

**APUNTES DE PROYECTO 3D
DE EVALUACIÓN DE YACIMIENTOS**

Preparado por Julián Ortiz C.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 1
Presentación del Proyecto

1. Presentación del Proyecto

El “Proyecto 3D” del curso de Evaluación de Yacimientos tiene por objeto exponer a los alumnos del curso a las dificultades que comúnmente se encuentran al trabajar con datos reales. A pesar de ello y con el fin de maximizar el aprendizaje, se entrega una base de datos limpia, de modo que no se pierda tiempo encontrando problemas inherentes a la información y que los alumnos puedan concentrarse en el uso que se le debe dar a los datos a través de las herramientas estudiadas en las cátedras y revisadas en las sesiones de laboratorio computacional.

El proyecto consiste en evaluar los recursos de un yacimiento de oro ubicado en la Franja de Maricunga en Chile.

Se dispone de información de sondajes y de una topografía, además de una breve descripción geológica que permitirá tener una primera idea del tipo de yacimiento con que se trabajará.

Una breve descripción geológica dada por un geólogo anglosajón se presenta a continuación:

"The deposit is of an epithermal gold type, forms an annular-shaped mineralized body hosted in stockworked porphyritic diorite. This has been intruded by microdiorite and dissected and displaced by a series of NW-trending vertical faults. Acid-sulphate alteration has resulted in the presence of a clay-rich alteration assemblage and pyrite-chalcopyrite mineralization. The gold is very fine grained (<10µm) and disseminated, and hosted mainly in clay (i.e. is free). The bulk of the deposit is comprised of sulphide ore whereas rock in the fault zones and near-surface are oxide ore. The sulphide ore is characterised by pyrite/chalcopyrite, chlorite and smectite, the oxide ore by pyrite, alunite and kaolinite"

Se incluye además, una copia del resumen de una publicación que trata acerca de la geología de yacimientos de similares características ubicados en la Franja de Maricunga (Vila T. & Sillitoe R. – Gold-rich systems in the Maricunga Belt, Northern Chile):

ABSTRACT

The Maricunga belt is a linear metallogenic unit defined by at least 14 zones of gold and/or silver mineralization between latitudes 26° and 28°S in the Andean Cordillera of northern Chile. After 10 years of exploration, three precious metal deposits are in production, two more have proven reserves, and others are being drilled. Total geologic reserves are 350 metric tons of gold equivalent, divided between intrusion-hosted porphyry-type deposits and volcanic-hosted epithermal deposits of high-sulfidation type.

Precious metal mineralization is related to a belt of Miocene volcanic rocks, most of which constitute a series of large compound stratovolcanoes of calc-alkaline composition. The volcanic rocks overlie unconformably and largely conceal a magmatic and sedimentary basement of Paleozoic and Mesozoic ages. The volcanic rocks and contained alteration-mineralization are subdivided on the basis of K-Ar dating into partly overlapping, western early Miocene (24-20 Ma) and eastern middle Miocene (14-13 Ma) sub-belts. High-angle reverse faulting occurred between these two epochs in response to regional compression induced by subduction-zone flattening. A northwest alignment is also prominent in the belt as reflected by the strike of several components of the alteration-mineralization zones.

Nine zones of porphyry-type mineralization have been discovered in the Maricunga belt, where they are present in both the western and eastern sub-belts. The porphyry-type mineralization was generated beneath andesitic-(dacitic) stratovolcanoes, which were dissected more extensively in the western than in the eastern sub-belt. The volcanic rocks were intruded by isolated, composite porphyry stocks which are dioritic in the eastern sub-belt but include quartz dioritic facies in the western sub-belt. Weakly porphyritic microdiorite and associated intrusion breccia are prominent stock components.

Minor inter- to late-mineralization hydrothermal breccias are commonly present.

The gold-copper mineralization is believed to have been introduced with K-silicate alteration, which is well preserved only at the Amalia, Refugio, and Casale Hill (Aldebaran) prospects. K-silicate alteration is overprinted and commonly obliterated by sericite-clay-chlorite assemblages of intermediate argillic type. Much of the gold is present in quartz stockworks. Iron oxides, both early magnetite and late hematite, constitute 5 to 10 volume percent of the mineralized zones. Sulfides are dominated completely by pyrite but include minor chalcopyrite and trace bornite and molybdenite. Supergene leaching of copper is developed to various degrees, but enrichment is only incipient.

Several porphyry-type stockworks are overlain by pyrite- and alunite-rich advanced argillic alteration, which carries barite, native sulfur, enargite, and at La Pepa, high-grade, vein-type gold mineralization of high-sulfidation, epithermal type. The quartz stockworks and advanced argillic caps are telescoped at Marte, Valy, Santa Cecilia, and La Pepa, but separated by a chloritized zone transected by a swarm of gold-poor, polymetallic veins with quartz-alunite selvages at Aldebaran.

Marte and Lobo are rich in gold (1.43 and 1.6 ppm) and poor in copper (0.05 and 0.12%) and molybdenum (46 and ~10 ppm), and may be designated as porphyry gold deposits. However, gold contents are lower (0.6-1 ppm) and hypogene copper contents probably higher at Refugio and Casale Hill. Zinc tends to occur as a geochemical halo to the Au-Cu-Mo mineralization, which is always deficient in silver (<0.1 ppm). Arsenic and mercury are enriched in the advanced argillic caps, and along with lead, are also weakly anomalous at Marte in the the underlying, shallow-level quartz stockwork.

The depth of erosion of the Maricunga porphyry-type systems is believed to decrease from the K-silicate zones exposed at Refugio and in the Casale

Hill sector at Aldebaran, through Marte, Vally, Santa Cecilia, and La Pepa where remnants of advanced argillic caps are present, to the highest, mercury-rich part of the Cathedral Peak sector at Aldebaran and zones higher than and west of Marte which comprise advanced argillic alteration rich in native sulfur. Reconstruction of the porphyry systems suggests that gold-bearing quartz stockworks were generated 600 to 1000 m beneath the paleosurfaces.

The gold-rich porphyry mineralization in the Maricunga belt is closely comparable to that in the Philippines because of the association with dioritic to quartz dioritic porphyry stocks intruded into andesitic-(dacitic) stratovolcanoes, the widespread distribution of intermediate argillic assemblages as partial or complete overprints to K-silicate alteration, the abundance of hypogene iron oxides with ore, and the common preservation of advanced argillic caps. The Maricunga porphyry-type mineralization stands in contrast to the porphyry deposits elsewhere in northern Chile, which are associated with more felsic intrusions lacking coeval volcanic rocks, contain large volumes of sericitized rocks, lack abundant ore-related iron oxides, are molybdenum-rich, gold-poor, and more than ten-times larger, and include major supergene enrichment blankets. However, both the gold-rich Maricunga belt and the molybdenum-rich deposits in northern Chile are underlain by thick continental crust, whereas the Philippine copper-gold province is in an island arc setting.

2. Objetivos del proyecto

Los objetivos del proyecto desde el punto de vista del alumno son:

- Aprender el uso de un software comercial para llevar a cabo la evaluación de los recursos de un yacimiento simplificado.
- Utilizar en un caso real las herramientas de análisis geoestadístico vistas en clase.
- Desarrollar el criterio para tomar ciertas decisiones en base a fundamentos encontrados por el propio alumno para ir superando las etapas del proyecto.

El proyecto en sí tiene las siguientes finalidades:

- Realizar un análisis exploratorio de los datos.
- Definir las unidades de estimación a utilizar en la evaluación.
- Modelar los variogramas para cada unidad de estimación.
- Construir y validar un modelo de bloques de leyes de oro para el depósito.

- Realizar la categorización de los recursos y calcular los inventarios de recursos totales y por categoría.
- Presentar los resultados de la evaluación ante sus pares.

3. Etapas del proyecto

El proyecto se desarrolla de la siguiente forma:

- Importación de datos.
- Despliegue de plantas y secciones características.
- Análisis estadístico de la información.
- Comparación de campañas de sondeos
- Variografía
- Creación de un modelo de tipos de roca
- Validaciones cruzadas
- Estimación por kriging ordinario
- Validación del modelo de bloques
- Categorización de recursos
- Inventarios de recursos

Estas etapas deben plasmarse en la elaboración de dos informes de avance y un informe final:

- Avance 1:
 - Presentación del proyecto, Geología, Datos
 - Estadísticas Básicas
 - Visualización de los Datos
- Avance 2:
 - Avance 1 corregido
 - Comparación de campañas
 - Variografía
- Informe Final:
 - Avance 2 corregido
 - Validaciones cruzadas y plan de kriging
 - Estimación, validación y estadísticas de modelo de bloques
 - Categorización de recursos
 - Inventarios
 - Conclusiones

Finalmente, se debe preparar una presentación de 20 minutos con los resultados más importantes del estudio, la que debe ser defendida ante sus compañeros y profesores.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 2
Familiarización con GEMS y con la base de datos
Importación de datos

1. Objetivos de la Clase Nº 2

Los principales objetivos de esta clase son:

- Familiarizarse con el programa GEMS
- Conocer la estructura de la base de datos
- Familiarizarse con los datos disponibles
- Aprender algunas utilidades básicas de GEMS
- Importar los datos

2. Introducción

Los datos que se utilizarán en este proyecto corresponden a datos reales de un yacimiento de oro de baja ley. La base de datos y topografía son reales. El modelo geológico ha sido simplificado, las leyes han sido multiplicadas por un factor y una constante ha sido sumada a las coordenadas para proteger los datos de la empresa minera.

El modelo geológico ha sido simplificado para concentrar los esfuerzos de los estudiantes en las técnicas geoestadísticas utilizadas. El modelo consiste en una zona de óxidos y sulfuros. En la práctica real, el modelo geológico se realiza previo a la evaluación de recursos. Se consideran aspectos tales como cambios en la litología, mineralización y alteración. En base a estas unidades, se analizan y definen unidades homogéneas que se utilizarán para la estimación, las que normalmente se denominan unidades geológicas.

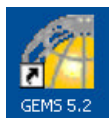
3. Datos disponibles

Se dispone de los siguientes datos:

- Una base de datos de sondajes tomados en el depósito que cuenta con información de posición de collar, dirección de sondajes por tramos y largo, litología y leyes de oro muestreadas en intervalos no regulares en cada sondaje.
- Topografía de superficie.
- Breve descripción de la geología.

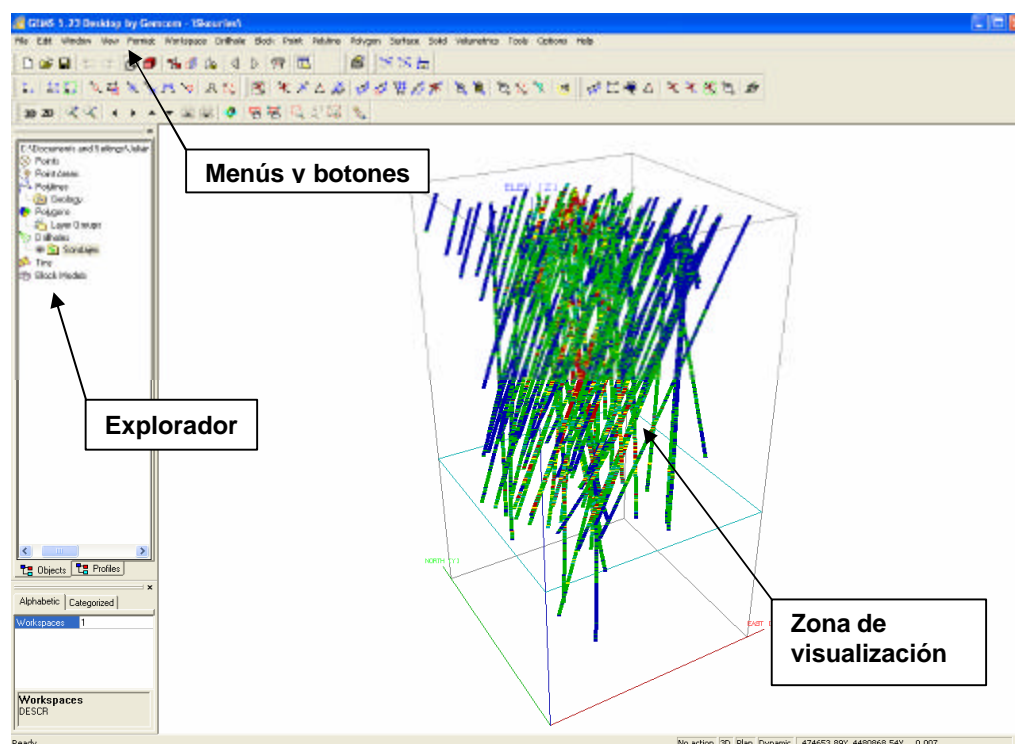
4. Introducción al software GEMS

El proyecto se realizará con GEMS y GSLIB. El primero se activa con doble-clic al ícono en el escritorio.









Para trabajar en la aplicación GEMS se utilizan básicamente botones y menús (como en cualquier aplicación en Windows). Se dispone además de un área donde se pueden ver algunas características del proyecto sobre el que se está trabajando. Esta área funciona como un “Explorador del proyecto”, es decir seleccionando un espacio de trabajo (workspace) y haciendo clic con el botón derecho del mouse se despliega un menú con algunas opciones, de manera de poder acceder de manera más rápida a algunas funciones.









En el sector derecho de la pantalla se pueden ver los despliegues gráficos que el programa permite obtener, en proyecciones bidimensionales y tridimensionales.



Botones

Al igual que en muchas aplicaciones de Windows, existe una barra con botones para efectuar algunas funciones que están en los menús, más rápidamente. Estos se describen a continuación, de izquierda a derecha:

	→	Crear un nuevo proyecto
	→	Asignar un proyecto existente
	→	Grabar la sesión actual
	→	Deshacer la última edición
	→	Rehacer la última edición
	→	Vista como estructura de alambre

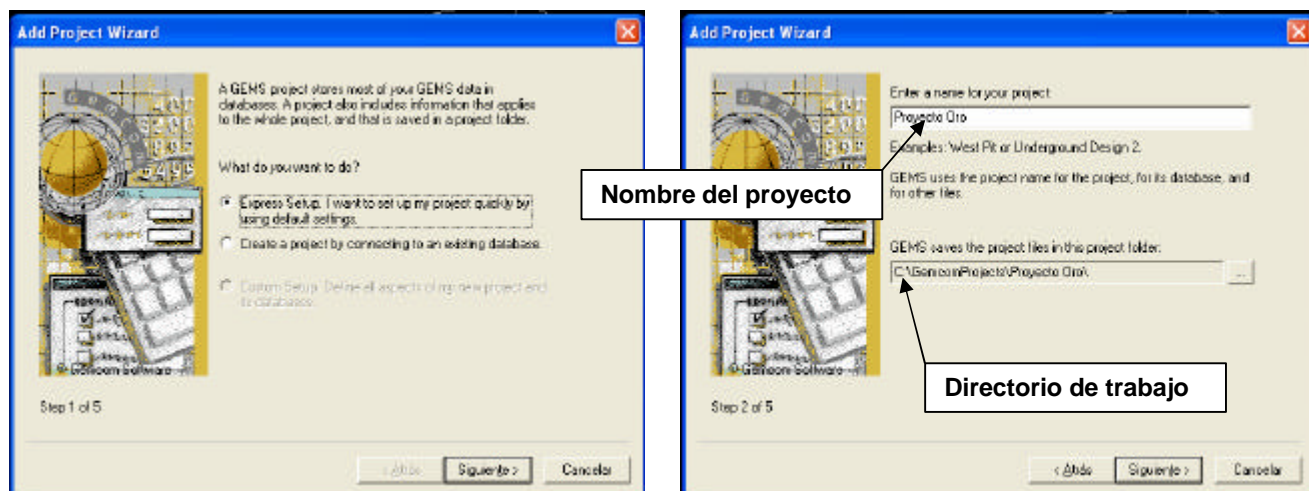
	→	Vista como sólido
	→	Extender las distancias de proyección sobre el plano
	→	Volver al espesor de proyección en el plano
	→	Bloquear el corredor
	→	Ver sección anterior
	→	Ver sección siguiente
	→	Plotear datos visibles
	→	Mostrar / Ocultar el área del explorador del proyecto

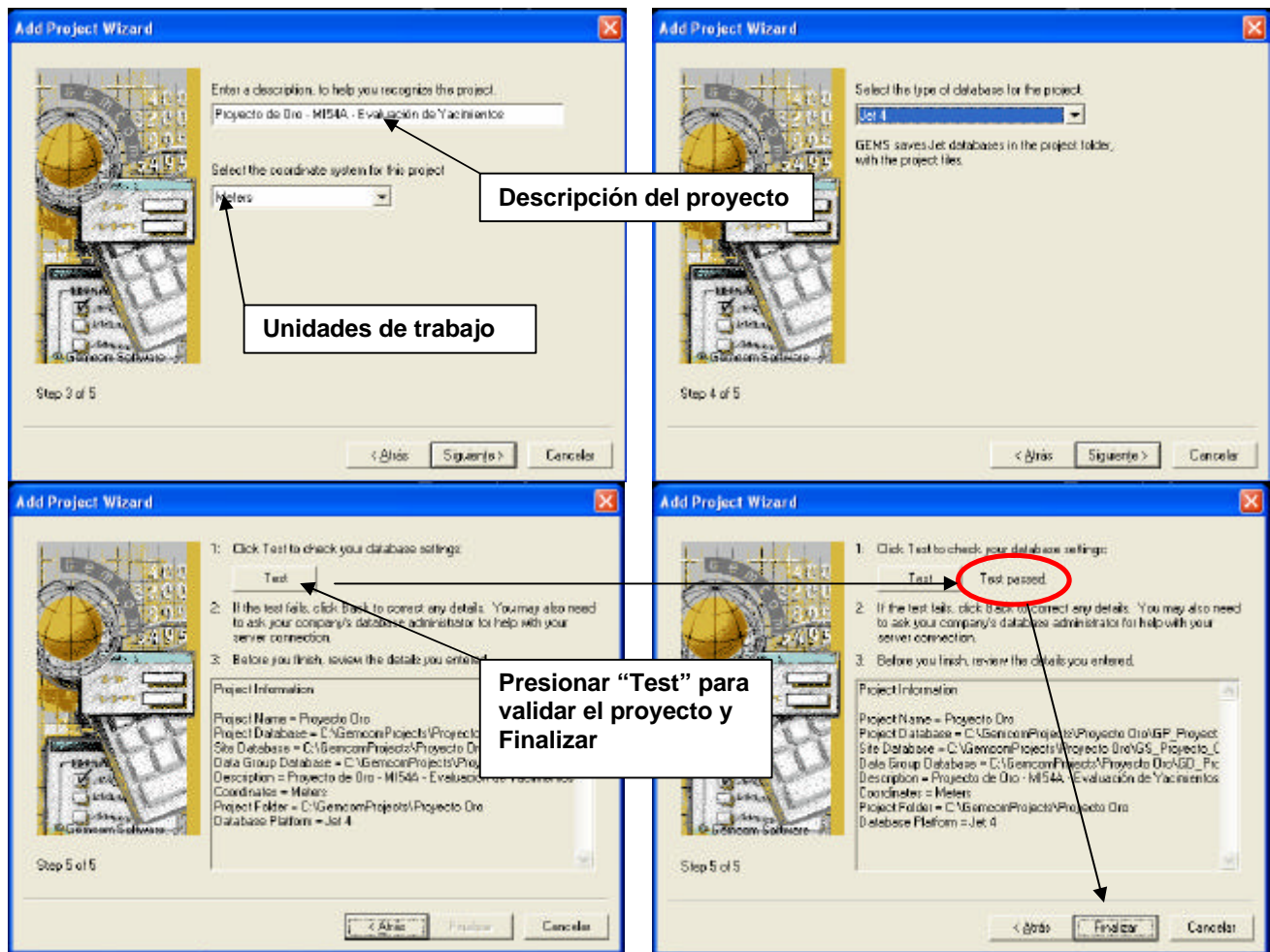
El software GEMS trabaja con bases de datos relacionales de MS ACCESS, las que están vinculadas por algunos campos clave. Normalmente, los sondeos se guardan en un espacio de trabajo (**workspace**), los polígonos, sólidos, datos puntuales, etc, se guardan en espacios de trabajo diferentes.

5. Crear proyecto nuevo:

FILE > NEW > PROJECT

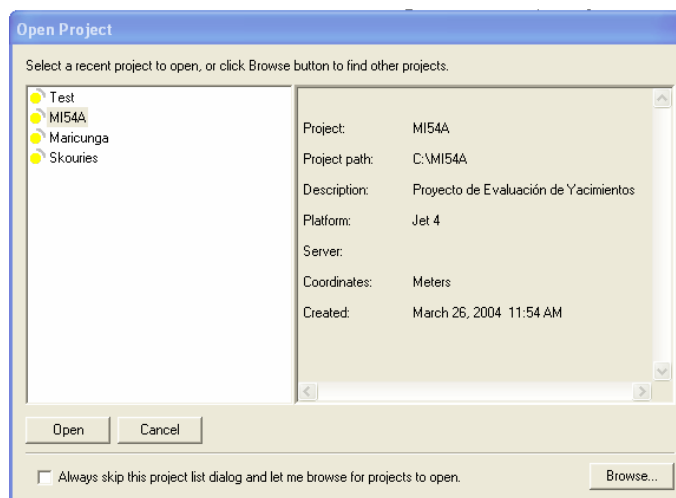
GEMS permite crear un proyecto nuevo a través de una serie de parámetros por defecto. Los principales aspectos que el usuario controla durante este proceso son el directorio donde se ubicarán las carpetas de trabajo y sistema de unidades a utilizar. Se debe presionar TEST y ver que el test pase correctamente. Luego, hacer clic en FINALIZAR.





6. Asignar el proyecto: (para proyectos existentes)

FILE > OPEN > PROJECT



Aparecerá una lista con los proyectos disponibles en el computador. Se debe seleccionar el proyecto que interesa.

Definir el proyecto antes de empezar a trabajar, puesto que GEMS abre por defecto el último proyecto activo.

7. Crear Base de Datos en Gems

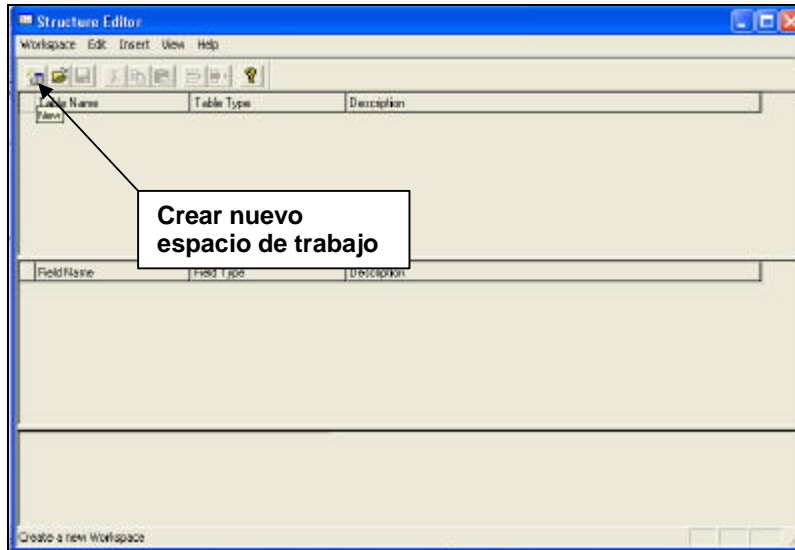
La información utilizada en la creación de un modelo de bloques con leyes estimadas proviene de diversas fuentes y es necesario poder incorporarla al proyecto de manera fácil. Habitualmente, la información proviene de muestras y mapeos de sondajes o bien de muestras puntuales o de canales. La base de datos se construye mediante una serie de tablas relacionales, vinculadas a través de algunos campos claves.

Las principales tablas que normalmente se utilizan son:

- **HEADER:** Tabla de collares de sondajes. Contiene el nombre de cada sondaje (HOLE-ID), su posición espacial (LOCATION X, Y y Z) y su largo total (LENGTH).
- **SURVEY:** Tabla de orientación y desviaciones de cada sondaje, donde se especifica, por tramos, la orientación del mismo a través de su azimut e inclinación. Esta tabla está vinculada a la tabla HEADER a través del HOLE-ID y puede contener los campos FROM, TO, AZIMUTH y DIP para cada tramo del sondaje.
- **ASSAYS:** Tabla que contiene la información de ensayos o análisis químicos de las muestras colectadas. También está vinculada a las otras tablas a través del HOLE-ID. Contiene las leyes de tantos elementos e impurezas como sea necesario y cualquier otra característica mapeada a partir de las muestras, siempre y cuando el mapeo se haya realizado en los mismos intervalos que se separaron para el muestreo. Típicamente, los campos de esta tabla son: HOLE-ID, FROM, TO, y GRADE para cada intervalo del sondaje.
- **LITHOLOGY:** Tabla con el resultado del estudio geológico de litologías o alteraciones del sondaje. También considera un vínculo con las otras tablas a través del HOLE-ID y contiene FROM, TO, y los códigos necesarios para identificar la litología, mineralogía, tipo de roca y alteración.

Adicionalmente, es posible encontrar tablas que contienen información de análisis geotécnicos, de mapeos de mineralización y alteraciones, de re-análisis de muestras, correcciones, etc. En general las bases de datos llegan a ser bastante complejas y es necesario tener claridad respecto a qué información contiene cada tabla. Es importante documentar claramente los contenidos de las tablas y de dónde se extrae la información en cada etapa, de manera de facilitar futuras auditorías o revisiones del trabajo que se realiza.

WORKSPACE > CREATE OR MODIFY WORKSPACE



Se iniciará el editor de estructura (**Structure Editor**) de la base de datos, donde se debe crear una nueva estructura

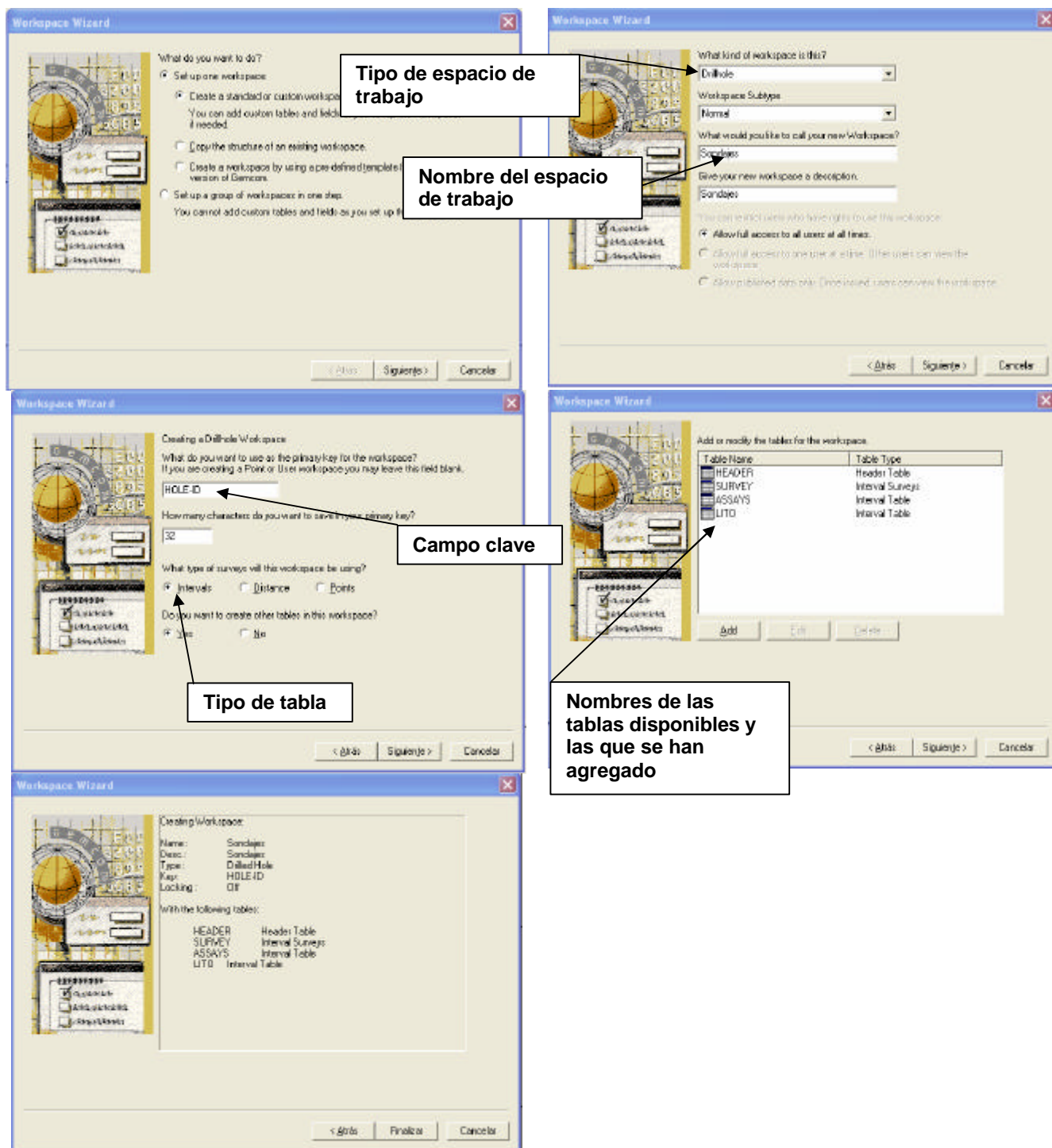
WORKSPACE > NEW

Aquí se selecciona el tipo de workspace a crear y se le asigna un nombre y descripción. Se especifica el campo que servirá de vínculo entre las distintas tablas de la base de datos. En general, esto se realiza con el campo HOLE-ID.

Se debe especificar el tipo de tablas disponibles. En el caso del proyecto a realizar, se debe seleccionar: **Intervals**. Se deben agregar las tablas adicionales que no son creadas automáticamente por el programa.

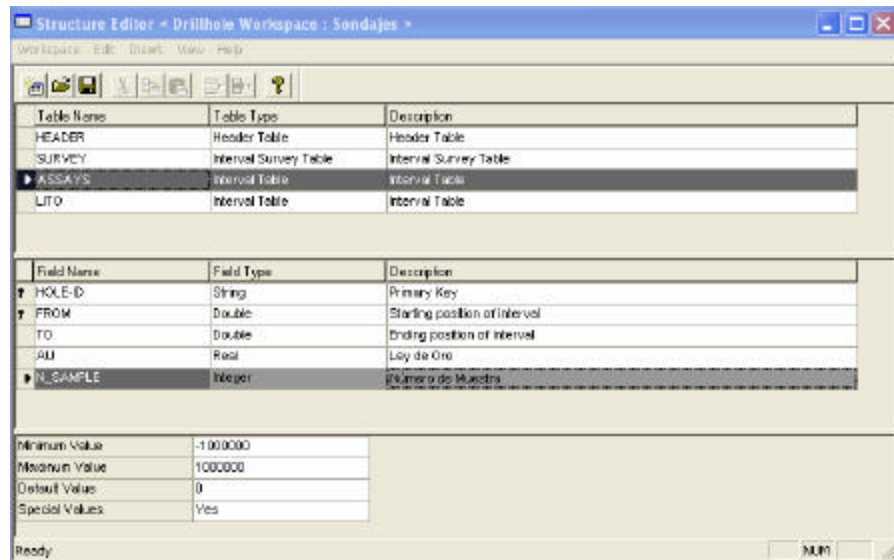
Los aspectos más relevantes en este proceso, para la aplicación que se le dará en el Proyecto 3D, son los siguientes:

- Primary key? HOLE-ID
- Tipo de Survey? Intervals
- Quiere crear otras tablas? Yes
- Add: Assays (Intervals), Lito (Intervals)



En las tablas creadas, se deben definir los campos que a continuación se muestran en las figuras. Para cada campo, se debe asignar un tipo (real, entero, texto) y una breve descripción. Además en la parte baja del editor, una vez seleccionado un campo, se puede modificar el valor por defecto y el número de decimales.

Tabla ASSAYS



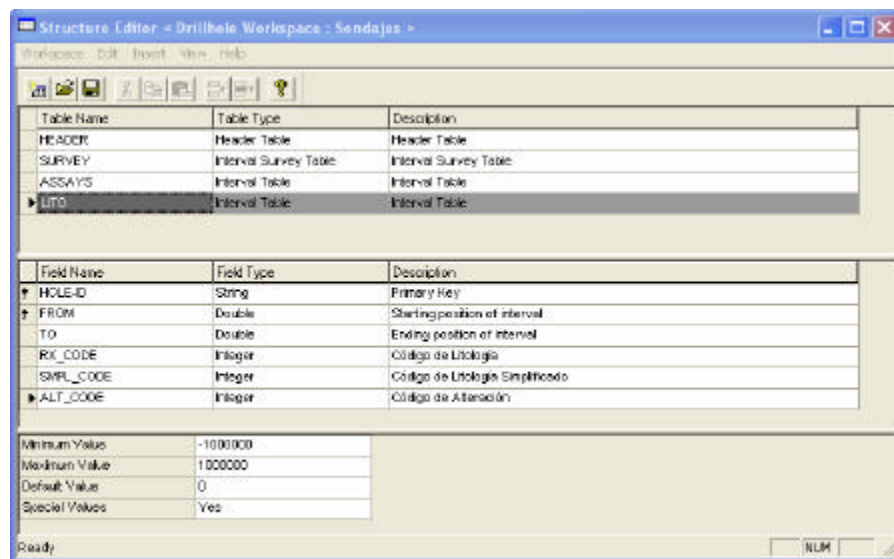
The screenshot shows the 'Structure Editor' window for 'Drillhole Workspace : Sondajes'. The 'Table Name' list on the left has 'ASSAYS' selected. The main area displays the table's structure with three columns: 'Table Name', 'Table Type', and 'Description'. Below this, the 'Field Name' list shows 'HOLE_ID', 'FROM', 'TO', 'AU', and 'N_SAMPLE'. The 'Field Type' and 'Description' columns provide details for each field. At the bottom, there are fields for 'Minimum Value', 'Maximum Value', 'Default Value', and 'Special Values'.

Table Name	Table Type	Description
HEADER	Header Table	Header Table
SURVEY	Interval Survey Table	Interval Survey Table
ASSAYS	Interval Table	Interval Table
LITO	Interval Table	Interval Table

Field Name	Field Type	Description
HOLE_ID	String	Primary Key
FROM	Double	Starting position of interval
TO	Double	Ending position of interval
AU	Real	Ley de Oro
N_SAMPLE	Integer	Número de Muestra

Minimum Value	-1000000
Maximum Value	1000000
Default Value	0
Special Values	Yes

Tabla LITO



The screenshot shows the 'Structure Editor' window for 'Drillhole Workspace : Sondajes'. The 'Table Name' list on the left has 'LITO' selected. The main area displays the table's structure with three columns: 'Table Name', 'Table Type', and 'Description'. Below this, the 'Field Name' list shows 'HOLE_ID', 'FROM', 'TO', 'RCK_CODE', 'SMPL_CODE', and 'ALT_CODE'. The 'Field Type' and 'Description' columns provide details for each field. At the bottom, there are fields for 'Minimum Value', 'Maximum Value', 'Default Value', and 'Special Values'.

Table Name	Table Type	Description
HEADER	Header Table	Header Table
SURVEY	Interval Survey Table	Interval Survey Table
ASSAYS	Interval Table	Interval Table
LITO	Interval Table	Interval Table

Field Name	Field Type	Description
HOLE_ID	String	Primary Key
FROM	Double	Starting position of interval
TO	Double	Ending position of interval
RCK_CODE	Integer	Código de Litología
SMPL_CODE	Integer	Código de Litología Simplificado
ALT_CODE	Integer	Código de Alteración

Minimum Value	-1000000
Maximum Value	1000000
Default Value	0
Special Values	Yes

El Workspace debe GUARDARSE al finalizar la creación de tablas.

8. Preparar Perfil de Importación de Bases de Datos

Una vez creada la base de datos con la estructura correcta, se deben importar los datos. Para ello es necesario diseñar primero un perfil (**profile**) de importación, donde se especifica el formato en que vienen los datos y a qué campos de la base de datos irán asignadas las columnas del archivo con datos.

Primero, se debe seleccionar el espacio de trabajo en el que se quiere realizar la importación.

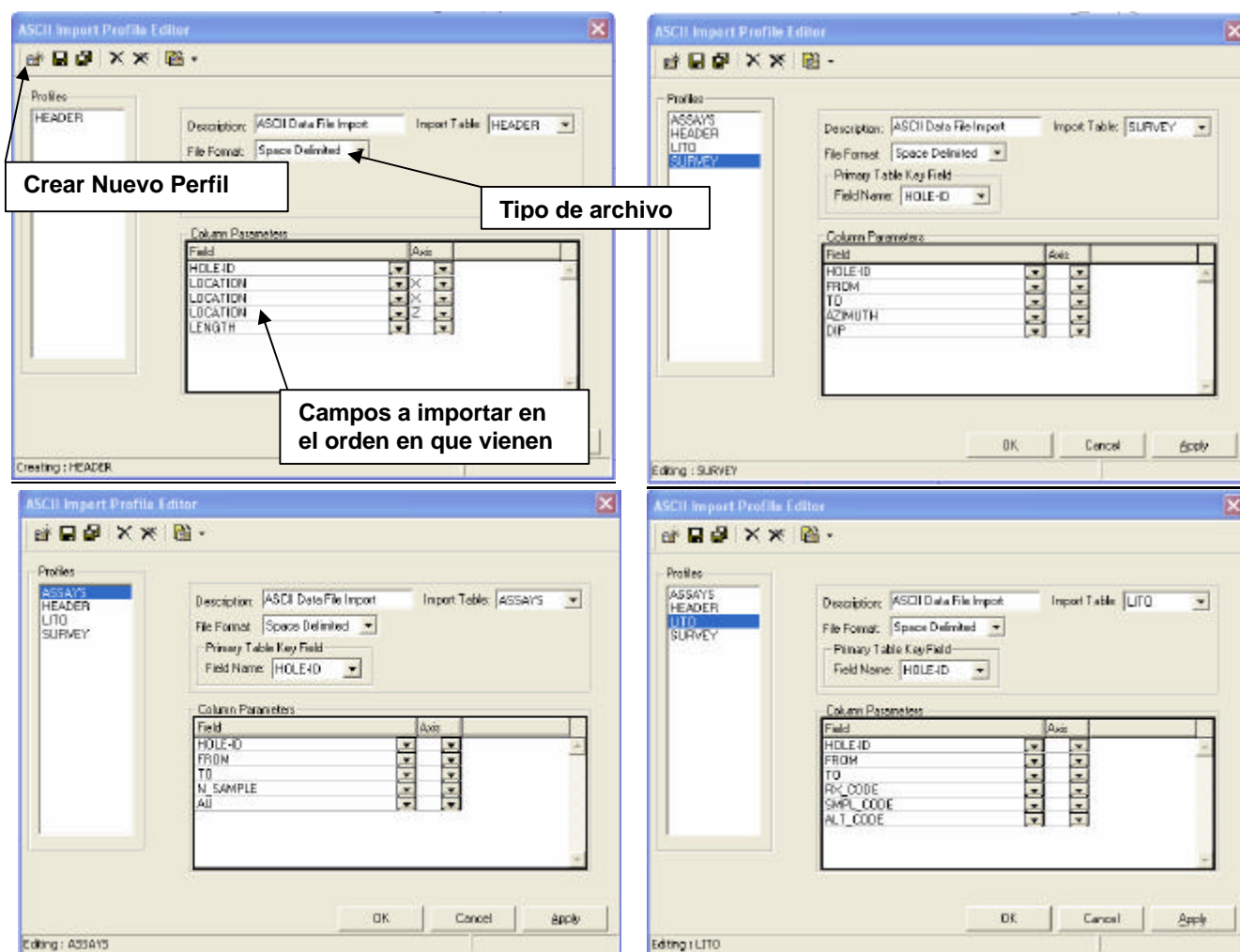
WORKSPACE > SELECT WORKSPACE

Seleccionar SONDAJES

FILE > IMPORT > DEFINE IMPORTS PROFILES

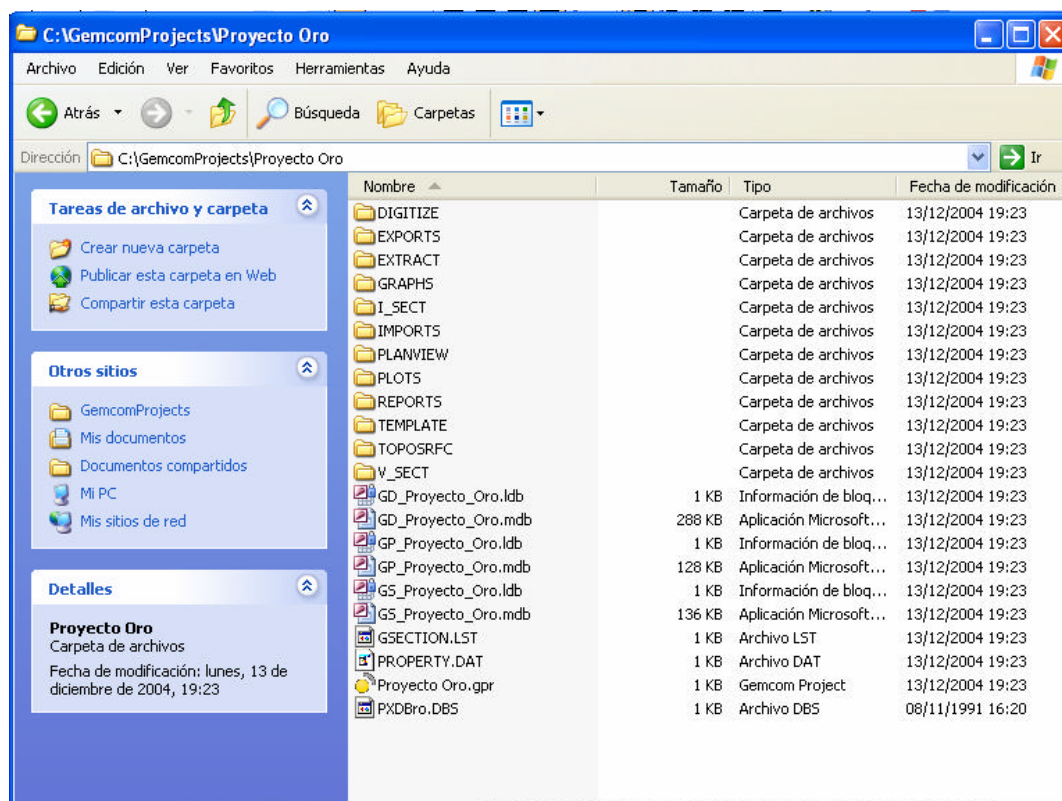
Add: agregar un profile por cada tabla. En cada tabla, se deben listar los campos en el orden que vienen ordenados los datos dentro de los archivos ASCII. Al terminar un profile hacer clic en APLICAR.

Recuerde grabar cada profile al terminar de especificar los campos y luego crear el profile siguiente.



9. Importar datos de las tablas

GEMS genera por defecto, al momento de la creación de un proyecto, una serie de carpetas donde se ubicarán distintos archivos, tales como archivos de extracción, imágenes, superficies, etc.



Es recomendable llevar las tablas en formato ASCII que contienen los datos al directorio IMPORTS del proyecto (por ejemplo este directorio puede ser C:\GemcomProjects\Proyecto Oro\IMPORTS). Los datos deben importarse en el siguiente orden: HEADER – SURVEYS – ASSAYS – LITO. De esta manera, se pueden generar los vínculos dentro de las tablas.

FILE > IMPORT DATA INTO WORKSPACE

- Escoger el profile de importación correspondiente a la tabla
- Crear un archivo donde guardar reporte de errores (TABLA.ERR)
- Ver detalle de importe (datos procesados, importados, rechazados), anotar números y luego OK.
- Ver archivo .ERR con detalle de errores. En caso que hubiesen, detectar, revisar y solucionar (si es que se puede).

En caso de encontrar problemas en este proceso (por ejemplo, que todos los datos sean rechazados en el proceso de importación), se puede acceder a la base de datos y revisar qué datos efectivamente se importaron.

10. Editar la base de datos

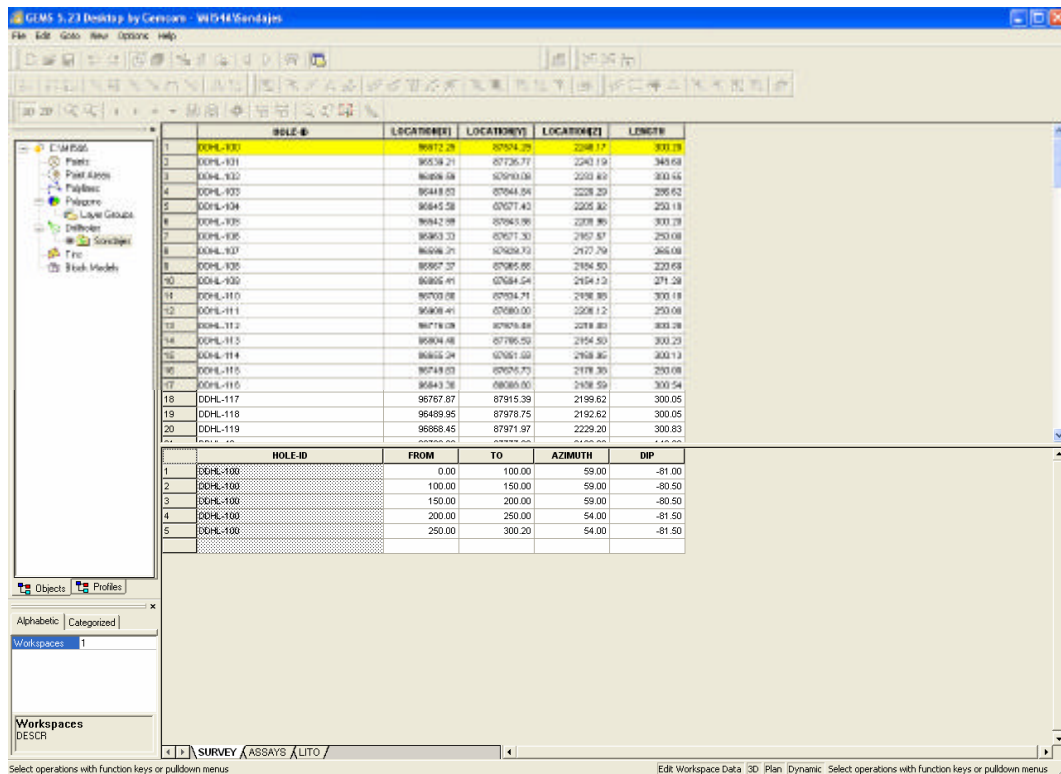
Cualquier modificación que se haga en este editor quedará guardada, por lo que es necesario tener mucho cuidado al editarla, para no modificarla involuntariamente.

WORKSPACE > EDIT DATA

En la parte baja del editor se puede seleccionar la tabla vinculada a la tabla HEADER para ver, por ejemplo, las leyes (tabla ASSAYS), la litología (tabla LITO), etc.

Para cerrar la base de datos, se debe hacer:

FILE > CLOSE WORKSPACE EDITOR



Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 3
Despliegue de datos – Plantas y secciones

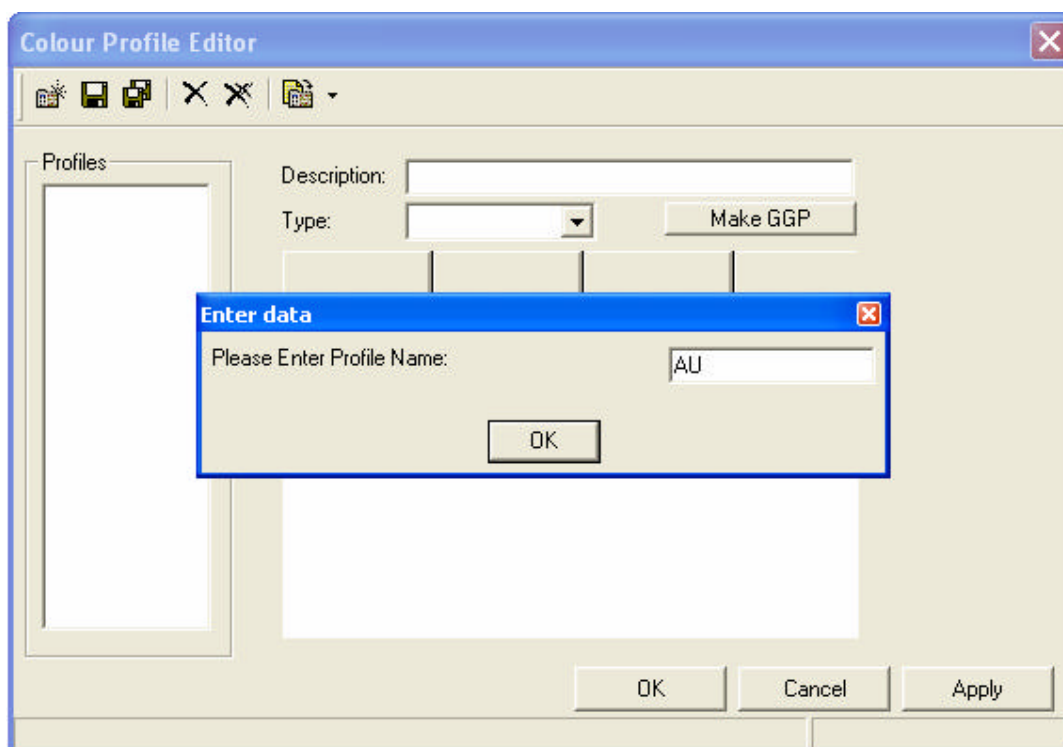
1. Objetivos de la Clase Nº 3

Los principales objetivos de esta clase son:

- Desplegar en pantalla los sondeos
- Crear y desplegar plantas y secciones y generar planos paralelos
- Visualizar los datos de diferentes maneras

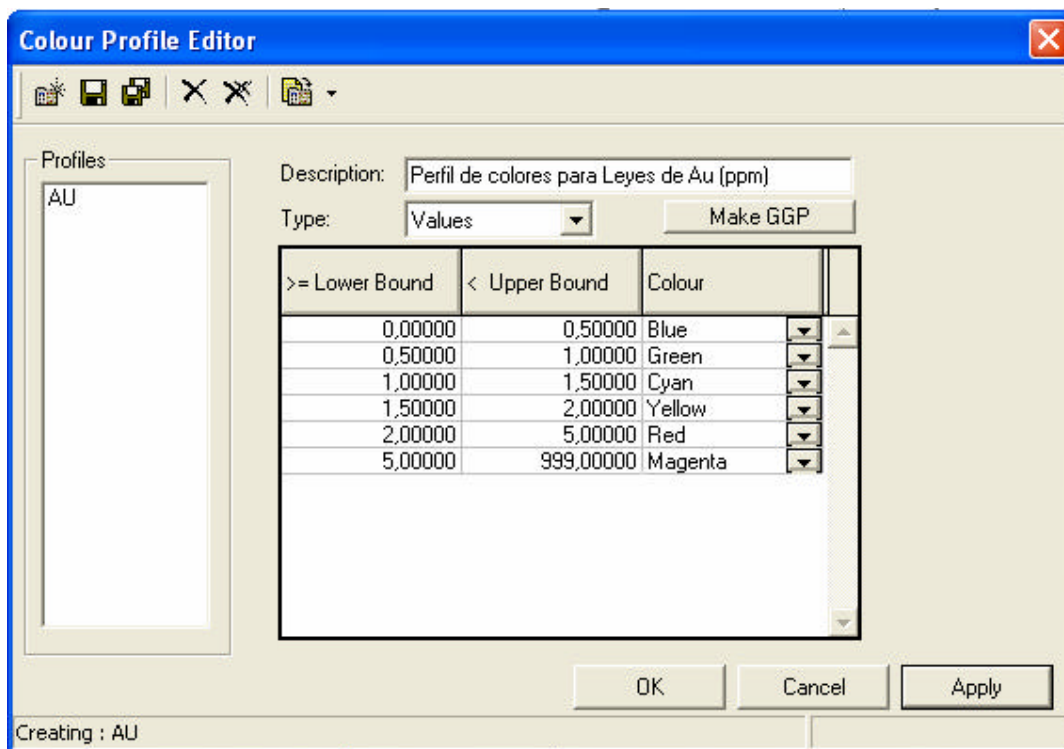
2. Creación de un perfil de colores

Antes de visualizar los sondeos, se debe definir el esquema de colores con que se codificarán las leyes y litologías (en general, cualquier propiedad que queramos visualizar). Para ello, es necesario crear uno o más perfiles de color.

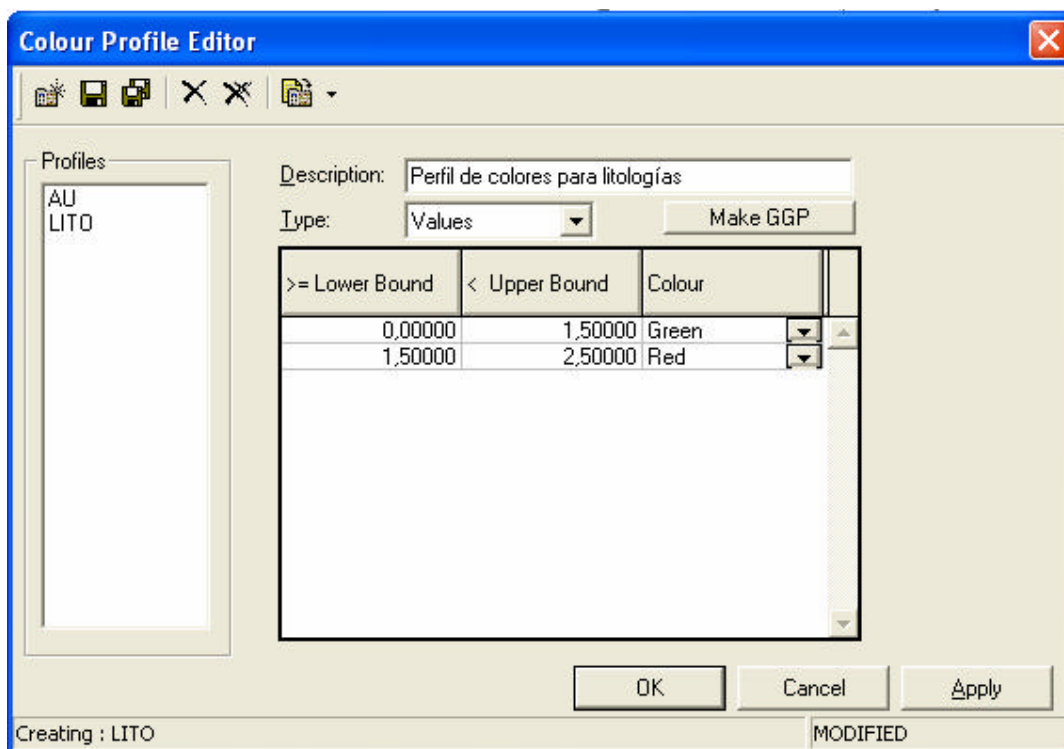


Crear un perfil de colores para leyes:

FORMAT > OTHERS PROFILES > DEFINE COLOR PROFILES



Crear también un perfil para litologías:



Una vez definido el perfil de color, se puede crear un perfil de despliegue de leyes de los sondeos.

3. Visualización de Sondajes

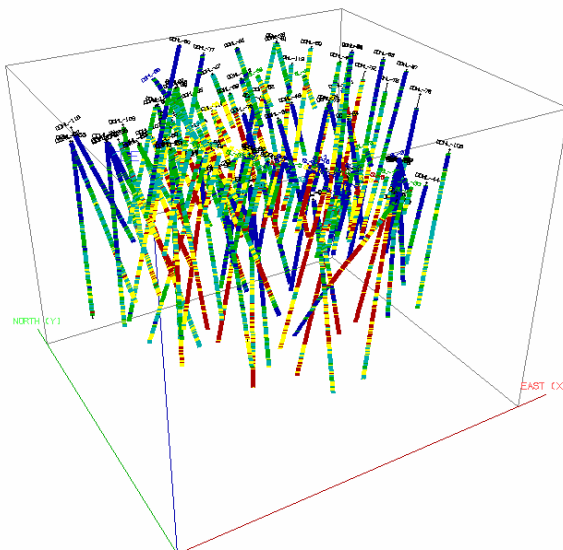
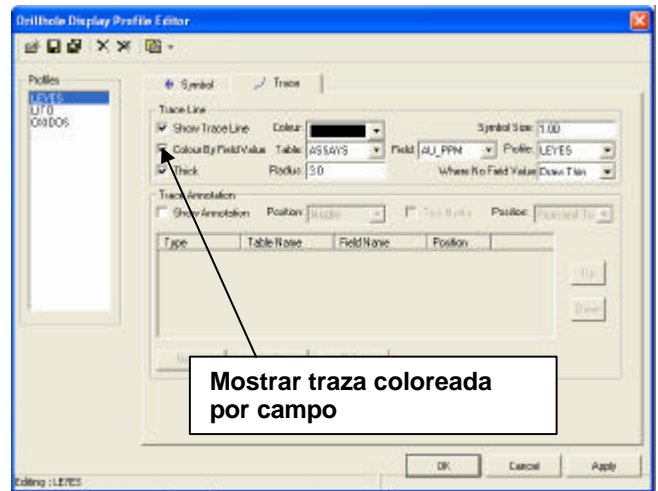
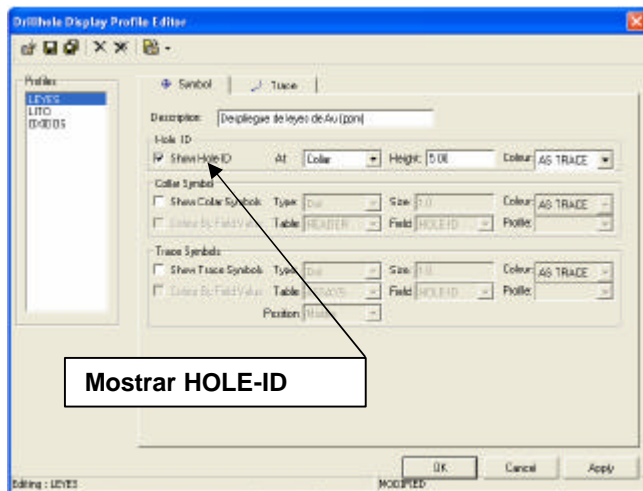
Crear un perfil de despliegue de sondajes:

FORMAT > DRILLHOLE

Seleccionar el Workspace **Sondajes**

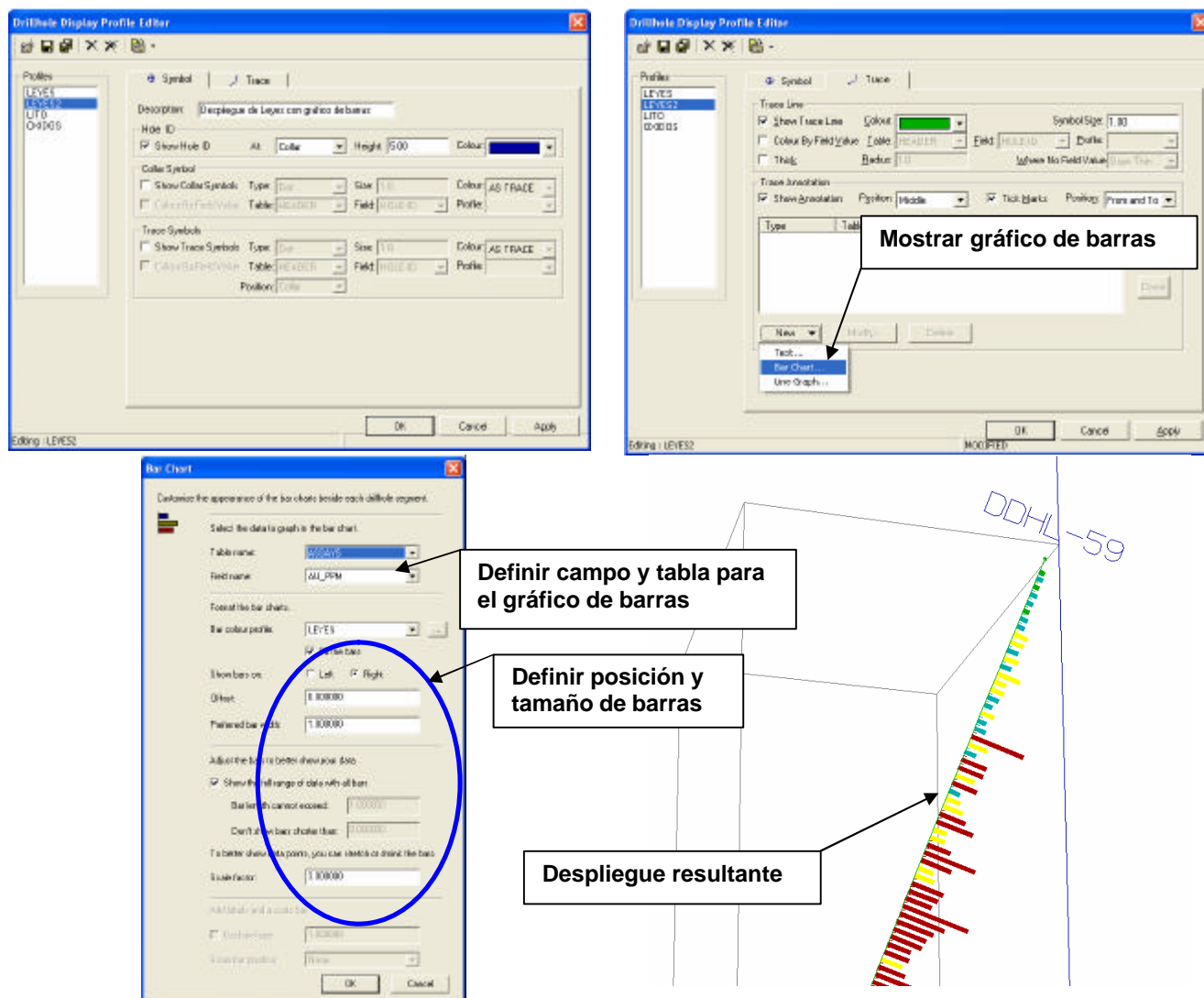
En estos perfiles se puede especificar cómo se visualizarán los sondajes. En la página SYMBOL, se puede escribir una breve descripción del profile para identificarlo. Luego, se indica si se desplegará el HOLE-ID, el collar del sondaje y la traza con algún símbolo. El collar puede colorearse según algún campo en particular (por ejemplo, se podría distinguir entre sondajes de diamantina y de aire reverse, para lo cual sería necesario definir un perfil de colores de texto).

En la página TRACE, se indica cómo se desplegará la traza del sondaje. Se especifica si se desplegará la traza y si se coloreará según el código de color para algún campo determinado de una de las tablas (por ejemplo, por ley, litologías, etc). Además, se puede señalar de qué espesor se quiere mostrar la traza y qué hacer con las muestras sin información.



El resultado del profile anterior se muestra a la izquierda. Se pueden ver los sondajes coloreados según la ley de la muestra y con el identificador del sondaje (HOLE-ID) escrito sobre el collar de cada elemento.

Adicionalmente, se pueden agregar gráficos de barras coloreados según el valor de un campo determinado, o anotar los valores de las muestras en el despliegue. A continuación se muestra, a modo de ejemplo, cómo incluir un gráfico de barras en el despliegue.

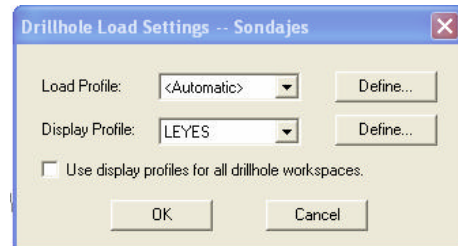
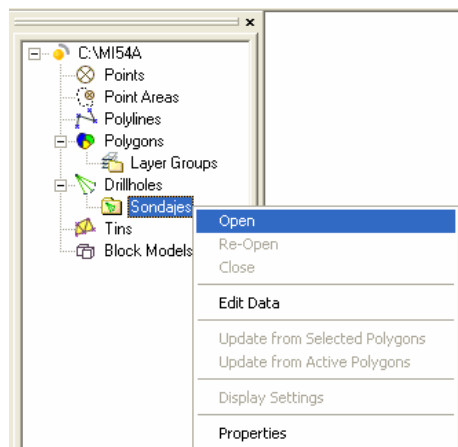


De la misma manera, se debe crear un perfil de despliegue de las litologías y otro para desplegar los sondajes coloreados según la campaña de sondajes a la que pertenecen.

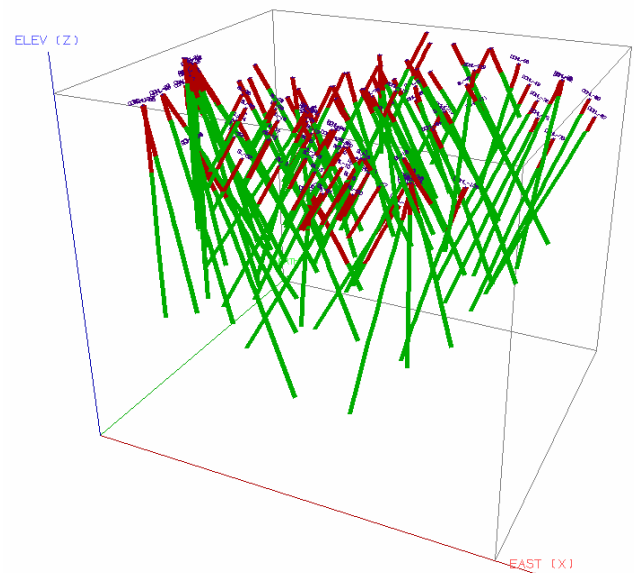
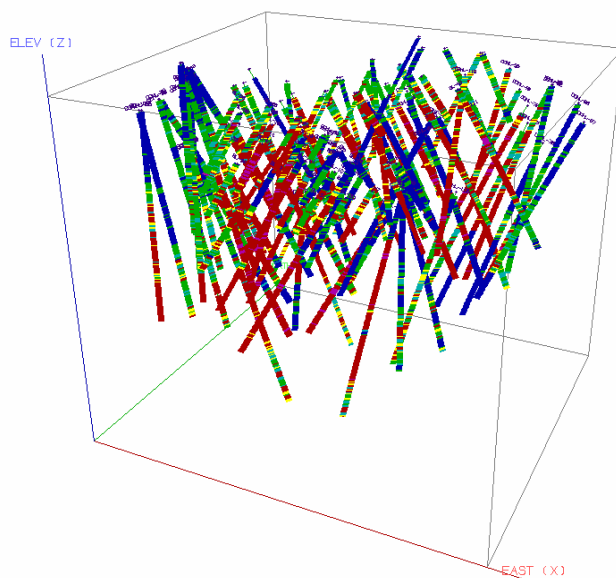
Para desplegar los sondajes

DRILLHOLE > DATA > OPEN

Alternativamente, se pueden desplegar seleccionando en el Explorador del Proyecto (lado izquierdo) el workspace (sondajes) y haciendo clic con el botón derecho del mouse, se puede seleccionar la opción OPEN y seleccionar ahí el perfil de despliegue (e incluso se puede editar uno existente o crear uno nuevo, presionando DEFINE).

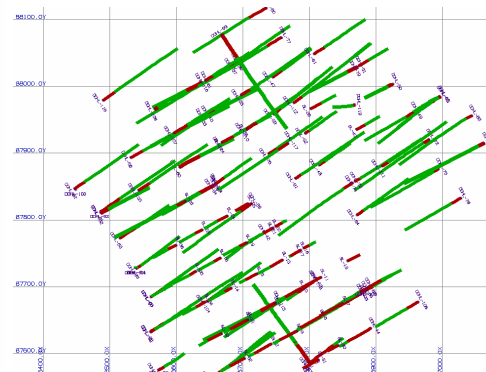
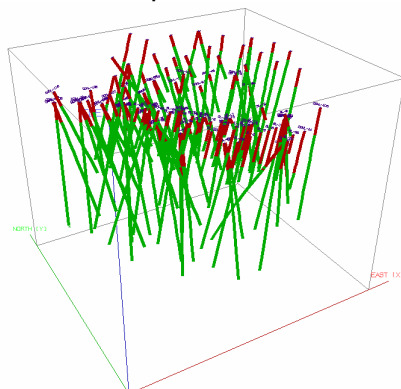



Seleccionar el profile de despliegue recién creado y cargar todos los sondajes.



4. Algunas consideraciones acerca del despliegue de datos

Una vez desplegados los sondajes con la información relevante, se pueden utilizar los botones **3D** y **2D** para pasar de una visualización en tres dimensiones a una vista en un plano bidimensional.



Si aún no se han definido planos o secciones, la visualización en 2D es, por defecto, una planta donde se proyectan todos los sondajes. Con las flechas del teclado se pueden rotar (en el modo 3D) los datos. Esta operación puede ser lenta, si se han cargado muchos datos (las leyes del modelo de bloques, por ejemplo). Para cambiar de punto de vista de manera más rápida, se puede utilizar el botón  y mover el mouse, o simplemente presionar la tecla “;” y mover el mouse. Una vez escogida la vista deseada, se presiona ENTER.

5. Definición de plantas y perfiles

En el modo 3D se pueden definir plantas y secciones verticales o inclinadas, en forma gráfica (con el mouse). Una vez definidas, al pasar al modo 2D se ve la proyección de los sondajes en el plano, dentro de un determinado espesor, el cual se puede definir presionando “C”, o bien:

VIEW > SET PROJECTION DISTANCES

Además, si se quiere ver todos los datos proyectados sobre el plano definido, se puede volver a definir el espesor anterior, o bien, se puede presionar el

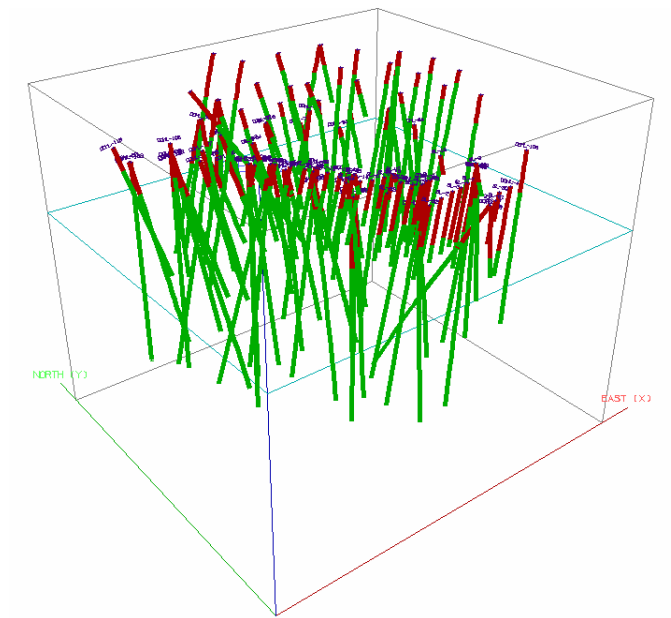
botón .

Generación de plantas

Para generar una planta:

VIEW > PLAN VIEW > LOOKING DOWN

Con el mouse se determina la posición de la planta.



Otra alternativa, si se quiere definir una planta a una cota determinada, es:

VIEW > PLAN VIEW > DEFINE PLAN VIEW

Plan View Editor

Profiles

- 2300

Comments : Planta 2300

Reference Elevation : 2300.000

Lower Elevation Limit : 2290.000

Upper Elevation Limit : 2310.000

Volume Calculations:

Series : 1

Sequence : 1

PC-Mine Bench Code (Optional):

Create Date: 04/3/31 Last Update: 04/3/31

OK Cancel Apply

Editing : 2300

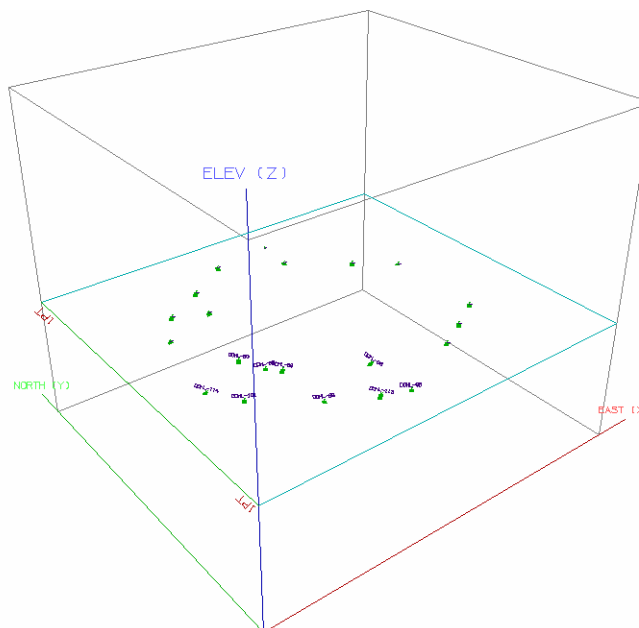
Se debe agregar una planta nueva y definir un nombre. Se requiere de una elevación de referencia y una elevación máxima y mínima para la planta, las que definen qué datos pertenecen a dicha planta y se visualizan con ella. Es necesario definir un número de serie y

secuencia para la planta.

La generación de una planta concluye al presionar APPLY.

La planta generada puede desplegarse seleccionándola gráficamente:

VIEW > PLAN VIEW > SELECT GRAPHICALLY



La planta seleccionada con el mouse sólo mostrará las muestras que estén entre su elevación mínima y máxima.

Una vez generada una planta, se pueden generar múltiples planos paralelos, como se verá más adelante.

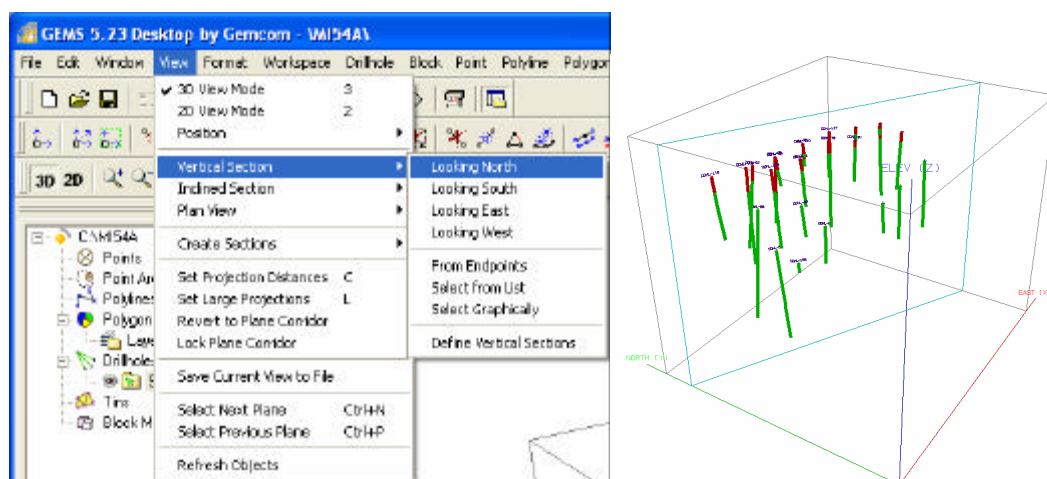
Generación de secciones verticales

De la misma forma, se pueden generar secciones verticales:

VIEW > VERTICAL SECTION

En este caso se tienen varias opciones. La sección puede definirse mirando al norte, sur, este u oeste, o desde un par de puntos definidos con el mouse en un plano horizontal (en la pantalla).

VIEW > VERTICAL SECTION > FROM ENDPOINTS



Generación de secciones inclinadas

Para generar una sección inclinada:

VIEW > INCLINED SECTION

En este caso, se pueden definir por coordenadas o a través de tres puntos definidos con el mouse.

Generación de una serie de planos paralelos equidistantes

Una vez definido un plano (ya sea una planta o una sección), se pueden construir diversos planos paralelos equidistantes. Los planos paralelos serán automáticamente generados y nombrados y requieren que una planta o sección

de referencia (a partir del cual se van a generar los planos paralelos) esté activa:

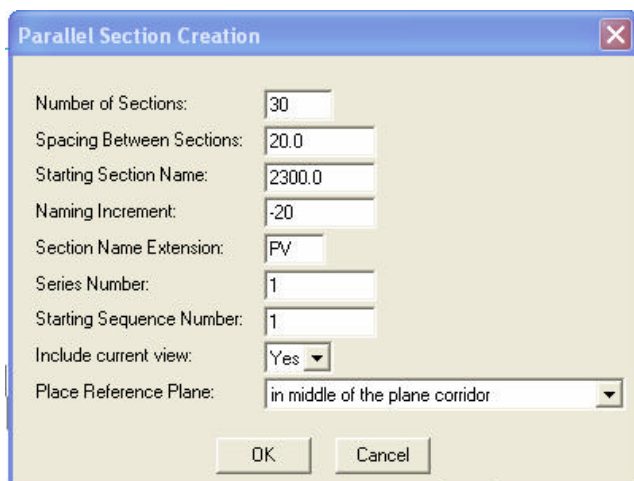
VIEW > PLAN VIEW > SELECT GRAPHICALLY

Seleccionar un plano con el mouse.

Los planos paralelos se generan de la siguiente manera:

VIEW > CREATE SECTIONS > PARALLEL SECTIONS

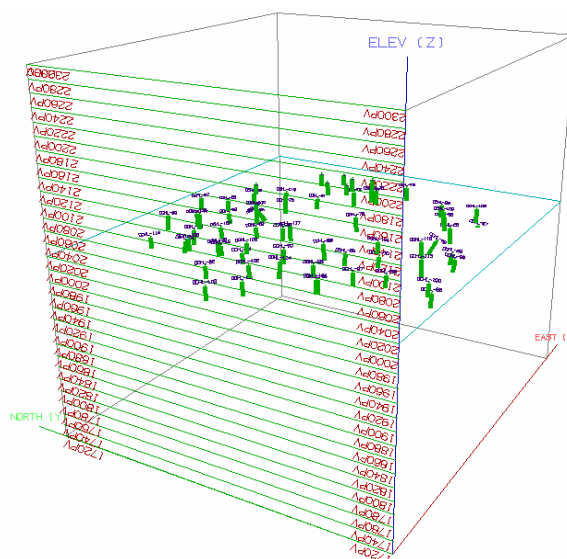
Tras una pantalla de confirmación, se deben llenar los siguientes campos:



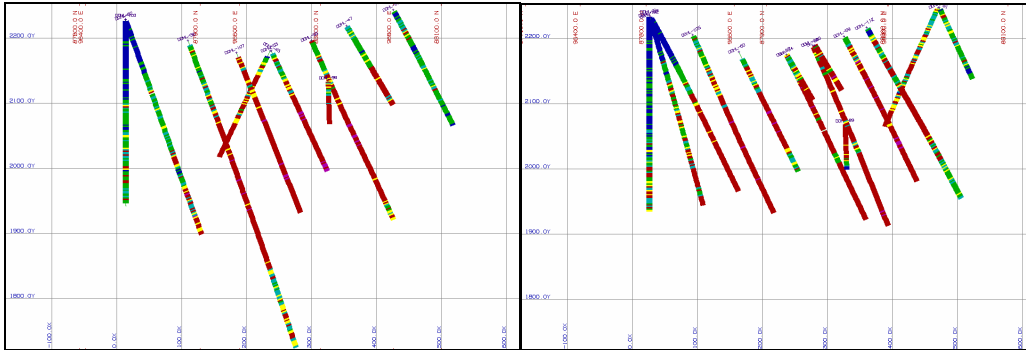
- Número de secciones paralelas a considerar.
- Espaciamiento entre secciones (positivo implica un descenso en elevación).
- Nombre de la sección inicial.
- Incremento en el nombre para las secciones subsecuentes.
- Extensión en el nombre de la serie de secciones.
- Número de la serie de secciones y número de inicio de la secuencia.

Esta operación generalmente toma unos segundos. Luego, se puede seleccionar gráficamente la sección a desplegar.

VIEW > PLAN VIEW > SELECT GRAPHICALLY



Igualmente, resulta interesante mirar secciones verticales por donde pasan los sondajes, de manera de ver, por una parte, la disposición (orientación) de éstos, y por otra, la variabilidad en las leyes. Para ello, se debe definir una sección vertical por donde pasan los sondajes y luego generar una serie de otras secciones paralelas a aproximadamente el espaciamiento de los sondajes. Aquí se muestra un par de ejemplos.



6. Hitos de avance del proyecto

A la fecha, los grupos de trabajo deberían estar bien familiarizados con el uso de GEMS. Su funcionamiento básico de creación de perfiles y luego ejecución de la tarea debiera permitirles explorar opciones que no han sido cubiertas en clases.

El desarrollo del proyecto debe, a estas alturas, contemplar los siguientes aspectos:

- Introducción general con los objetivos del proyecto. Se debe recordar que el principal objetivo de este proyecto es generar un inventario de recursos para este depósito. Cada decisión en el proceso de caracterizar la ley del depósito y su variabilidad espacial, debe estar bien justificada.
- Discusión acerca de la geología en base a los antecedentes disponibles. Las preguntas que deben contestarse son: ¿Qué puede esperarse de la estimación de leyes?, ¿es la geología excesivamente compleja, como para ser un problema en la estimación?, ¿existe suficiente información de muestras para realizar una estimación bien fundada de los recursos del depósito?
- Visualización de los datos, discusión acerca de la base de datos disponible, su estructura y la calidad de los datos (datos faltantes, datos erróneos, áreas mal muestreadas, densidad de sondajes suficiente o insuficiente, etc). Se debe, al menos, ilustrar la disposición de los datos con:
 - Una vista en planta general, donde se presenten la ubicación de los collares de los sondajes.
 - Una vista en planta, donde se proyecten los sondajes, de manera de ver su orientación (inclinados o verticales)

- Una sección general norte-sur y otra este-oeste donde se proyecten todos los sondajes de manera de ver su orientación y densidad.
- Un par de plantas donde se muestren sólo las muestras en un determinado espesor, respecto a la elevación de dicha planta.
- Un par de secciones donde se muestren sólo las muestras en un determinado espesor, respecto al plano vertical de la sección.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 4
Extracciones y estadísticas básicas
Importación de superficie topográfica

1. Objetivos de la Clase Nº 4

Los principales objetivos de esta clase son:

- Realizar extracciones desde la base de datos según ciertos criterios
- Calcular las estadísticas básicas para las diferentes poblaciones de datos
- Iniciar el estudio comparativo entre sondajes de aire reverso y de diamantina
- Crear un workspace de superficies
- Importar la superficie topográfica

2. Crear archivos de extracción

Para analizar la información de las bases de datos, es necesario crear un archivo de extracción que contenga la información a analizar.

Los archivos de extracción presentan seis columnas:

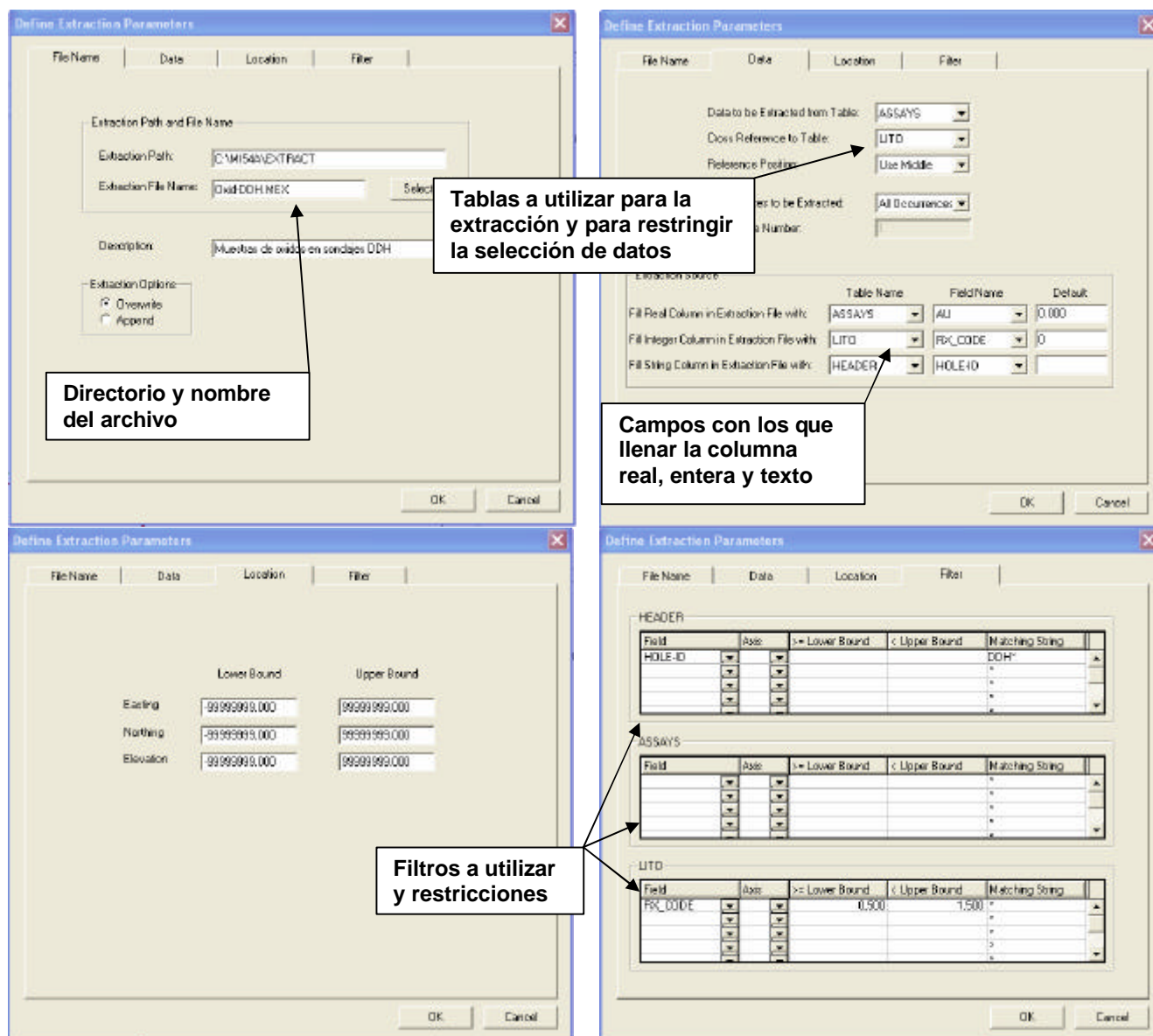
- Coordenada Norte
- Coordenada Este
- Cota o Elevación
- Valor real
- Valor entero
- Texto

Note que sólo una columna de valor real, entero y de texto puede extraerse en cada archivo. Las extracciones (guardadas en archivos de extensión .MEX) se realizan de la siguiente forma:

WORKSPACE > EXTRACT A SUBSET OF DATA > CREATE POINTS > EXTRACTION FILE

La primera página (FILE NAME) de este menú permite definir el nombre y descripción del archivo a extraer. En DATA se indica de qué tabla y en consideración a qué otra tabla se realizará la extracción. Por ejemplo, si se quieren extraer las leyes para una litología determinada, se deberá usar como referencia cruzada la tabla de litologías y como tabla principal (de donde se extraerán los datos realmente), la tabla de leyes (ASSAYS). En LOCATION, se puede filtrar por coordenada geográfica, truncando todos los datos fuera de cierto rango de coordenadas. Finalmente, FILTER permite especificar los criterios de selección de los datos. Se pueden especificar intervalos de los datos, o bien especificar restricciones a los nombres, por ejemplo aceptando

sólo los datos cuyo HOLE-ID sea DDH*. Muchos de los problemas en la extracción de información se producen por campos mal especificados o mal completados en esta última página del menú de extracción de datos.

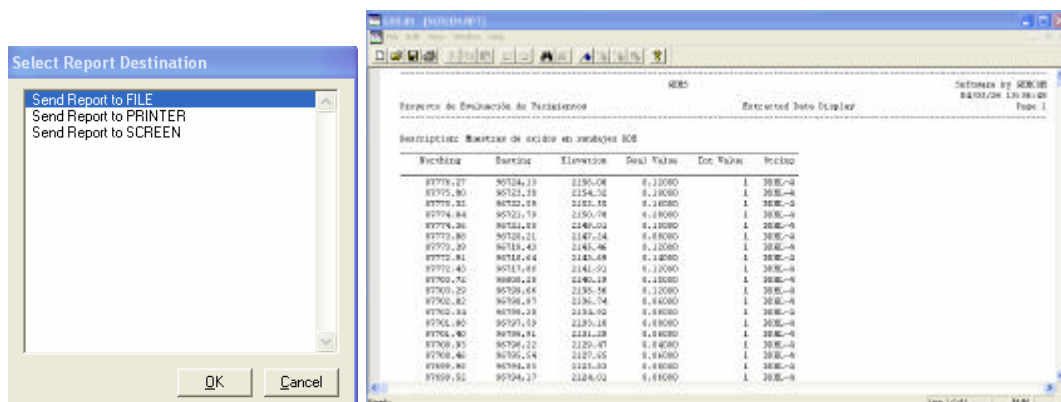


3. Ver archivos de extracción

WORKSPACE > EXTRACT A SUBSET OF DATA > VIEW EXTRACTION FILE

Enviar a la pantalla (SCREEN). Alternativamente se pueden enviar a un archivo ASCII (FILE) y editar para luego poder analizarlo con otras herramientas, por ejemplo de GSLIB. Al hacerse esto, muchas veces se incluyen encabezados en el medio de los datos (cuya finalidad es permitir la correcta impresión de los

datos), por lo que conviene más desplegar en pantalla los datos (SCREEN) y guardar con un nombre, en lugar de enviarlos directamente a un archivo.

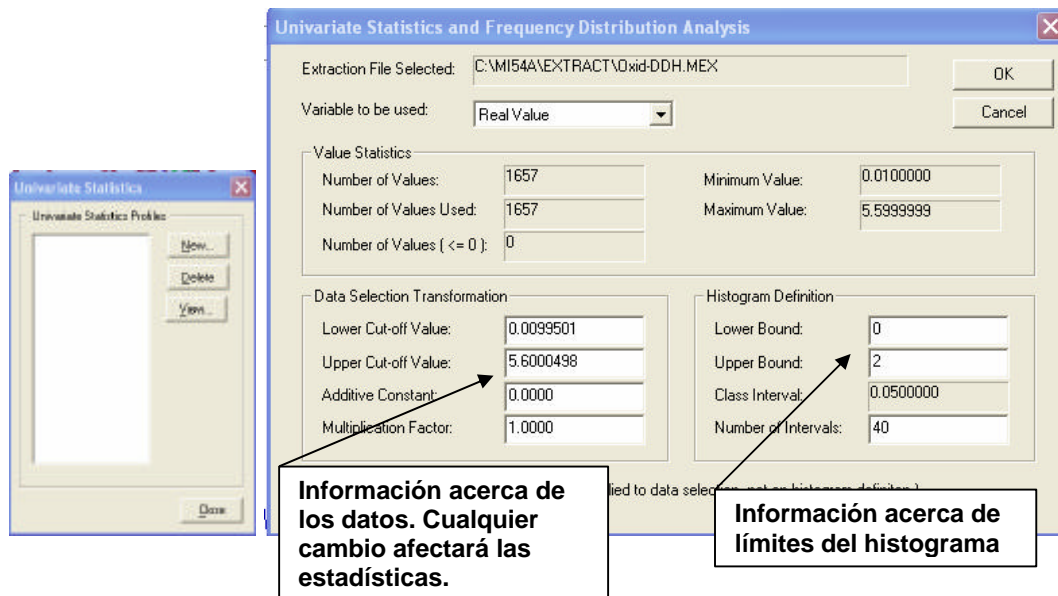


A partir de este archivo se puede hacer el análisis estadístico de los datos.

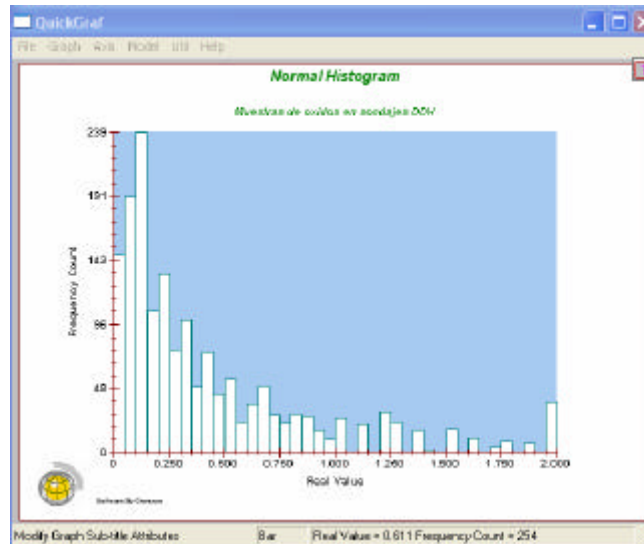
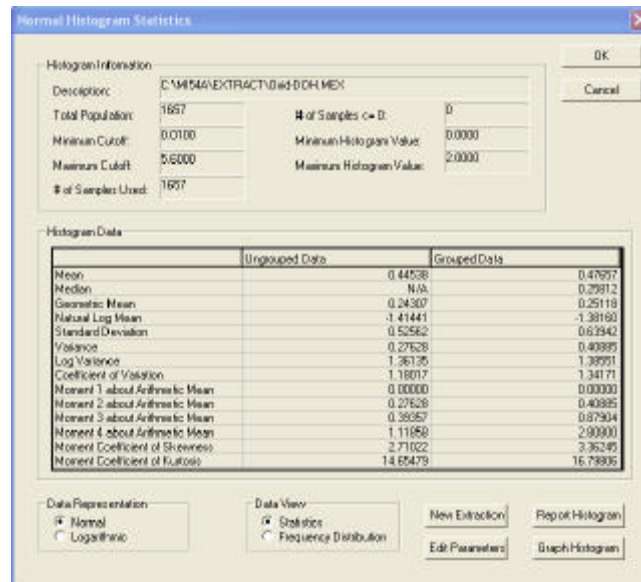
4. Analizar archivos de extracción

WORKSPACE > ANALYSIS > UNIVARIATE STATISTICS > EXTRACTION FILE

Crear NEW profile y nombrarlo y seleccionar el archivo de extracción.



La información generada al calcular las estadísticas básicas a un archivo de extracción se muestran en una tabla. En ella, sólo los resultados presentados como “Ungrouped Data” son válidos. Los otros datos (“Grouped Data”) tienen relación con la forma en la que se construyó el histograma, por lo que no son relevantes desde un punto de vista estadístico.



La información estadística entregada en este análisis debe resumirse y sólo la información relevante debe presentarse en el informe. Estas estadísticas permiten el cálculo y gráfico de estadísticas directas de los datos (sin transformación, llamadas “normales” en el programa GEMS). También se pueden calcular estadísticas de los logaritmos de los datos, construir histogramas acumulados normales y logarítmicos, etc.

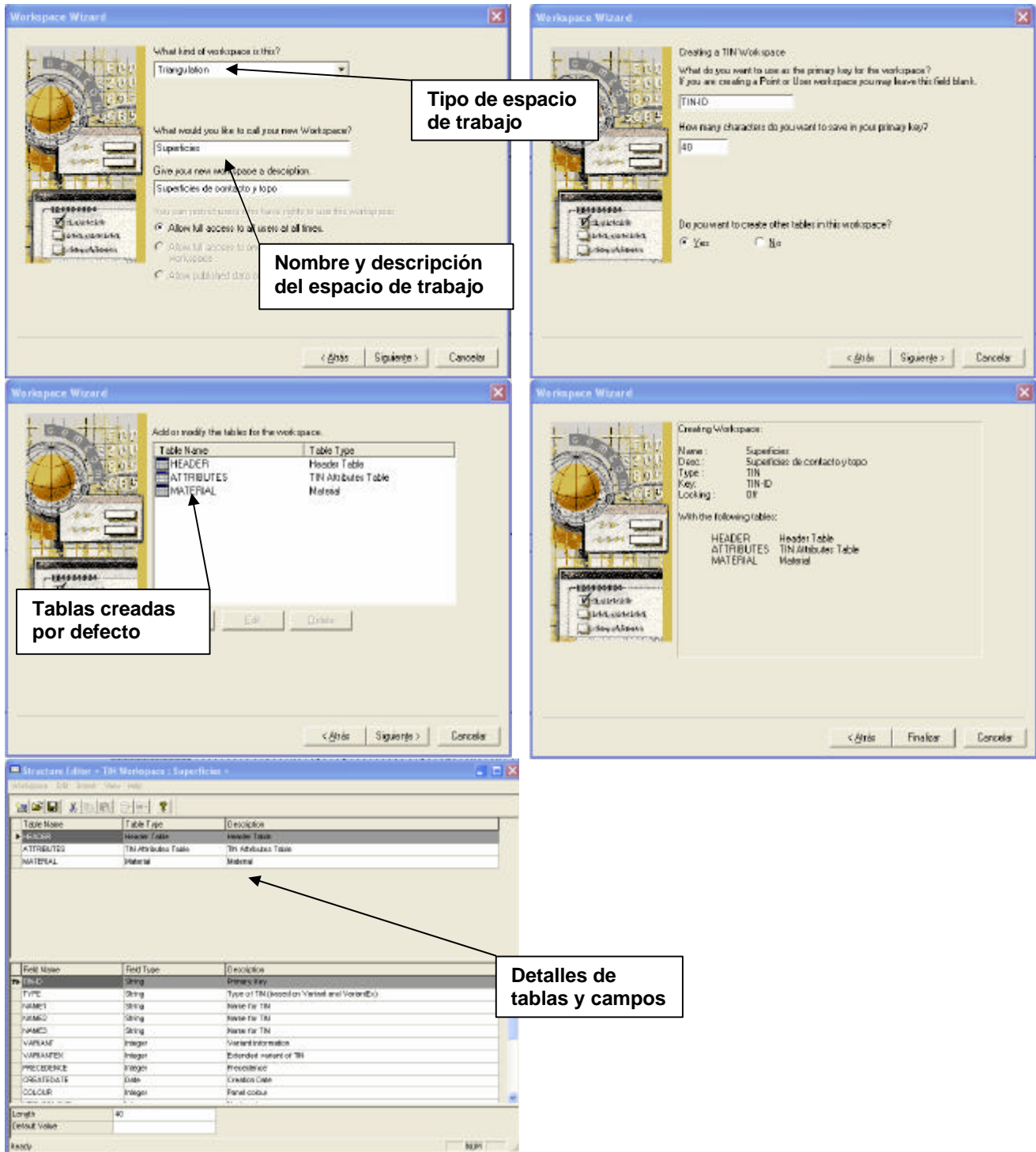
Los gráficos de QuickGraf pueden guardarse como .bmp o .wmf, este último formato siendo el más liviano y conveniente.

5. Creación de un workspace de superficies

Para importar la superficie topográfica, es necesario definir un workspace de superficies.

WORKSPACE > CREATE OR MODIFY WORKSPACE

En el Structure Editor, se debe crear un nuevo workspace. Se debe seleccionar la creación de un solo workspace, del tipo TRIANGULATION y definir el nombre y descripción. Como Primary Key se debe dejar el TIN-ID.



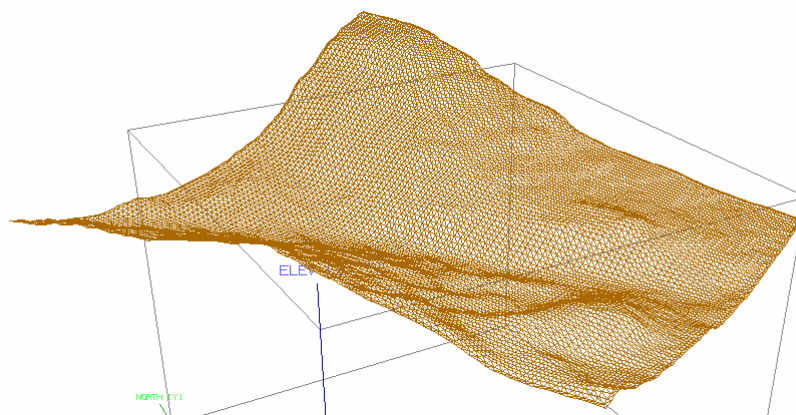
Este workspace debe agregarse a los TINS en el explorador (lado izquierdo) con el botón izquierdo del mouse y haciendo clic en ADD WORKSPACE.

6. Importación de superficie topográfica

Ahora estamos en condiciones de cargar la superficie topográfica, lo que nos permitirá posteriormente definir el modelo de tipos de roca para restringir la estimación. Para ello, se debe tener el archivo de la superficie topográfica en una localización conocida en el disco, de forma de poder importarla a un Workspace de superficies.

SURFACE > UTILS > IMPORT SURFACES FROM BT2

Se debe seleccionar el Workspace donde se guardará la superficie y luego encontrar el directorio donde esta se encuentra. Tras confirmar la importación, aparecerá un mensaje que confirma que un objeto ha sido importado.



Recuerde guardar el Workspace después de importar esta superficie.

7. Hitos de avance del proyecto

Con la presentación de los archivos de extracción y el análisis de estadísticas básicas, se puede iniciar el estudio de los distintos grupos de datos disponibles. De esta forma, se puede tener un primer acercamiento a la comparación de las campañas de sondeos y de las poblaciones geológicas (óxidos y sulfuros).

Para ello, se pueden resumir los estadísticos más importantes en una tabla para las poblaciones y sub-poblaciones de datos de interés. Se debe, además, mostrar la distribución global, para tener una primera idea del valor del depósito. Se sugiere extraer los datos y formatearlos para poder analizarlos con otras herramientas, tales como Excel o GSLIB, las que ofrecen mayor flexibilidad en los análisis.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 5
Compositación
Comparación de campañas de sondaje

1. Objetivos de la Clase Nº 5

Los principales objetivos de esta clase son:

- Aprender a preparar y calcular la tabla de compósitos.
- Calcular las estadísticas básicas para compósitos de 2, 5 y 10 metros, para cada población.
- Determinar la validez de la campaña de sondajes de aire reverso, comparándola con la de diamantina.
- Conocer los principales métodos para comparar poblaciones.
- Definir las poblaciones a utilizar en la estimación.

2. Cálculo de compósitos

Dado que las muestras tienen distintos tamaños, no poseen un igual peso estadístico (para la construcción de un histograma, por ejemplo). Por esta razón, se calculan compósitos que corresponden a un volumen regularizado de muestra, es decir, se define un tamaño sobre el cual se promediarán las muestras para obtener compósitos de un tamaño regular. La ley media del compósito se calcula como el promedio ponderado por el largo de las muestras que caen dentro del volumen definido del compósito. Otra razón para compositar es que a menudo el soporte a utilizar para la estimación corresponde a la altura de banco (o altura del bloque a estimar).

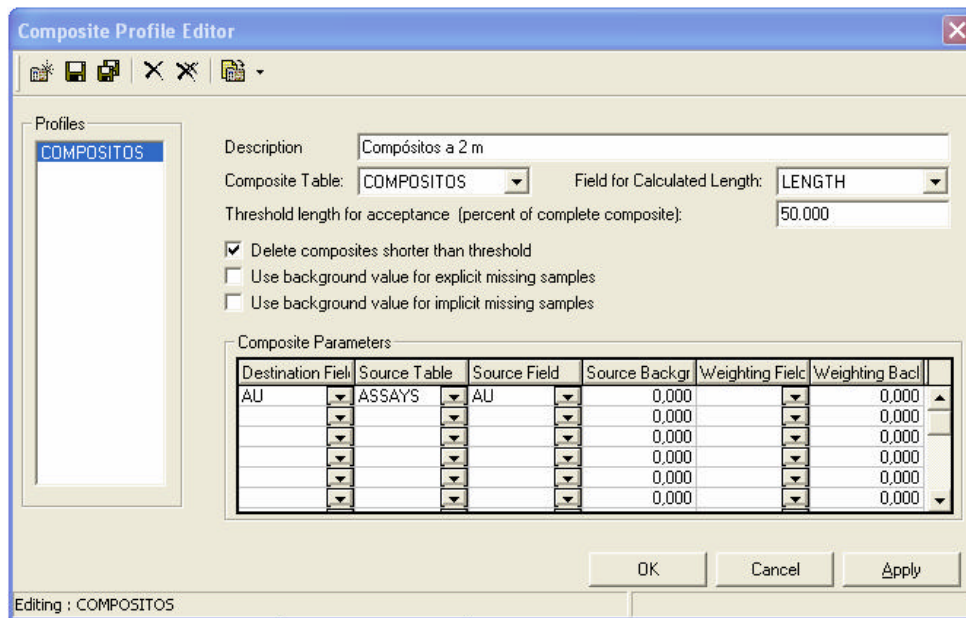
Es importante notar que, cuanto mayor es el tamaño del soporte al cual se está regularizando, menor es la varianza de la distribución, puesto que se están reemplazando valores puntuales por promedios.

Para calcular compósitos en GEMS, es necesario definir un profile de compósitos, luego preparar la tabla de compósitos y, finalmente, calcularlos.

Sin embargo, antes de ello, es necesario modificar el Workspace SONDAJES de modo de **agregar una tabla de compósitos**, cuyos campos son: HOLE-ID, FROM, TO, LENGTH, AU y COMP-ID.

Definir un profile de compósitos

DRILLHOLE > COMPOSITING > DEFINE COMPOSITING PROFILE



Composite Profile Editor

Profiles: **COMPOSITOS**

Description: **Compósitos a 2 m**

Composite Table: **COMPOSITOS** Field for Calculated Length: **LENGTH**

Threshold length for acceptance (percent of complete composite): **50.000**

☒ Delete composites shorter than threshold

☐ Use background value for explicit missing samples

☐ Use background value for implicit missing samples

Composite Parameters

Destination Field	Source Table	Source Field	Source Backgr	Weighting Field	Weighting Back
AU	ASSAYS	AU	0.000		0.000
			0.000		0.000
			0.000		0.000
			0.000		0.000
			0.000		0.000
			0.000		0.000

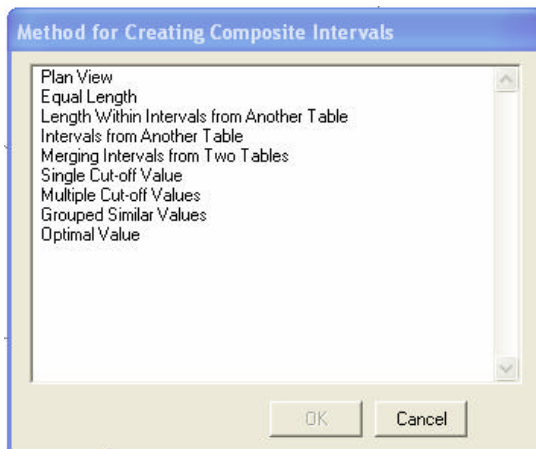
OK Cancel Apply

Editing : COMPOSITOS

En este cuadro se define la tabla de compósitos, el campo para el cálculo del largo de compósito, el porcentaje del compósito total para aceptar el valor calculado, el campo de destino de los cálculos y el origen de los datos (tabla y campo).

Preparar la tabla de compósitos

DRILLHOLE > COMPOSITING > PREPARE COMPOSITE TABLE



Method for Creating Composite Intervals

Plan View

Equal Length

Length Within Intervals from Another Table

Intervals from Another Table

Merging Intervals from Two Tables

Single Cut-off Value

Multiple Cut-off Values

Grouped Similar Values

Optimal Value

OK Cancel

Tras seleccionar los sondeos a compositor (ALL), se debe indicar la tabla de compósitos (tabla **COMPOSITOS**). Finalmente, se pide el método para crear los intervalos de compósitos. Para hacer compósitos de igual largo, se debe seleccionar "Equal Length" y luego ingresar el largo de compósitos a considerar, además de indicar desde dónde se medirán éstos (desde el collar o desde el fondo del sondeo).



Composite by Equal Length

Table for Compositing: **COMPOSITOS** OK

Compositing Length: **2.0000** Cancel

Starting Position: **Start from Collar**

Con esto, la tabla de compósitos quedará preparada para hacer los cálculos de los valores compositados.

Al prepararse la tabla para un tamaño distinto de compósitos, todos los valores calculados con anterioridad de compósitos serán eliminados.

Calcular los compósitos

El último paso es el cálculo de los valores compositados. Para esto:

DRILLHOLE > COMPOSITING > CALCULATE COMPOSITES

Se pide el perfil de compósitos a utilizar y cuales sondajes se desea compositar. Una vez ingresados estos parámetros, se realiza el cálculo, quedando los valores en el campo escogido anteriormente, en la tabla de compósitos. Estos se pueden visualizar editando la base de datos y seleccionando la tabla de compósitos recién creada.

Se sugiere estudiar el efecto de soporte calculando estadísticas básicas para óxidos y sulfuros utilizando compósitos de 2, 5 y 10 m.

Finalmente, se deben dejar en la tabla de compósitos los de 10m para los análisis posteriores.

3. Comparación de campañas de sondaje

Cuando se tienen datos provenientes de diferentes campañas de sondajes y varias poblaciones litológicas, mineralógicas y de alteración, se puede llegar a considerar una cantidad muy grande de poblaciones estadísticas. Cada una de ellas debe caracterizarse por su distribución y por su estructura espacial, es decir, por la correlación que existe entre las leyes para diferentes distancias. Se puede llegar al extremo de tener demasiadas unidades con muy pocos datos en cada una de ellas como para hacer estimaciones locales (de la ley de un bloque, por ejemplo). De hecho, puede incluso ser difícil calcular el histograma que represente la ley en dicha unidad, si se dispone de muy pocos datos.

Es necesario, por lo tanto, comprobar que sean efectivamente poblaciones diferentes. Por ejemplo, dado que se tienen dos tipos litológicos, definidos por geología (óxidos y sulfuros) y dos campañas de sondajes de diferente tipo (diamantina y aire reverso), inicialmente, se podría considerar que se tienen las siguientes poblaciones:

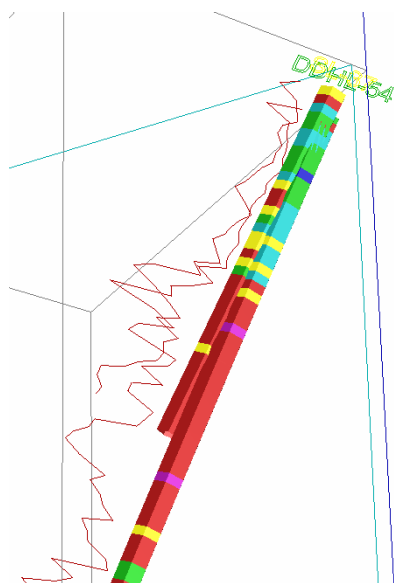
- Óxidos – Diamantina
- Sulfuros – Diamantina
- Óxidos – Aire Reverso
- Sulfuros – Aire Reverso

Sin embargo, intuitivamente se sabe que los óxidos son una población cuyas características probablemente difieren de las de los sulfuros. Las características dentro de los óxidos deberían ser independientes del origen de los datos tomados en ese dominio, si asumimos que el tipo de muestra extraída (polvo recuperado de un sondaje de aire reverso o el testigo que se obtiene en un sondaje de diamantina) no sesga de manera sistemática el valor de la ley. Es importante señalar, sin embargo, que muchas veces, aunque no existe un sesgo sistemático entre las campañas, éstas tienen distintas calidades, generando errores de muestreo diferentes y que pueden complicar la evaluación. Por esta razón, es necesario comprobar si las distintas campañas de sondajes (en este caso) pueden ser consideradas de la misma forma en la evaluación. Para esto, se debe verificar que ambas campañas representen igualmente bien a la población real. Este análisis se realiza principalmente utilizando estadísticas, construyendo q-q plots, haciendo variografía y efectuando un análisis visual cualitativo.

4. Comparación de “Twin-Holes”

Cuando se realizan dos campañas de sondajes diferentes en un yacimiento, algunas veces se perforan “twin holes” (sondajes gemelos), de manera de poder validar ambas campañas, comprobando que no exista sesgo entre ellas. Intuitivamente, si dos sondajes están muy cerca y tienen la misma dirección, deberían entregar leyes parecidas. Sin embargo, dada la variabilidad propia de las leyes en el yacimiento, no se puede esperar que sean iguales, sino sólo que se parezcan.

Análisis visual (cualitativo)



Para validar las campañas de sondajes, deben seleccionarse varios pares de sondajes cercanos y aproximadamente paralelos, y se debe verificar que cualitativamente las leyes tengan las mismas tendencias. Al seleccionar las leyes de los dos sondajes del par, éstas se pueden graficar versus la profundidad para constatar si existe por ejemplo un evidente sesgo sistemático.

En otros casos, se puede apreciar un sesgo que es condicional a la ley, por ejemplo, un tipo de sondaje entrega una ley menor al otro tipo en cierto rango de leyes. Este tipo de sesgos puede explicarse muchas veces por el hecho de que se pierdan los finos en algún tipo de sondajes y que éstos contengan la mayor ley, produciéndose el sesgo.

Q-q plot

El q-q plot es una herramienta para comparar dos distribuciones. No se utiliza para verificar la relación par a par que hay entre ellas, sino que sólo permite saber si las dos distribuciones se parecen.

Se construye dividiendo las distribuciones en cuantiles y graficando el valor de un mismo cuantil de una distribución versus el mismo cuantil de la otra. Un cuantil es el valor de la distribución acumulada bajo el cual se encuentra un determinado % de los datos. Así, se habla de cuantiles (25, 50 y 75 %), deciles (10, 20, 30, ..., 90 %) y percentiles (1, 2, 3, 4, ..., 99 %). Es necesario, en general, tener una cantidad de información suficiente para poder tener un gráfico confiable, de otro modo, uno puede dejarse engañar por las fluctuaciones que se deben a la escasa cantidad de muestras y no a una diferencia real en las distribuciones.

5. Análisis estadístico de dos poblaciones en un mismo volumen

El análisis de los sondeos gemelos es principalmente cualitativo y permite detectar sesgos evidentes en las campañas, sin embargo, muchas veces son insuficientes para determinar si este sesgo existe.

Si se tiene una zona dada y se realiza un muestreo de ella, se podrá obtener una estimación de la ley media de dicha zona. Ahora bien, si se realiza otro muestreo, es lógico suponer que el resultado de la estimación de la ley media con estas nuevas muestras debería ser parecido al obtenido en el primer caso, pues también se está estimando la ley media sobre la zona estudiada.

Por esta razón, para definir si las dos campañas de sondeos tienen validez, un método susceptible de utilizarse es el cálculo de la ley media dentro de un volumen en el que exista una cantidad de datos suficiente de ambos tipos de sondeo (aire reverso y diamantina).

Sin embargo, podría darse el caso de que las muestras no estuvieran bien repartidas en el volumen, razón por la cual la distribución obtenida no representaría la distribución real. Para salvar este obstáculo, existen técnicas de desagrupamiento (declustering) mediante las cuales se pondera la frecuencia de aparición en el histograma en función de la existencia de grupos de datos (clusters).

En general, en minería, se tienen zonas de alta ley sobremuestreadas, lo que se debe principalmente a que se intenta delimitar las zonas de interés del yacimiento. Por esta razón, al tomar simplemente una media de los datos, se considerarán muchos valores altos que distorsionarán el histograma obtenido, el cual no representará correctamente al real.

Para desagrupar existen dos metodologías:

- Método del volumen de influencia: Consiste en ponderar la frecuencia de aparición de cada muestra por el volumen de influencia, dividido por el volumen total, es decir, se trata de un volumen normalizado.
- Método de las celdas: Este método de desagrupamiento consiste en generar una malla tridimensional en que cada celda (o bloque) tiene el mismo tamaño. Dentro de cada una de estas celdas, habrá una cantidad de muestras variable, según la posición y tamaño de la malla y el grado de agrupamiento que exista en las muestras. Se calcula la media desagrupada, promediando las muestras que estén en una misma celda y luego promediando, sin ponderar, las leyes de todas las celdas que tienen al menos una muestra dentro. Con esto, según el tamaño de las celdas variará la media desagrupada. Analizando las variaciones de la media para diversos tamaños y posiciones de las grillas, se puede construir un gráfico de media desagrupada versus tamaño de celda. Aunque sin un fundamento teórico claro, se recomienda en general seleccionar el tamaño de celda que minimiza la media desagrupada y siempre y cuando éste coincida aproximadamente con el espaciamiento medio de las muestras.

Utilizando cualquiera de estos métodos de desagrupamiento, se puede reproducir la distribución representativa de la zona analizada y determinar su ley media.

Una forma de utilizar las estadísticas desagrupadas consiste en graficar para las distintas poblaciones en consideración, la media y varianza desagrupadas y visualizar qué poblaciones coinciden en estos dos parámetros de la distribución.

6. Comparación de variogramas

Una última forma de comparar las poblaciones es verificando su variograma, el cual representa la variabilidad de las leyes en función de la distancia de separación entre dos puntos. El variograma se estudiará en profundidad más adelante. Sólo es importante señalar que cuando los rasgos estructurales del variograma cambian en forma considerable, esto puede deberse a errores de muestreo o a que se trata de dos poblaciones diferentes.

7. Hitos del proyecto

En esta etapa del proyecto, se debe finalizar la comparación de las campañas de sondajes de aire reverso y diamantina, a través de los siguientes pasos:

- Demostrar el efecto de soporte a través del cálculo de estadísticas de compósitos de 2, 5 y 10 m.

- Determinar las estadísticas básicas para cada población.
- Encontrar tres o cuatro pares de sondeos gemelos y realizar una comparación a partir de dicha información.
- Encontrar un volumen bien representado por ambos tipos de muestras que permita verificar la representatividad de las dos campañas.

En base a este análisis, se debe determinar si se pueden utilizar conjuntamente los datos de diamantina y aire reverso en la evaluación del depósito. Similarmente, se deben caracterizar las poblaciones geológicas (óxidos y sulfuros) y definir cuán diferentes son realmente. Se debe responder a la pregunta de si se deben separar como poblaciones o si se pueden tratar como una unidad con características homogéneas.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 6
Variografía

1. Objetivos de la Clase Nº 6

Los principales objetivos de esta clase son:

- Entender el concepto de variograma y poder calcularlo.
- Conocer el concepto de anisotropía.
- Calcular, interpretar y modelar el variograma para las distintas poblaciones en estudio.

2. Introducción

Para encontrar la relación espacial que existe entre los datos se utiliza el variograma. En GEMS existe la posibilidad de calcular tanto variogramas lineales como tridimensionales.

El variograma lineal (o direccional) se calcula a lo largo de una línea de muestreo o a lo largo de la traza de un sondeo. Los datos se toman directamente de la base de datos correspondiente (no es necesario hacer una extracción).

El variograma tridimensional se determina a partir varios variogramas direccionales. Estos variogramas direccionales se calculan definiendo direcciones (determinados por su acimut e inclinación) y tolerancias de búsqueda para encontrar un número suficiente de pares de muestras. Los valores y posiciones de las muestras se obtienen directamente desde los datos que han sido extraídos de la base de datos a través de archivos de extracción.

Se pueden calcular hasta doce variogramas direccionales simultáneamente para direcciones y tolerancias especificadas. Se pueden imponer también, filtros a los datos.

3. Concepto de variograma

El variograma es una herramienta que permite medir la regularidad espacial de una variable. Esto se representa graficando la correlación existente en promedio para pares de muestras distantes una cierta separación.

Consideremos dos valores numéricos $z(\mathbf{u})$ y $z(\mathbf{u} + \mathbf{h})$, en dos puntos \mathbf{u} y $\mathbf{u} + \mathbf{h}$ separados por el vector \mathbf{h} . La variabilidad entre estas dos cantidades está caracterizada por la función variograma $g(\mathbf{h})$, que está definida como la mitad de la esperanza de la variable aleatoria $[Z(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u} + \mathbf{h})]^2$, es decir:

$$g(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u} + \mathbf{h})]^2\}$$

Considerando el caso general, el variograma es una función tanto del punto como de la distancia de separación entre los puntos: $g(\mathbf{h}) = g(\mathbf{u}, \mathbf{h})$. Sin embargo, en la práctica, se asume que el fenómeno puede modelarse correctamente con una función aleatoria estacionaria, por lo que se considera el variograma independiente de la posición del par y sólo dependiente del vector de separación entre los dos puntos.

Un estimador del variograma se obtiene a través de un promedio aritmético de las diferencias al cuadrado de los valores de pares de puntos aproximadamente separados por el vector \mathbf{h} :

$$g^*(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [z(\mathbf{u}_i) - z(\mathbf{u}_i + \mathbf{h})]^2$$

donde $N(\mathbf{h})$ corresponde al número de pares encontrados a una distancia de separación de aproximadamente \mathbf{h} .

4. Anisotropías

Cuando una variable tiene el mismo comportamiento espacial en todas las direcciones, se dice que es **isótropa**. Esto puede verse en un mapa variográfico como curvas de isovalor circulares, es decir, sin ninguna dirección en que el alcance sea mayor. Cuando se trazan variogramas direccionales de una variable isótropa, éstos se parecen mucho en distintas direcciones, y se ven entrelazados entre sí, debido a lo errático del cálculo del variograma experimental.

El caso contrario implica que el fenómeno tiene direcciones preferenciales. El tipo más sencillo de anisotropía es la **anisotropía geométrica**, que se soluciona con una transformación geométrica de las coordenadas. Esto quiere decir que al multiplicar por un factor la coordenada en una dirección, se vuelve al caso isótropo.

Gráficamente, esta anisotropía se detecta ya sea a través de la construcción de un mapa variográfico (**Figura 1**), donde se aprecia una elipse, de la cual se pueden deducir el ángulo de anisotropía y la razón entre los alcances en las direcciones principales para considerar en la transformación (los ejes mayor y menor de la elipse mencionada), o bien al graficar el variograma de la variable en dos direcciones diferentes (perpendiculares), donde se aprecia una diferencia en los alcances, pero no en las mesetas de las curvas.

Un tipo de anisotropía más compleja es la **anisotropía zonal**, que corresponde al caso en que la varianza de la variable es diferente en distintas direcciones (generalmente, la diferencia está en la dirección vertical, respecto al plano horizontal). Gráficamente, esta anisotropía se detecta a través de un mapa

variográfico como una banda en una dirección (una elipse con el radio mayor infinito), es decir, que en ciertas direcciones no se alcanza la misma meseta que en otras, o en los variogramas se manifiesta como una diferencia en las mesetas según las diferentes direcciones.

Finalmente, es importante mencionar que, en ciertas ocasiones, la anisotropía no se puede modelar, casos en los cuales se debe dividir el campo de trabajo en zonas menores donde puedan modelarse estas anisotropías, o bien se recurre a técnicas mucho más complejas.

Se presenta a continuación un ejemplo, donde se muestran cuatro mapas variográficos: el primero corresponde al caso en que la variable es isótropa, el segundo muestra una clara anisotropía geométrica en dirección N 40°W aproximadamente, el tercero presenta anisotropía zonal donde la dirección de menor varianza es N 45°E aproximadamente, y el último corresponde simplemente a un caso en que no es fácil visualizar si existen direcciones preferenciales (en la mayoría de los casos prácticos, los mapas variográficos son difíciles de interpretar).

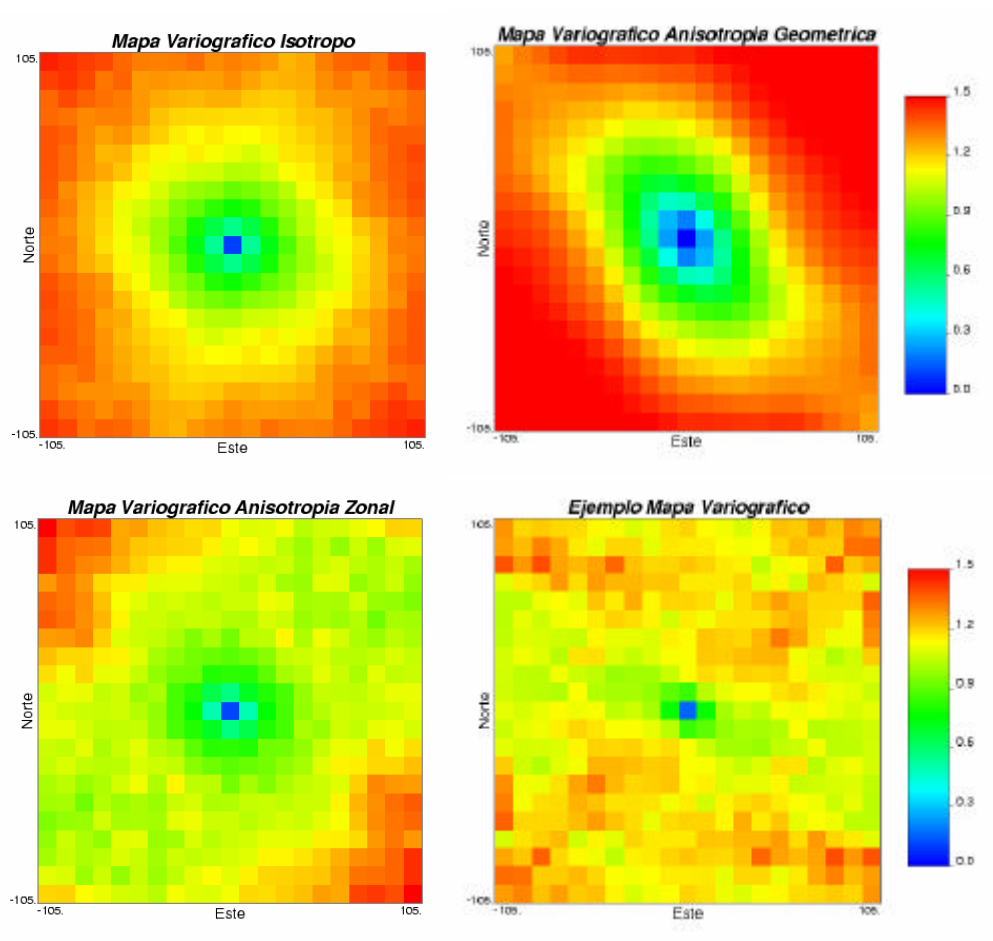


Figura 1: Mapas variográficos para cuatro casos.
Arriba izquierda: isotropía; Arriba derecha: anisotropía geométrica;
Abajo izquierda: anisotropía zonal; Abajo derecha: caso real.

Las anisotropías también pueden detectarse mediante la construcción de variogramas direccionales, de forma de ver las diferencias en las distintas direcciones. Para saber cómo se ven las anisotropías en los variogramas, se presenta la **Figura 2**.

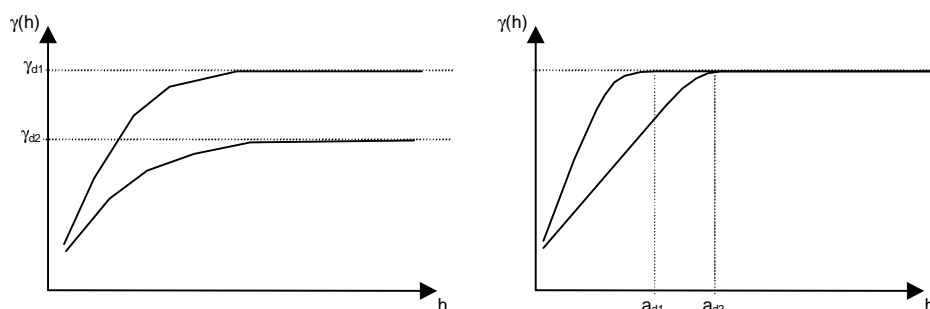


Figura 2: Variogramas direccionales para variables anisótropas. Izquierda: anisotropía zonal; Derecha: anisotropía geométrica.

Consideraciones prácticas

Para el cálculo de variogramas se hacen las siguientes recomendaciones:

- El variograma es válido hasta la mitad del dominio (en cada dirección).
- Es necesario tener al menos 50 pares de puntos para el cálculo de cada paso, de manera que la estimación de $\gamma(h)$ sea confiable.

5. Cálculo de variogramas experimentales en GEMS

Para calcular un variograma, no se puede esperar que los datos estén separados exactamente por el vector \mathbf{h} . Esto puede ocurrir solamente si se tienen datos en una malla regular. Por esta razón, en el cálculo de un variograma experimental, se utiliza una aproximación. Se consideran los siguientes parámetros para el cálculo experimental, incluyendo aquellos que permiten aproximar la búsqueda (tolerancias):

- **Paso p (lag distance):** es la distancia a la que se calcularán los puntos del variograma experimental.
- **Número de pasos n_p (number of classes):** corresponde al número de pasos a calcular (según el tamaño del dominio).
- **Tolerancia del paso D_p (lag tolerance):** corresponde a la tolerancia en la separación, de manera que los puntos puedan encontrarse a una distancia mayor o menor al paso. Por defecto, este valor es 0.5 veces el paso p.
- **Azimut q (azimuth):** es la dirección en la que se calcula el variograma medida en un plano horizontal respecto al norte, en el sentido de los punteros del reloj.
- **Tolerancia angular en el azimuth D_q (spread angle):** es el parámetro a través del cual se aproxima el cálculo del variograma experimental, y

corresponde al ángulo dentro del que se considera válido un punto, para el cálculo de la diferencia.

- **Ancho de banda en el azimut Dh_H (half width):** corresponde a una banda dentro de la cual se consideran válidos los datos para el cálculo del variograma, y se mide perpendicular a la dirección del azimut.
- **Inclinación j (dip):** es la dirección, medida en el plano vertical del azimut, en la que se calcula el variograma. Una inclinación de 0° corresponde a la dirección horizontal, considerándose positiva la dirección “hacia arriba” y negativa la dirección “hacia abajo”.
- **Tolerancia angular en la inclinación Dj (spread angle):** este parámetro corresponde al ángulo dentro del cual se considera válido un punto, para el cálculo de la diferencia, en el mismo plano vertical en que se definió la inclinación. En GEMS es igual a la tolerancia angular en el azimut.
- **Ancho de banda en la inclinación Dh_V (half height):** al igual que el ancho de banda en el azimut, corresponde a la dimensión vertical de la banda dentro de la cual se consideran los datos válidos para calcular el variograma.
- **Número de pares mínimo (threshold pairs):** se puede considerar que un punto del variograma es válido si su cálculo se hizo con un número de pares superior a este parámetro.
- **Desplazamiento inicial (starting offset):** es la distancia inicial que se considera desde el punto para iniciar la búsqueda de los demás datos.

En la **Figura 3** se presenta una descripción en dos dimensiones de algunos de los parámetros antes descritos. Se presentan los parámetros siguientes:

- Azimut Este ($\theta = 90^\circ$)
- Tolerancia angular en el azimut de $\Delta\theta=22.5^\circ$
- Paso p
- Tolerancia del paso $\Delta p=p/2$
- Ancho de banda en el azimut Δh_H
- Desplazamiento inicial igual a cero.

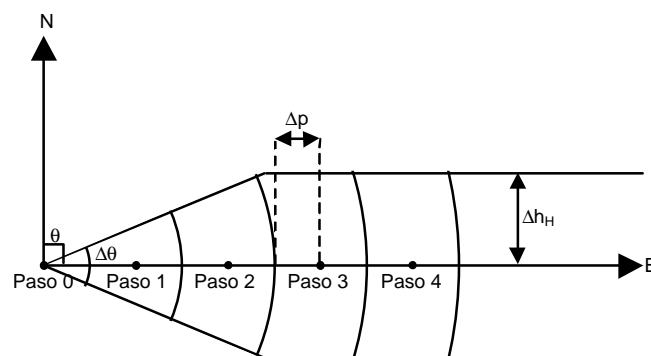
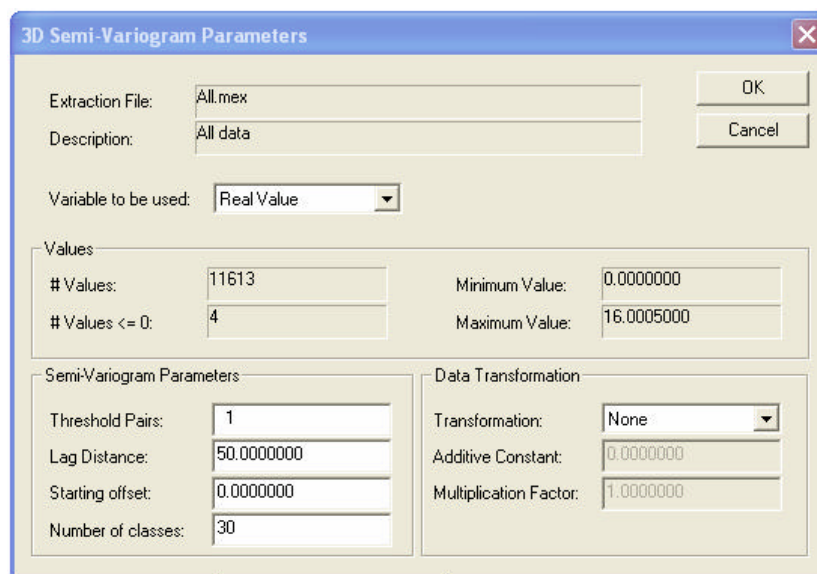


Figura 3: Parámetros para el cálculo de un variograma experimental.

En GEMS, se debe seleccionar:

WORKSPACE > ANALYSIS > 3-D SEMI-VARIOGRAM > EXTRACTION FILE

Al igual que en otras herramientas de GEMS, se debe definir un profile de variograma, el cual quedará guardado para posteriores consultas, presionando NEW... y asignándole un nombre. Se requiere tener hechas las extracciones de la base de datos antes de poder calcular un variograma. Por ejemplo, es necesario tener las extracciones por población separadas, de manera de calcular los variogramas para cada una. Una vez seleccionado el archivo de extracción a analizar, se deben ingresar los parámetros básicos del variograma.



3D Semi-Variogram Parameters

Extraction File: All.mex
 Description: All data

Variable to be used: Real Value

Values

Values: 11613
 # Values <= 0: 4
 Minimum Value: 0.0000000
 Maximum Value: 16.0005000

Semi-Variogram Parameters

Threshold Pairs: 1
 Lag Distance: 50.0000000
 Starting offset: 0.0000000
 Number of classes: 30

Data Transformation

Transformation: None
 Additive Constant: 0.0000000
 Multiplication Factor: 1.0000000

Una vez seleccionados los parámetros básicos de los variogramas, se ingresan las direcciones y tolerancias de cada uno. Se pueden calcular simultáneamente hasta 12 variogramas, sin embargo, todos ellos utilizarán los parámetros ingresados en la pantalla anterior, por lo que si se quiere calcular variogramas con diferentes pasos en las diferentes direcciones, es necesario definir un nuevo perfil. Dado que en la mayoría de los casos, es espaciamiento vertical de las muestras es menor que el espaciamiento entre sondajes, se recomienda generar un variograma para la dirección vertical, con un paso pequeño, y otro variograma para las direcciones horizontales con un paso mayor.

En la nueva pantalla, se deben activar los variogramas que se desee calcular (ENABLE) y se deben ingresar los parámetros de búsqueda. Además, se puede filtrar por cota y por ley.

Cuando el variograma ya ha sido calculado, se pueden modificar los parámetros presionando el botón PARAMETERS. Además, se puede generar un reporte (para llevar a una planilla de cálculo, por ejemplo) y se puede graficar y, posteriormente, modelar el variograma experimental calculado.

Presionando en GRAPH, se inicia la aplicación QUICKGRAPH, a través de la cual se puede visualizar y modelar el variograma activo.

3D Semi-Variogram Definitions

Description: All data

OK Cancel

3D Variogram Specifications

Variogram 1 Azimuth: 0.0000000
 Variogram 2 Dip: 0.0000000
 Variogram 3 Spread Angle: 90.0000000
 Variogram 4 Lower Elevation: 1725.0709111 Upper Elevation: 2245.4719355
 Variogram 5 Lower Cut-off: 0.0000000 Upper Cut-off: 16.0005000
 Variogram 6 IND Cut-off: 0.0000000
 Variogram 7 Search cone may be restricted inside a rectangular corridor (0.0 to ignore)
 Variogram 8 Half Width: 0.0000000 Half Height: 0.0000000
 Variogram 9 ☒ Enable
 Variogram 10
 Variogram 11
 Variogram 12

3D Semi-Variogram

Semi-Variogram: Variogram 1

OK Cancel

Variogram Parameters

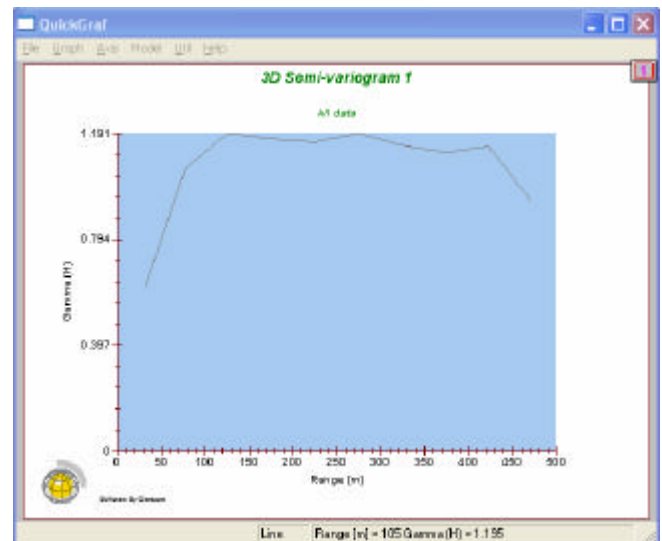
Azimuth: 0.000 Lower Elevation: 1725.071
 Dip: 0.000 Upper Elevation: 2245.472
 Spread Angle: 90.000 Total pairs used: 67425000

Variogram Statistics

From	To	Pairs	Dist	Gamma (H)	Local Mean	Distance
50.00	50.00	560566	0.0042	0.6175	1.0345	31.77
50.00	100.00	2624645	0.0257	1.0605	1.1368	78.01
100.00	150.00	5720306	0.0189	1.1912	1.0960	126.29
150.00	200.00	8043277	0.0105	1.1679	1.0378	175.26
200.00	250.00	9375256	0.0143	1.1570	1.0039	224.75
250.00	300.00	9836412	0.0085	1.1885	1.0135	274.58
300.00	350.00	9852326	0.0160	1.1438	1.0443	324.34
350.00	400.00	8723836	0.0086	1.1190	1.0551	373.94
400.00	450.00	6435878	0.0417	1.1414	0.9834	423.00
450.00	500.00	3896965	0.0101	0.9345	0.8113	471.73
500.00	550.00	15831915	0.0325	0.5666	0.5205	520.24

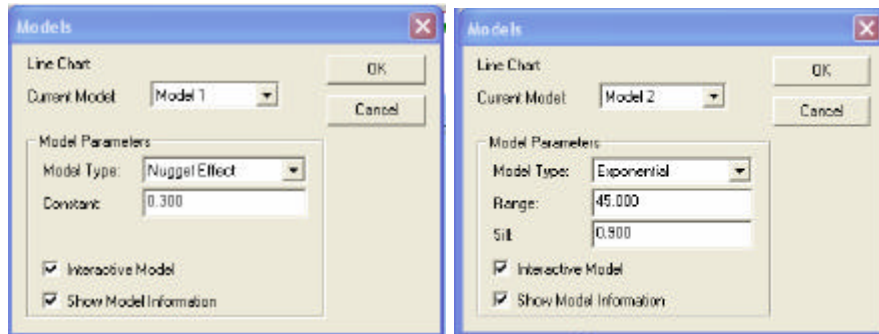
Display Options
 Gamma: No Normalization

Parameters Report Graph

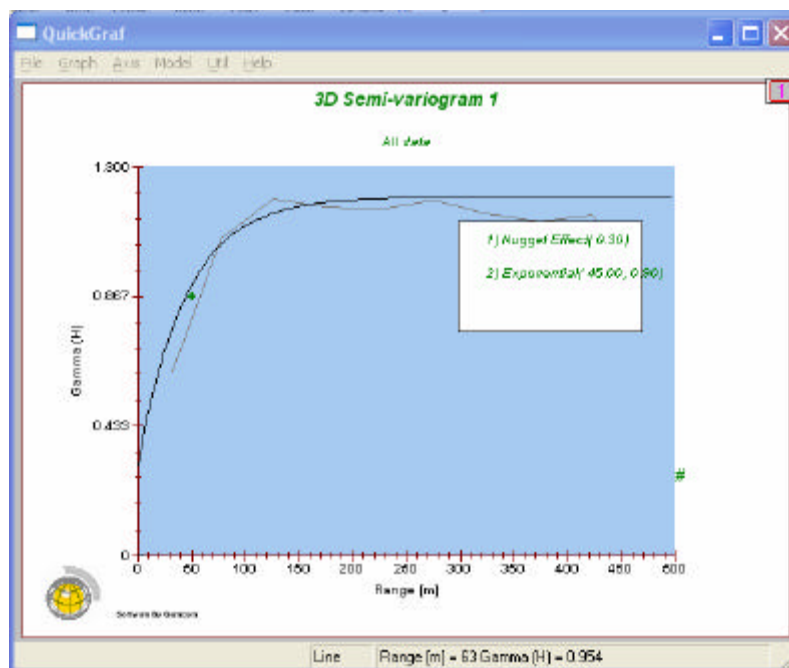


Utilizando el menú de QUICKGRAPH, se puede acceder a diversas opciones para modificar la presentación del gráfico, además de permitir el modelamiento del variograma.

MODEL > SPECIFY MODELS



Seleccionando primero el MODEL 1, se puede definir cualquiera de los tipos de variogramas disponibles y definir sus parámetros. Usualmente, se deja el MODEL 1 para el efecto pepa. Se puede activar INTERACTIVE MODEL y SHOW MODEL INFORMATION de manera de poder modificar el modelo en pantalla haciendo clic en los caracteres especiales que aparecen (+, #) y luego moviendo el mouse para mover el modelo. Se pueden anidar hasta tres modelos, escogiendo entre: efecto pepa, esférico, exponencial, lineal, logarítmico y gaussiano.



6. Modelamiento tridimensional de variogramas

El modelamiento tridimensional de variogramas es una operación delicada y difícil. Es necesario compatibilizar varias direcciones para obtener un solo modelo que las satisfaga. El procedimiento general para modelar es el siguiente:

- Definir el efecto pepa a partir del variograma vertical, o bien, a partir del horizontal que entregue un valor menor cerca del origen.
- Definir la meseta total del variograma, la que se obtiene observando dónde se estabilizan los variogramas direccionales.
- Definir a grandes rasgos los alcances de los variogramas en las distintas direcciones. Generalmente, se calculan y usan para el modelamiento tres direcciones perpendiculares. Éstas deben ser, además, las direcciones de máxima anisotropía.
- Dado el efecto pepa, la meseta y los alcances en las distintas direcciones, definir un tipo o modelo de variograma para llegar a dicha meseta, desde el efecto pepa, y asignándole los alcances antes definidos, calcular el modelo.
- Iterar para mejorar el ajuste del modelo, ya sea corrigiendo el efecto pepa, meseta y alcances, o bien, agregando una estructura anidada adicional para dar mayor flexibilidad al modelo.

Se recomienda llevar los datos a formato GSLIB y realizar el modelamiento y ajuste tridimensional utilizando las herramientas GAMV (para el cálculo de los variogramas experimentales), VARGPLT (para graficar los variogramas) y VMODEL (para definir y calcular el modelo con el que se ajustarán los variogramas experimentales).

7. Hitos del proyecto

A estas alturas, cada grupo debiera haber definido las poblaciones geológicas con que va a trabajar y haber validado las campañas de sondajes. Tras esta sesión, deben realizar la variografía (pueden utilizar variogramas también para validar las campañas de sondajes). Una vez lista la variografía (cálculo, interpretación y modelos), se puede iniciar la etapa de estimación. El resultado de esta etapa es la definición de la estructura espacial de la ley, por ejemplo, si tiene o no anisotropías, y la generación de un modelo analítico tridimensional de su variograma, para cada población.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 7
Creación de modelo de tipos de rocas
Construcción de superficie de contacto óxidos-sulfuros

1. Objetivos de la Clase Nº 7

Los principales objetivos de esta clase son:

- Crear un modelo de bloques.
- Crear la superficie que separa óxidos de sulfuros.
- Crear el modelo de tipos de rocas.

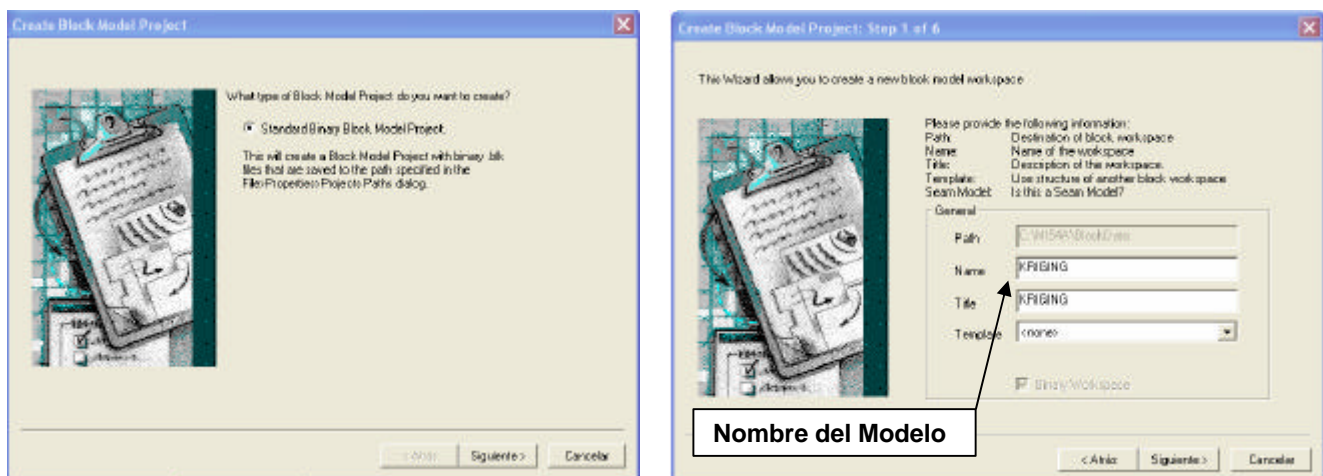
2. Introducción

Para decidir el plan de kriging con el que se realizará la estimación de la ley de los bloques se utiliza la técnica de validación cruzada, que consiste en estimar leyes puntuales en las posiciones de los compósitos, utilizando todos los datos excepto el del punto en que se está realizando la estimación, y comparándolos con los valores reales de los compósitos en estos puntos. Antes de ello, es necesario crear el modelo de bloques que contendrá los valores estimados y que permitirá restringir la estimación en función de los tipos de roca.

3. Creación de un modelo de bloques

Previo a la estimación misma o validación cruzada, es necesario especificar los parámetros del modelo de bloques. Para ello, se debe crear un workspace:

BLOCK > CREATE > CREATE BLOCK MODEL PROJECT...



Se construye un modelo binario estándar, para lo cual es necesario definir un nombre y título. Existe la opción de construirlo a partir de otro modelo de bloques ya definido, seleccionándolo en TEMPLATE.

Definición del tamaño del modelo

Definición de los niveles (bancos)

Level	Thickness	Top elevation	Bottom elevation	Description
1	10.00	1600.00	1590.00	0
2	10.00	1590.00	1580.00	0
3	10.00	1580.00	1570.00	0
4	10.00	1570.00	1560.00	0
5	10.00	1560.00	1550.00	0
6	10.00	1550.00	1540.00	0
7	10.00	1540.00	1530.00	0
8	10.00	1530.00	1520.00	0
9	10.00	1520.00	1510.00	0
10	10.00	1510.00	1500.00	0
11	10.00	1500.00	1490.00	0
12	10.00	1490.00	1480.00	0
13	10.00	1480.00	1470.00	0

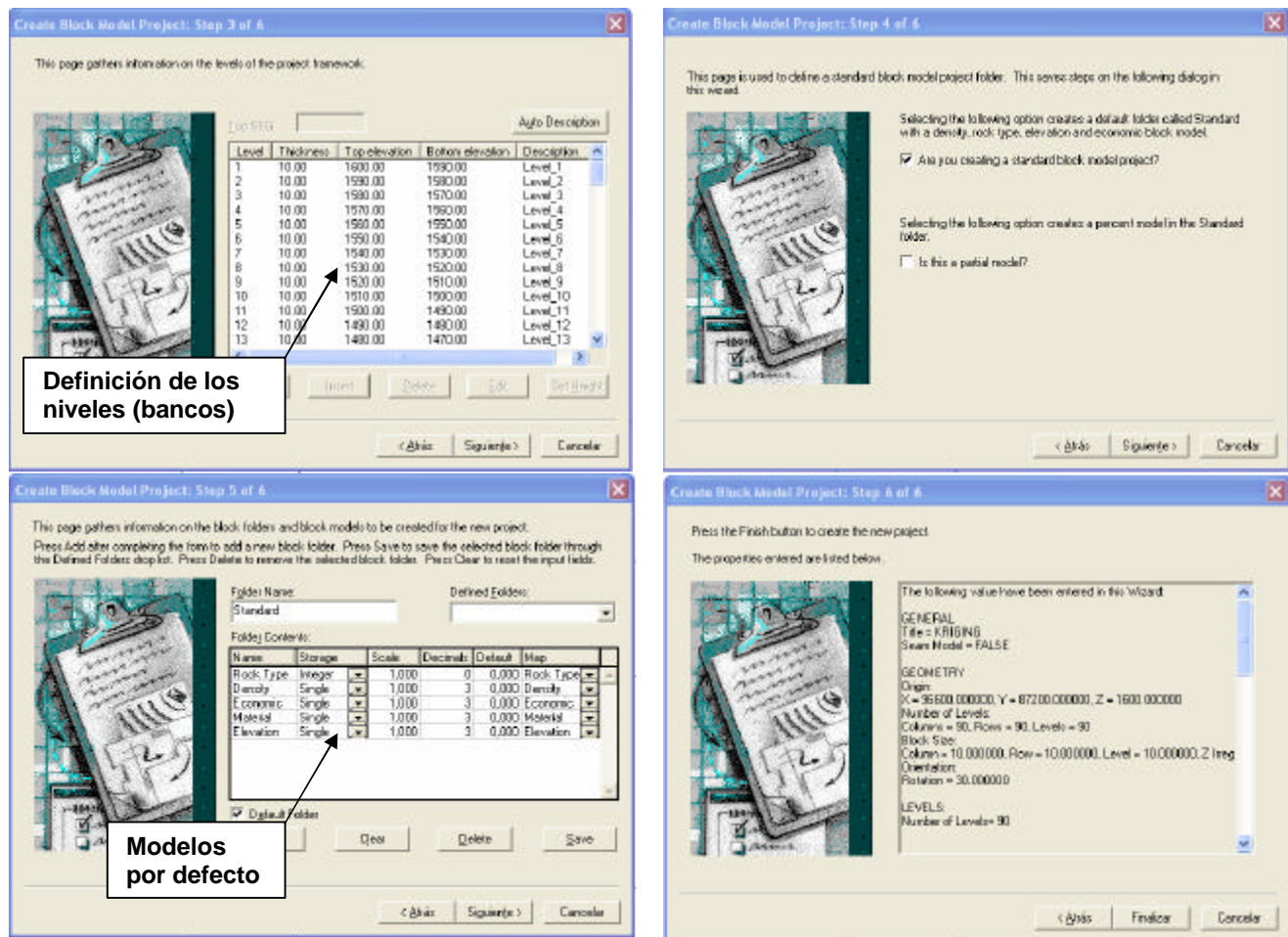
El modelo se especifica a través de las coordenadas del bloque con mínimas coordenadas X, Y y Z. Además, se debe especificar el número y tamaño de bloques en cada dirección, junto a un ángulo de rotación, si éste se quiere crear rotado respecto al norte. La rotación se mide en la dirección contra-reloj.

Se pueden nombrar los bancos según la elevación de la pata, cresta, centro del banco, o por el número del nivel.

Existe la opción de crear un modelo parcial (de porcentajes) para manejar bloques cerca de los contactos de unidades geológicas.

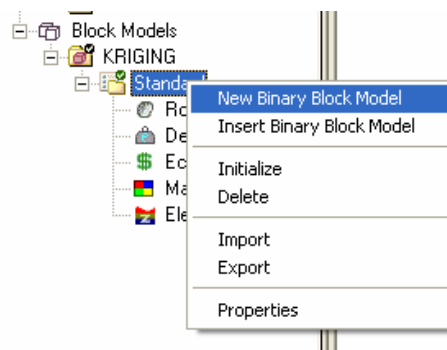
Por defecto, se crean modelos para Tipo de Roca, Densidad, modelo Económico, modelo de tipo de Material, y modelo de Elevación. Posteriormente, será necesario agregar los modelos de ley estimada y varianza de estimación.

Una vez finalizada la creación del modelo estándar, aparecerá en el menú tipo explorador de la izquierda, un submenú con modelos de bloques, donde aparecerá el modelo recién creado.



Tal como se indicaba, es necesario agregar ahora los modelos de leyes estimadas y varianzas de estimación. Para ello, se puede hacer clic con el botón derecho del mouse sobre el modelo de bloques en el que se quieren agregar estos nuevos modelos.

NEW BINARY BLOCK MODEL



Se especifica el nombre de la variable, valor por defecto, unidades y tipo de variable (se recomienda trabajar con variables tipo DOUBLE, de manera de asegurar que no habrá problemas de precisión).

Create Block Model: Step 1 of 4

This option allows you to create a block model in the selected block folder.

Please complete the following general block model elements and press the Next button when done.

Name:

Default Value:

Units:

Product Factor:

Elevation Model: ☐

Binary Model: ☒

Definición del modelo

< Atras Siguiente > Cancelar

Create Block Model: Step 2 of 4

Define storage information for the new block model by completing the following form.

Press the Next button when done.

Type:

Scaling:

< Atras Siguiente > Cancelar

Adicionalmente, se debe indicar el número de decimales con que se trabajará y un CELL DISPLAY PROFILE, que puede dejarse en blanco mientras no se defina.

Create Block Model: Step 3 of 4

Define display information for the new block model by completing the following form.

Press the Next button when done.

Number of Decimals:

Cell Display Profile:

Block Model Mapping:

< Atras Siguiente > Cancelar

Create Block Model: Step 4 of 4

Press the Finish button to create the block model.

The properties entered are listed below.

The following values have been entered in this Wizard:

BLOCK FOLDER
Folder Name = Standard

GENERAL
Name = Au Grade
Default Value = 0
Units = g/T
Product Factor = 1.000000
Elevation Model = FALSE

STORAGE
Storage Type = Double
Scale Values By = 1.000000

< Atras Finalizar Cancelar

Este procedimiento debe repetirse para la variable “Au Variance”.

4. Creación de la superficie óxidos-sulfuros

Para realizar la estimación, es necesario definir un modelo de tipos de roca. En el proyecto, se han definido dos poblaciones geológicas: óxidos y sulfuros. El único conocimiento que se tiene del contacto entre estos tipos de roca corresponde al cambio en la litología en las muestras de los sondeos. Por esta razón, se requiere crear una superficie que represente este contacto, la cual se utilizará posteriormente para crear el modelo de tipos de roca, previo a la estimación.

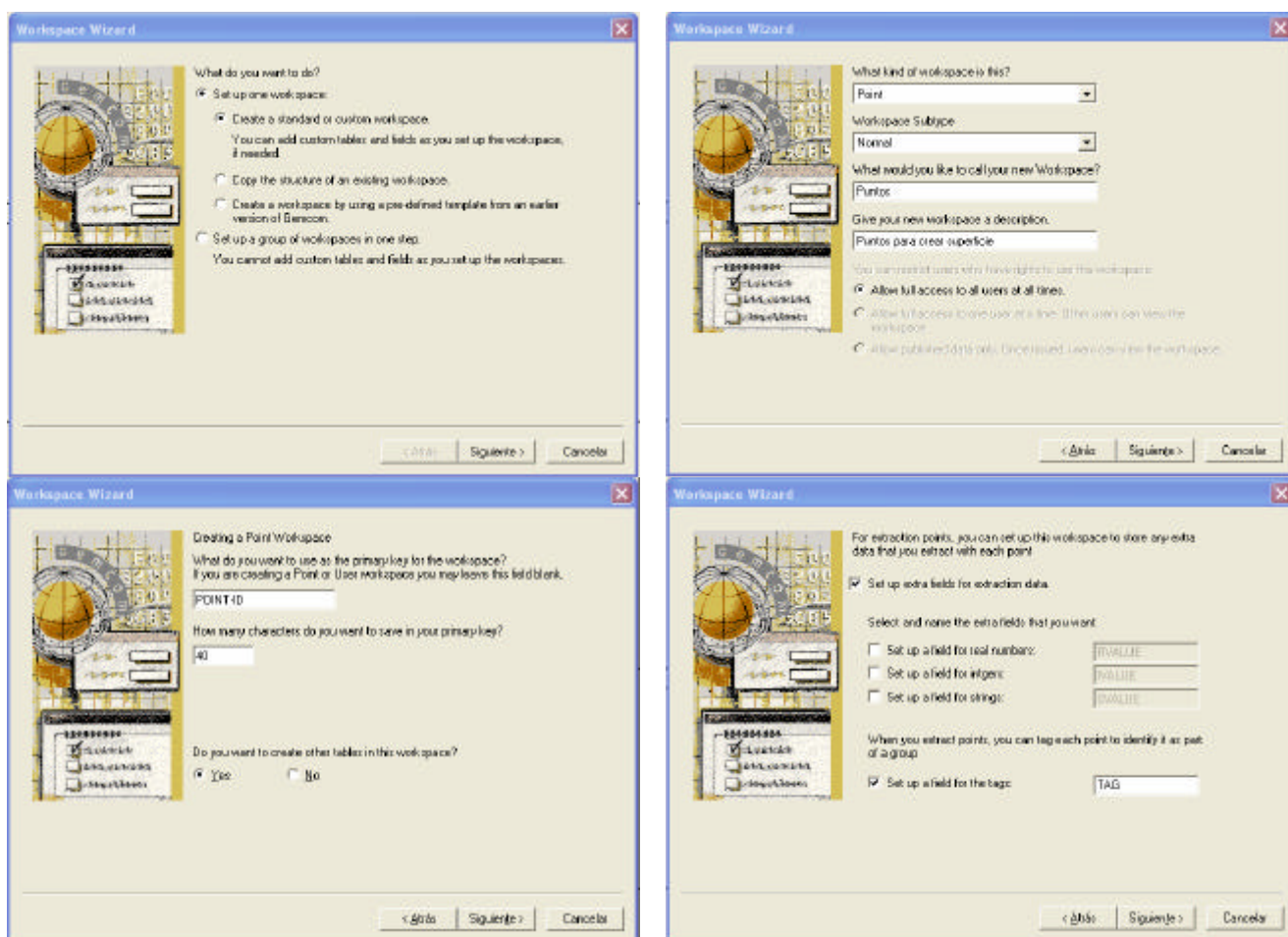
La superficie que se creará corresponde a una interpretación del contacto real. La calidad de la estimación dependerá de cuán acertada esté la interpretación de la localización exacta del contacto entre las dos poblaciones (desconocido).

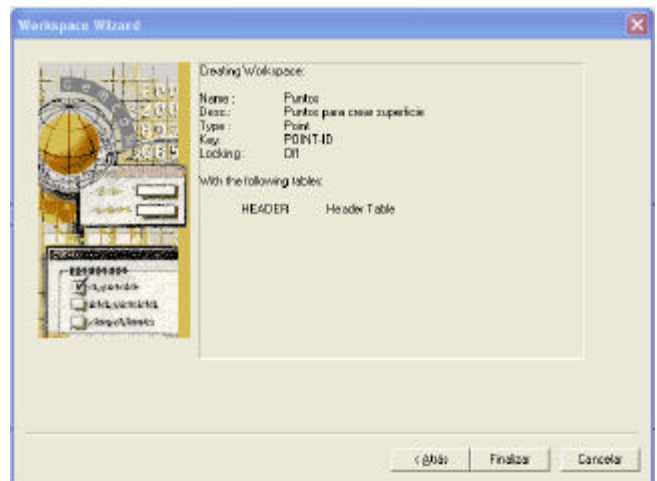
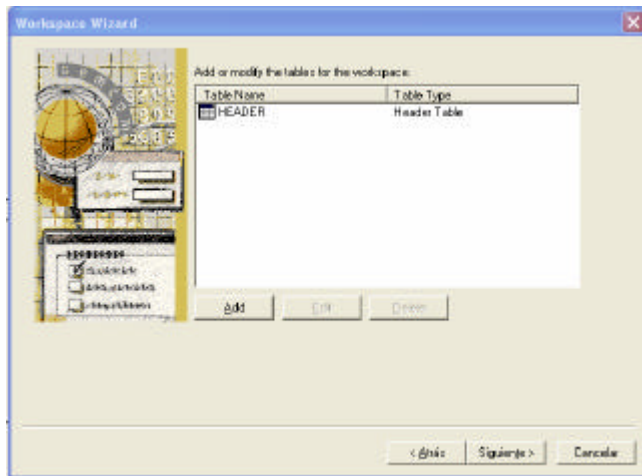
El procedimiento para crear la superficie requiere en primer lugar crear un workspace de puntos, donde se incorporarán los puntos a utilizar en la creación de la superficie. Luego, es necesario importar los puntos que guiarán la superficie, los cuales se obtienen a través de un archivo de extracción. Enseguida, se debe crear un workspace de superficies donde se guardará la superficie creada a partir de los puntos de referencia.

WORKSPACE > CREATE OR MODIFY WORKSPACE

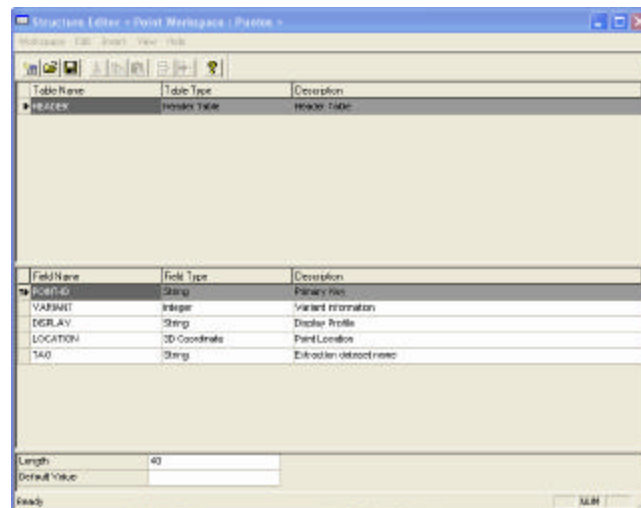
En el Structure Editor, se debe crear un nuevo workspace.

Se debe seleccionar la creación de un solo workspace, del tipo POINT, subtipo NORMAL y definir el nombre y descripción. Como Primary Key se debe dejar el POINT-ID y se deben deseleccionar las opciones de tener un campo entero, real y de texto.

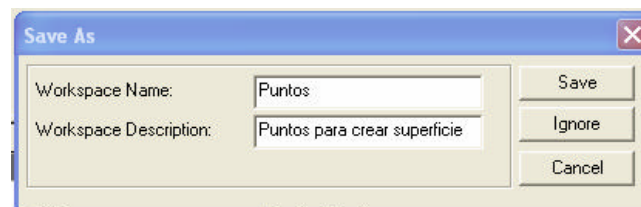




El Workspace creado se verá de la siguiente manera en el Structure Editor:

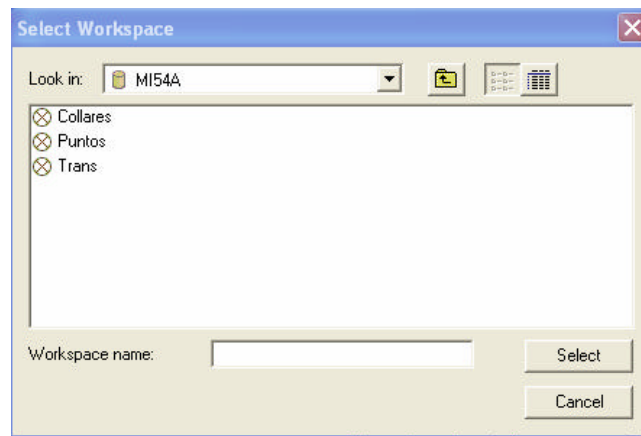


Este workspace debe guardarse antes de salir del editor:

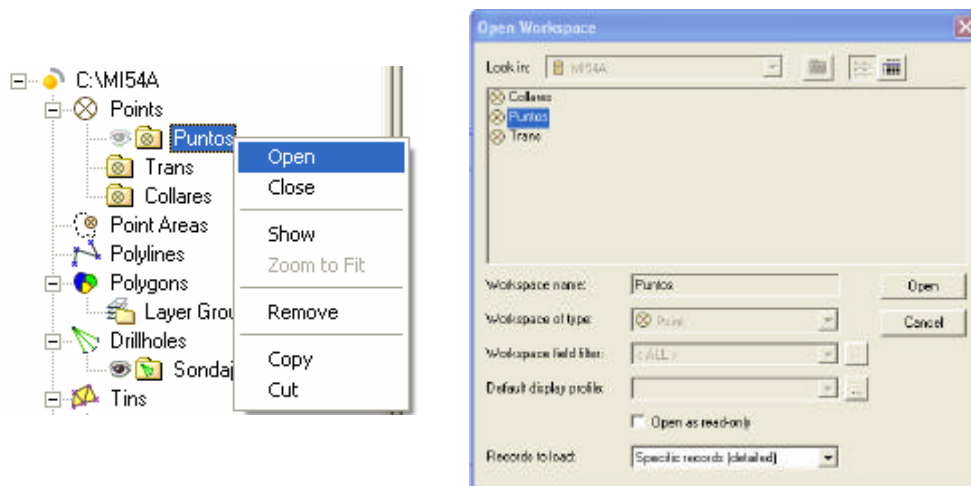


Sobre Points en el explorador (izquierda) se puede hacer clic con el botón derecho del mouse y agregar el Workspace recién creado:

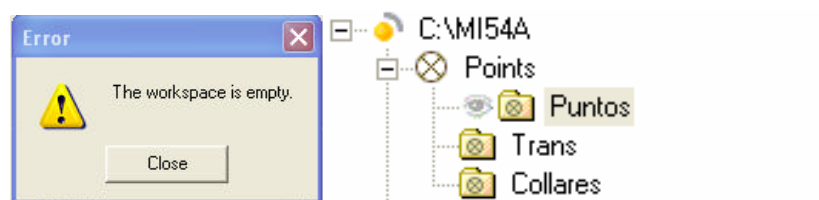
POINTS > ADD WORKSPACE



Luego, se puede abrir este workspace:



Dado que no contiene información, habrá un mensaje de error, pero se abrirá el workspace:

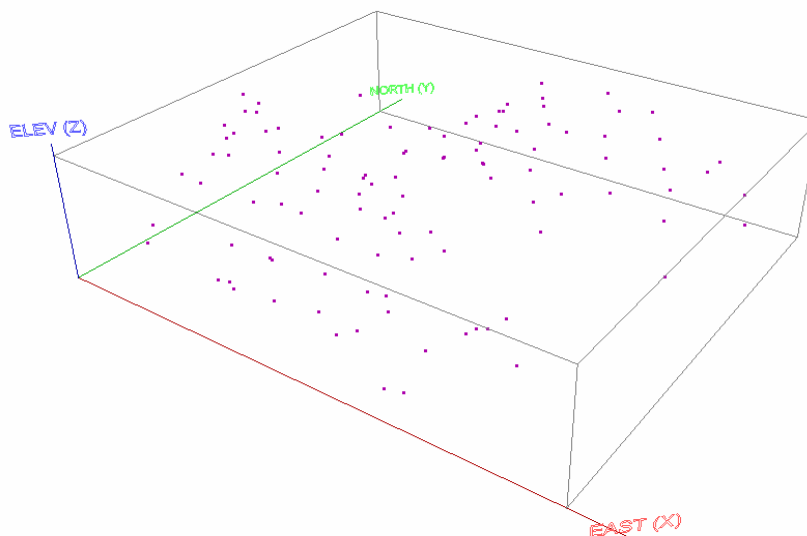
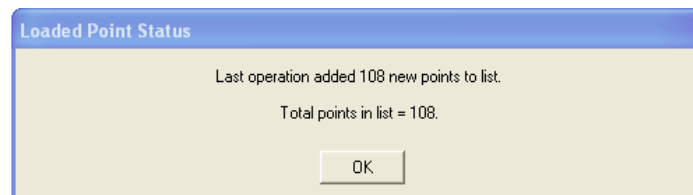
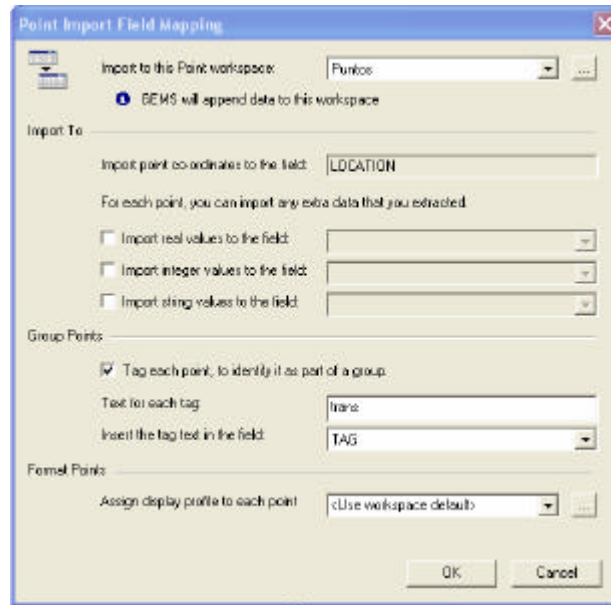


A continuación se debe crear un archivo de extracción con los puntos (coordenadas X, Y, Z) que se desee utilizar para la creación de una superficie. En el caso del contacto óxidos-sulfuros, se puede extraer la coordenada del FROM de la primera muestra de sulfuros, o bien, la coordenada del TO de la última muestra de óxidos. Esta última opción tiene el inconveniente de que en aquellos sondajes que no lleguen al contacto se considerará la coordenada del fondo del sondaje, que no necesariamente corresponde al contacto. El archivo de extracción no requiere información en los campos real, entero y de texto, pues sólo interesan las coordenadas de los puntos.

Una vez creado el archivo de extracción, se deben cargar estos datos como puntos:

POINT > DATA > IMPORT DATA FROM EXTRACTION FILE

Seleccionar el archivo de extracción e importar los puntos:



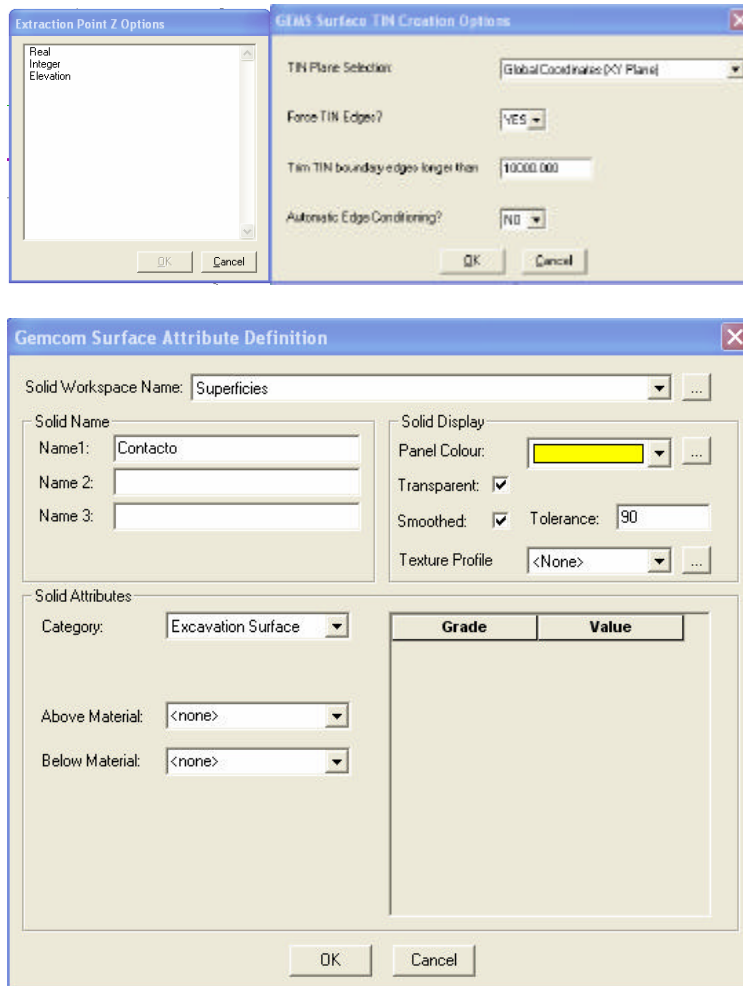
Nótese que una vez importados los puntos es necesario guardar el workspace modificado.

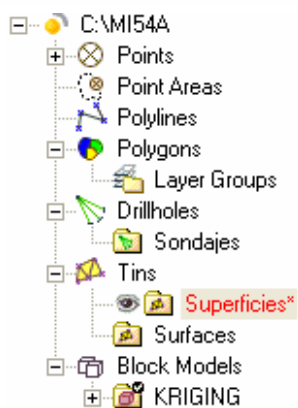
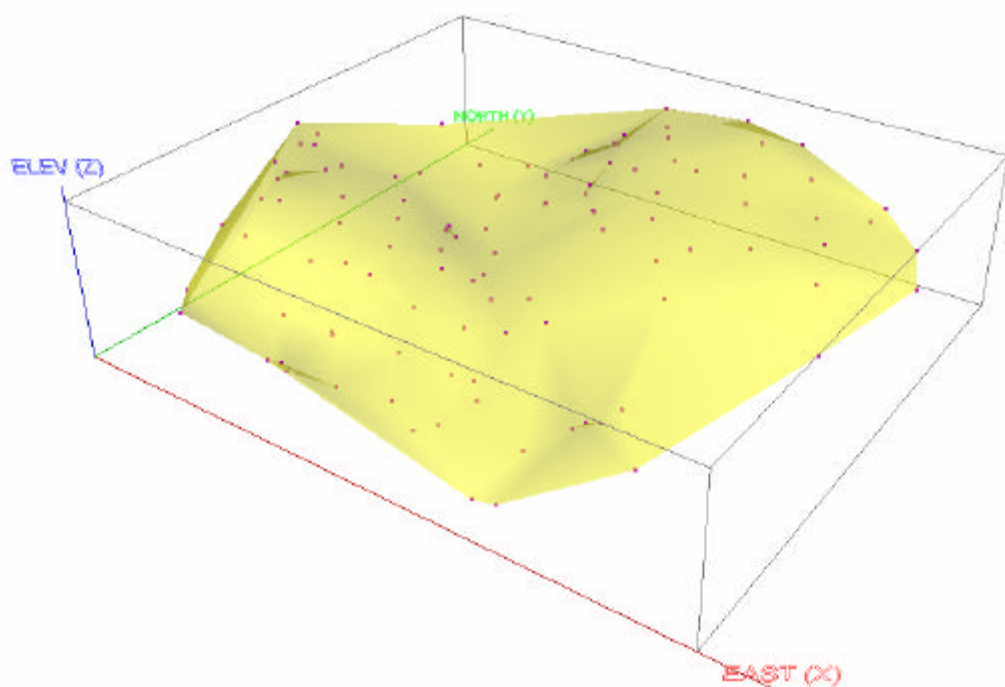
Ahora hay que crear la superficie utilizando estos puntos, para lo cual hay que utilizar el workspace de superficies.

Una vez que el workspace está activo, se puede crear la superficie con los datos activos (los puntos importados previamente al Workspace de POINTS).

SURFACE > CREATE > CREATE SURFACE FROM ACTIVE DATA

Escogiendo la opción Elevation para Z y luego confirmando:



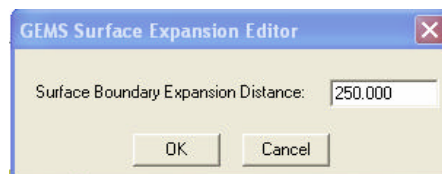


Recuerde que el Workspace de superficies también debe ser grabado haciendo clic con el botón derecho del mouse y con la opción SAVE.

Un último paso en la creación de la superficie es extenderla de manera de poder separar el modelo de bloques en dos unidades.

SURFACE > EDIT > EXPAND SURFACE

Tras seleccionar la superficie a expandir, se debe indicar la distancia:



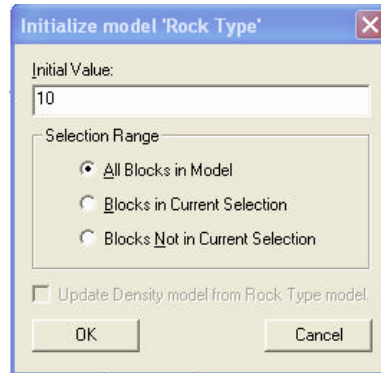
Una vez refrescada la vista actual (tecla R) se ve la superficie extendida. Recuerde grabar la superficie actual.

5. Actualización del modelo de tipos de rocas

Es necesario ahora “llenar” el modelo de tipos de roca con códigos adecuados. Para ellos, se debe inicializar este modelo (clic con botón derecho sobre el modelo ROCK TYPE):

INITIALIZE

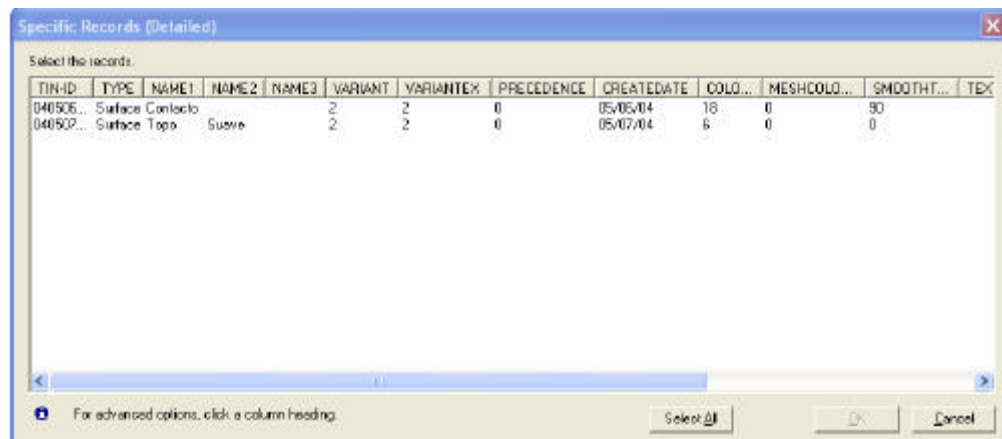
Se debe especificar un código de inicialización (todos los bloques del modelo tendrán este código).



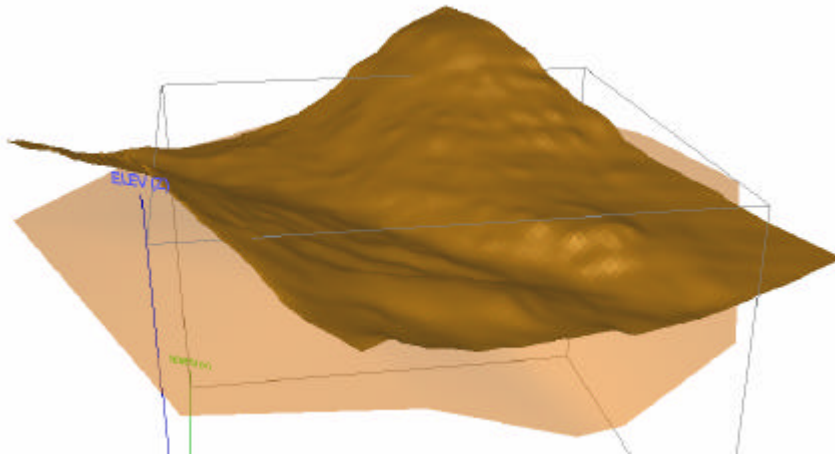
Luego, se deben hacer selecciones específicas de partes del modelo que se quieran codificar con códigos diferentes. Se definen los siguientes códigos de tipos de roca:

- 10 Aire
- 20 Óxidos
- 30 Sulfuros

Para ello se deben activar las superficies que se utilizarán como límites entre las unidades geológicas, haciendo clic con el botón derecho del mouse sobre el Workspace, luego seleccionando OPEN y confirmando el Workspace a abrir:



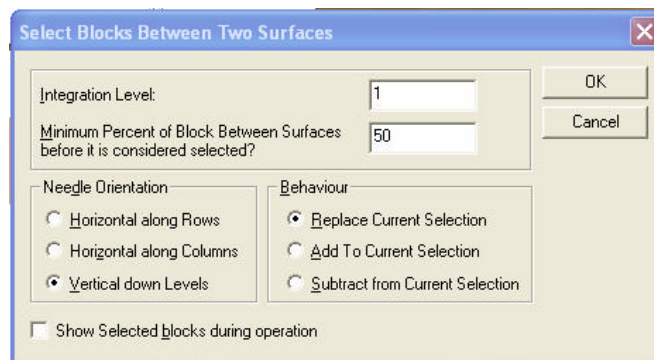
Se seleccionan y confirman las superficies de topografía y de contacto.



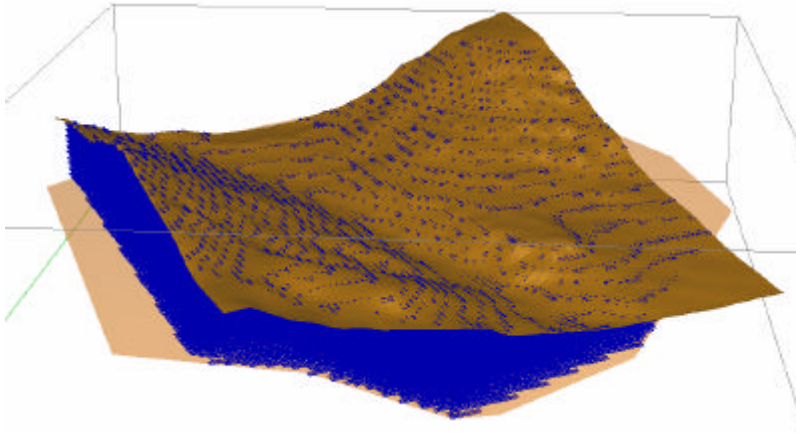
Luego, se debe crear la selección de los bloques entre estas superficies:

BLOCK > SELECTION > CREATE > FROM SURFACES > BETWEEN TWO SURFACES

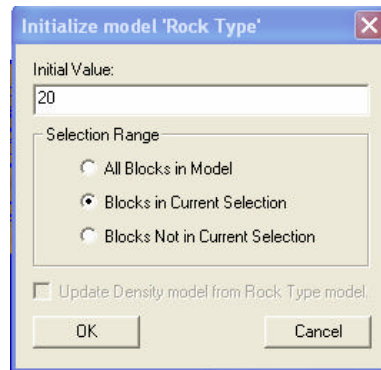
Tras seleccionar con el mouse ambas superficies, se debe especificar los parámetros de este procedimiento. Consideraremos sólo los bloques con al menos un 50% entre ambas superficies y reemplazaremos la selección actual de bloques:



Haciendo clic sobre el modelo de bloques Rock Type y seleccionando DISPLAY, se verán los bloques seleccionados entre ambas superficies (todos aún con un código de roca 10).



Reinicializamos el modelo de rocas con un código 20, sólo considerando los bloques en la selección actual.

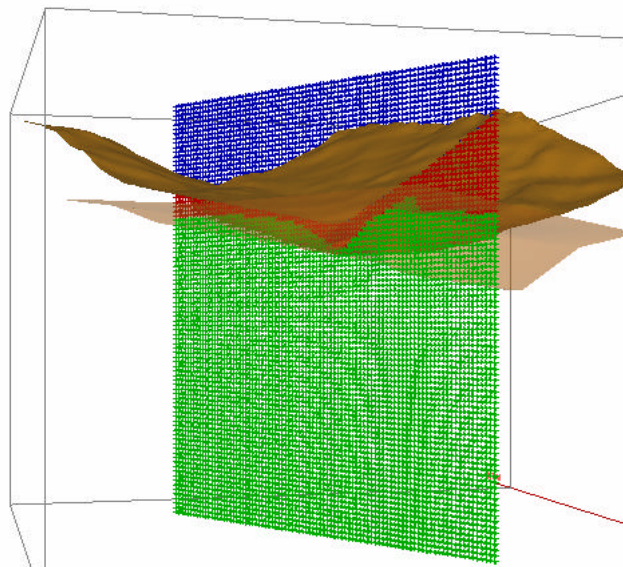


Luego seleccionamos los bloques bajo la superficie de contacto:

BLOCK > SELECTION > CREATE > FROM SURFACES > BELOW SURFACE

Repetimos el proceso de inicialización del modelo, ahora con un código 30 para los bloques bajo la superficie de contacto.

Podemos ahora desplegar, con un Profile de colores adecuado, las litologías en el modelo de bloques, mostrando una columna del modelo de tipos de roca.



Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 8
Validación Cruzada

1. Objetivos de la Clase Nº 8

Los principales objetivos de esta clase son:

- Entender el concepto de validación cruzada.
- Conocer los principales parámetros de un plan de kriging.
- Determinar el mejor plan de kriging para realizar la estimación de los recursos del yacimiento.

2. Definición de un perfil de kriging

Tanto para realizar una validación cruzada, como para hacer una estimación por kriging, se debe definir un perfil de kriging (Kriging Profile).

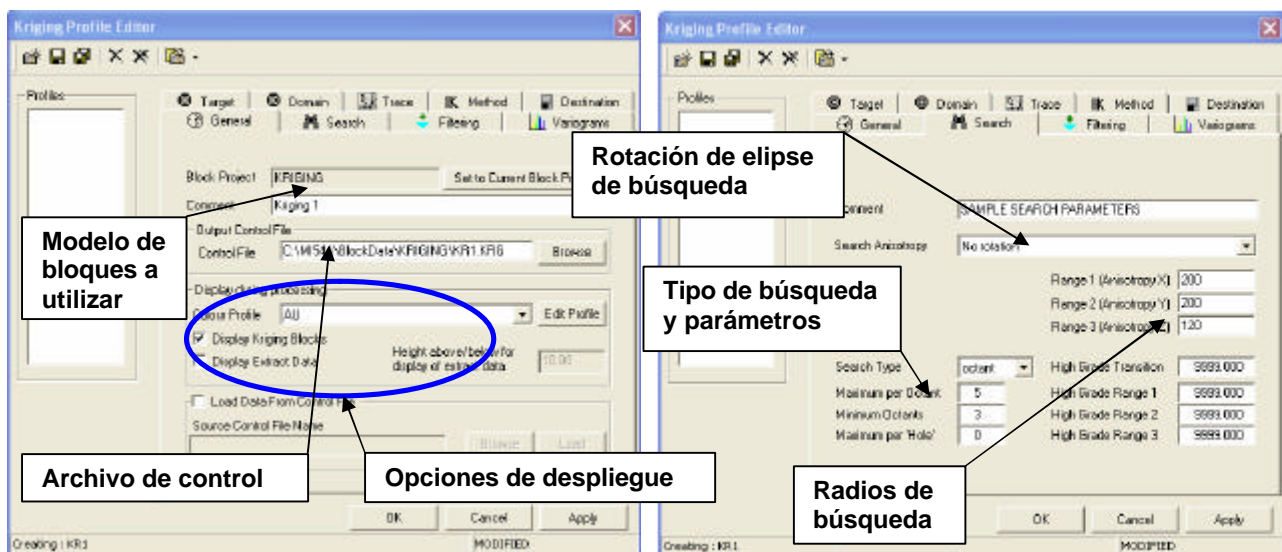
El perfil especifica lo que normalmente se llama el “**plan de kriging**”, el cual define los parámetros de búsqueda y estrategia para realizar la estimación. Es importante recordar que al realizar una estimación de la ley de un bloque, en general no se utiliza toda la información disponible, sino que se restringe a una vecindad en torno a la posición del bloque que se está estimando. Además, no se utilizan todos los datos en la vecindad, sino que se considera hasta un máximo número de muestras. Adicionalmente, muchas veces se favorece el uso de muestras de manera tal que “rodeen” la posición que se está estimando. Esto se consigue exigiendo que, para realizar la estimación, se encuentren datos en un determinado número de octantes, es decir, si se considera que el espacio puede dividirse en ocho donde los tres planos utilizados para realizar esta división pasan exactamente por el centro del bloque que se está estimando, entonces, se requiere que existan muestras en un número mínimo de dichos octantes para realizar la estimación.

El editor de perfiles de kriging está constituido por nueve hojas en las que se deben ingresar los parámetros.

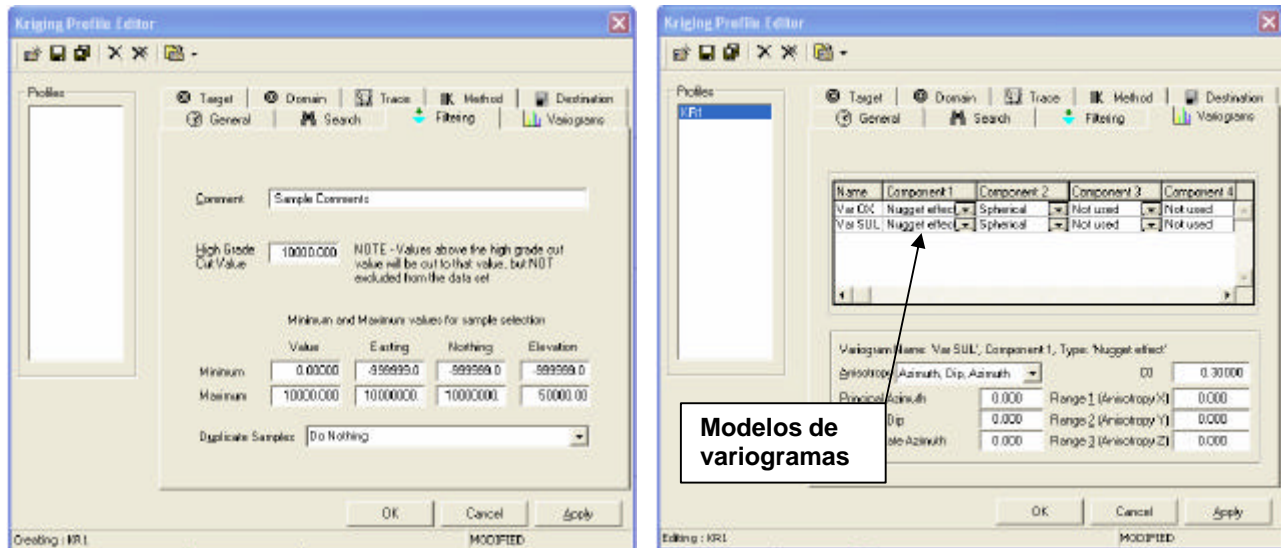
BLOCK > INTERPOLATE > DEFINE KRIGING PROFILES... > EXTRACTION FILE...

- **Parámetros Generales:** En esta hoja se introduce lo siguiente:
 - Un comentario que describa el perfil de kriging.
 - El nombre del archivo de control (.KRG), el cual se llamará más adelante para ejecutar la validación o estimación. En este archivo quedan grabados todos los parámetros que se especifican en este profile.
 - El perfil de colores con el que se desplegarán los bloques y compósitos durante el proceso, el cuál puede editarse directamente desde esta pantalla.

- El espesor del plano en el que se quieren visualizar los datos durante el proceso.
- **Parámetros de Búsqueda:** Estos son:
 - Un comentario que describa la búsqueda.
 - El tipo de búsqueda con anisotropía, si la hay. Existen varias opciones de búsqueda anisótropa. En general, la diferencia radica en la forma en la que se especifica la rotación de los ejes para definir los radios en estas nuevas coordenadas rotadas. Siempre se recomienda consultar la ayuda, dado que distintos programas tienen convenciones diferentes para realizar las rotaciones e, incluso, para definir acimut (a favor o contra los punteros del reloj), inclinación (positiva o negativa hacia abajo), etc.
 - Los parámetros del tipo de anisotropía: rotaciones de los ejes de anisotropía (estas opciones aparecen al seleccionar un tipo de búsqueda anisótropa).
 - El tipo de búsqueda: elipsoidal, octantes o rectangular.
 - Los parámetros del tipo de búsqueda escogido: mínimo número de octantes, máximo número de muestras por octante, máximo número de muestras por sondaje.
 - Los radios de búsqueda en las tres direcciones.
 - Una ley de transición para utilizar radios de búsqueda diferentes para las leyes altas. Esto se conoce como *camping* y tiene que ver con minimizar el efecto de valores extremos en la estimación para no generar bolsones de lata ley inexistentes. Al reducir el radio de influencia de ciertas muestras, se reduce su efecto en la estimación. Esta opción en general no debe utilizarse y, sólo se puede necesitar en casos justificados y tras un análisis exploratorio bastante exhaustivo y que justifique esta reducción de la influencia de las altas leyes.
 - Los radios de búsqueda para las leyes altas en las tres direcciones.



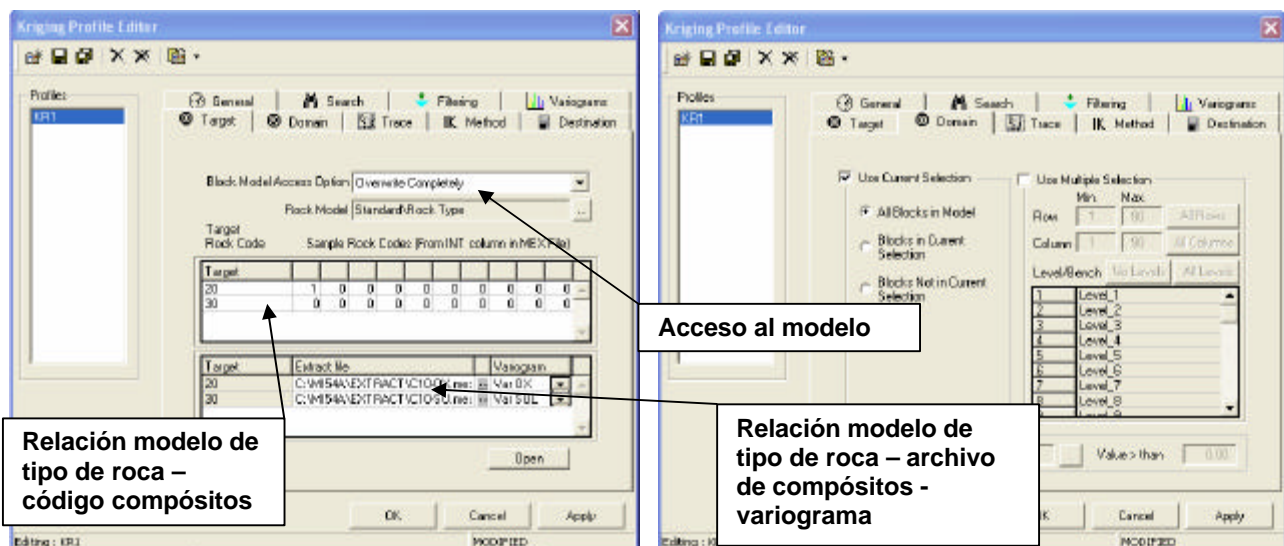
- **Parámetros para filtrar las muestras:** Estos corresponden a:
 - Un comentario para identificar el filtro a aplicar.
 - Una ley de corte, con la que todas las leyes superiores a este valor son reemplazadas por él, sin eliminarse.
 - Los filtros para la selección, pudiéndose seleccionar las muestras según su ley o cualquiera de sus coordenadas.
 - Una opción para corregir las muestras duplicadas.
- **Variogramas:** En esta página deben ingresarse los modelos a utilizar para la estimación. Se pueden ingresar hasta 20 variogramas, aunque en la práctica se ingresa un variograma por población y éstas no suelen ser demasiadas. Para cada variograma se pueden tener hasta ocho componentes, es decir, modelos anidados. Cada variograma se identifica con un nombre, el cual se utilizará más adelante para asociarlo con el código de los compósitos y con un determinado tipo de roca en el modelo de bloques. Para cada componente, se debe ingresar:
 - El tipo de variograma: esférico, exponencial, logarítmico, lineal, efecto pepita, gaussiano, efecto hoyo o transitivo.
 - El tipo de anisotropía a considerar.
 - Las rotaciones en caso de utilizarse algunos tipos de anisotropía.
 - La contribución de meseta de la estructura correspondiente.
 - Los alcances según las distintas direcciones. Es importante mencionar que una componente con un alcance muy grande (infinito) en una dirección, no tiene influencia sobre esta dirección.



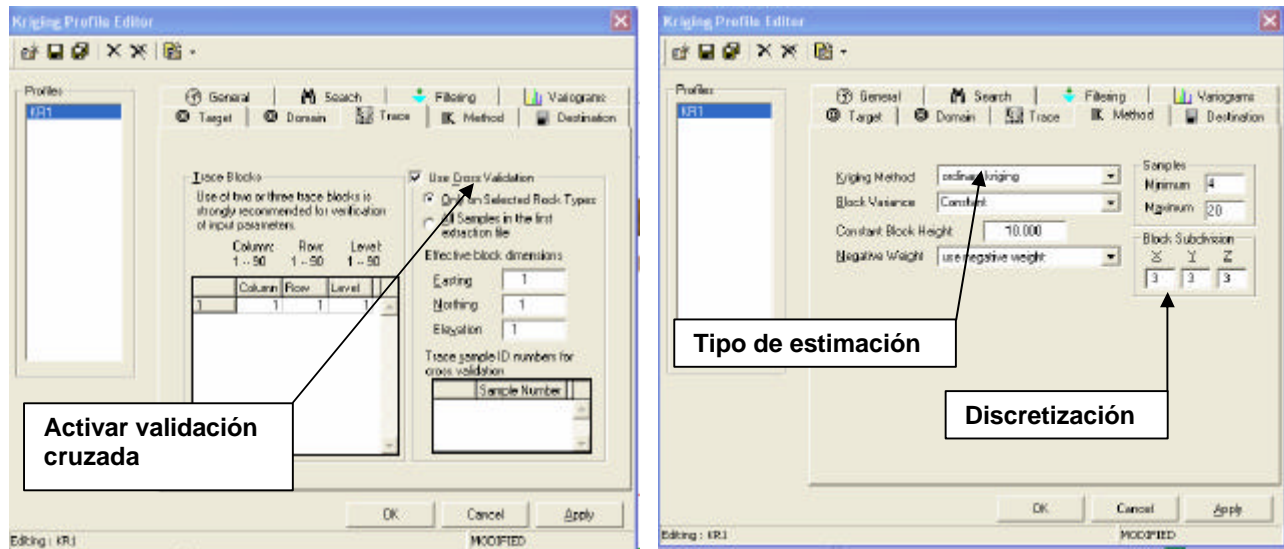
- **Códigos de roca de las muestras y de los bloques:** En esta hoja se relacionan los códigos geológicos de las muestras (litología, mineralización o alteración, o bien un código compuesto que permita identificar las distintas poblaciones que componen las unidades de estimación) con los tipos de

roca definidos en el modelo de bloques. En consecuencia, para un tipo de roca de bloques se podría utilizar más de un tipo de roca de muestras. Las opciones que se deben ingresar en esta hoja son:

- **Opción de acceso al modelo de bloques:** se puede sobrescribir el modelo de bloques completo, o bien, actualizar determinados tipos de roca, o actualizar solamente los bloques que no han sido estimados todavía y que tienen aún ley 0. Esta última técnica se utiliza cuando se realiza una estimación inicial muy exigente y luego se quiere tener valores de lo que no se estimó, con uno más planes menos exigentes.
 - **Modelo de rocas:** debe ingresarse el modelo que tiene los códigos de los tipos de roca (.BRT)
 - **Relación entre los códigos de bloques y los de las muestras:** se debe seleccionar qué códigos de muestras se utilizarán para estimar bloques que tengan determinados tipos de roca.
 - **Archivos de compósitos:** se deben identificar los archivos de extracción que contienen los compósitos a utilizar en la estimación de cada unidad, identificada por el código de tipo de roca del modelo de bloques.
 - **Variogramas a utilizar para cada tipo de roca del modelo de bloques:** se puede utilizar un variograma diferente para cada tipo de roca en el modelo de bloques. Estos deben haber sido definidos con anterioridad.
- **Dominio de bloques a estimar:** En esta hoja se ingresa qué bloques deben ser estimados. Se pueden seleccionar a partir de la vista actual (planta o sección actualmente en uso), o bien, hacer una selección múltiple. En el caso de la validación cruzada, no es necesario seleccionar los bancos pues sólo se quiere estimar los valores puntuales de las muestras y no es necesario recorrer todos los bancos del modelo. Para el kriging, en general, se deseará estimar el modelo completo, aunque se puede seleccionar una parte de él, definiendo los bancos, filas o columnas que interesen.



- **Bloques traza y validación cruzada:** Existe la opción de ver un bloque traza y todos los cálculos que se realizan para estimarlo, de manera de poder comprobar que el programa está trabajando bien. Esta opción se utiliza solamente si se detecta algún resultado anómalo. Además, en esta hoja se selecciona la opción de realizar la validación cruzada, ingresándose el tamaño del bloque a estimar en la posición de las muestras (se considera un tamaño pequeño de 1m de lado, de manera que sea comparable con una estimación puntual).
- **Método de kriging y parámetros de kriging por indicadores:** En esta hoja se ingresa:
 - **Tipo de estimación a realizar:** Las opciones son kriging ordinario, kriging simple de indicadores, kriging múltiple de indicadores o inverso a la distancia. En general la mayor parte de las estimaciones se hacen por kriging ordinario, que es lo que utilizaremos en este proyecto.
 - **Cálculo de la varianza del bloque:** Se puede utilizar varianza por nivel, constante o por bloque. Consideraremos que nuestros bloques son de igual altura, por lo que definiremos la varianza como constante y se debe especificar la **altura del bloque**.
 - **Uso de ponderadores negativos:** La existencia de ponderadores negativos muchas veces genera “leyes negativas”, lo que complica a muchos usuarios, sin embargo, si el interpolador indica que la ley es negativa, lo que claramente está indicando es que la ley es muy baja, por lo que se puede decir que las leyes han sido estimadas como cero. En general no es recomendable quitarle al estimador la capacidad de generar valores fuera del rango de los datos (lo que consigue con ponderadores negativos), porque esto le da la capacidad de extrapolar cuando hay una evidente deriva local.
 - **Número mínimo y máximo de muestras a considerar:** Debe ser compatible con los definidos en la búsqueda por octantes al comienzo.
 - **Discretización del bloque:** para realizar kriging de bloques, éstos se discretizan en una serie de puntos a partir de los cuales se calcula una covarianza promedio que reemplaza el vector de covarianzas en el sistema de kriging (lado derecho). Esta discretización debe ser tal que permita una buena aproximación de los valores exactos (integrales) de dichas covarianzas promedio. En general, se recomienda utilizar como mínimo 3 puntos por dimensión e idealmente 4 o 5. Más puntos, implican mayor tiempo de cálculo y poca ganancia en precisión en el cálculo. Un aspecto interesante es que si los compósitos son de 10m y el modelo de bloques es de 10m de altura, la discretización en Z no debería ser más que 1 punto, dado que el soporte de los compósitos (asumiendo que son verticales) es de 10m.



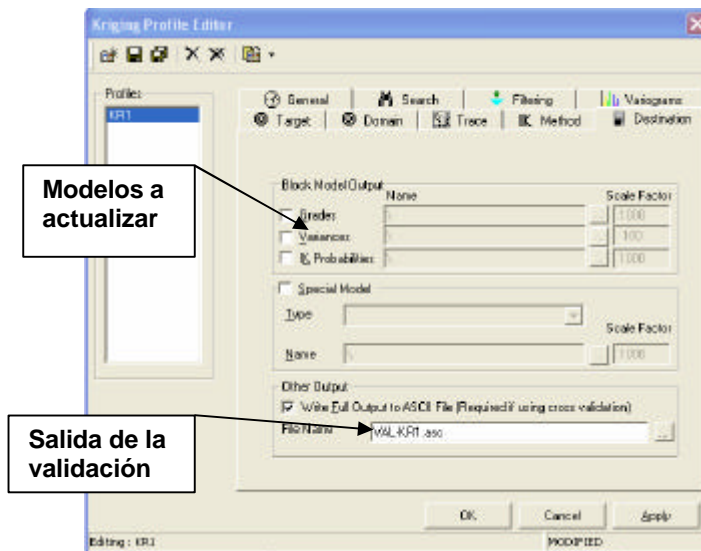
- **Parámetros de los archivos de salida:** En esta última hoja del perfil de kriging, se ingresan los modelos que serán actualizados al ejecutar la estimación:

- **Modelos de bloques de salida:** Se seleccionan los modelos que se desea completar, existiendo las siguientes opciones:

- modelo de leyes
- modelo de varianzas
- modelo de probabilidades del kriging de indicadores

Para cada uno de estos, se debe seleccionar el nombre del modelo. En el caso del kriging ordinario, se deben seleccionar los modelos de leyes y varianzas, mientras que para cualquier kriging por indicadores, se debe agregar a éstos, el modelo de probabilidades. Para la validación cruzada no es necesario seleccionar ningún modelo de bloques, sino que sólo el archivo ASCII que se describe más adelante.

- **Modelo especial:** Existe la posibilidad de completar un modelo especial.
- **Archivo ASCII:** Para la validación cruzada se deben enviar todos los cálculos a un archivo de salida tipo ASCII, el cual entrega los valores reales y estimados de la validación cruzada, los que pueden ser analizados para ver el desempeño del plan de kriging.



3. Elección del mejor plan de kriging

Dentro del plan de kriging, existe una serie de parámetros que hacen que el resultado de la estimación sea mejor o peor. Para decidir si un determinado plan es mejor que otro, se deben comparar los resultados variando estos parámetros.

Por esta razón, se deben realizar validaciones cruzadas para varios planes, viendo el efecto que tiene sobre los resultados la modificación de los siguientes parámetros:

- Radio de búsqueda
- Mínimo número de compósitos a utilizar
- Máximo número de compósitos a utilizar
- Mínimo número de octantes con información
- Máximo número de compósitos por octante
- Máximo número de compósitos por sondaje

Una vez calculadas las validaciones cruzadas, se deben aplicar los siguientes criterios para decidir cual es el mejor plan de kriging:

- Sesgo global: La media de los compósitos debe parecerse a la media de los puntos estimados (idealmente, deben ser iguales).
- Sesgo condicional: En un gráfico de medias condicionales puede verse el sesgo condicional generado por un plan de kriging. Este sesgo debe evitarse.
- Es preferible el plan que genere la menor dispersión entre valores estimados y valores reales de los compósitos, lo que puede verse en un gráfico de dispersión entre estas dos variables.

4. Estimación o validación cruzada con el perfil de kriging

Una vez definido el perfil se debe ejecutar:

BLOCK > INTERPOLATE > KRIGING / INVERSE DISTANCE ESTIMATION ...

Se selecciona el archivo de control y ejecuta la validación o la estimación.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 9
Estimación
Validación del modelo estimado

1. Objetivos de la Clase Nº 9

Los principales objetivos de esta clase son:

- Repasar los métodos existentes para estimar las leyes en el modelo de bloques.
- Desplegar el modelo estimado.
- Realizar chequeos básicos del modelo estimado.

2. Introducción

A continuación se presenta una breve discusión acerca de los métodos de estimación que pueden utilizarse.

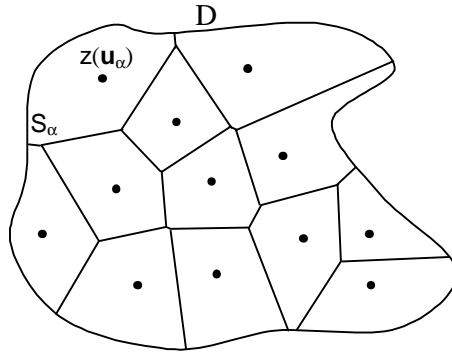
La estimación de leyes puede realizarse mediante varios métodos. Los métodos “clásicos” utilizan principalmente consideraciones geométricas para ponderar las muestras en una vecindad al punto a estimar. Los métodos “geoestadísticos” combinan la configuración geométrica de los datos con la cantidad de información que acarrean, a través de las herramientas de análisis estructural (espacial) que se utilizan —el variograma o la covarianza—, las que consideran efectos tales como la anisotropía existente, redundancia entre los datos y cercanía de éstos al punto a estimar.

En la clase anterior, se estimaron las leyes en los bloques del modelo mediante kriging ordinario. Este modelo debe validarse mediante una serie de chequeos.

3. Repaso de métodos de estimación clásicos

Se presentan dos modelos clásicos de estimación, los que consideran principalmente argumentos geométricos para determinar la influencia de cada muestra en la estimación de la ley de un bloque. El primer método es el de los polígonos (o más cercano vecino), el cual asigna a cada punto del espacio el valor de la muestra más cercana. Luego, se muestra el método de inverso de la distancia, donde cada muestra se pondera de acuerdo a la distancia al punto que se está estimando, de modo de asignar más peso a las muestras más cercanas. Ninguno de estos métodos utiliza la estructura espacial que la variable presenta y por lo tanto no cuantifican adecuadamente la cercanía (que puede ser anisótropa en términos de su influencia al punto que se está estimando), ni la redundancia de las muestras en la vecindad.

Polígonos: El método de los polígonos de influencia consiste simplemente en ponderar el valor de la variable en cada punto por el área o volumen de influencia.



Con esto, se puede determinar la media global ponderada, tomando en cuenta la influencia que cada muestra tiene en el dominio. Para estimar un punto en este dominio, la estimación se asigna a cada punto el valor de la muestra más cercana, definiéndose los polígonos que dan el nombre al método. En tres dimensiones, el procedimiento de cálculo consiste en

crear una malla fina de nodos y asignar a cada uno, el valor de la muestra más cercana. De esta manera, se pueden realizar estimaciones tanto globales, como locales. Para realizar con este método una estimación global se requiere tener bien delimitado el campo de estudio.

Figura 1: Estimación por polígonos.

Estimación local: $z(u) = z(u_\alpha)$

donde

- u_α es el punto más cercano a u
- $z(u_\alpha)$ es el valor de la variable en el punto muestreado u_α

Estimación global: $m = \frac{1}{V} \sum_{a=1}^n V_a \cdot z(u_a)$

donde

- $V = |D|$ corresponde al volumen total del dominio
- V_α es el volumen de influencia de la muestra ubicada en el punto u_α
- $z(u_\alpha)$ es el valor de la variable en el punto muestreado u_α

Inverso de la distancia: este método sirve para realizar estimaciones locales y consiste en ponderar las muestras cercanas al punto a estimar por el inverso de la distancia elevado a alguna potencia (en general, entre 1 y 2). La suma de todas las muestras ponderadas, dividida por la suma de los ponderadores entrega el valor estimado en el punto que se quería estimar.

Estimación local: $z(u) = \frac{\sum_{a=1}^{n(u)} \frac{z(u_a)}{d_a^p}}{\sum_{a=1}^{n(u)} \frac{1}{d_a^p}}$

donde:

- $n(u)$ corresponde al número de muestras utilizadas para estimar el punto u , que puede estar definido por un radio de búsqueda, por ejemplo.
- p es la potencia a la que se eleva el inverso de la distancia y que en general está entre 1 y 2.
- $z(u_\alpha)$ es el valor de la variable en el punto muestreado u_α

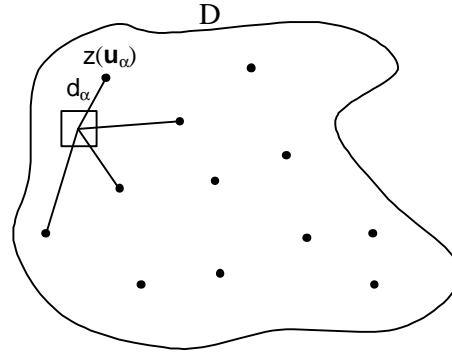


Figura 2: Estimación por inverso de la distancia.

4. Varianza-Error de estimación (Varianza de estimación)

La principal desventaja de los métodos clásicos de estimación es que no consideran la estructura de la variable (continuidad, anisotropía, etc.), están simplemente condicionados por la geometría. Además, no consideran el cálculo de la varianza de estimación. A continuación se presentan las ecuaciones que permiten obtener esta varianza.

Varianza de estimación:

Si a partir de un conjunto de muestras $V'=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ (que pueden considerarse puntuales), se quiere estimar la media de un bloque V , mediante el promedio aritmético del conjunto de muestras (sin ponderar), y notando $\sigma_E^2(V, V')$, la varianza de la diferencia $Z(V) - Z(V')$, se puede hacer la siguiente deducción:

$$\sigma_E^2(V, V') = \text{Var}(Z(V) - Z(V'))$$

Es decir, se interpreta la diferencia $Z(V) - Z(V')$ como el error de estimación, el cual si se considera una variable estacionaria (de orden dos), tiene esperanza nula y varianza igual a la varianza de estimación recién expuesta. En caso de estimar la ley de un bloque mediante una muestra central, por ejemplo, la varianza de estimación se denomina **varianza de extensión**.

Ahora bien, esta varianza puede desarrollarse como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Var}(Z(V) - Z(V')) &= \text{Cov}(Z(V) - Z(V'), Z(V) - Z(V')) \\ &= \text{Cov}(Z(V), Z(V)) + \text{Cov}(Z(V'), Z(V')) - 2 \cdot \text{Cov}(Z(V), Z(V')) \end{aligned}$$

Pero $\text{Cov}(Z(V), Z(V)) = \sigma_{Z(V)}^2$ y $\text{Cov}(Z(V'), Z(V')) = \sigma_{Z(V')}^2$

es decir, cada una de las covarianzas anteriores representan la varianza de los bloques de tamaño V (o V') en el dominio D.

Luego, la varianza de estimación queda:

$$\sigma_E^2(V, V') = \sigma_{Z(V)}^2 + \sigma_{Z(V')}^2 - 2 \cdot \text{Cov}(Z(V), Z(V'))$$

donde

$$\sigma_{Z(V)}^2 = \sigma_{(V/D)}^2 = \sigma_{(\circ/D)}^2 - \sigma_{(\circ/V)}^2 = \sigma_{(\circ/D)}^2 - \bar{\gamma}(V, V)$$

$$\sigma_{Z(V')}^2 = \sigma_{(V'/D)}^2 = \sigma_{(\circ/D)}^2 - \sigma_{(\circ/V')}^2 = \sigma_{(\circ/D)}^2 - \bar{\gamma}(V', V')$$

y

$$\text{Cov}(Z(V), Z(V')) = \sigma_{(\circ/D)}^2 - \bar{\gamma}(V, V')$$

Por lo que la igualdad anterior queda:

$$\sigma_E^2(V, V') = 2 \cdot \bar{\gamma}(V, V') - \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(V', V')$$

es decir, la varianza del error de estimar V con V' es dos veces el variograma medio entre todos los pares de puntos en los que un punto pertenece a V y el otro a V', menos el variograma medio de los pares de puntos en V y menos el variograma medio de los pares en V'.

Si las muestras que constituyen el dominio V' son pequeñas relativas al dominio a estimar V y al dominio total D, éstas pueden considerarse para efectos prácticos como muestras puntuales.

A continuación se presentan tres cálculos de varianzas de estimación.

Ejemplo 1:

Al estimar la ley del bloque V de la figura, dada la muestra v_1 , se pide calcular la varianza de estimación. El modelo variográfico de esta variable es el siguiente:

$$g(h) = \text{Exp}_{a=2/3}(h)$$

es decir, se trata de un modelo exponencial sin efecto pepita, con meseta igual a 1 y alcance práctico 2 (parámetro 2/3).

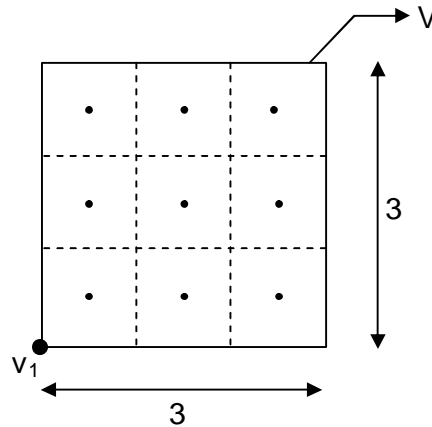


Figura 3: Posición de la muestra respecto al bloque a estimar.

La varianza de estimación está dada por:

$$\sigma_E^2(v_1, V) = 2 \cdot \bar{\gamma}(v_1, V) - \bar{\gamma}(v_1, v_1) - \bar{\gamma}(V, V)$$

Con esto, para calcular $\bar{\gamma}(v_1, V)$, se subdivide el bloque en 9 puntos (de manera de discretizar el cálculo del variograma medio) y se tiene:

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}(v_1, V) &= \frac{1}{9} \cdot \left[\gamma(0,5 \cdot \sqrt{2}) + \gamma(1,5 \cdot \sqrt{2}) + \gamma(2,5 \cdot \sqrt{2}) + 2 \cdot \gamma(\sqrt{0,5^2 + 1,5^2}) \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \gamma(\sqrt{0,5^2 + 2,5^2}) + 2 \cdot \gamma(\sqrt{1,5^2 + 2,5^2}) \right] \\ &= 0,928 \end{aligned}$$

Este valor será más parecido al verdadero $\bar{\gamma}(v_1, V)$, mientras mayor sea la cantidad de puntos en que se discretiza el bloque. Los siguientes son los mínimos recomendados para aplicaciones prácticas:

- Una dimensión: 10
- Dos dimensiones: 6 x 6 = 36
- Tres dimensiones: 4 x 4 x 4 = 64

El valor de $\bar{\gamma}(v_1, v_1)$ es cero, puesto que es una muestra puntual y el variograma en el origen es nulo.

Ahora se debe calcular el $\bar{\gamma}(V, V)$ que corresponde al variograma medio entre todos los pares de puntos de la discretización del bloque. Así:

$$\begin{aligned}\bar{\gamma}(V, V) &= \frac{1}{81} \cdot [9 \cdot \gamma(0) + 24 \cdot \gamma(1) + 16 \cdot \gamma(\sqrt{2}) + 12 \cdot \gamma(2) + 4 \cdot \gamma(2 \cdot \sqrt{2}) + 16 \cdot \gamma(\sqrt{5})] \\ &= 0,784\end{aligned}$$

Finalmente, se puede calcular la varianza de estimación:

$$\begin{aligned}\sigma_E^2(v_1, V) &= 2 \cdot \bar{\gamma}(v_1, V) - \bar{\gamma}(v_1, v_1) - \bar{\gamma}(V, V) \\ &= 2 \cdot 0,928 - 0 - 0,784 \\ &= 1,072\end{aligned}$$

Ejemplo 2:

Ahora se estimará la ley del bloque V de la figura, dada la muestra v_2 ubicada en el centro. Se desea calcular la varianza de estimación. El modelo variográfico de esta variable es el mismo:

$$g(h) = \text{Exp}_{a=2/3}(h)$$

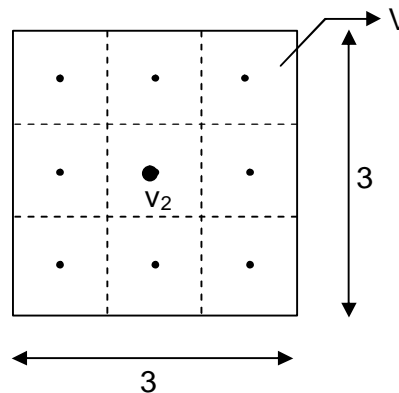


Figura 4: Posición de la muestra respecto al bloque a estimar.

La varianza de estimación está dada por:

$$\sigma_E^2(v_2, V) = 2 \cdot \bar{\gamma}(v_2, V) - \bar{\gamma}(v_2, v_2) - \bar{\gamma}(V, V)$$

Procediendo igual que antes, se obtienen los siguientes variogramas medios:

$$\bar{\gamma}(v_2, V) = 0,691$$

$$\bar{\gamma}(v_2, v_2) = 0$$

$$\bar{\gamma}(V, V) = 0,784$$

La varianza de estimación resulta:

$$\sigma_E^2(v_2, V) = 0,598$$

Ejemplo 3:

Ahora se estimará la ley del bloque V de la figura utilizando las dos muestras. Se desea calcular la varianza de estimación. El modelo variográfico de esta variable sigue siendo:

$$g(h) = \text{Exp}_{a=2/3}(h)$$

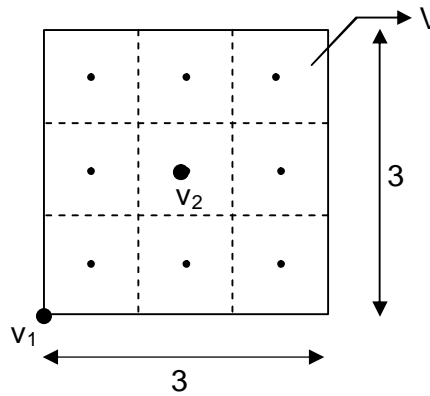


Figura 5: Posición de las muestras respecto al bloque a estimar.

La varianza de estimación está dada por:

$$\sigma_E^2(V', V) = 2 \cdot \bar{\gamma}(V', V) - \bar{\gamma}(V', V') - \bar{\gamma}(V, V)$$

donde $V' = \{v_1, v_2\}$.

Procediendo igual que antes, se obtienen los siguientes variogramas medios:

$$\bar{\gamma}(V', V) = \frac{1}{2} \cdot (\bar{\gamma}(v_1, V) + \bar{\gamma}(v_2, V)) = 0,810$$

$$\bar{\gamma}(V', V') = \frac{1}{4} \cdot (\bar{\gamma}(v_1, v_1) + \bar{\gamma}(v_1, v_2) + \bar{\gamma}(v_2, v_1) + \bar{\gamma}(v_2, v_2)) = 0,479$$

$$\bar{\gamma}(V, V) = 0,784$$

La varianza de estimación resulta:

$$\sigma_E^2(V', V) = 0,357$$

Como se ve, la varianza de estimación depende de las geometrías tanto del dominio a estimar como del conjunto de muestras, además de la estructura de la variable (que se manifiesta a través de su variograma o covarianza). Es importante notar que la varianza no depende del valor de las muestras.

Como era de esperar, la varianza de estimación mayor corresponde a la configuración con una muestra en la esquina del bloque. La configuración con la muestra en el centro tiene una varianza de estimación de aproximadamente la mitad del primer caso. Finalmente, dando iguales ponderadores a las dos muestras, se obtiene una varianza aún menor.

Se puede concluir que no tiene sentido dar igual peso a dos muestras que conducen a errores tan diferentes. Intuitivamente, la muestra central debiera tener un ponderador de aproximadamente dos tercios y la muestra de la esquina, de sólo un tercio.

Ahora bien, se desea que el error de estimación sea lo más pequeño posible, es decir, que la varianza de estimación sea mínima. Este es el origen del **kriging**. Para lograr este objetivo debe desarrollarse una expresión para la varianza de estimación en que los ponderadores sean las incógnitas a determinar.

5. Kriging Simple

Se considera, para el kriging simple, que la media m del dominio (o al menos la media en una vecindad que se llamará **vecindad de kriging**) es conocida.

Además, se conoce el valor de la variable que se quiere estimar en n puntos de medición: $z(\mathbf{u}_\alpha)$, $\alpha = 1, \dots, n$.

Se asume inicialmente, que la **media es nula**.

Bajo estas condiciones, el valor estimado será una combinación lineal ponderada de los valores conocidos:

$$Z^*(u_0) = \sum_{a=1}^n I_a \cdot Z(u_a)$$

Se tiene entonces que la varianza de estimación es la varianza de la diferencia entre el valor estimado (combinación lineal de los puntos medidos) menos el valor real desconocido del punto a estimar. Esta varianza se puede descomponer en la doble suma ponderada de las covarianzas de las distancias entre las muestras más la covarianza a priori del modelo variográfico utilizado, menos dos veces la suma ponderada de las covarianzas entre el punto a estimar y los puntos medidos:

$$\begin{aligned}
Var[Z^*(u_0) - Z(u_0)] &= Var\left[\left(\sum_{a=1}^n I_a \cdot Z(u_a)\right) - Z(u_0)\right] \\
&= \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n I_a \cdot I_b \cdot C(u_a - u_b) + C(0) - 2 \sum_{a=1}^n I_a \cdot C(u_a - u_0)
\end{aligned}$$

Para obtener los ponderadores que minimizan esta varianza, se debe derivar e igualar a cero la expresión anterior, obteniéndose el **sistema de kriging simple**:

$$\sum_{b=1}^n I_b C(u_a - u_b) = C(u_a - u_0) \quad \forall \alpha = 1, \dots, n.$$

Este sistema es un sistema lineal que tiene igual número de ecuaciones y de incógnitas, y que corresponden al número de datos disponibles n . Este sistema se presenta también en escritura matricial:

$$\begin{aligned}
[C(u_a - u_b)] \quad [I_b] &= [C(u_a - u_0)] \\
\begin{pmatrix} C(u_1 - u_1) & \cdots & C(u_1 - u_n) \\ \vdots & & \vdots \\ C(u_n - u_1) & \cdots & C(u_n - u_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} C(u_1 - u_0) \\ \vdots \\ C(u_n - u_0) \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Con esto, los ponderadores óptimos serán:

$$[I_b] = [C(u_a - u_b)]^{-1} [C(u_a - u_0)].$$

Reemplazando estos valores en la expresión de la varianza de estimación, que ahora se llamará **varianza de kriging**, se obtiene que ésta vale:

$$s_{KS}^2(u_0) = C(0) - \sum_{a=1}^n I_a C(u_a - u_0)$$

El mismo sistema y la solución pueden también plantearse en términos del variograma:

$$\begin{aligned}
[g(u_a - u_b)] \quad [I_b] &= [g(u_a - u_0)] \\
\begin{pmatrix} g(u_1 - u_1) & \cdots & g(u_1 - u_n) \\ \vdots & & \vdots \\ g(u_n - u_1) & \cdots & g(u_n - u_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} g(u_1 - u_0) \\ \vdots \\ g(u_n - u_0) \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

El haber asumido la media nula es una decisión que no parece muy práctica en el caso minero, en que las variables regionalizadas son en su mayoría mayores que cero. Sin embargo, lo que se hace es trabajar con la variable $Z-m$ que tiene media nula, resolver el sistema como se muestra en los párrafos anteriores, y luego volver a Z una vez que se tengan los ponderadores óptimos y se haya resuelto el sistema, de la siguiente forma:

$$Z^*(u_0) - m = \sum_{a=1}^n I_a \cdot [Z(u_a) - m],$$

o bien

$$Z^*(u_0) = \sum_{a=1}^n I_a \cdot Z(u_a) + \left(1 - \sum_{a=1}^n I_a\right) \cdot m.$$

Ejemplo:

Dada la siguiente configuración, calcular el estimador de kriging simple y su varianza para estimar el punto u_0 .

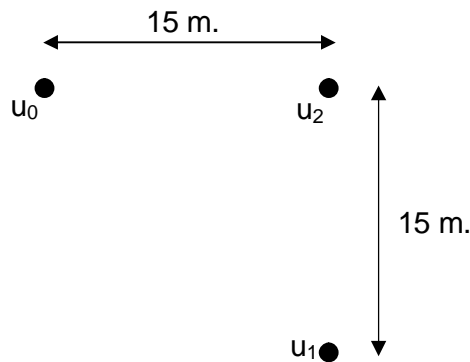


Figura 6: Configuración de muestras para estimar u_0 .

El modelo variográfico a utilizar es: $g(h) = 0,3 + 1,75 \cdot \text{Exp}_{a=30}(h)$

Se sabe que $u_1 = 0.50$ g/t, $u_2 = 16.00$ g/t y la media del sector (vecindad) es $m = 1.40$ g/t.

Las ecuaciones asociadas son las siguientes:

$$u_0 = 0,50 \cdot I_1 + 16,00 \cdot I_2 + 1,40 \cdot (1 - I_1 - I_2)$$

$$s_{KS}^2 = C(u_0 - u_0) - I_1 \cdot C(u_0 - u_1) - I_2 \cdot C(u_0 - u_2)$$

y para el cálculo de los ponderadores óptimos, el sistema de ecuaciones es:

$$\begin{aligned}C(u_1 - u_1) \cdot I_1 + C(u_1 - u_2) \cdot I_2 &= C(u_0 - u_1) \\C(u_2 - u_1) \cdot I_1 + C(u_2 - u_2) \cdot I_2 &= C(u_0 - u_2)\end{aligned}$$

Del modelo variográfico se tiene que:

- $C(u_1 - u_1) = C(u_2 - u_2) = C(u_0 - u_0) = s^2 = 2,05$ (varianza de la población)
- $C(u_1 - u_2) = C(u_2 - u_1) = 2,05 - 0,99 = 1,06$
- $C(u_0 - u_1) = 2,05 - 1,19 = 0,86$
- $C(u_0 - u_2) = 2,05 - 0,99 = 1,06$

Luego, el sistema de ecuaciones queda:

$$\begin{aligned}2,05 \cdot \lambda_1 + 1,06 \cdot \lambda_2 &= 0,86 \\1,06 \cdot \lambda_1 + 2,05 \cdot \lambda_2 &= 1,06\end{aligned}$$

Y las soluciones son:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 0,208 \\ \lambda_2 &= 0,410 \\ (1 - \lambda_1 - \lambda_2) &= 0,382\end{aligned}$$

Por lo tanto, el estimador de kriging simple es:

$$u_0 = (0,208 \cdot 0,50) + (0,410 \cdot 16,00) + (0,382 \cdot 1,40) = 7,22 \text{ g/t}$$

Y su varianza asociada:

$$\sigma_{KS}^2 = 2,05 - (0,208 \cdot 0,86) - (0,410 \cdot 1,06) = 1,437 \text{ (g/t)}^2$$

6. Kriging Ordinario

En la mayoría de los casos la media no es conocida, por lo que el kriging simple no se puede aplicar. Es necesario entonces, replantear el sistema de kriging recién revisado, de manera de obtener los ponderadores **sin considerar la media**.

Nuevamente, el estimador que se utiliza es una combinación lineal de los valores medidos de la variable en una vecindad:

$$Z^*(u_0) = \sum_{a=1}^n I_a \cdot Z(u_a)$$

Sin embargo, en este caso debe imponerse la **condición de insesgo**, es decir, se debe imponer que la esperanza del error de estimación sea nula:

$$E[Z^*(u_0) - Z(u_0)] = \sum_{a=1}^n I_a \underbrace{E[Z(u_a)]}_m - \underbrace{E[Z(u_0)]}_m$$

$$= m \left(\sum_{a=1}^n I_a - 1 \right)$$

Esto lleva a la siguiente restricción (llamada también condición de universalidad):

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1.$$

Ahora, nuevamente se debe minimizar la varianza de estimación, pero sujeta a la restricción recién presentada:

$$\min \quad \text{Var}[Z^*(u_0) - Z(u_0)] = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n I_a \cdot I_b \cdot C(u_a - u_b) + C(0) - 2 \sum_{a=1}^n I_a \cdot C(u_a - u_0)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{a=1}^n I_a = 1$$

Este problema se resuelve utilizando la técnica de los multiplicadores de Lagrange. Para esto, se minimiza la siguiente función:

$$\sigma_E^2 - 2 \cdot \mu \cdot \left(\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right)$$

igualando a cero sus derivadas parciales respecto a los ponderadores y al multiplicador de Lagrange, se obtiene el **sistema de kriging ordinario**:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial I_a} = 0 : \sum_{b=1}^n I_b C(u_a - u_b) - m = C(u_a - u_0) & \forall a = 1 \dots n \\ \frac{\partial}{\partial m} = 0 : \sum_{a=1}^n I_a = 1 \end{cases}$$

o matricialmente,

$$\begin{bmatrix} C(u_a - u_b) & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_b \\ -m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(u_a - u_0) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} C(u_1 - u_1) & \cdots & C(u_1 - u_n) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ C(u_n - u_1) & \cdots & C(u_n - u_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \\ -m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(u_1 - u_0) \\ \vdots \\ C(u_n - u_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

Y la varianza de kriging vale:

$$s_{KO}^2(u_0) = s^2 - \sum_{a=1}^n I_a C(u_a - u_0) + m$$

Se puede utilizar equivalentemente el variograma en lugar de la covarianza, obteniéndose el sistema siguiente:

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^n I_b g(u_a - u_b) + m = g(u_a - u_0) & \forall a = 1 \dots n \\ \sum_{a=1}^n I_a = 1 \end{cases}$$

o matricialmente,

$$\begin{bmatrix} g(u_a - u_b) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_b \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(u_a - u_0) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} g(u_1 - u_1) & \dots & g(u_1 - u_n) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ g(u_n - u_1) & \dots & g(u_n - u_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g(u_1 - u_0) \\ \vdots \\ g(u_n - u_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

Y la varianza de kriging vale:

$$s_{KO}^2(u_0) = \sum_{a=1}^n I_a g(u_a - u_0) + m.$$

Ejemplo:

Dada la misma configuración anterior, calcular el estimador de kriging ordinario y su varianza para estimar el punto u_0 .

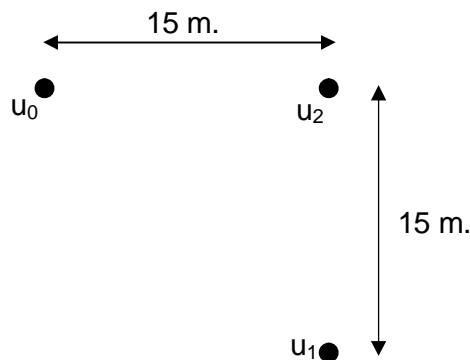


Figura 7: Configuración de muestras para estimar u_0 .

El modelo variográfico a utilizar es: $g(h) = 0,3 + 1,75 \cdot \text{Exp}_{a=30}(h)$

Se sabe que $u_1 = 0.50$ g/t y $u_2 = 16.00$ g/t.

Las ecuaciones en este caso son:

$$u_0 = 0,50 \cdot I_1 + 16,00 \cdot I_2 \quad \text{con } I_1 + I_2 = 1$$
$$s_{KO}^2 = C(u_0 - u_0) - I_1 \cdot C(u_0 - u_1) - I_2 \cdot C(u_0 - u_2) + m$$

y para el cálculo de los ponderadores óptimos, el sistema de ecuaciones es:

$$C(u_1 - u_1) \cdot I_1 + C(u_1 - u_2) \cdot I_2 - m = C(u_0 - u_1)$$
$$C(u_2 - u_1) \cdot I_1 + C(u_2 - u_2) \cdot I_2 - m = C(u_0 - u_2)$$
$$I_1 + I_2 = 1$$

Del modelo variográfico se tiene que:

- $C(u_1 - u_1) = C(u_2 - u_2) = C(u_0 - u_0) = s^2 = 2,05$ (varianza de la población)
- $C(u_1 - u_2) = C(u_2 - u_1) = 2,05 - 0,99 = 1,06$
- $C(u_0 - u_1) = 2,05 - 1,19 = 0,86$
- $C(u_0 - u_2) = 2,05 - 0,99 = 1,06$

Luego, el sistema de ecuaciones queda:

$$2,05 \cdot \lambda_1 + 1,06 \cdot \lambda_2 - \mu = 0,86$$
$$1,06 \cdot \lambda_1 + 2,05 \cdot \lambda_2 - \mu = 1,06$$
$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

Y las soluciones son:

$$\lambda_1 = 0,399$$
$$\lambda_2 = 0,601$$
$$\mu = 0,595$$

Por lo tanto, el estimador de kriging ordinario es:

$$u_0 = (0,399 \cdot 0,50) + (0,601 \cdot 16,00) = 9,82 \text{ g/t}$$

Y su varianza asociada:

$$\sigma_{KO}^2 = 2,05 - (0,399 \cdot 0,86) - (0,601 \cdot 1,06) + 0,595 = 1,66 \text{ (g/t)}^2$$

Se puede observar que el kriging simple es más robusto que el kriging ordinario, debido al efecto suavizante de la media.

7. Ejemplos de kriging ordinario

A continuación se presentan ocho casos de kriging, donde se observa sobre los ponderadores el efecto de la distancia, de la anisotropía, el efecto pantalla, el efecto de declusterización y el resultados de tener un efecto pepita mayor en el modelo variográfico.

Se considera en primer lugar el caso base siguiente y el efecto de aumentar la distancia de una de las muestras, con el variograma:

$$g(h) = 0,2 + 0,8 \cdot Sph_{a=100}(h)$$

En la figura siguiente se presenta la posición de las muestras respecto al bloque, con el valor del ponderador calculado mediante kriging ordinario. Además, se muestra el valor de la varianza de estimación.

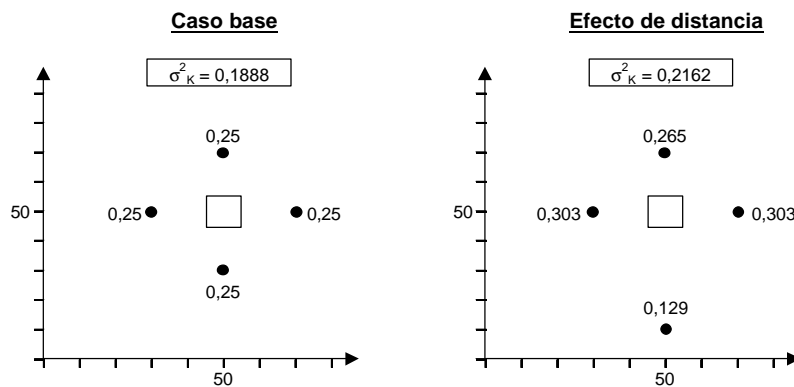


Figura 8: Caso base y efecto del aumento de la distancia sobre los ponderadores.

Como es lógico, al alejar una muestra, los pesos de las muestras más cercanas al bloque a estimar aumentan y el de la que se alejó, disminuye. La varianza de estimación aumenta (pues la información es de peor calidad al estar más lejos). Además se produce un resultado interesante: las muestras más cercanas a la muestra que se alejó toman un peso mayor que la más lejana (en este caso la de más arriba). Esto se debe a que el peso que pierde la muestra al alejarse se traspasa principalmente a las muestras que se encuentran más cercanas a ella.

Ahora considerando respecto al caso base, la presencia adicional de dos muestras que están ocultas respecto al bloque a estimar, se tendrá el efecto pantalla.

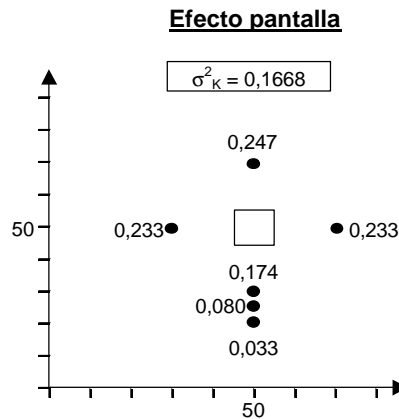


Figura 9: Efecto pantalla sobre los ponderadores de kriging.

Como se puede ver, los ponderadores de las muestras afectadas por este efecto pantalla son muy bajos. Las tres muestras que forman este grupo suman un peso de 0,287 (muy distinto al 0,5 que se podría suponer por tratarse de tres muestras de seis). La varianza de estimación disminuye, pues se cuenta con una mayor cantidad de información (además ésta es de calidad superior al caso base, pues además de las cuatro muestras ubicadas en las mismas posiciones, se dispone de dos muestras adicionales).

Se presenta ahora el efecto de declusterización del kriging sobre los pesos. Este efecto se pudo apreciar en el caso anterior y se manifiesta como una disminución de los ponderadores cuando las muestras están muy cerca unas de otras (formando grupos o *clusters*).

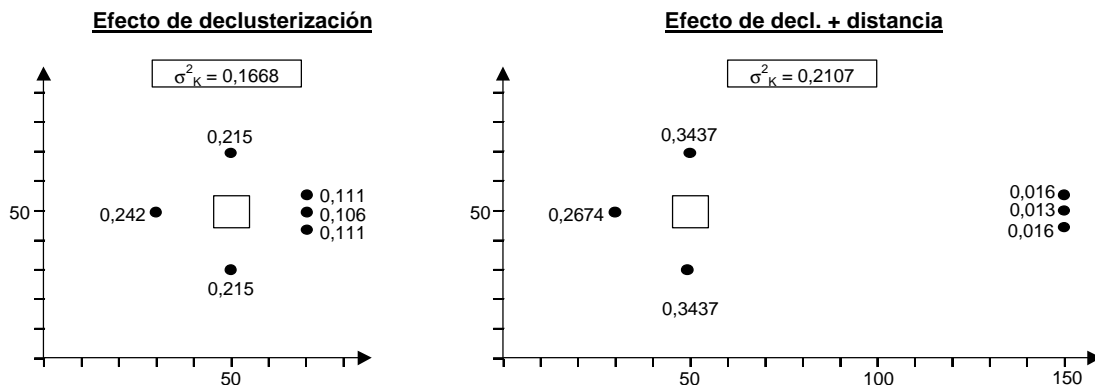


Figura 10: Efecto de declusterización y efecto de declusterización + distancia.

Al igual que antes, la varianza de estimación depende de la cantidad de información disponible.

Se supone ahora que el variograma no es isótropo. Se considera una anisotropía geométrica de razón 4 a 1 en la dirección X (es decir, el alcance del modelo en esta dirección es cuatro veces mayor que en la dirección Y).

Considerando la misma disposición de las muestras que en el caso base, se tiene lo siguiente:

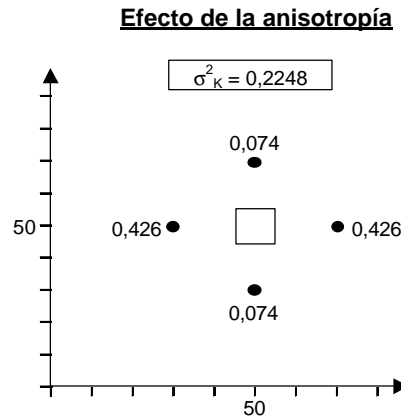


Figura 11: Efecto de la anisotropía geométrica sobre los ponderadores de kriging.

Finalmente, se presenta una configuración para un modelo con un efecto pepita de 20% y se compara, para la misma disposición de las muestras, con un modelo que tiene un efecto pepita de 70%.

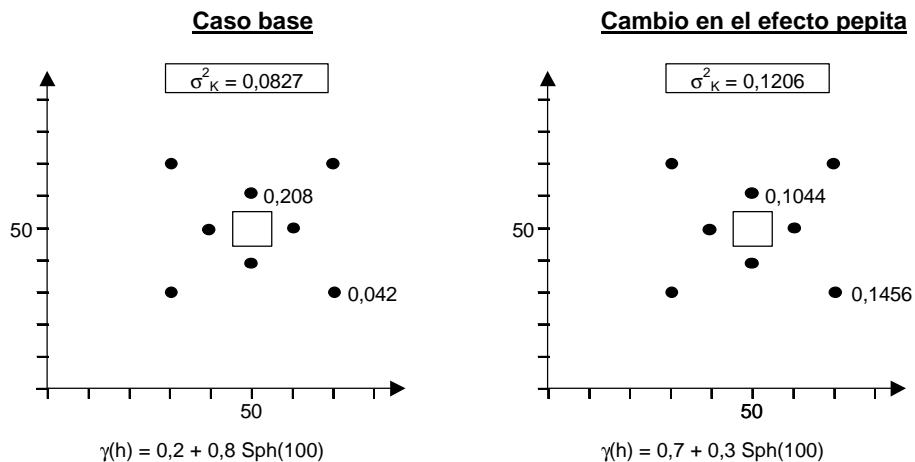


Figura 12: Efecto sobre los ponderadores de un cambio en el efecto pepita del modelo variográfico.

Como puede verse, los ponderadores tienden a parecerse cuando el efecto pepita es más alto, llegando al extremo de ser todos iguales si se tiene efecto pepita puro, sin importar la posición de las muestras respecto al bloque a estimar.

8. Estimación en GEMS

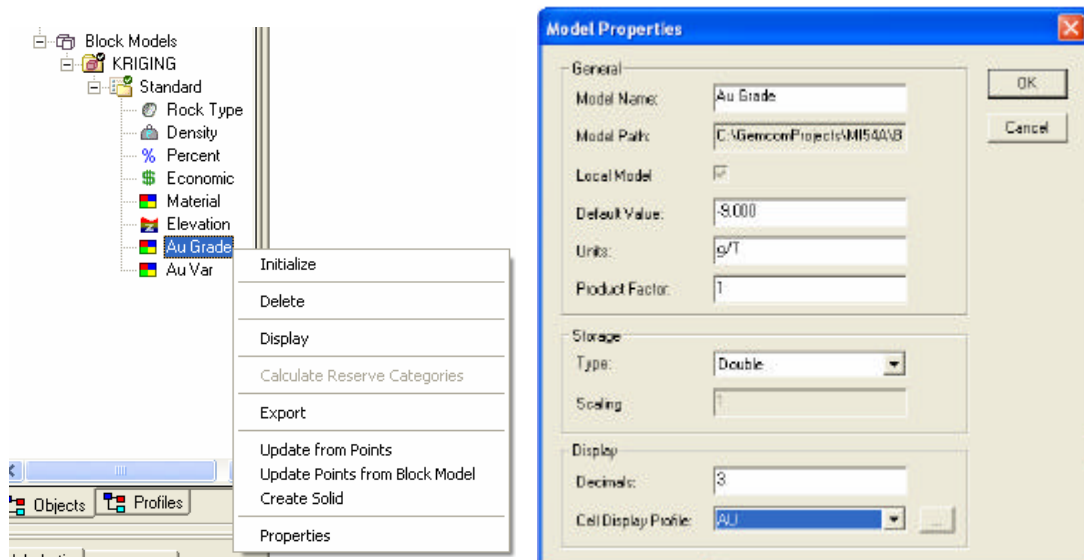
Tras haber seleccionado los parámetros del plan de kriging más indicado mediante validaciones cruzadas, es necesario realizar la estimación, tal como se indicara en la clase anterior.

BLOCK > INTERPOLATE > KRIGING / INVERSE DISTANCE ESTIMATION ...

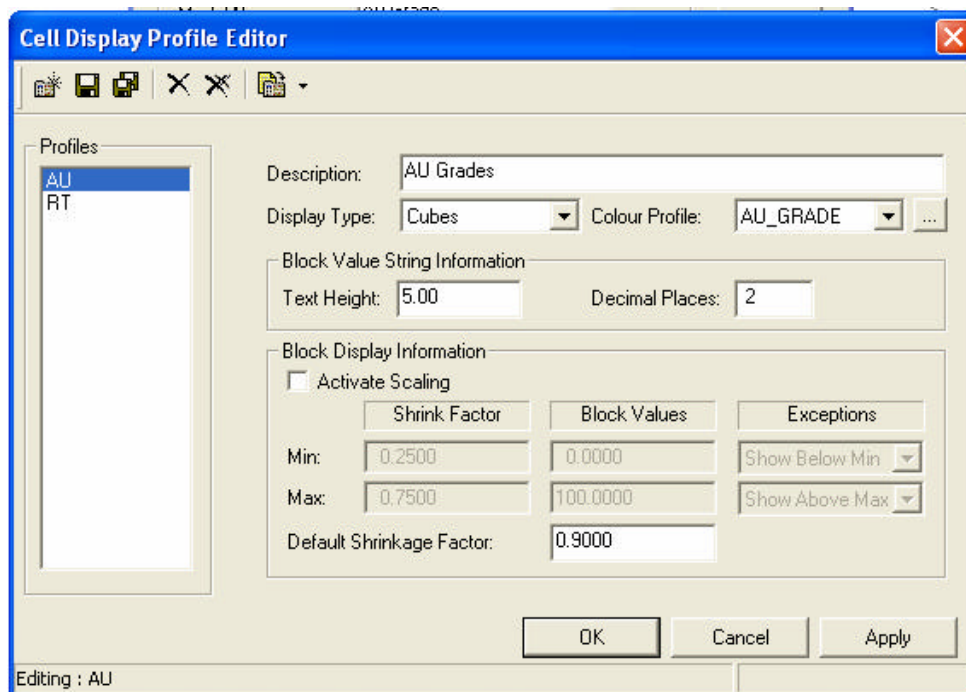
Se selecciona el archivo de control y ejecuta la estimación. Según los parámetros indicados antes, se desplegarán los bloques y las muestras (compósitos) utilizados en la estimación, codificados según el perfil de colores escogido. La estimación actualizará los archivos (modelos de bloques) de leyes y varianzas (*.BL1 y *.VR1, respectivamente). Además Se genera un archivo ASCII (*.ASC) con un resumen de la estimación y otro (*.LIS) con un listado de los parámetros utilizados en la estimación.

9. Despliegue de un modelo de bloques

Una vez realizada la estimación, se puede desplegar en pantalla cualquiera de los bloques actualizados. El despliegue se puede realizar en plantas o secciones (filas o columnas) o combinar estos últimos. Para ello, debe existir un perfil de colores y debe realizarse una selección de los bloques a desplegar. Haciendo clic con el mouse sobre un modelo de bloques en el área del proyecto, aparece el siguiente menú. Seleccionando DISPLAY, aparece el siguiente cuadro, donde se define el perfil de despliegue a utilizar.



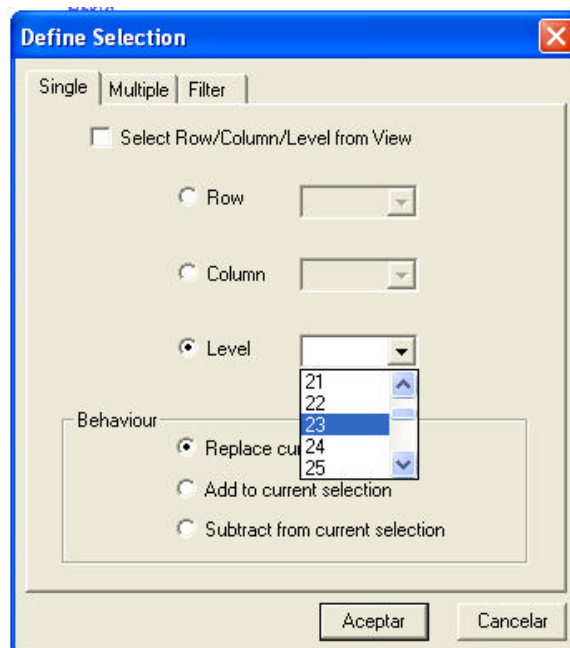
Al seleccionar el botón para modificar o crear un perfil de despliegue (CELL DISPLAY PROFILE), aparece el siguiente cuadro, donde se seleccionan el tipo de despliegue, el perfil de colores y otros atributos.



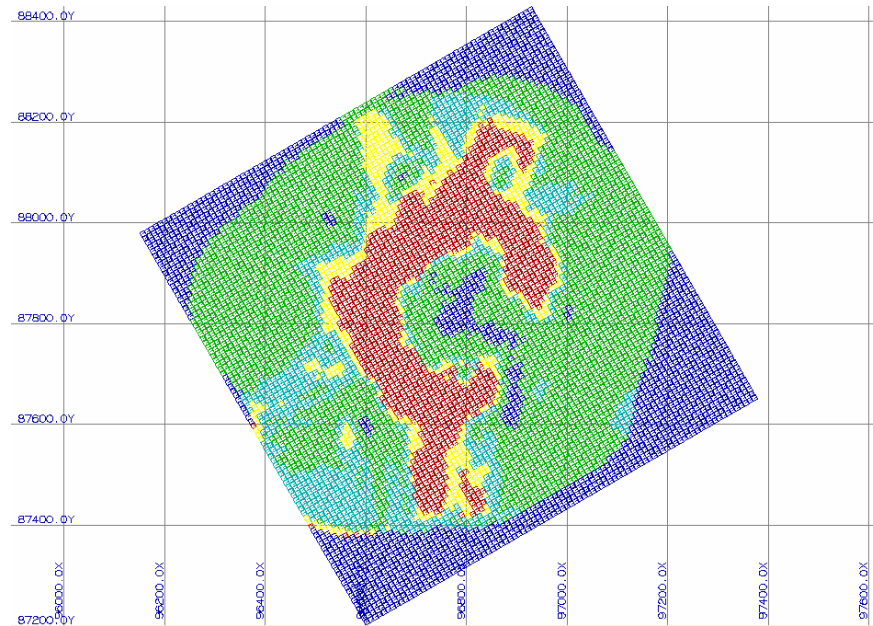
Además de esto, se deben seleccionar los niveles, columnas o filas a desplegar, lo que también puede hacerse a través del menú:

BLOCK > SELECTION > DEFINE SELECTION...

En esta ventana, se puede hacer una selección simple (de un solo nivel, fila o columna), o bien, una selección múltiple:

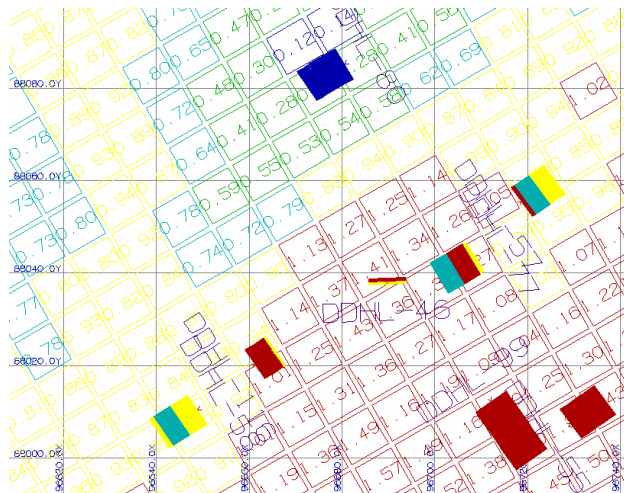


Con la selección hecha, se desplegarán en pantalla los bloques seleccionados, codificados con el perfil de colores indicado.



10. Validación de la estimación

Validación gráfica: Consiste básicamente en determinar si los compósitos influenciaron de manera correcta a los bloques estimados. Se debe verificar que en los puntos donde existían datos de alta ley, se generaron zonas de bloques de alta ley y que lo mismo ocurra con las leyes bajas. Para realizarlo, se deben desplegar **plantas** y **secciones** donde se incluyan los compósitos (considerando un espesor en la visualización) y los bloques. Cualquier problema mayor en el perfil de kriging realizado antes podrá observarse mediante esta validación.



Validación estadística: El siguiente paso consiste en calcular estadísticas del modelo de bloques por población y compararlas con las estadísticas de los compósitos utilizados para realizar la estimación (desagrupadas). Sin embargo, debe considerarse que las leyes de bloques estimadas serán más suaves (menor varianza), por tratarse de una interpolación. Esta validación permitirá definir si existe sesgo global (debe compararse con las estadísticas desagrupadas de los compósitos, por población). Además, se podrá verificar la reducción en la varianza de dispersión, la que teóricamente puede calcularse si se conoce el variograma.

Cálculo de derivas: Para determinar si las tendencias en el espacio de la variable estimada corresponden a lo que los compósitos indican, se calculan derivas, que corresponden a promedios tanto de los bloques estimados como de los compósitos utilizados en franjas en cada una de las tres direcciones (este, norte y elevación). Se debe graficar, para cada dirección, la deriva de los bloques y la de los compósitos. Las derivas de las leyes de bloque serán más suaves que aquellas de los compósitos, por el efecto de soporte.

La construcción de derivas permitirá detectar errores en los márgenes (extrapolaciones incorrectas), principalmente.

Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 10
Categorización de recursos

1. Objetivos de la Clase Nº 10

Los principales objetivos de esta clase son:

- Discutir metodologías de clasificación de recursos geológicos y reservas mineras.
- Definir algún criterio de categorización y clasificar los recursos en medidos, indicados e inferidos.

2. Introducción

La estimación generada anteriormente entrega valores para las leyes de bloques que tienen distintos niveles de calidad (en cuanto a qué tan acertado es el valor estimado, si se lo compara con el valor real desconocido). Así, los bloques estimados en los márgenes del depósito habrán utilizado un número de muestras menor y la estimación estará por lo tanto sujeta a un error mayor. Por esta razón, se definen categorías de recursos y reservas.

La categorización de recursos minerales (o geológicos) y reservas mineras es una de las etapas más críticas en la evaluación de un proyecto minero, dado que el financiamiento del proyecto y las inversiones dependen de la cantidad (tonelaje) y calidad (ley) de los recursos y reservas. Además, la decisión de invertir en el proyecto considera la confiabilidad en los valores estimados de estos recursos y reservas.

Sin embargo, éste es a la vez uno de los procedimientos más subjetivos en la evaluación, dado que la clasificación queda sujeta a la opinión experta de un especialista en evaluación de yacimientos. En los últimos años, los códigos internacionales han tendido a incluir de manera más explícita los requerimientos para la divulgación de resultados de la estimación de los recursos y reservas, sin embargo, aún no se ha especificado una metodología fija para todos los proyectos.

A continuación se presenta una breve revisión de los códigos internacionales para la presentación pública de recursos geológicos y reservas mineras. La mayor parte de estos códigos explicita que las cantidades deben documentarse junto a alguna medida de la calidad de la estimación. Tras presentar los códigos y discutir los requerimientos que éstos imponen, se analizan de manera crítica los distintos sistemas para categorizar los recursos y reservas.

En esta clase definiremos algunos de los criterios que comúnmente se utilizan para categorizar recursos y reservas y luego implementaremos uno de ellos en el proyecto.

3. Códigos internacionales para categorizar recursos geológicos y reservas mineras

Los primeros intentos documentados para clasificar recursos y reservas se remontan a principios del siglo XX. Bajo la misma idea básica de definir el grado de confianza en la estimación de la cantidad y calidad del recurso, los sistemas de clasificación han evolucionado de acuerdo al desarrollo de las políticas mineras y las restricciones impuestas por los mercados financieros y los inversionistas. Sin embargo, aún hoy los códigos dejan la categorización al juicio de un especialista en evaluación de recursos y reservas. A pesar de ello, mayor énfasis se ha puesto en la necesidad de establecer límites de confianza en las categorías, en el requerimiento de que la categorización sea reproducible y por ende auditable, y que el especialista sea una persona calificada y reconocida entre sus pares. En general, se privilegia el uso de técnicas convencionales de evaluación que hayan probado su eficacia en la cuantificación de los recursos y reservas.

Los principales códigos utilizados incluyen:

- Circular 531 del USGS (USGS, 1980) en Estados Unidos
- CIM Guidelines (CIM, 1996) y posteriormente el National Instrument 43-101 en Canadá (CSA, 2001)
- SAMREC Code sudafricano (SAMREC, 2000)
- JORC Code (JORC, 1999) de Australia.

Este último se ha convertido en el estándar de facto, y la mayor parte de las revisiones de los otros códigos se refieren a definiciones e indicaciones del JORC.

De los contenidos de estos códigos, es necesario rescatar la definición de recurso mineral o geológico y reserva minera y sus categorías:

Recurso Mineral: es una concentración u ocurrencia de material de interés económico intrínseco en o sobre la corteza de la Tierra en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencia y conocimientos específicos geológicos. Los Recursos Minerales se subdividen, en orden de confianza geológica ascendente, en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos.

Reserva Minera: es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido o Indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se puedan producir cuando se extraiga el material. Se han realizado las evaluaciones apropiadas, que pueden incluir estudios de factibilidad y contemplan la consideración de y modificación por factores razonablemente asumidos de extracción, metalúrgicos, económicos, de mercados, legales, ambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones demuestran en la fecha en que se reporta que podría justificarse

razonablemente la extracción. Las Reservas Mineras se subdividen, en orden creciente de confianza, en Reservas Probables y Reservas Probadas. Nótese que la definición de Reservas Posibles ha caído en desuso, debido a que los códigos no autorizan declarar reservas que provienen de recursos geológicos inferidos.

La definición del grado de confiabilidad de recursos y reservas se basa en diversos factores que son evaluados por una persona competente. Este experto debe encargarse de cuantificar el grado de incertidumbre en los valores estimados para calcular las figuras indicadas en el estudio de factibilidad del depósito.

En la definición del grado de confiabilidad, surge la subjetividad de las técnicas aplicadas para definir estas categorías. Varios aspectos son considerados al definir la calidad del valor estimado, siendo las más comunes:

- el grado de continuidad geológica que el experto considera existe en la mineralización,
- la cantidad de información disponible y su configuración geométrica y
- el grado de continuidad espacial de las leyes, el cuál es medido a través de las herramientas que la geoestadística provee.

4. Cuantificación de incertidumbre

Dados los requerimientos de indicar el nivel de confianza en la estimación de los recursos y reservas, es necesario determinar metodologías que permitan categorizar los bloques en alguna de las dos o tres categorías, según si hablamos de reservas o recursos. Varios criterios pueden considerarse para definir a qué categoría pertenece un determinado bloque. Idealmente, estos criterios debieran combinarse de manera de obtener la clasificación más acertada.

Criterios Geológicos:

Uno de los aspectos claves de la interpretación geológica es la comprensión de la continuidad geológica del depósito. Ésta se ve favorecida por un estudio exploratorio de datos detallado y por un conocimiento razonable de la geología regional en la que el depósito yace.

Por su naturaleza, tanto la interpretación geológica como la definición de la continuidad geológica de la mineralización son extremadamente subjetivas y acarrearán un grado de incertidumbre que debe considerarse (aunque resulta extremadamente difícil de cuantificar). Buena comprensión de la geología regional y un análisis detallado de los datos obtenidos dentro de la propiedad permitirán evaluar la posibilidad de que existan discontinuidades en la mineralización, por fallas o intrusiones de cuerpos menores.

Debe entonces enfatizarse que la continuidad geológica no necesariamente implica continuidad en la ley del elemento de interés (por ejemplo, aunque en algunos casos las vetas de oro pueden estar bien delimitadas geológicamente, éstas suelen tener leyes muy erráticas). La interpretación geológica debe, en general, utilizarse en conjunto con otro criterio que pueda cuantificarse de manera más consistente y repetible.

Criterios Geométricos:

Una práctica habitual es asignar el grado de confianza de la estimación de la ley de un bloque en base a la configuración espacial de las muestras utilizadas en su estimación. Por ejemplo, un bloque cuya ley fue estimada considerando solamente datos de un sondaje es considerado menos confiable que aquel que ha sido estimado con información de varios sondajes a su alrededor (interpolación vs. extrapolación). Así, se definen criterios como densidad de sondajes o número de muestras combinado con el número de sondajes de donde provienen éstas, para definir las categorías.

Los criterios geométricos pueden utilizarse para definir lo que se considera razonablemente estimado, por ejemplo, para limitar la extensión de los recursos inferidos. Una práctica habitual es definir una distancia máxima de extrapolación, la cual, en cualquier caso, debería también considerar el grado de continuidad espacial de las leyes.

Criterios Geoestadísticos:

Uno de los inconvenientes de los criterios puramente geométricos, es que no consideran las características de continuidad espacial de las leyes. Por ejemplo, muchas mineralizaciones presentan anisotropías, es decir, las concentraciones del elemento de interés son más continuas en una dirección que en otras. De hecho, es habitual ver que la variabilidad en la dirección vertical es diferente a lo que ocurre en el plano horizontal, debido a los procesos de sedimentación y compactación que ocurren por la gravedad. Así, la caracterización de la continuidad espacial por medio de alguna herramienta estructural geoestadística como el variograma, el correlograma o la covarianza espacial, permite una cuantificación repetible de la ley.

Ahora bien, no basta sólo con definir direcciones y alcances (radios de influencia) basados en el variograma para utilizar un criterio geométrico de clasificación. Es necesario también considerar la abundancia y redundancia de la información a la hora de estimar. La estimación de la ley de un bloque será tanto mejor, cuanto más informativos sean los datos disponibles. Se puede tener una situación en que se dispone de la misma cantidad de muestras para estimar la ley de un bloque, pero éstas poseen configuraciones geométricas diferentes. A aquel bloque que sea estimado con datos menos redundantes entre sí, debe asignársele una mayor confiabilidad.

La clasificación de recursos y reservas debe tomar en cuenta la incertidumbre proveniente de cada uno de estos factores. Por ejemplo, la aplicación de

criterios puramente geológicos corre el riesgo de no considerar las fluctuaciones en la ley, dentro de estructuras geológicamente muy bien definidas. Asimismo, si se utiliza sólo un criterio geométrico, no se estarán tomando en cuenta las anisotropías que la continuidad de ley podría presentar. La geoestadística entrega una serie de herramientas para cuantificar la incertidumbre, sin embargo, es necesario definir un criterio para utilizar esta incertidumbre en un esquema de clasificación.

5. Categorización de recursos y reservas

El procedimiento para categorizar recursos y reservas debe cumplir con ciertos estándares que aseguren una buena definición de las distintas categorías.

En primer lugar es necesario llevar a cabo un estudio exploratorio de datos que permita identificar y corroborar la interpretación geológica inicial. La continuidad en la geología y en las leyes debe verificarse utilizando toda la información disponible.

Al estudio exploratorio, lo sigue un análisis de la continuidad espacial de las leyes en cada unidad geológica definida en el paso anterior. Dependiendo de la aplicación que se considerará más adelante, puede ser necesario comprobar si existe un efecto proporcional en las leyes, es decir, una mayor variabilidad en las zonas de altas leyes (Emery, 2000). En caso de aplicar un método de simulación, una transformación de los datos será necesaria y el cálculo del variograma de esta nueva variable transformada. Este tipo de transformaciones a menudo logra modelar el efecto proporcional y facilita el cálculo e interpretación del variograma, pues reduce el efecto de valores anómalos altos en el cálculo del variograma experimental.

Finalmente, el problema de la estimación de leyes de bloques puede enfrentarse mediante herramientas de estimación propiamente tales, como el kriging con todas sus variantes, o a través de métodos de simulación, que permiten generar una serie de modelos numéricos del depósito, con la variabilidad adecuada. Para obtener los valores estimados a partir de estos modelos, es necesario realizar en cada modelo simulado, un cambio de soporte (rebloqueo) que permita calcular el valor simulado de la ley del bloque, y luego, se deben promediar las leyes de bloques de los distintos modelos para cada posición en el espacio.

Ambos métodos, estimación y simulación, entregan alguna medida del error de estimación. En el caso del kriging, se calcula la varianza de kriging para cada bloque, la que mide básicamente la dispersión del error cometido y puede ser utilizada para definir categorías. En el caso de las simulaciones, el problema de categorización puede enfrentarse de dos maneras. En primer lugar, se define la varianza local de las leyes de cada bloque, a partir del histograma de las leyes simuladas de este bloque. Esta varianza de simulación puede usarse tal como la varianza de estimación obtenida con kriging. Una segunda forma de utilizar las simulaciones, es calcular la varianza correspondiente a un periodo de

producción y categorizar en base al error en la ley promedio para dicho periodo.

Cada uno de estos procedimientos tiene ventajas y desventajas, tal como discutimos a continuación.

6. Estimación geoestadística

Las técnicas geoestadísticas de estimación, o kriging, permiten estimar la ley de bloque de manera óptima, en el sentido que se minimiza la varianza de estimación. La varianza mínima resultante se conoce como la varianza de kriging.

Un fenómeno que a menudo se encuentra en las distribuciones espaciales de variables con histogramas asimétricos es que la dispersión (variabilidad) depende de los valores locales de la variable. En minería, esto se conoce como efecto proporcional y corresponde a un aumento en la variabilidad local, medida a través de la varianza local de las leyes, con la media local de las mismas. Por lo tanto, se encuentra que las zonas con altas leyes presentan una variabilidad alta, mientras que las zonas de baja ley se comportan de manera menos variable.

El uso del kriging como técnica de estimación asume un variograma (y por lo tanto una varianza) de las leyes constante sobre dominios considerados geológicamente homogéneos. Esto no afecta la estimación misma, pero tiene un importante efecto en las varianzas de estimación que se calculan. Sin importar si el bloque se encuentra en una zona de alta o baja ley, sólo la configuración espacial de las muestras utilizadas en la estimación, no sus valores, influye en el valor de la varianza de kriging. Bloques en alta ley, que intuitivamente tienen un valor estimado más incierto dado el efecto proporcional, tendrán una varianza de kriging que no castiga este hecho.

Esto, tiene la ventaja de que en general, las leyes altas son las que más interesan y, aunque pueden ser más inciertas, son las que deben considerarse al inicio del proyecto en los planes de producción. Así, utilizar varianzas de kriging de corte, permitirá una categorización que no castiga las leyes altas por el efecto proporcional presente. En definitiva, este criterio tiende a aceptar un error de mayor amplitud en las altas leyes que en las zonas de bajas leyes.

Clasificar en base a varianzas de kriging de corte es una práctica bastante habitual. Se considera una configuración de la información que, a criterio del geólogo o ingeniero de minas a cargo, parece ser suficiente para entregar un valor estimado de la ley de bloque con una alta confiabilidad. Con esta configuración y con el variograma de la ley en la unidad geológica en estudio, se define la varianza de kriging que se usará como corte para distinguir, por ejemplo, entre recursos medidos e indicados. Típicamente, para yacimientos tipo pórfido cuprífero, se consideran esquemas como el siguiente:

- **Recurso medido** es todo aquel cuya varianza de kriging es menor que aquella de un bloque ubicado al centro de cuatro sondajes ubicados en una malla cuadrada de 60 por 60 metros.
- **Recurso indicado** es todo aquel cuya varianza de kriging es mayor que aquella de un bloque ubicado al centro de cuatro sondajes ubicados en una malla cuadrada de 60 por 60 metros, pero menor que aquella en el caso de una malla de 120 por 120 metros.
- **Recurso inferido** es todo aquel que haya sido estimado de manera razonable, pero con muy baja confiabilidad. Se asume que existe continuidad en la mineralización, pero ésta no se comprueba. Una definición típica de esta clasificación es definir como inferidos sólo aquellos bloques que se encuentren informados por un número mínimo de muestras y/o que se encuentren a una distancia mínima de un sondaje.

Las reservas pueden definirse de manera similar, pero considerando los factores de la explotación, tales como dilución, accesibilidad, ley de corte, etc.

Otra posibilidad consiste en normalizar la varianza de kriging por la ley estimada, es decir, definir una varianza relativa (varianza de kriging dividida por el cuadrado del valor estimado por kriging), la cual sirve para determinar las categorías de recursos o reservas. Sin embargo, tal criterio favorece los recursos de altas leyes, los cuales tienden a ser clasificados como medidos. Este efecto se ilustrará más adelante a través de un caso práctico.

Una forma alternativa de determinar las categorías es definir distintos planes de kriging. En primera instancia, se diseña un plan de kriging muy exigente, con radios de búsqueda pequeños y una gran cantidad de muestras necesarias para entregar un valor estimado. La estimación con este plan, generará una importante cantidad de bloques no estimados, por no satisfacer las demandas del plan. A continuación, se diseña un segundo plan de kriging, menos exigente que el anterior. El modelo de leyes de bloques estimadas, se actualiza sólo en aquellos bloques que no habían sido estimados con el primer plan. Aún con este segundo plan de kriging hay bloques que no han sido estimados. Se utiliza un tercer plan de kriging, menos exigente que permite generar valores estimados de menor calidad, pues no cuentan con suficientes muestras o se encuentran en sectores escasamente muestreados en los márgenes de la mineralización. Las categorías se definen entonces, en función del plan que permitió estimar la ley del bloque: recursos medidos si se trata del primer plan, indicados si se trata del segundo plan, e inferidos si se trata del tercer plan.

La principal desventaja de este método es que puede ser manipulado para generar recursos con escasa información. Además, la utilización de un plan muy exigente para definir los recursos medidos puede ir en desmedro de la calidad de la estimación de éstos. Incorporar muestras fuera del radio de búsqueda utilizado (es decir, usar un plan de kriging menos restrictivo) podría mejorar la estimación.

7. Simulación geoestadística

Los métodos de simulación geoestadística permiten cuantificar la incertidumbre en la ley de cada bloque por medio de la generación de múltiples modelos numéricos que imitan las características espaciales del depósito verdadero. Cada modelo tiene un histograma que fluctúa en torno al histograma representativo de la ley y reproduce la covarianza espacial (o variograma). Además, coincide con los valores de las muestras en sus ubicaciones, por lo que la simulación se denomina condicional.

A partir de estos modelos, se puede calcular la distribución de incertidumbre de la ley de cada bloque (histograma de sus valores simulados) y determinar una varianza local o condicional. Esta varianza, a diferencia del caso de las estimaciones, depende de la ley de las muestras cercanas y, por ende, considera el efecto proporcional. En general, leyes de bloque mayores vendrán acompañadas de mayor incertidumbre.

Otra ventaja de las simulaciones condicionales es que permiten “procesar” los modelos numéricos como si fueran el depósito real. Por ejemplo, se puede aplicar a los modelos simulados un diseño, plan y secuencia mineros y definir, en base a una ley de corte operacional, la producción mensual y su incertidumbre.

Una forma de considerar la varianza local generada a partir de modelos simulados es utilizarla en relación a la media local. Se define por tanto la varianza relativa, que se calcula dividiendo la varianza local, por el cuadrado del valor estimado (promedio de las leyes simuladas del bloque). De esta forma, no se penaliza la mayor variabilidad de los bloques de alta ley, que son los que mayor interés presentan (la división de la varianza local por el cuadrado de la ley estimada “compensa” el efecto proporcional).

La varianza relativa puede utilizarse de manera similar a la varianza de kriging, en el sentido de que se pueden definir valores de corte que separan lo que se clasifica como recursos medidos, indicados e inferidos, o en el caso de reservas mineras, separan las reservas probadas de las probables.

Recientemente, algunas compañías mineras han adquirido una forma diferente de clasificar, utilizando modelos simulados. La idea básica es relacionar la incertidumbre con determinados periodos de producción.

Por ejemplo, se definen:

- Reservas probadas, aquellas que presentan una variabilidad de $\pm 15\%$ con un 90% de confianza, respecto al valor estimado, sobre una producción trimestral.
- Reservas probables serán aquellas que fluctúen en $\pm 15\%$ alrededor de la ley estimada con un 90% de confianza, para una producción anual.

Esta definición está acorde a los requerimientos del código JORC, que exige la clasificación por medio de algún criterio estadístico.

8. Ejemplo

Se dispone de información de sondajes para generar un modelo de recursos en un yacimiento de cobre tipo pórfido cuprífero. En lo que se refiere a clasificar los recursos, se utilizan varios métodos, con el fin de demostrar las diferencias que éstos generan y poder sacar algunas conclusiones respecto a sus bondades y falencias. Considere los datos desplegados en la Figura 1, donde la escala de grises codifica las leyes de cobre de cada compósito.

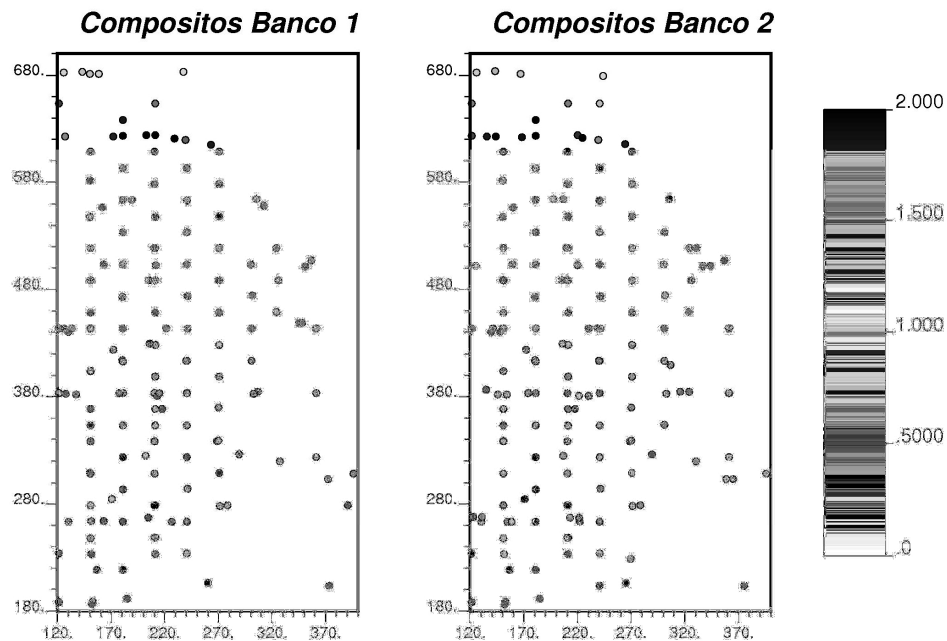


Figura 1: mapas de localización de los datos en los dos bancos en estudio.

Tras el estudio exploratorio de los datos y análisis variográfico de la ley, se genera un modelo de valores estimados mediante kriging ordinario. Se definen bloques de 20 x 20 x 12 m³. La altura de los bloques (12 m) corresponde a la altura de banco en la mina. El kriging ordinario entrega para cada bloque, un valor estimado y una varianza de kriging, tal como se muestra en la Figura 2.

Además de esto, se considera la opción de generar simulaciones condicionales. Para ello, se utiliza el método de simulación Gaussiana secuencial, el cual requiere que la variable (ley) sea inicialmente transformada a una distribución normal estándar. Luego, se realiza el análisis variográfico de esta nueva variable transformada y se genera cien modelos numéricos, cada uno de los cuales reproduce el histograma de los datos y su variograma y representa una posible distribución en el espacio de leyes puntuales.

Para el cálculo de recursos, se debe realizar un cambio de soporte, al tamaño de bloque deseado. Esto se realiza en cada uno de los 100 modelos generados. Con ello, se obtienen 100 modelos de distribución espacial de las leyes de bloques. Se puede entonces calcular el estimador (promedio) y varianza local a partir de las simulaciones de leyes de bloques, tal como se muestra en la Figura 3. Este resultado debe compararse con el de la Figura 2. En el caso de los mapas generados a través de simulación, la transformación Gaussiana controla el efecto proporcional existente, por lo que hay diferencias en los mapas, especialmente en la varianza local de las simulaciones respecto a la varianza de kriging.

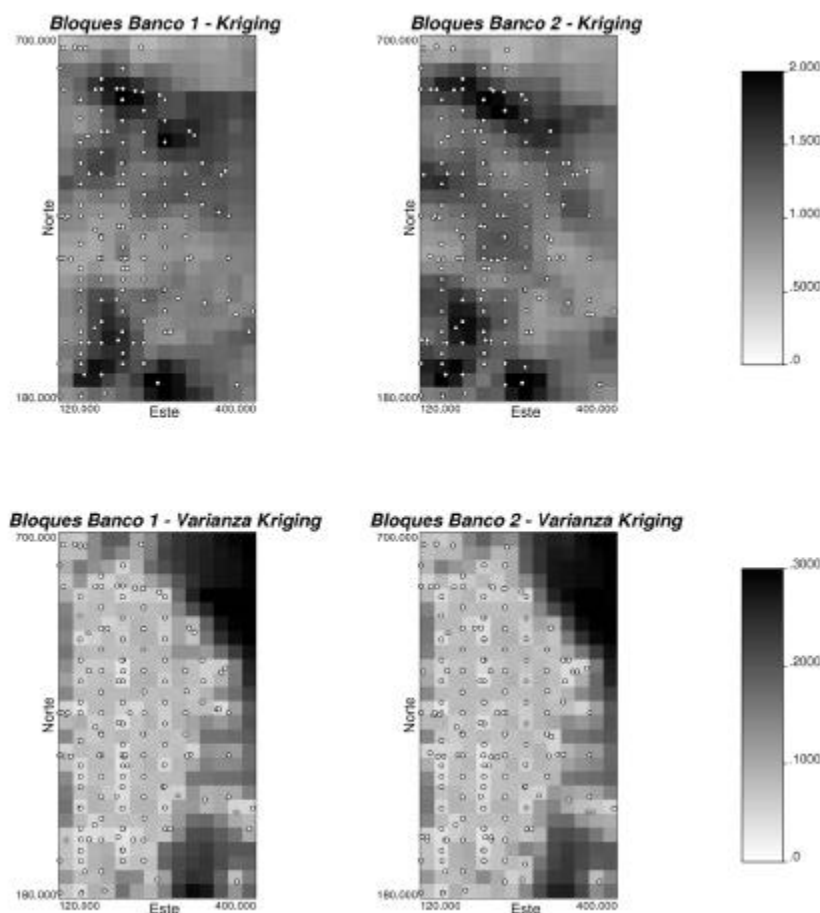


Figura 2: mapas de leyes de bloques estimadas y sus correspondientes varianzas de kriging para los dos bancos en estudio, mediante kriging ordinario.

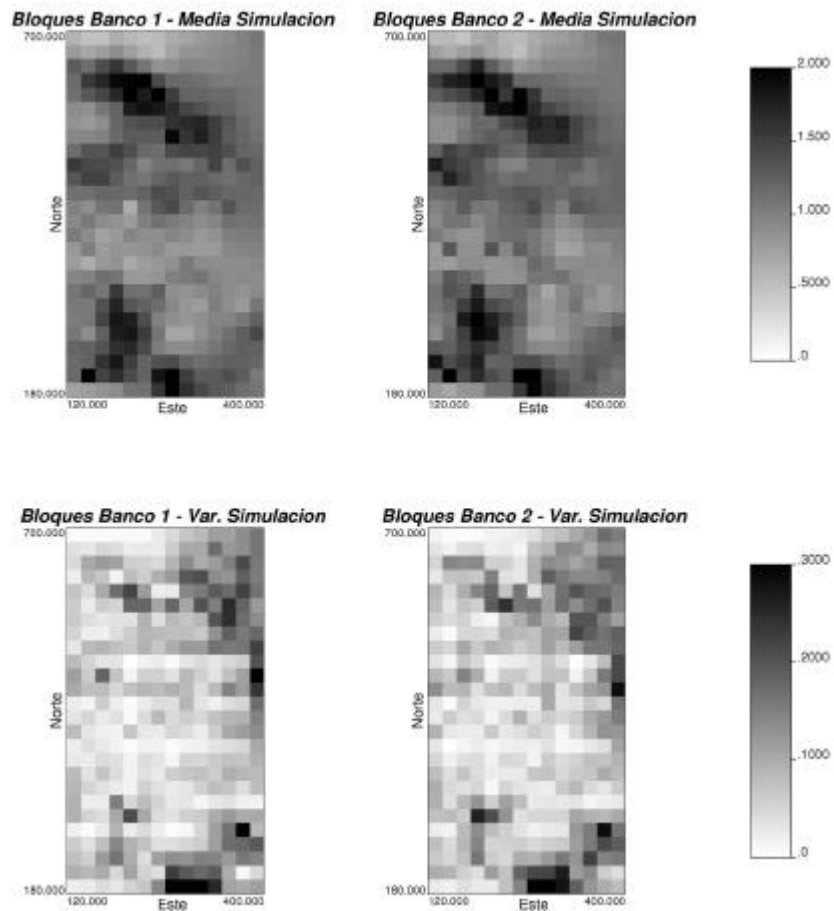


Figura 3: mapas de leyes de bloques estimadas y varianza local para los dos bancos de interés mediante simulación condicional.

En el presente ejemplo, compararemos la clasificación originada a partir de los mapas obtenidos por kriging ordinario y por simulación condicional. Aplicamos un criterio de varianza de corte definido por varianzas de corte escaladas a la varianza media de cada método:

- Recursos medidos: aquellos cuya varianza de estimación (de kriging o simulación) sea inferior o igual a 1.5 veces la varianza media del método.
- Recursos indicados: aquellos cuya varianza de estimación (de kriging o simulación) sea superior a 1.5 veces e inferior a 2 veces la varianza media del método.
- Recursos inferidos: aquellos que se encuentren a una distancia menor a 150 metros de una muestra y que no se han clasificado como medidos o indicados.

Estos criterios permiten obtener tonelajes relativamente similares, sin embargo, se obtienen notables diferencias particularmente en la ley media de los recursos en cada categoría, según el método aplicado, tal como se ilustra en la Tabla 1.

Tabla 1: comparación de resultados basados en cuatro métodos de clasificación.

Clasificación de Recursos	Varianza de kriging			Varianza de simulación		
	Miles Ton	Ton %	Ley %Cu	Miles Ton	Ton %	Ley %Cu
Medidos	7504	79.5	1.183	7374	78.2	1.106
Indicados	933	9.9	1.153	1050	11.1	1.263
Inferidos	998	10.6	1.100	1011	10.7	1.382

Clasificación de Recursos	Varianza relativa de kriging			Varianza relativa de simulación		
	Miles Ton	Ton %	Ley %Cu	Miles Ton	Ton %	Ley %Cu
Medidos	7555	80.1	1.211	7400	78.4	1.169
Indicados	842	8.9	0.961	933	9.9	1.097
Inferidos	1036	11.0	0.886	1101	11.7	1.090

Lo más notable de estos resultados es que el hecho de castigar las leyes altas debido al efecto proporcional, como es el caso de utilizar sólo la varianza local de simulación, produce que los mejores recursos (en ley) sean clasificados como los de peor confiabilidad, a pesar de que es allí donde generalmente el muestreo es más denso. La varianza local está estrechamente relacionada con la media local, lo que resulta preponderante y mitiga la mayor densidad de muestras del sector, haciendo que muchas reservas de alta ley sean clasificadas como indicadas o inferidas (por su mayor variabilidad local). Sin embargo, el hecho de escalar la varianza local, dividiéndola por el valor estimado del bloque al cuadrado, permite recobrar las buenas propiedades de la varianza de kriging ordinario (indiferente al efecto proporcional). Por el contrario, dividir la varianza de kriging por el cuadrado de la ley estimada tiende a privilegiar las zonas de altas leyes, las cuales tienden a ubicarse en la categoría de recursos medidos. A juicio de los autores, dicho procedimiento resulta en una categorización demasiado optimista y su uso debería evitarse.

Por otro lado, dado que la simulación condicional trabaja con una transformada de los datos originales, la variografía es mucho más robusta y, en general, los resultados son más confiables en ese sentido. Sin embargo, la simulación requiere una hipótesis mucho más fuerte de estacionaridad (u homogeneidad espacial) que el kriging ordinario. Esta es sin duda una desventaja de los métodos de simulación.

Como dato final, cabe mencionar que en el ejemplo recién presentado, la clasificación por varianza de kriging coincide en un 79% de los bloques con la

basada en varianza local de simulación. Esta coincidencia aumenta al 87% de los casos, cuando se utiliza una varianza local escalada por la media local. La categorización por varianza relativa de kriging coincide en el 80% de los bloques con la que resulta al utilizar la varianza de kriging.

9. Discusión

Los métodos de clasificación de recursos geológicos y reservas mineras tienen gran importancia a la hora de presentar el proyecto minero a instituciones financieras. La subjetividad de los métodos de clasificación ha sido históricamente un problema y tanto las mismas instituciones financieras, como las organizaciones profesionales han intentado acotar las metodologías utilizadas en la categorización.

La preparación del código JORC y su vasta aceptación en la mayoría de los países y especialmente por las empresas mineras más importantes del mundo, ha permitido que la definición y publicación de recursos y reservas requiera de una cuantificación del error. Las técnicas geoestadísticas de estimación y simulación, permiten obtener una medida del error de estimación, la que puede ser utilizada en la categorización. Sin embargo, el uso de uno u otro método no asegura consistencia de los resultados y se debe cuidar que la metodología no perjudique o favorezca el proyecto, clasificando, por ejemplo, todos los recursos de calidad como inferidos, o en el caso contrario, como medidos.

La varianza local de simulación, escalada por el cuadrado del valor estimado del bloque, permite generar una categorización parecida a la que se hace por medio de varianzas de kriging. Además, el hecho de poder generar múltiples modelos numéricos del depósito, permite procesar estos modelos para cuantificar, por ejemplo, la incertidumbre en la producción para determinados períodos de tiempo, lo que también puede utilizarse como base para definir una categorización.

Desafortunadamente, la diversidad en la geología y las configuraciones de muestreo en diferentes depósitos, hace muy difícil estandarizar la categorización de recursos geológicos y reservas mineras. Sin embargo, en opinión de los autores, es necesario investigar y analizar cuáles serían las consecuencias de rigidizar la categorización y cómo enfrentar la transición desde los métodos de categorización que las mineras aplican actualmente a un método más estándar.

10. Referencias

- CIM, 1996, Mineral Resource/Reserve Classification, Categories, Definitions and Guidelines, CIM Bulletin, V. 89, No. 1003, p. 39-44.
- CSA, 2001, National Instrument 43-101 – Standards of Disclosure for Mineral Projects, Canadian Securities Administration.

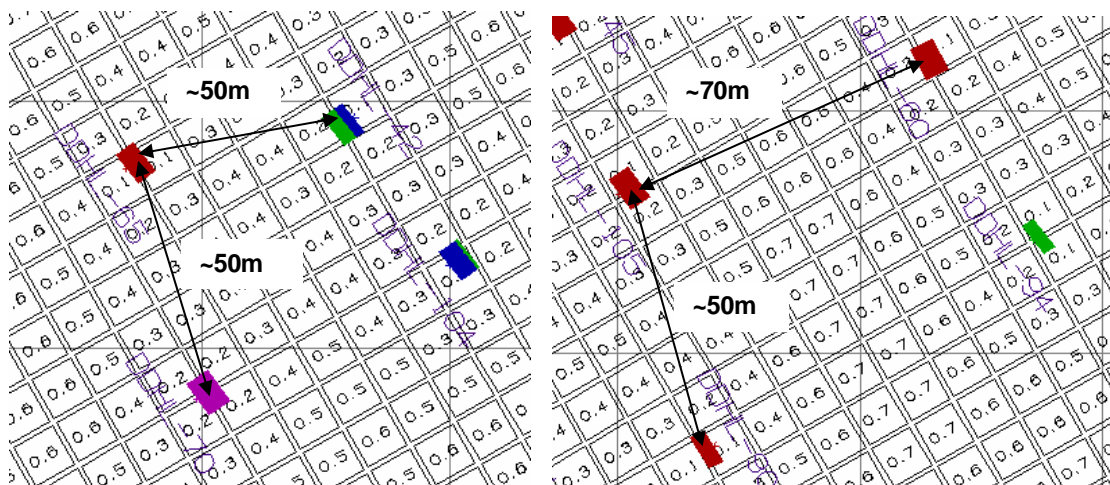
- JORC, 1999, Australasian code for reporting of mineral resources and ore reserves (the JORC code), Joint Ore Reserve Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia, 16 p.
- SAMREC, 2000, South African Code for Reporting of Mineral Resources and Mineral Reserves (The SAMREC Code), South African Mineral Resource Committee (SAMREC), Prepared under the auspices of the South African Institute of Mining and Metallurgy.
- USGS, 1980, Principles of a resource/reserve classification for minerals, United States Geological Survey, Circular 831, 5 p.

11. Criterio para categorizar los recursos del proyecto

Para el proyecto que desarrollamos, definiremos el siguiente criterio de categorización:

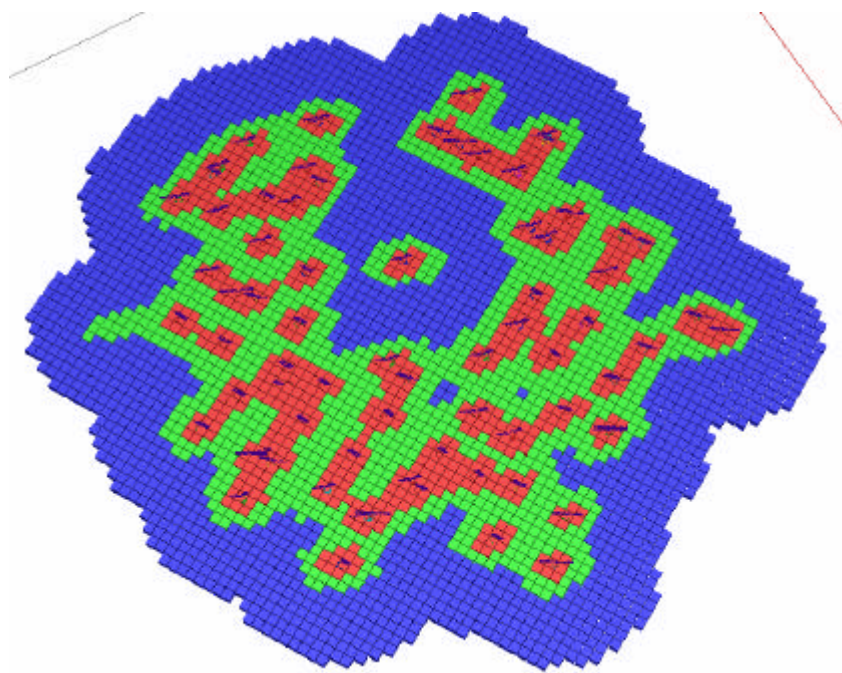
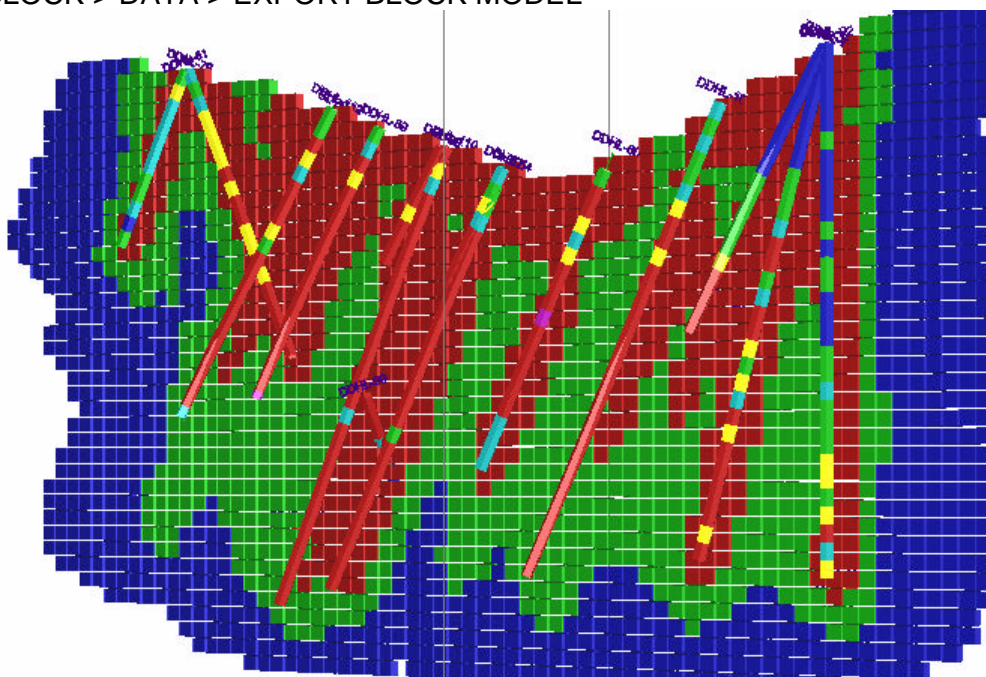
- Recursos medidos: aquellos cuya varianza de estimación sea menor o igual a la máxima encontrada en una malla casi regular de 50 x 50 m.
- Recursos indicados: aquellos cuya varianza de estimación sea mayor a la máxima encontrada en una malla casi regular de 50 x 50 m y menor o igual a la máxima encontrada en una malla casi regular de 70 x 50 m.
- Recursos inferidos: aquellos que no pertenezcan a ninguna de las categorías anteriores y que hayan sido estimados de manera razonable.

Para determinar las varianzas de corte, es necesario considerar algún sector del depósito donde la malla de sondajes sea aproximadamente la deseada para la categoría. Alternativamente, se puede desarrollar un cálculo teórico, utilizando el modelo variográfico de la unidad geológica correspondiente y definir cuál es la varianza de kriging máxima para dicha configuración.



En el ejemplo anterior, las varianzas de corte para mineral medido e indicado corresponden a 0.4 y 0.7 respectivamente. Una vez definidas estas varianzas de corte (y descartando todos los bloques no estimados), se puede crear un perfil de color y desplegar los bloques por categoría, como se muestra en las figuras siguientes. Finalmente, es necesario hacer estadísticas por categoría y totales. Para ello, se puede importar el modelo de bloques (leyes) a archivos de extracción a través de la opción:

BLOCK > DATA > EXPORT BLOCK MODEL



Proyecto de Evaluación de Yacimientos
Clase Nº 11
Inventarios de recursos
Elaboración de informe y presentación final

1. Objetivos de la Clase Nº 11

Los principales objetivos de esta clase son:

- Desarrollar el inventario de recursos del proyecto
- Discutir aspectos generales acerca de la elaboración del informe final y de la presentación final del proyecto.

2. Inventario de recursos

La conclusión del proyecto implica la preparación del inventario de recursos, esto es, el resumen de los tonelajes de mineral y ley media de los recursos medidos, indicados e inferidos, diferenciados por unidad geológica, además de los recursos totales.

Además es conveniente presentar los recursos demostrados (medidos + indicados) con su tonelaje y ley.

El inventario se completa con la elaboración de curvas tonelaje-ley.

3. Informe

El informe debe contener todo el trabajo realizado explicado y comentado de manera clara, con un formato uniforme y ordenado. Entregar informe anillado.

La estructura típica de un informe de este tipo es:

1. **Portada:** indicar nombre del proyecto, fecha e integrantes del grupo que lo realizó.
2. **Resumen ejecutivo:** en no más de dos páginas indicar los resultados más relevantes del estudio. En particular, se debe indicar las principales características geológicas del depósito, describir brevemente las poblaciones geológicas, datos disponibles, etapas del estudio e inventario de recursos categorizado y total. Además indique cualquier conclusión relevante que considere.
3. **Introducción:** indicar los antecedentes generales, objetivos y alcances del proyecto.
4. **Geología:** entregar una breve reseña de la geología donde se emplaza el depósito.
5. **Datos disponibles:** indicar el tipo de datos, cantidad, estadísticas básicas y comentar acerca de la calidad / cantidad / distribución espacial

de datos para el objetivo del proyecto. Muestre figuras, tablas y gráficos que respalden sus comentarios. Indique aquí el tratamiento estadístico que dará a los datos en las etapas siguientes, es decir, compare poblaciones y campañas y concluya qué poblaciones estadísticas utilizará de aquí en adelante. Debe justificar sus decisiones con argumentos válidos, respaldados por cualquier análisis que haya realizado (éstos pueden ir en apéndices, dejando sólo lo más relevante en el cuerpo del informe). Incluya la etapa de cálculo de compósitos junto con toda la información relevante para estos datos.

6. **Variografía:** comente acerca del espaciamiento medio de los datos en distintas direcciones, existencia de anisotropías, cantidad, distribución de los datos, para cada unidad geológica. Indique los parámetros de cálculo de variogramas, la robustez de los valores experimentales y cualquier comentario que considere relevante. Interprete sus variogramas experimentales e indique claramente los modelos variográficos tridimensionales utilizados.
7. **Definición del plan de kriging:** indique el plan de kriging a utilizar y las validaciones cruzadas realizadas. Comente acerca del valor de realizar validaciones cruzadas. Respalde su decisión con gráficos y tablas relevantes, relegando cualquier información adicional a apéndices. Comente acerca del tipo de límites que utilizó entre las distintas poblaciones geológicas y cuáles son las consecuencias de ello.
8. **Estimación de leyes de bloques:** resuma el resultado de la estimación de leyes a través de tablas e ilustre el modelo mediante plantas y secciones. Muestre los análisis realizados para validar dicho modelo. Comente cualquier hecho que considere relevante y discuta las consecuencias de algunos de los parámetros del plan de kriging. Comente acerca de sesgo global, sesgo condicional, interpolación y extrapolación de leyes. Respalde sus comentarios con los gráficos que considere oportunos.
9. **Categorización de recursos:** indique claramente el criterio que utilizará para categorizar los recursos apoyándose en figuras, gráficos o estadísticas que requiera. Ilustre el resultado de la categorización mediante plantas y secciones donde se codifiquen los bloques por categoría.
10. **Inventario de recursos:** resuma en tablas, gráficos o figuras los recursos totales, demostrados (indicados más medidos) y por cada categoría, del depósito. Construya una curva tonelaje-ley de los recursos demostrados del depósito.
11. **Conclusiones y recomendaciones:** indique cualquier conclusión relevante que considere necesaria, señale asimismo recomendaciones que propondría para mejorar el modelo estimado que posee, indique qué análisis adicionales podría haber hecho para mejorar la calidad de su trabajo (que, en virtud del tiempo y del escaso sueldo que usted recibió por hacer este trabajo no fueron realizadas).

Estas secciones son sólo referenciales y considérese libre de cambiar esta pauta, quitando o agregando lo que considere adecuado.

Cuide que la presentación del informe sea adecuada, que las figuras sean legibles, que las figuras, tablas, gráficos, secciones y anexos estén numerados. Revise la ortografía y redacción. Se espera una entrega profesional del informe.

4. Presentación

La presentación es esencialmente un resumen del informe, con énfasis en los gráficos y las conclusiones. Evite poner tablas con demasiados números, o largos párrafos con texto. La presentación no se hace copiando y pegando del informe, sino que debe ser una imagen fresca y fácil de seguir del mismo.

La presentación no deberá exceder los 20 minutos en su duración y deberá ser presentada por ambos integrantes del grupo en partes iguales.

Luego de la presentación se efectuarán preguntas de parte de los asistentes (5 a 10 minutos). Estas tendrán un carácter específico respecto a los análisis realizados para establecer ciertas conclusiones a lo largo del desarrollo del estudio. Cada pregunta podrá dirigirse a un integrante en particular, por lo que ambos deben tener cabal conocimiento del proyecto en su totalidad. Los análisis y resultados deben ser comprendidos por ambos integrantes en todas las etapas del proyecto. Se considera, por lo tanto, que ambos son responsables del proyecto.

Se dispondrá de computador y proyector para las presentaciones.