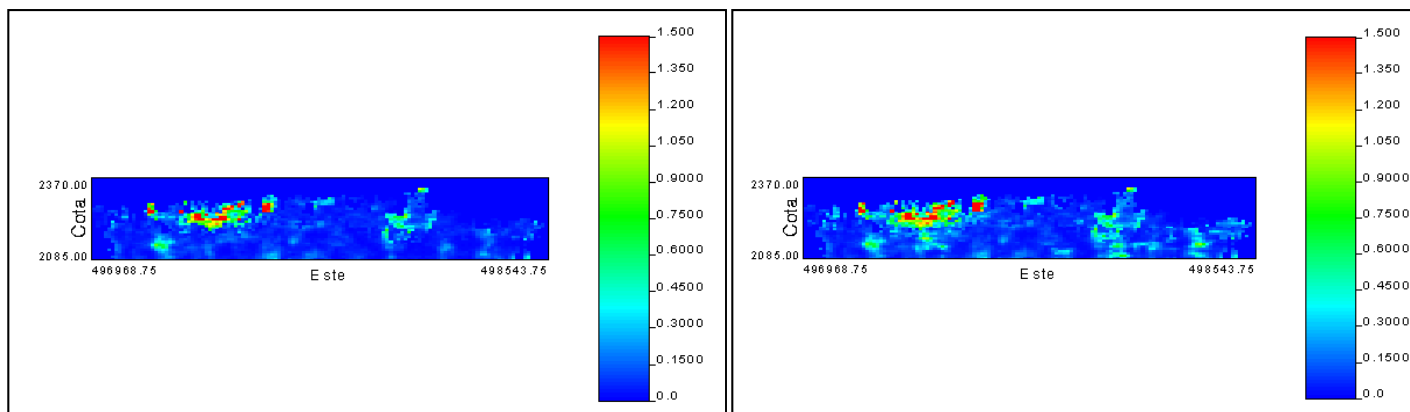


Figura 47: Modelos de bloques simulados (Sim3). Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.

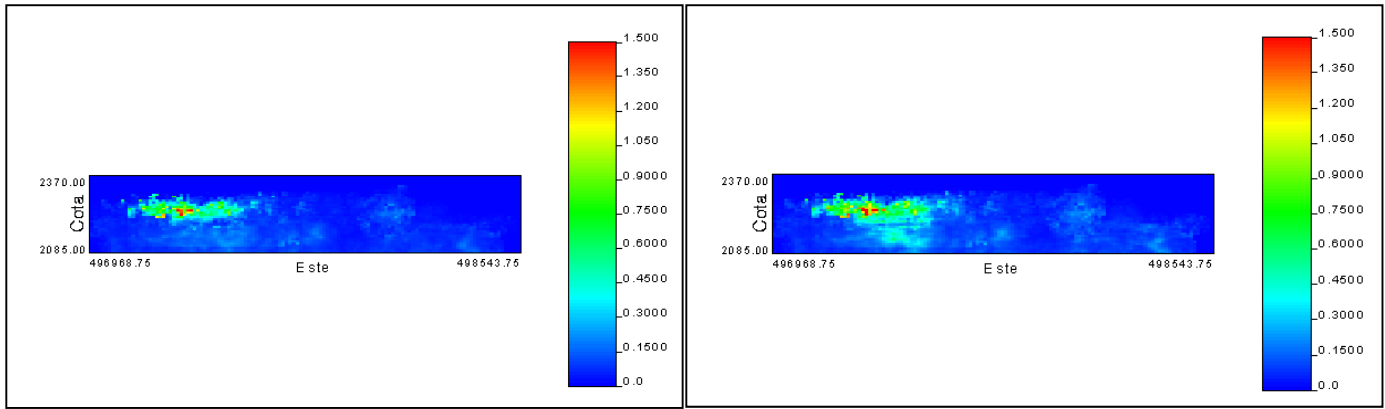


Figura 48: Promedio Simulaciones. Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.

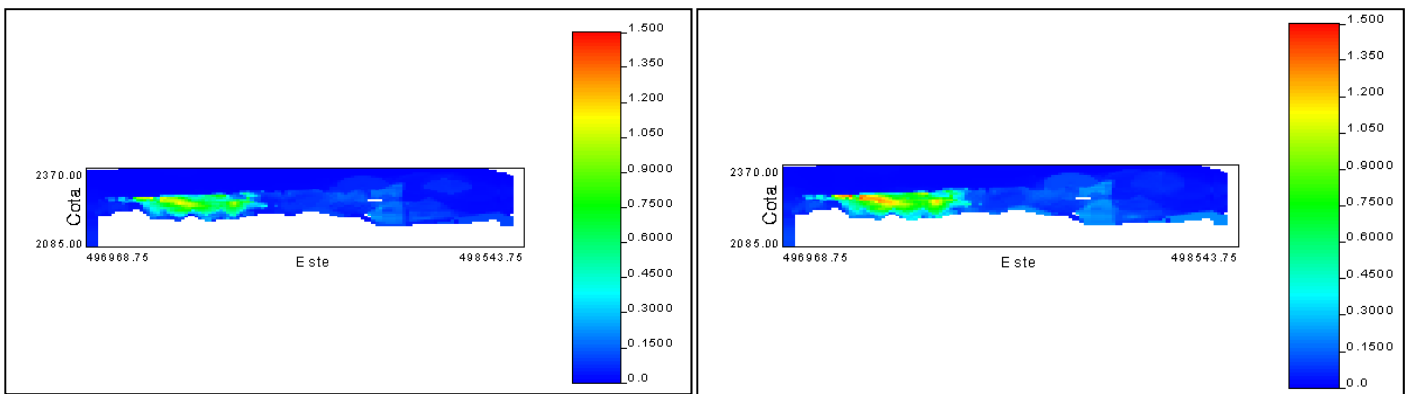


Figura 49: Vistas Kriging. Vistas Perfil Este-Cota, cobre soluble y total.

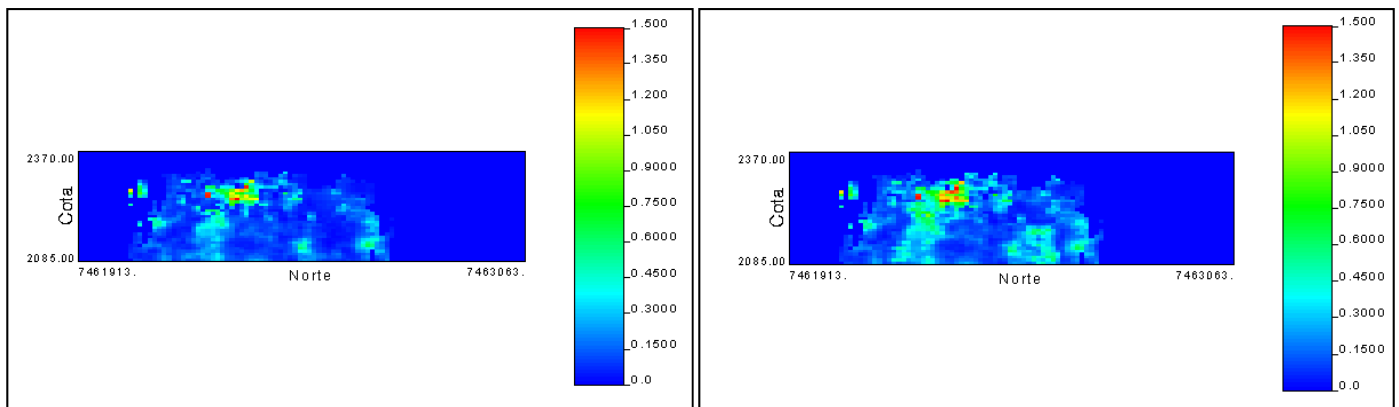


Figura 50: Modelos de bloques simulados (Sim1). Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.

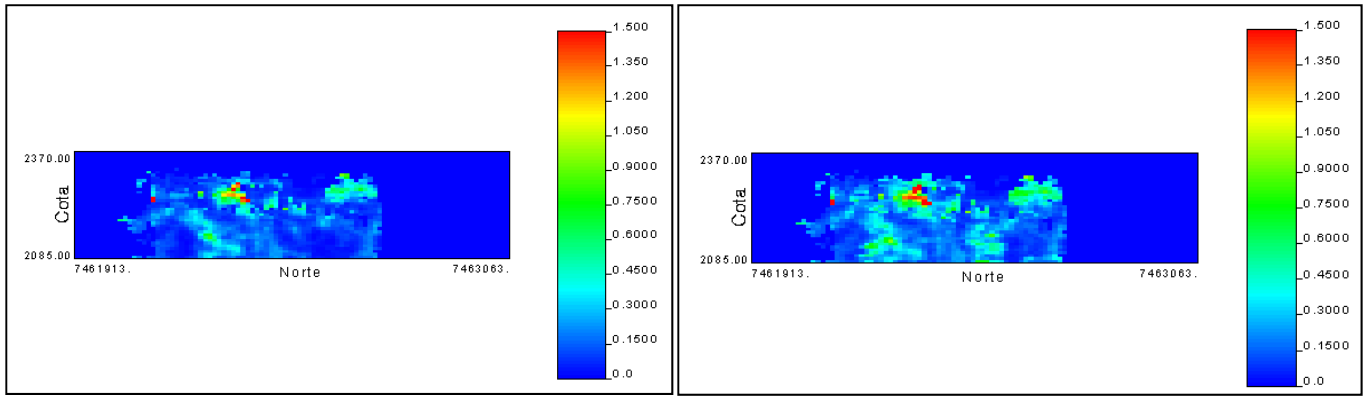


Figura 51: Modelos de bloques simulados (Sim2). Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.

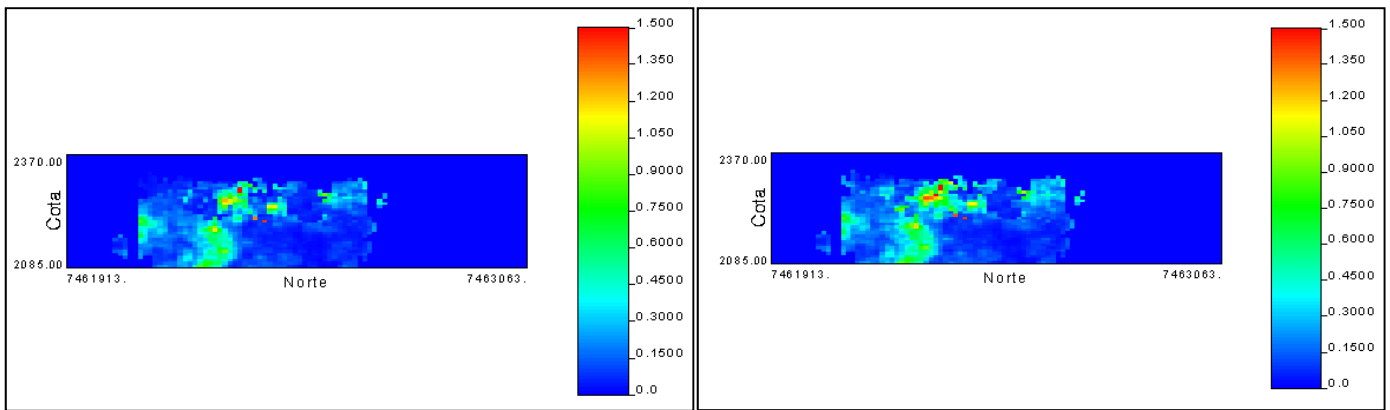


Figura 52: Modelos de bloques simulados (Sim3). Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.

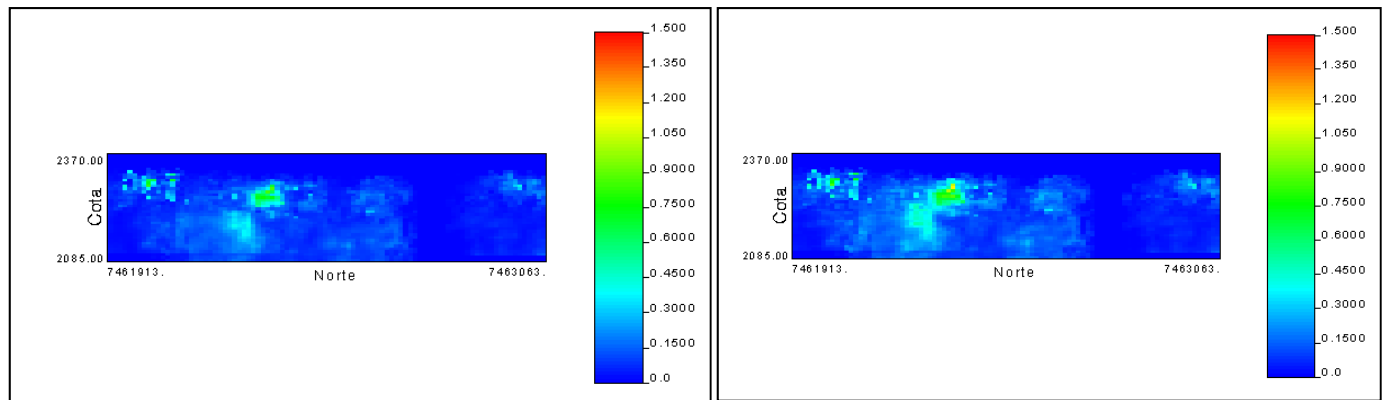


Figura 53: Promedio Simulaciones. Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.

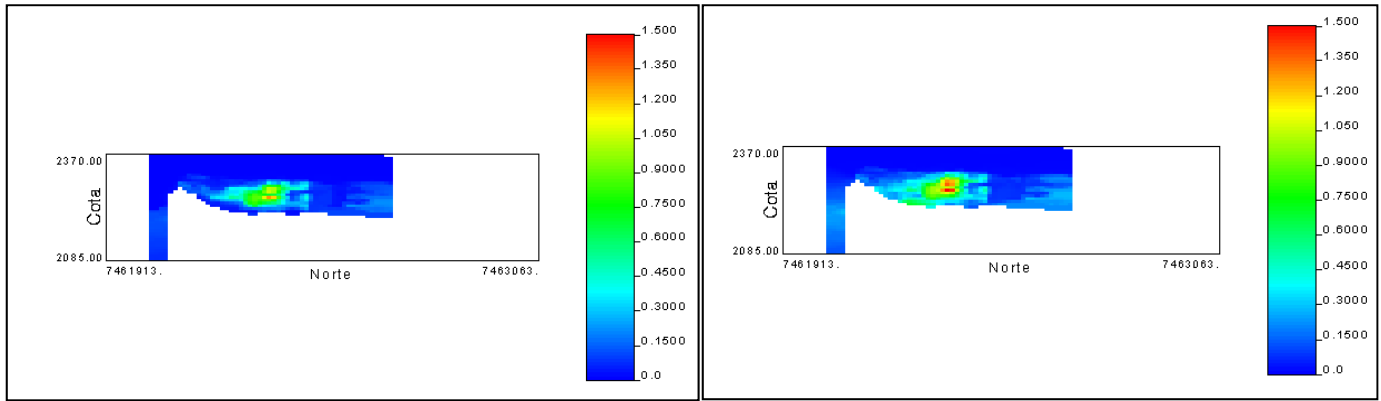


Figura 54: Vistas Kriging. Vistas Perfil Norte-Cota, cobre soluble y total.

Los modelos son concordantes entre sí respecto a las zonas de altas leyes, dado que corresponden es su mayoría a las zonas de óxidos. Además los promedios para las simulaciones no difieren mucho de lo que es el Kriging, aunque este sea bastante más suave, esto se debe en parte al haber realizado solamente 11 simulaciones; se obtendría un mayor suavizamiento al promediar un mayor número de simulaciones.

Se realiza la validación de datos para todas las simulaciones, además de desplegarse los histogramas.

Tabla 8: Validación de Simulaciones respecto a Sondajes desagrupados. Caso cobre soluble.

Leyes medias de CuS						
UG	Sondajes Desagrupados	Sim1	Sim2	Sim3	Media Simulaciones	Diferencia Sondajes/Simulaciones
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Estéril	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	* No se simuló
Lixiviados	0.13	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08
Hipógeno	0.03	0.12	0.13	0.13	0.13	0.10
Parcial Lixiviado	0.16	0.07	0.06	0.07	0.06	0.09
Supérgeno	0.04	0.10	0.06	0.09	0.08	0.04
Mixto	0.19	0.22	0.22	0.21	0.22	0.04
Óxidos Verdes	0.28	0.26	0.26	0.28	0.27	0.00
Óxidos Crisocola	1.42	1.57	1.72	2.09	1.95	0.52
Óxidos Negros	0.15	0.15	0.18	0.17	0.17	0.02
Lixiviados con Cu	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.01

Tabla 9: Validación de Simulaciones respecto a Sondajes desagrupados. Caso cobre total.

UG	Leyes medias de Cut					
	Sondajes Desagrupados	Sim1	Sim2	Sim3	Media Simulaciones	Diferencia Sondajes/Simulaciones
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Estéril	0.19	0	0	0	0	* No se simuló
Lixiviados	0.26	0.08	0.08	0.08	0.08	0.17
Hipógeno	0.41	0.16	0.18	0.16	0.16	0.25
Parcial Lixiviado	0.25	0.18	0.16	0.17	0.18	0.07
Supérgeno	0.34	0.33	0.31	0.34	0.34	0
Mixto	0.33	0.35	0.38	0.35	0.37	0.04
Óxidos Verdes	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35	0
Óxidos Crisocola	1.58	1.82	1.97	2.36	2.2	0.62
Óxidos Negros	0.32	0.3	0.34	0.33	0.33	0.01
Lixiviados con Cu	0.2	0.18	0.17	0.18	0.18	0.03

La mayor diferencia de leyes entre los sondajes desagrupados y la media de las simulaciones está dada para los óxidos crisocola. Sin embargo la diferencia porcentual no es tan significativa. Esto se debe a la variabilidad de leyes presente en este dominio. Para las otras unidades geológicas las diferencias no son relevantes, teniéndose como excepción sólo las leyes para mineral hipógeno, lo que se explica por la falta de muestreo a esa profundidad (sondajes poco profundos).

Dado que el modelo de kriging se encuentra incompleto, considerando que solo tiene los valores de leyes para 154.046 de los 440.960 bloques del modelo (35%), se selecciona en las simulaciones sólo los bloques que se encuentren en las mismas ubicaciones que aquellos con información de kriging. Se realiza así la validación.

Tabla 10: Validación de Simulaciones respecto al modelo de Kriging. Casos cobre soluble y total.

UG	Leyes medias de CuS			Leyes medias de CuT		
	Media Simulaciones	Kriging	Diferencia	Media Simulaciones	Kriging	Diferencia
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Estéril	0.05	0.02	0.03	0.06	0.03	0.04
Lixiviados	0.08	0.06	0.02	0.11	0.08	0.03
Hipógeno	0.11	0.06	0.05	0.17	0.16	0.01
Parcial Lixiviado	0.10	0.07	0.03	0.19	0.18	0.01
Supérgeno	0.08	0.06	0.02	0.22	0.34	0.11
Mixto	0.20	0.20	0.00	0.30	0.30	0.00
Óxidos Verdes	0.19	0.24	0.05	0.25	0.29	0.04
Óxidos Crisocola	1.35	1.49	0.14	1.50	1.65	0.15
Óxidos Negros	0.23	0.17	0.06	0.35	0.32	0.03
Lixiviados con Cu	0.10	0.07	0.03	0.19	0.14	0.04

Las diferencias entre las medias de simulaciones y el kriging son pequeñas, por lo tanto se considera que las simulaciones son insesgadas.

A continuación se presentan los histogramas de los sondajes, simulaciones y kriging para las zonas minerales económicamente más atractivas.

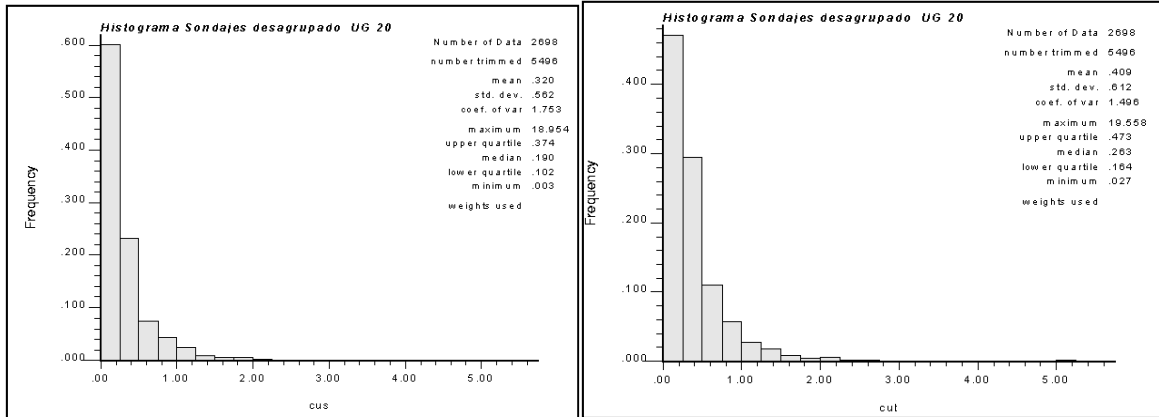


Figura 55: Histogramas Sondajes desagrupados. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.

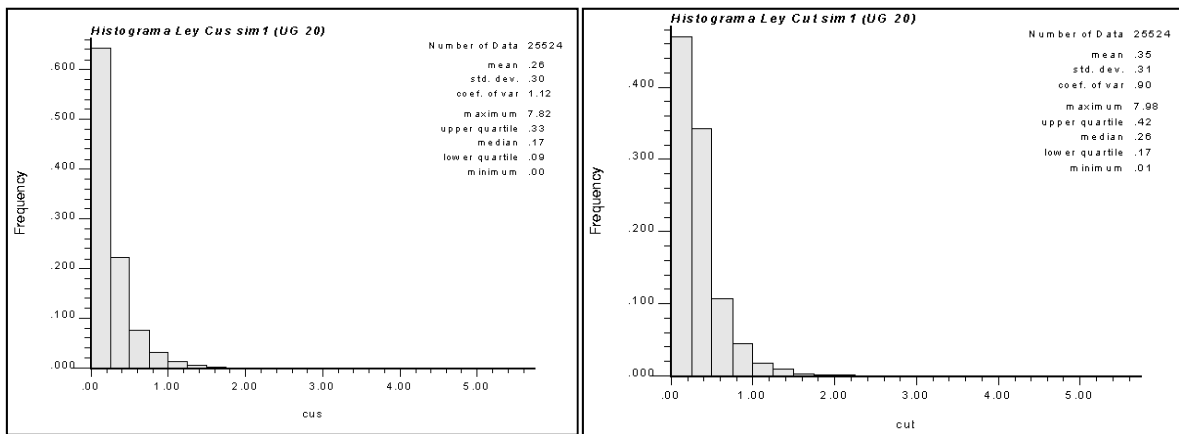


Figura 56: Histogramas simulación 1. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.

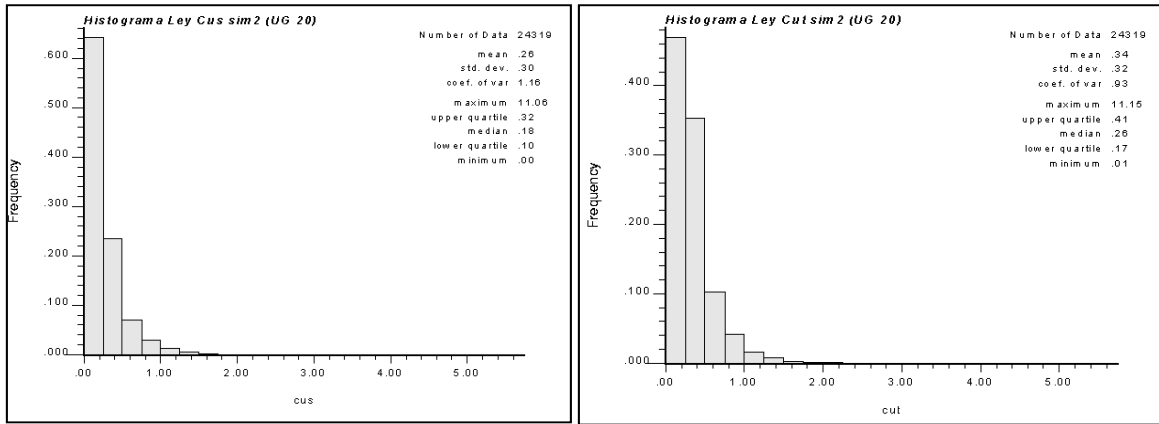


Figura 57: Histogramas simulación 2. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.

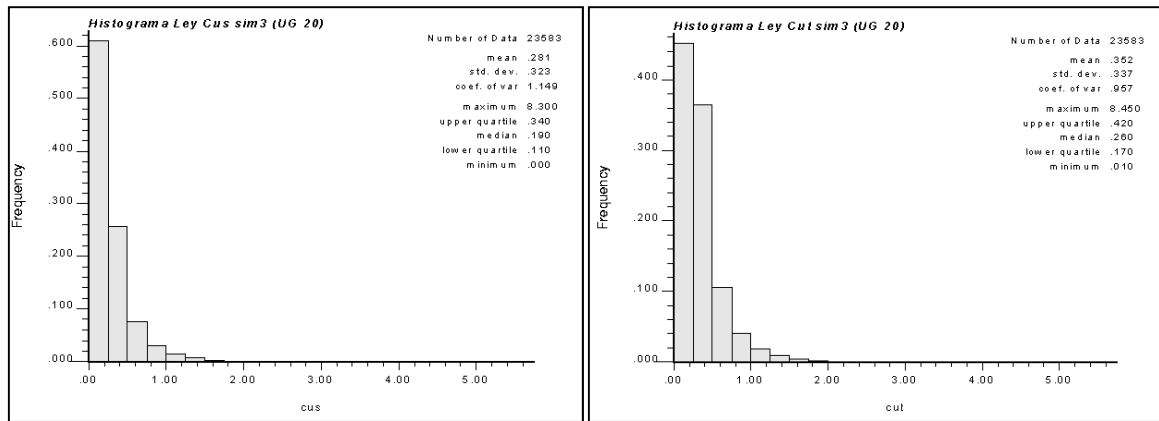


Figura 58: Histogramas simulación 3. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Verdes.

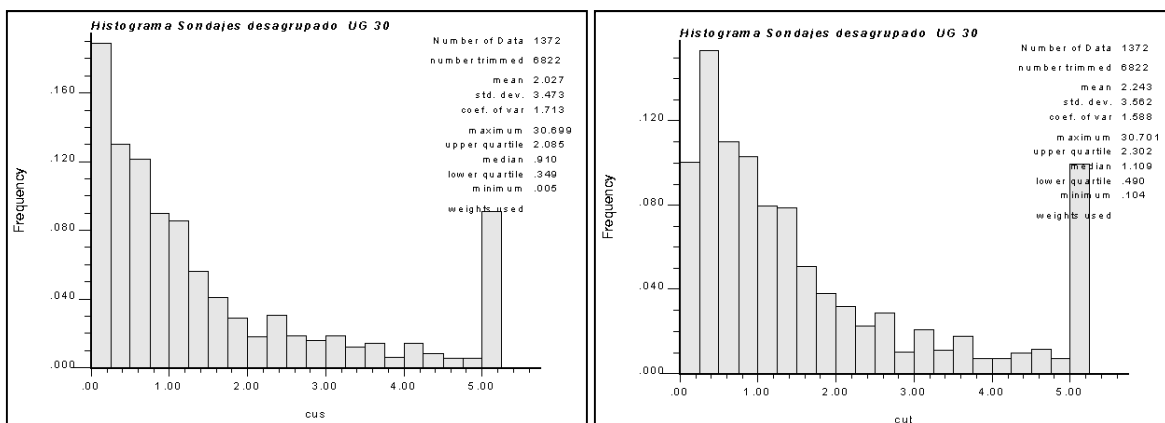


Figura 59: Histogramas Sondeos desagrupados. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.

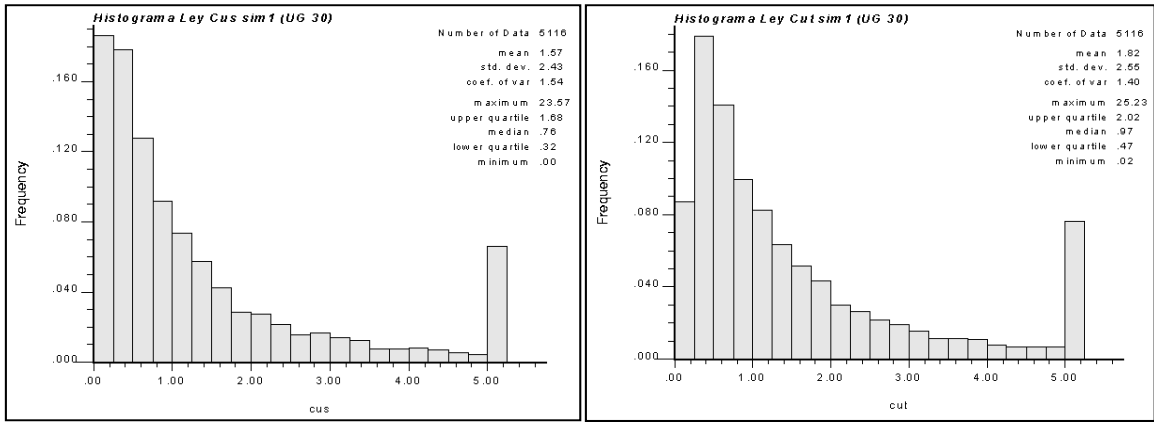


Figura 60: Histogramas simulación 1. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.

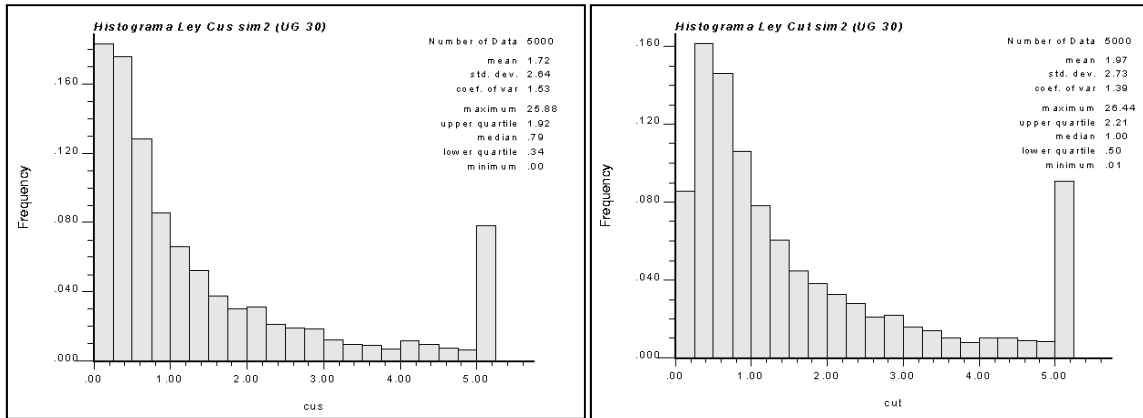


Figura 61: Histogramas simulación 2. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.

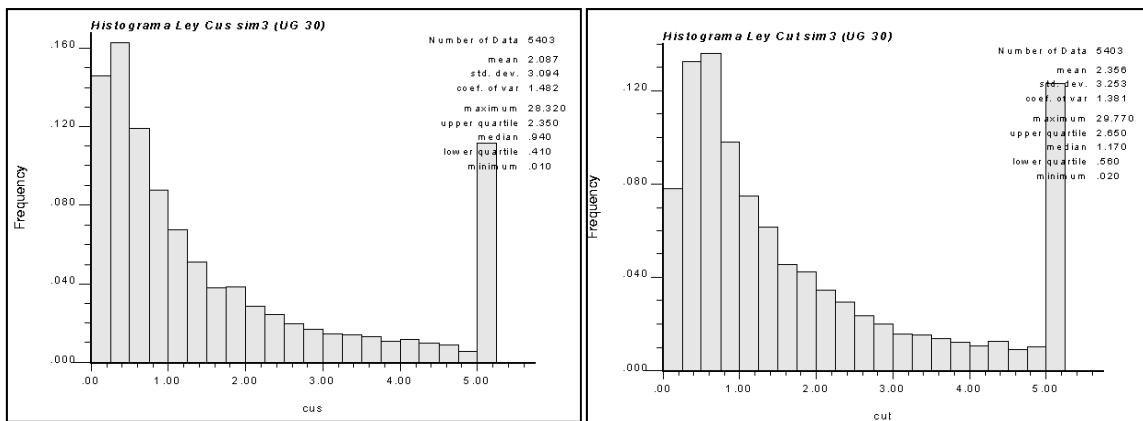


Figura 62: Histogramas simulación 3. Cobre soluble y cobre total, Óxidos Crisocola.

Los histogramas de simulaciones se asemejan bastante a los de sondajes en cuanto a su forma y rango. Si bien existen pequeñas diferencias de suavizamiento, estas se explican por el cambio de soporte puntual a bloques. Además se reproducen las leyes altas de manera similar a lo que fueron muestreadas. Se impuso que la máxima ley entregada por las simulaciones fuera mayor o igual al máximo valor de ley de sondaje para esa unidad geológica, sin embargo dado que el soporte es distinto, es muy difícil que un bloque refleje una ley tan alta como un compósito.

4.6. Procesamiento de resultados

Como se obtienen once realizaciones distintas es posible ponerse en cada uno de estos escenarios y ver cuáles son los tonelajes y leyes medias, determinar los casos más y menos favorables y obtener un rango en el que se encuentre cada una de estas variables. Es de bastante utilidad desplegar las curvas tonelaje ley para ver cuáles son los recursos una vez definidas las leyes de corte. A continuación se muestran las curvas para las once simulaciones en celeste, además de los promedios en rojo para el total del yacimiento y también considerando sólo las zonas minerales más interesantes. Dada su mayor relevancia, sólo se tomará la variable cobre soluble.

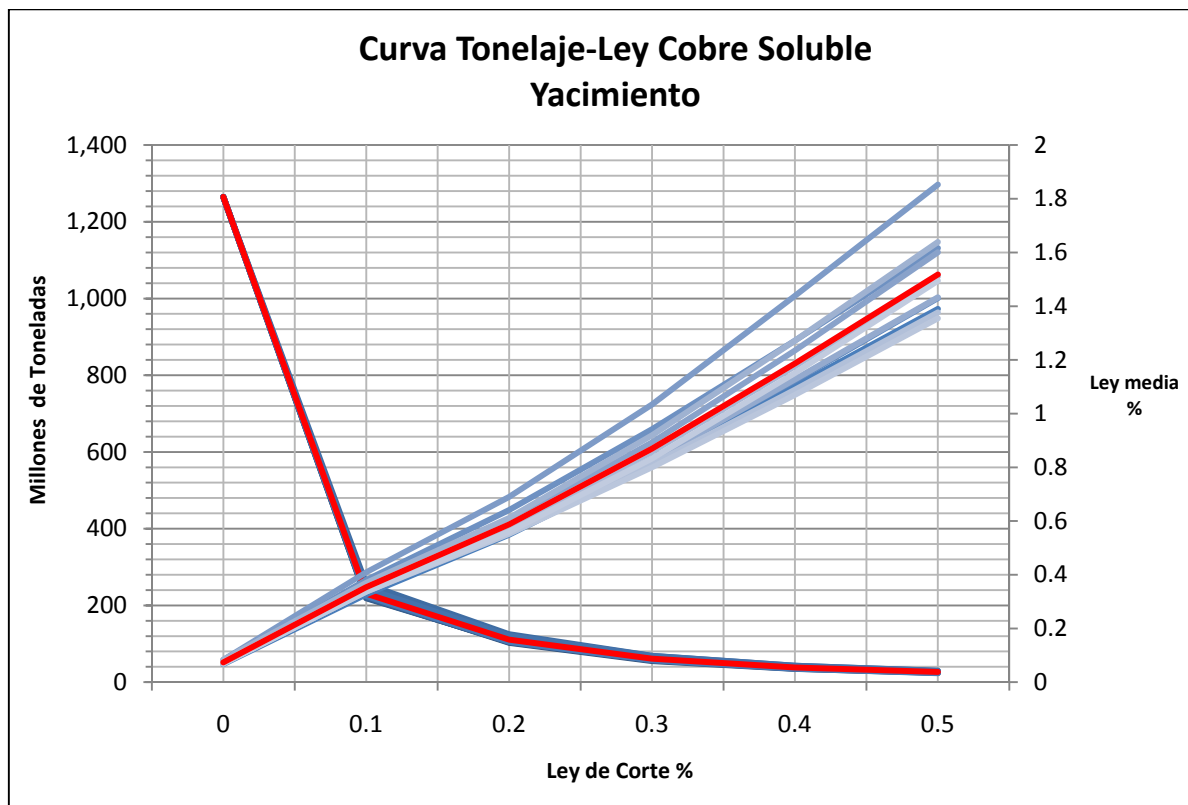


Figura 63: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para todo el yacimiento.

Así mismo se obtienen los siguientes rangos de tonelaje, leyes medias y cantidad de fino:

Tabla 11: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Total del yacimiento, caso CuS.

	Leyes de Corte [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje Máximo [Mton]	1,264	255	125	68	42	29
Tonelaje Mínimo [Mton]	1,264	218	102	55	34	23
Tonelaje Promedio [Mton]	1,264	230	110	61	38	26
Lm Máximo [%]	0.08	0.41	0.69	1.03	1.44	1.85
Lm Mínimo [%]	0.07	0.33	0.55	0.80	1.07	1.36
Lm Promedio [%]	0.07	0.35	0.59	0.87	1.19	1.52
Fino Máximo [Kton]	1,062	945	772	656	576	524
Fino Mínimo [Kton]	847	727	561	449	379	334
Fino Promedio [Kton]	933	815	651	532	455	403

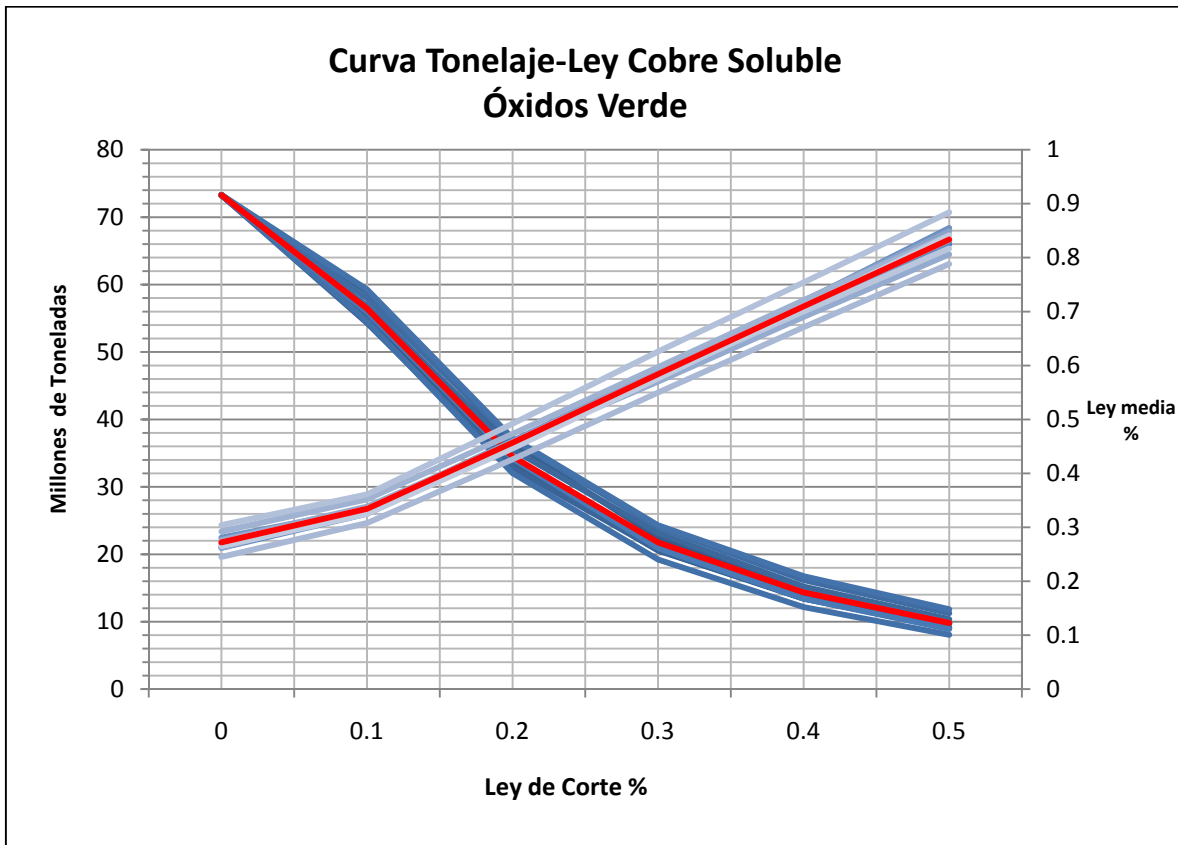


Figura 64: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Verdes.

Se obtienen los siguientes rangos de tonelaje, leyes medias y cantidad de fino:

Tabla 12: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Óxidos Verdes, caso CuS.

	Leyes de Corte [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje Máximo [Mton]	73	59	37	24	16	12
Tonelaje Mínimo [Mton]	73	54	32	19	12	8
Tonelaje Promedio [Mton]	73	56	35	22	14	9
Lm Máximo [%]	0.30	0.36	0.49	0.63	0.75	0.88
Lm Mínimo [%]	0.25	0.31	0.43	0.55	0.67	0.79
Lm Promedio [%]	0.27	0.33	0.46	0.58	0.71	0.83
Fino Máximo [Kton]	222	213	183	152	126	104
Fino Mínimo [Kton]	179	168	136	105	81	63
Fino Promedio [Kton]	199	188	157	127	101	81

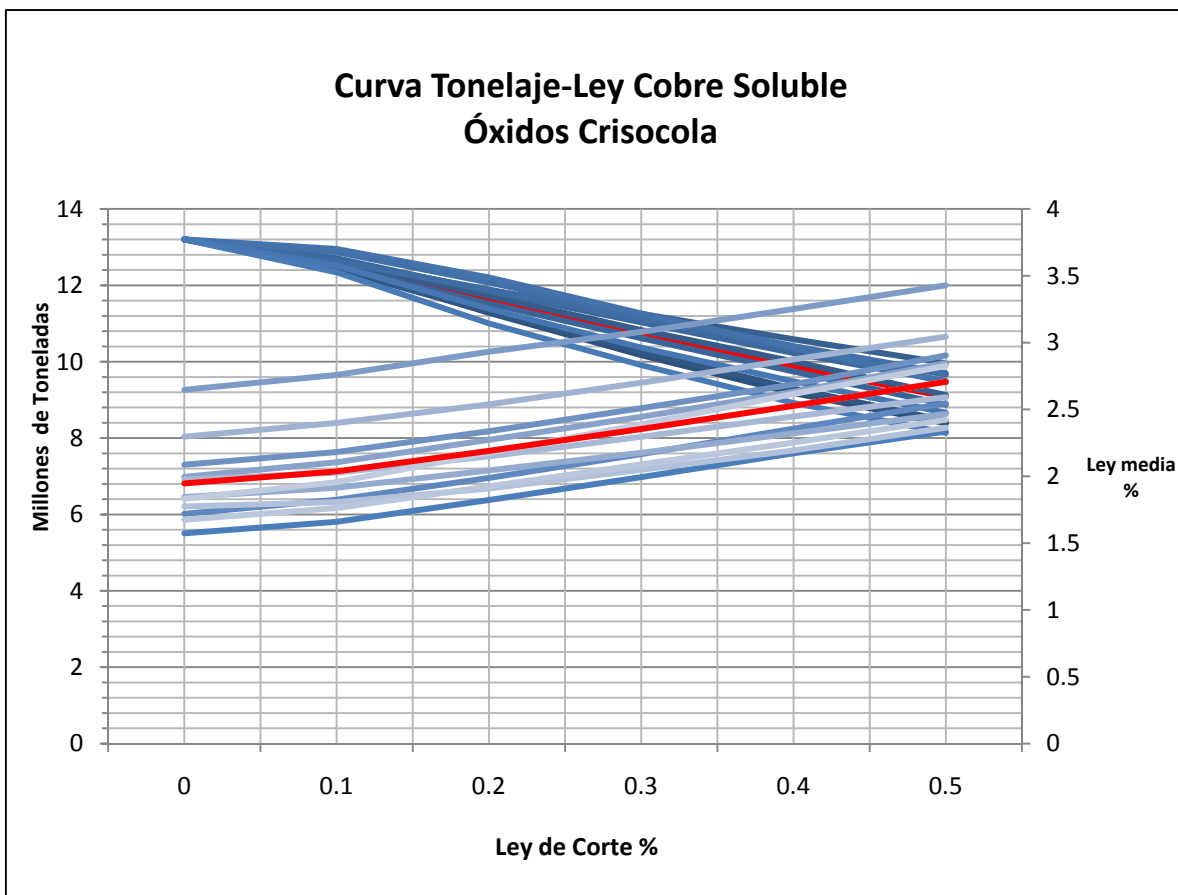


Figura 65: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Crisocola.

Se obtienen los siguientes rangos de tonelaje, leyes medias y cantidad de fino:

Tabla 13: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Óxidos Crisocola, caso CuS.

	Leyes de Corte [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje Máximo [Mton]	13	12.9	12,2	11.2	10.5	9.9
Tonelaje Mínimo [Mton]	13	12.3	11	9.9	8.9	8.1
Tonelaje Promedio [Mton]	13	12.6	11.6	10.7	9.8	9
Lm Máximo [%]	2.65	2.76	2.93	3.08	3.25	3.43
Lm Mínimo [%]	1.57	1.66	1.82	1.99	2.17	2.34
Lm Promedio [%]	1.95	2.04	2.19	2.35	2.53	2.71
Fino Máximo [Kton]	349	349	348	346	344	341
Fino Mínimo [Kton]	207	207	205	202	199	195
Fino Promedio [Kton]	257	256	255	253	250	246

Tabla 14: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal. Óxidos Crisocola, caso CuS.

Es bastante claro que la zona que presenta mayor incertidumbre es la de Óxidos de Crisocola, dada su alta variabilidad de leyes (reflejada en los variogramas), por lo que se ve un mayor espectro de leyes medias y tonelajes (dada una ley de corte). Al contrario, en la curva tonelaje-ley de todo el yacimiento la variación entre los distintos casos es bastante acotada, no presenta mucha variabilidad, esto ya que las leyes medias son bastante menores (variograma menor), y sólo las zonas de óxidos, que son más difusas, aumentan algo la incertidumbre.

4.7 Comparación con Modelo de Kriging

El modelo de kriging entregado por Antofagasta Minerals no abarca todo el yacimiento y sólo se consideran las zonas de mayor interés económico. Se toma en cuenta sólo los bloques de los modelos simulados en los que existen leyes del modelo de kriging para realizar la comparación. Así realizando esta simplificación se obtienen los siguientes recursos y curvas de tonelaje-ley.

Tabla 15: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de fino modelos simulados (simplificados) y modelo kriging. Óxidos Verdes, caso CuS.

	Lc [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje Máximo [Mton]	73	59.2	37.2	24.2	16.7	11.8
Tonelaje Mínimo [Mton]	73	54.2	32.0	19.2	12.1	8
Tonelaje Promedio [Mton]	73	56.4	34.5	21.7	14.3	9.8
Lm Máximo [%]	0.30	0.36	0.49	0.63	0.75	0.88
Lm Mínimo [%]	0.25	0.31	0.43	0.55	0.67	0.79
Lm Promedio [%]	0.27	0.33	0.46	0.58	0.71	0.83
Fino Máximo [Kton]	222	213	183	152	126.3	104.6
Fino Mínimo [Kton]	179	168	136	105	81.7	63.5
Fino Promedio [Kton]	199	188	157	127	101.9	82
	Kriging					
Tonelaje [Mton]	70.8	65	30	14.4	9.1	5.9
Lm [%]	0.24	0.26	0.38	0.54	0.65	0.76
Fino [Kton]	172	167	115	77	59.6	45.3

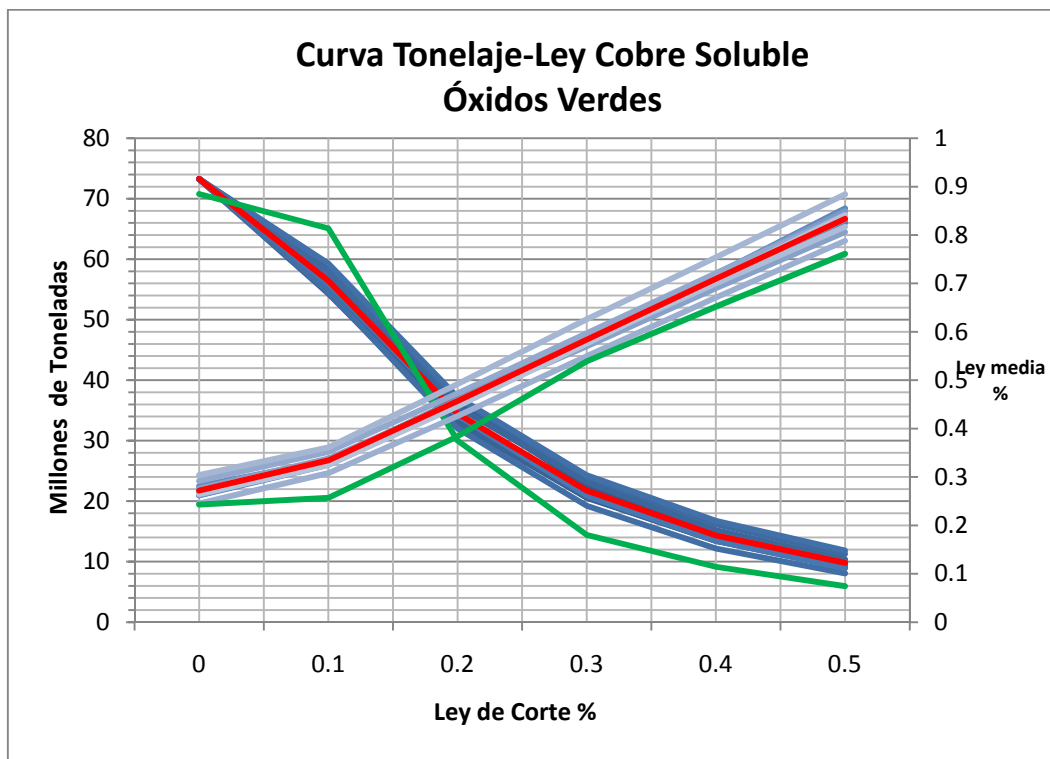


Figura 66: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Verdes. En azul las once simulaciones, en rojo el promedio de todas y en verde el kriging.

Tabla 16: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal modelos simulados (simplificados) y modelo kriging . Óxidos Crisocola, caso CuS.

	Lc [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje Máximo [Mton]	13.2	12.95	12.2	11.2	10.6	9.95
Tonelaje Mínimo [Mton]	13.2	12.34	11	9.9	8.9	8.1
Tonelaje Promedio [Mton]	13.2	12.60	11.6	10.7	9.9	9
Lm Máximo [%]	2.65	2.76	2.93	3.08	3.25	3.43
Lm Mínimo [%]	1.57	1.66	1.82	1.99	2.17	2.34
Lm Promedio [%]	1.95	2.04	2.19	2.35	2.53	2.71
Fino Máximo [Kton]	350	349.2	348	346.6	344	341
Fino Mínimo [Kton]	208	207.2	205.5	202.7	199.3	195
Fino Promedio [Kton]	257	256.7	255.3	253.1	250.1	246.6
	Kriging					
Tonelaje [Mton]	15.4	15.3	13.7	11.9	10.9	10.09
Lm [%]	1.49	1.50	1.66	1.87	2.00	2.14
Fino [Kton]	229.8	229.7	227	222.7	219.4	215.4

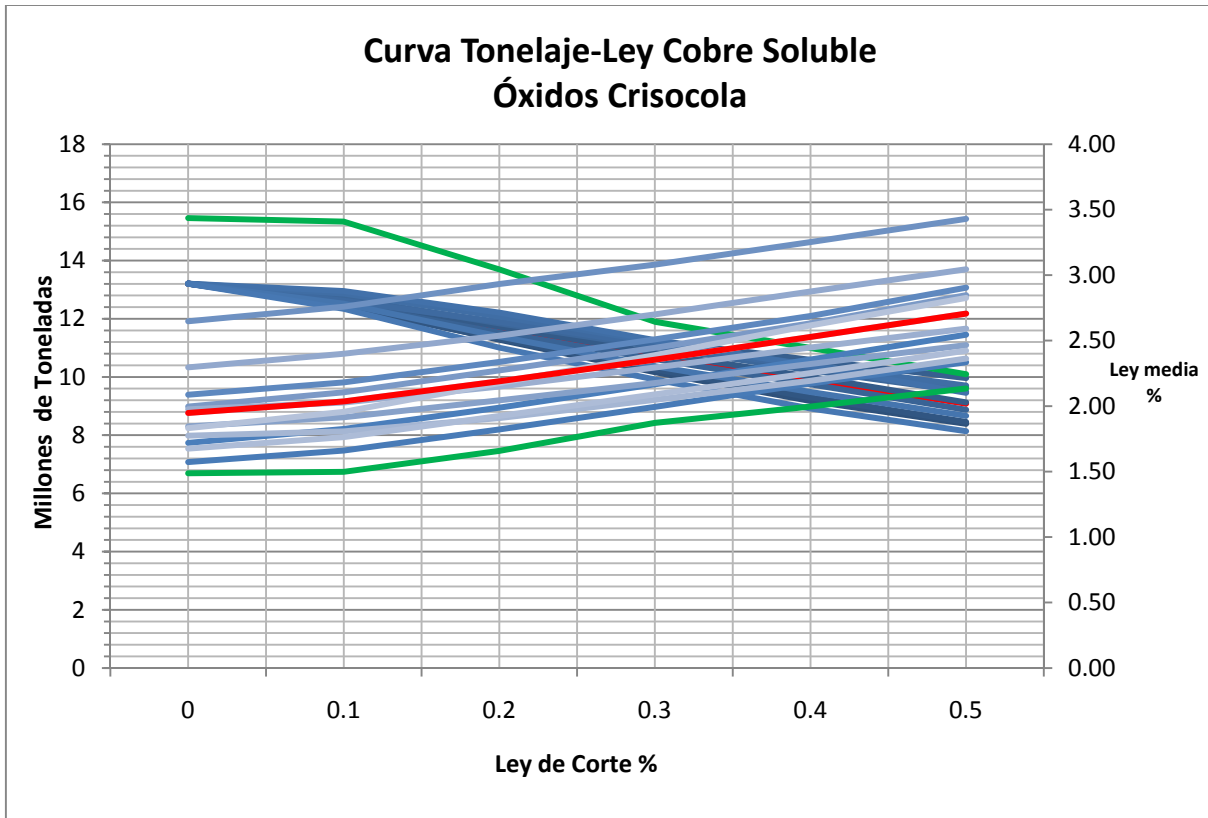


Figura 67: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para la zona de Óxidos Crisocola. En azul las once simulaciones, en rojo el promedio de todas y en verde el kriging.

Existen algunas diferencias entre el promedio de las simulaciones y el modelo de kriging, sobre todo para el caso de leyes de óxidos crisocola en que se tiene mayor variabilidad de datos.

Idealmente el kriging debería ser igual al promedio de las simulaciones, no obstante, considerando que cada simulación de ley toma en cuenta además otra simulación de unidad geológica independiente, no se está realizando necesariamente una comparación entre las mismas ubicaciones del yacimiento con respecto al kriging.

A continuación, se realiza una comparación entre todos los bloques del yacimiento,

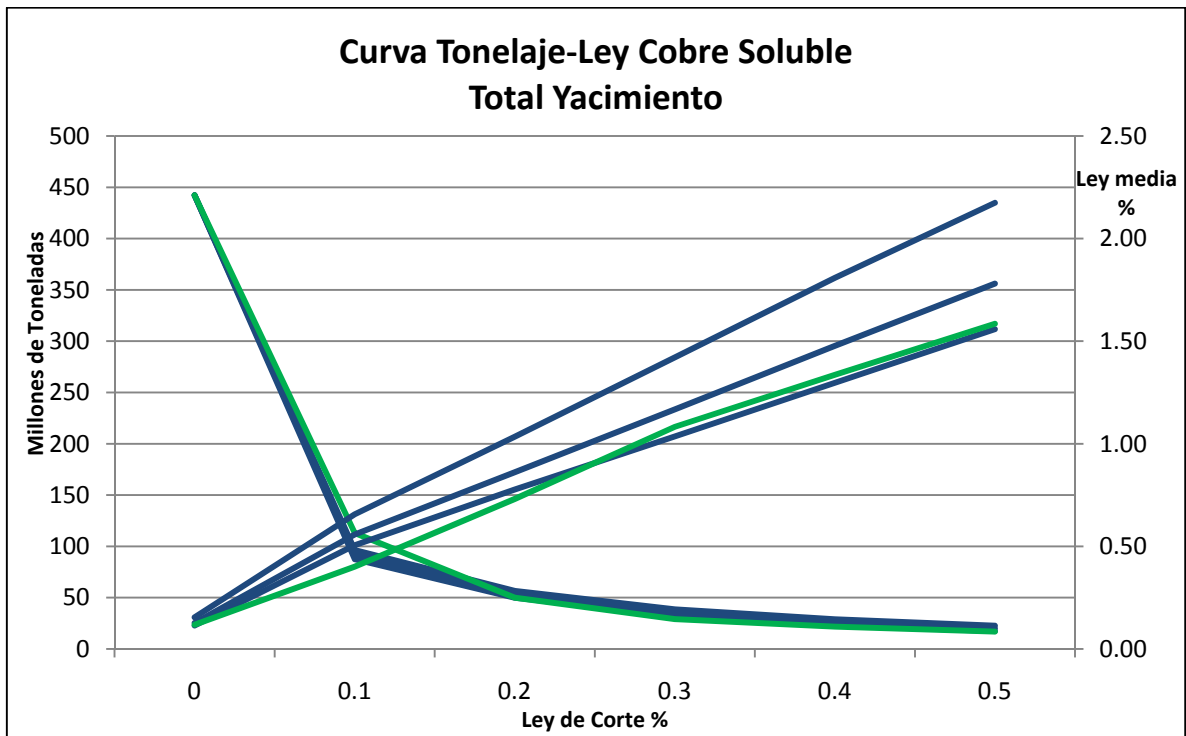


Figura 68: Curva Tonelaje Ley (cobre soluble) para el total del yacimiento simplificado. En azul las realizaciones mínimas, máxima y promedio, en verde modelo de kriging.

Tabla 17: Rangos Tonelajes, Leyes medias y cantidad de metal modelos simulados y modelo kriging. Total Yacimiento, caso cobre soluble.

	Simulaciones					
	Lc [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje Promedio [Mton]	442.2	91.8	53.2	35.7	26	20.1
Lm Promedio [%]	0.13	0.56	0.86	1.17	1.48	1.78
Fino Promedio [Kton]	561.2	513	460.1	418	384.9	358.9
	Kriging					
	Lc [%]					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Tonelaje [Mton]	442.2	112.9	50	29.1	21.7	16.9
Lm [%]	0.12	0.40	0.73	1.08	1.34	1.59
Fino [Kton]	521.8	452.9	365.9	315.6	290.1	268.4

El kriging se asemeja a las simulaciones para una ley de corte nula. Sin embargo, para leyes de corte mayores, hay algunas diferencias explicadas por el efecto suavizamiento del kriging, que provoca que las leyes bajas se sobreestimen y que se subestimen las leyes altas. Por construcción, este suavizamiento no sucede con las simulaciones, las cuales reproducen la variabilidad espacial de leyes, obteniendo así una menor “dilución” (menor tonelaje con leyes medias más altas para leyes de corte bajas, y más tonelaje para leyes de corte altas). Considerando que la simplificación abarca mucho tonelaje de leyes altas, para leyes de corte no nulas, el kriging subestima las leyes y los tonelajes (para leyes mayores que 0.1).

5 CONCLUSIÓN

La principal ventaja de las simulaciones condicionales respecto al kriging, es que estas permiten tener tantos escenarios como sea necesario, los que reproducen la variabilidad del yacimiento y de esta forma permiten medir la incertidumbre y el riesgo a través de los casos más o menos favorables. No obstante, se debe tener precaución con las zonas minerales que posean pocos datos condicionantes, pues la simulación se apoya en la media global de los datos para compensar la carencia de información. Puede ocurrir que esta media global no sea adecuada localmente, por lo que las simulaciones no reflejarán el real comportamiento de las variables.

Si bien la construcción de realizaciones es parte importante en el trabajo de lograr una simulación, la validación es fundamental para aprobar los métodos utilizados. Tanto para el caso de simulación secuencial de indicadores, para las unidades geológicas, como para la simulación secuencial gaussiana, para las leyes. Está la ventaja de que cada uno de los variogramas, de indicador y de datos gaussianos, respectivamente, se modeló de manera independiente (para cada uno de los dominios geológicos), por lo que el modelo variográfico es una buena representación de la distribución espacial del yacimiento. Siempre es importante tener una idea de lo que pasa en la realidad para no considerar solo los modelos obtenidos. Los geólogos deben ser partícipes tanto en la elaboración como en la etapa de validación.

Se debe considerar la incertidumbre tanto en las unidades geológicas como en las leyes de cobre total y cobre soluble dada la gran importancia económica presente en este yacimiento. Además, considerando los rangos en que fluctúa la evaluación de recursos, debería tomarse en cuenta los modelos simulados en las decisiones técnicas como alternativas al modelo de kriging. Esto es relevante debido a que el sector más importante del yacimiento es el que presenta mayor variabilidad. Asimismo se debe llevar a cabo constantemente muestreos en los contactos de los dominios, a través de nuevas campañas de sondajes, para así tener mayor información y poder realizar simulaciones de modo de complementar los modelos geológicos creados.

Sería interesante junto con tener los estudios de solubilidad de las distintas zonas minerales, contar con información similar para la ganga que rodea estos dominios. Se podría crear modelos predictivos para el comportamiento de estos bloques en los futuros procesos metalúrgicos, tales como el consumo de ácido en la hidrometalurgia de los óxidos. Además debería incluirse en estas simulaciones los porcentajes de impurezas, tales como el arsénico, que permitan tener el beneficio/costo real de cada bloque, posibilitando un modelo que abarque no sólo las variables de ingreso, sino también las que implican una disminución del potencial económico.

6 REFERENCIAS

- [1] Alastair J.Sinclair, Garston H. Blackwell, 2002. Applied Mineral Inventory Estimation. p. 284-299.
- [2] Chilès JP., Delfiner P., 1999. Geostatistics: modeling spatial uncertainty. Wiley, New York, 695 p.
- [3] Emery X., 2004, Testing the correctness of the sequential algorithm for simulating Gaussian random fields, Stoch Envir Res and Risk 18, p.401-413.
- [10] Emery X., 2007, Statistical tests for validating geostatistical simulation algorithms (2007), Computers & Geosciences, 11p.
- [4] I.M Glacken, D.V Snowden, 2001: Mineral Resource Estimation, in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne. P 189-198.
- [5] J.H. Duke, P.J. Hanna, Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation, in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne. P 147-156.
- [6] Journel A. G., Huijbregts Ch. J., 1978. Mining Geostatistics. Academic Press, London, 600 p.
- [7] Clayton V. Deutsch, André G. Journel, 1998: GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press. 189p.
- [8] Oy Leuangthong, Clayton V. Deutsch, 2002: Stepwise Conditional Transformation for Simulation of Multiple Variables, Mathematical Geology, Vol. 35, No. 2, February 2003 (C ° 2003). 19p
- [9] Oy Leuangthong, Jason A. McLennan, and Clayton V, 2004. Deutsch: Minimum Acceptance Criteria for Geostatistical Realizations. Natural Resources Research, Volume 13, Number 3, 131-141, 11p.

7 ANEXOS

Anexos 1: Probabilidad de Ocurrencia de unidad geológica.

Imágenes de Probabilidad de ocurrencia de distintas unidades geológicas:

Vistas en Planta (2186 m):

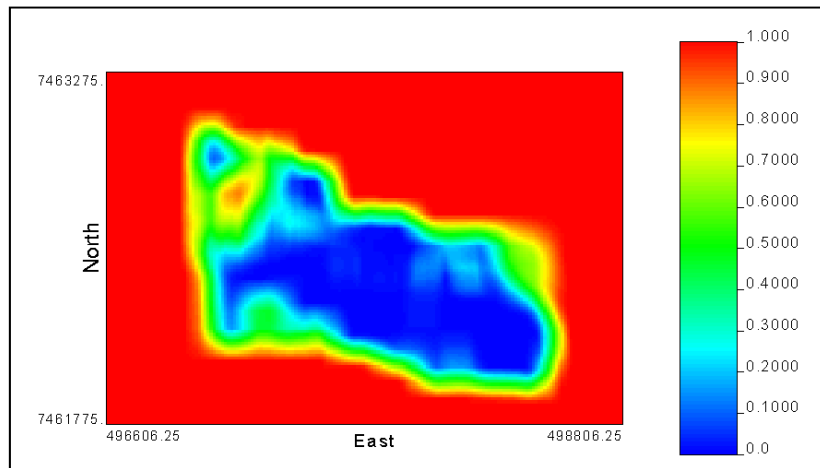


Figura 1: Probabilidad ocurrencia unidad Estéril.

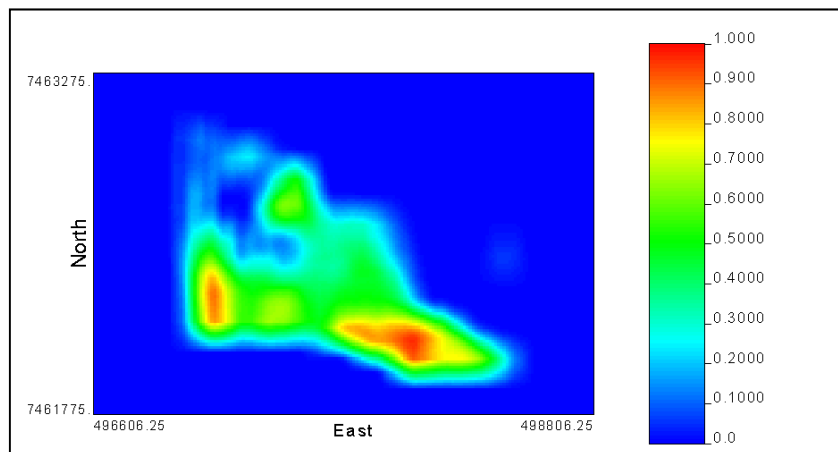


Figura 2: Probabilidad ocurrencia unidad Lixiviados.

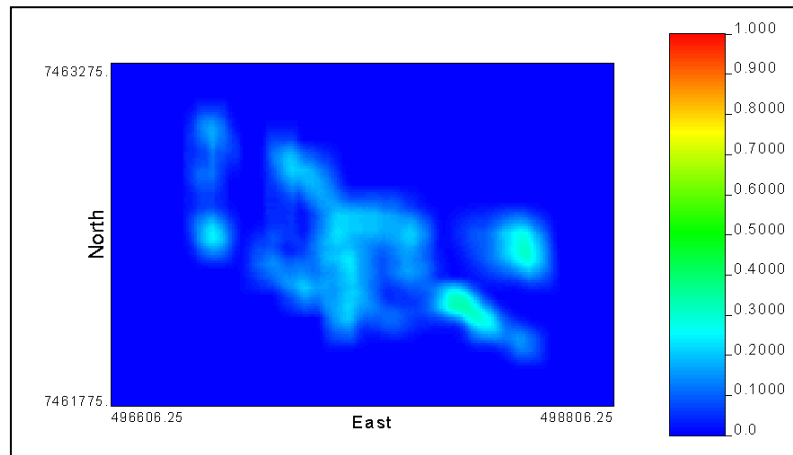


Figura 3: Probabilidad ocurrencia unidad Hipógeno.

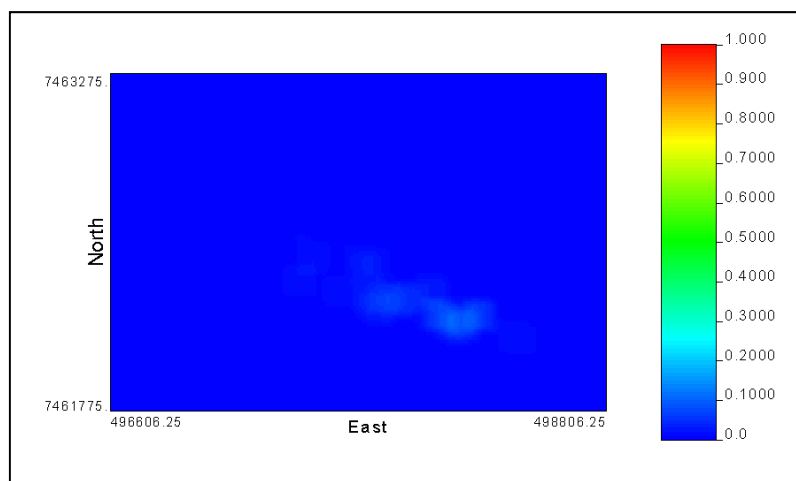


Figura 4: Probabilidad ocurrencia unidad Parcial Lixiviado.

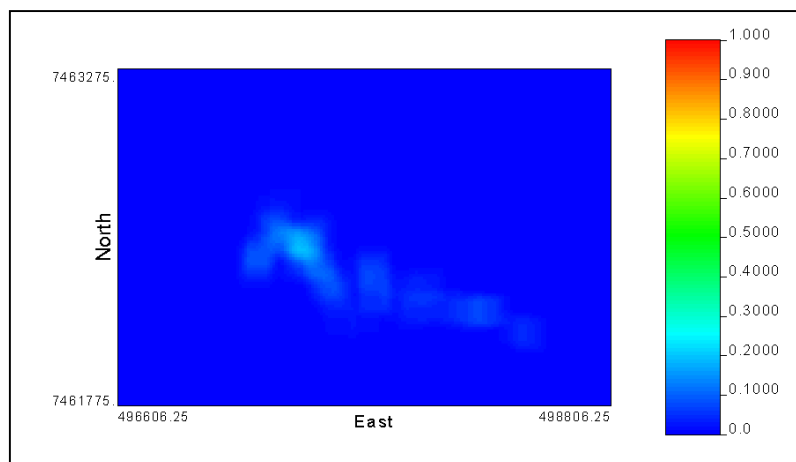


Figura 5: Probabilidad ocurrencia unidad Supérgeno.

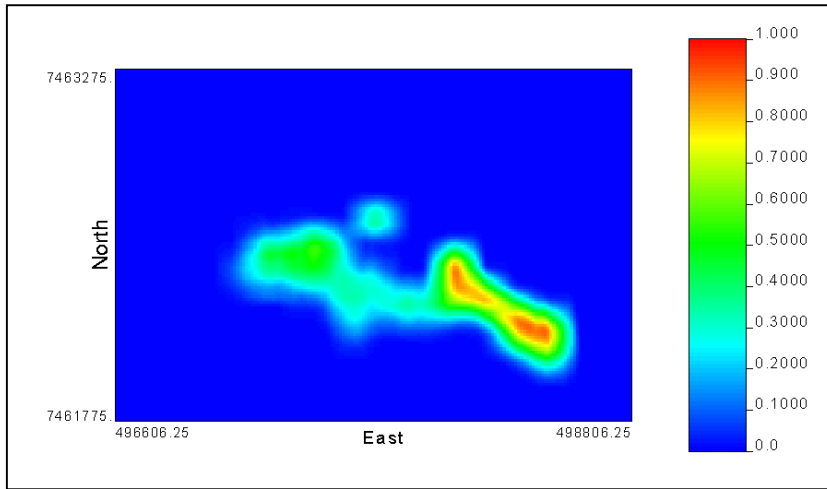


Figura 6: Probabilidad ocurrencia unidad Mixto.

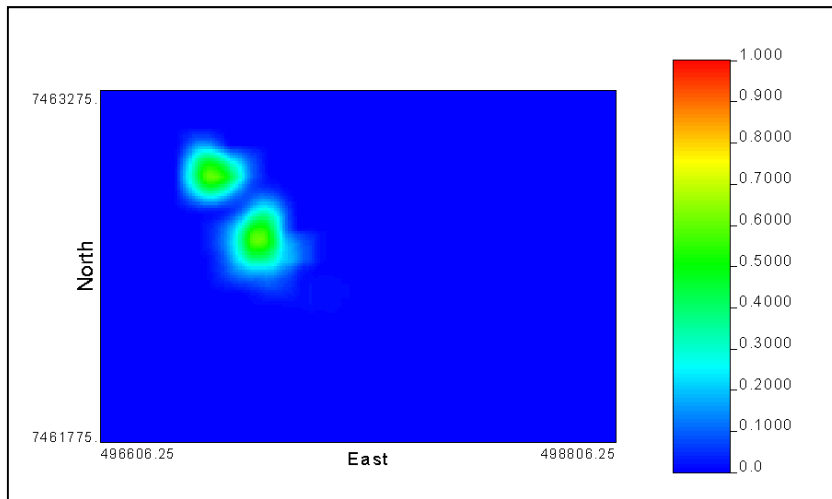


Figura 7: Probabilidad ocurrencia unidad Óxidos Verdes.

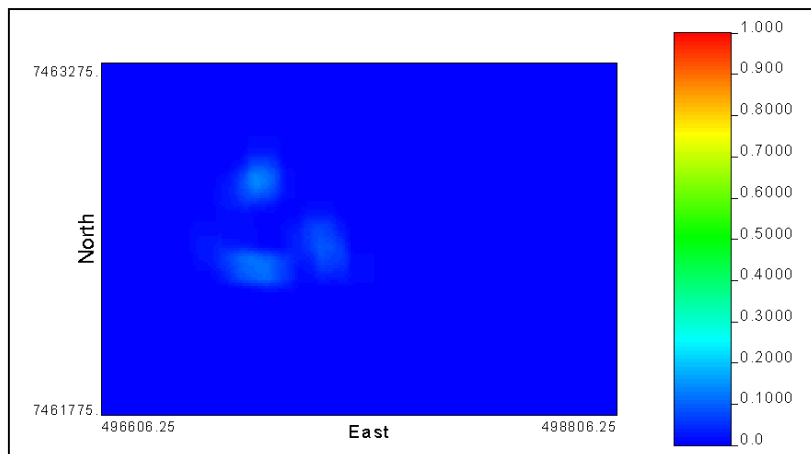


Figura 8: Probabilidad ocurrencia unidad Óxidos Crisocola.

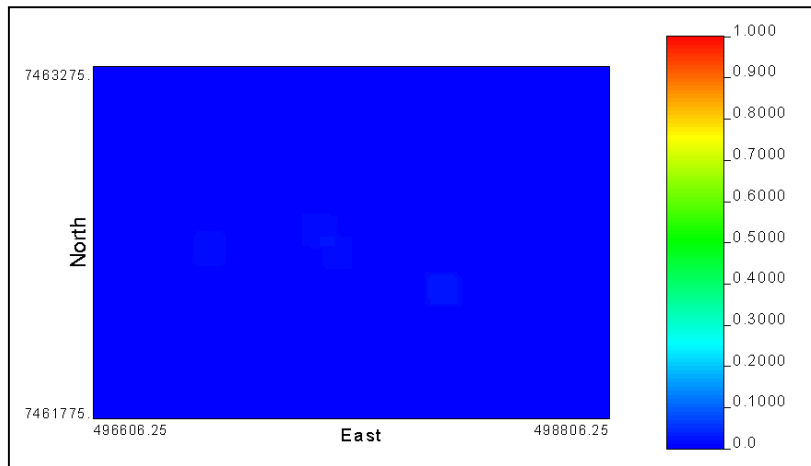


Figura 9: Probabilidad ocurrencia unidad Óxidos Negros.

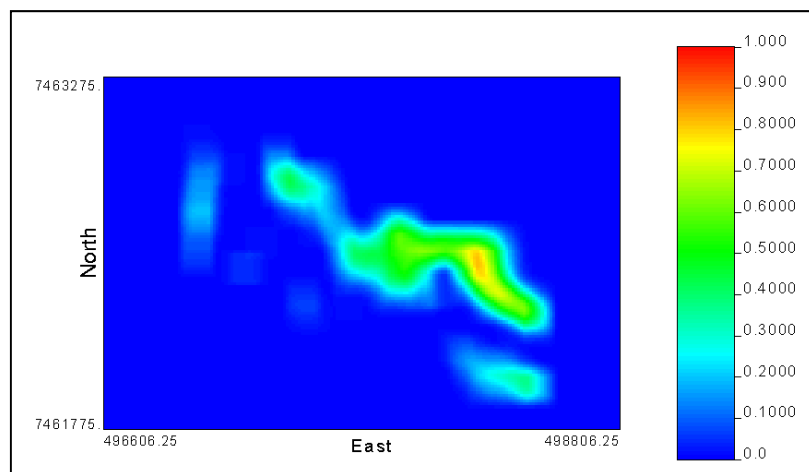


Figura 10: Probabilidad ocurrencia unidad Lixiviados con Cobre.

Código MATLAB

```

MB= input('Ingrese modelo de bloques: x y z UG:');
deltax= input('Ingrese cuantos bloques en x a considerar :');
deltay= input('Ingrese cuantos bloques en y a considerar :');
deltaz= input('Ingrese cuantos bloques en z a considerar :');

MB = sortrows(sortrows(sortrows(MB,1),2),3);
MB_vecindad = MB;
UG = reshape(MB(:,4),176,120,60);
l = 1;

for k = 1:60
    disp([int2str(k),' de 60']); pause(0.001);
    for j = 1:120
        for i = 1:176
            A = UG( max(1,i-deltax):min(176,i+deltax) , max(1,j-
deltay):min(120,j+deltay) , max(1,k-deltaz):min(60,k+deltaz) );

```

```

        I = find(A(:)<0); A(I) = [];
        MB_vecindad(1,4)= mean(A(:));
        l = l+1;
    end
end
end

```

Anexos 2: Simulación de Leyes.

Anexos 2.1: Código MATLAB: Asignación de Modelos de simulación de Leyes a Modelo de Unidades Geológicas:

```

% lectura de los archivos de simulaciones de leyes y del archivo de
% simulación de unidades geológicas
load('MBSIM_775_1_simplificado.txt');
load('sgsim_block_cui_3.out');
load('sgsim_block_cui_5.out');
load('sgsim_block_cui_10.out');
load('sgsim_block_cui_11.out');
load('sgsim_block_cui_12.out');
load('sgsim_block_cui_20.out');
load('sgsim_block_cui_30.out');
load('sgsim_block_cui_40.out');
load('sgsim_block_cui_50.out');

sgsim_cui = [sgsim_block_cui_3 sgsim_block_cui_5 sgsim_block_cui_10
sgsim_block_cui_11 sgsim_block_cui_12 sgsim_block_cui_20 sgsim_block_cui_30
sgsim_block_cui_40 sgsim_block_cui_50];
sisim = MBSIM_775_1_simplificado(:,4);
n = size(sisim);
sgsimfinal_cui = zeros(n,1);

for i = 1:n
    l = sisim(i);
    if l==3, j=1;
    end
    if l==5, j=2;
    end
    if l==10, j=3;
    end
    if l==11, j=4;
    end
    if l==12, j=5;
    end
    if l==20, j=6;
    end
    if l==30, j=7;
    end
    if l==40, j=8;
    end
    if l==50, j=9;
    end
    if l==0,
    sgsimfinal_cui(i) = 0;

```

```

    else
    sgsimfinal_cui(i) = sgsim_cui(i,j);
    end
end

load('sgsim_block_cus_3.out');
load('sgsim_block_cus_5.out');
load('sgsim_block_cus_10.out');
load('sgsim_block_cus_11.out');
load('sgsim_block_cus_12.out');
load('sgsim_block_cus_20.out');
load('sgsim_block_cus_30.out');
load('sgsim_block_cus_40.out');
load('sgsim_block_cus_50.out');

sgsim_cus = [sgsim_block_cus_3 sgsim_block_cus_5 sgsim_block_cus_10
sgsim_block_cus_11 sgsim_block_cus_12 sgsim_block_cus_20 sgsim_block_cus_30
sgsim_block_cus_40 sgsim_block_cus_50];

sgsimfinal_cus = zeros(n,1);
for i = 1:n
    l = sisim(i);
    if l==3, j=1;
    end
    if l==5, j=2;
    end
    if l==10, j=3;
    end
    if l==11, j=4;
    end
    if l==12, j=5;
    end
    if l==20, j=6;
    end
    if l==30, j=7;
    end
    if l==40, j=8;
    end
    if l==50, j=9;
    end
    if l==0,
    sgsimfinal_cui(i) = 0;
    else
    sgsimfinal_cus(i) = sgsim_cus(i,j);
    end
end
MB_cuicus = MBSIM_775_1_simplificado;
MB_cuicus(:,5)=sgsimfinal_cui;
MB_cuicus(:,6)=sgsimfinal_cus;
disp('Proceso finalizado');

```

Anexos 2.2: Código MATLAB Transformación de base de datos con unidad geológica, cobre total y cobre soluble y exportación de datos:

```

n=size(MB_cuicus(:,1));
MB_cuscut=zeros(n,6);

```

```

MB_cuscut(:,1)=MB_cuicus(:,1);
MB_cuscut(:,2)=MB_cuicus(:,2);
MB_cuscut(:,3)=MB_cuicus(:,3);
MB_cuscut(:,4)=MB_cuicus(:,4);
MB_cuscut(:,5)=MB_cuicus(:,6);

for i=1:n,
MB_cuscut(i,6)=MB_cuicus(i,5)+MB_cuicus(i,6);
end

fid_ton = fopen('MB_sim_ug_ley_1.out','wt');

for i=1:n,
fprintf(fid_ton,'%5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f
%5.2f\n',MB_cuscut(i,1),MB_cuscut(i,2), MB_cuscut(i,3), MB_cuscut(i,4),
MB_cuscut(i,5), MB_cuscut(i,6) );
end

fclose(fid_ton);

disp('Proceso finalizado');

```