

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



M

*odelo de recursos del sector
CRIII-1 del yacimiento
ferroniquelífero Cantarana.*

Diplomante: Alfredo Yordanis Johnson Santiago

Tutores: Dr. Luis Arturo Rojas Purón.

Dr. Arístides Alejandro Legrá Lobaina.

Moa, Julio 2009

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a Dios, gracias a su gran misericordia, gracia y amor para conmigo, me haya permitido desarrollar mi intelecto con la sabiduría necesaria la cual Él me ha concedido. No me alcanzarían jamás las palabras de agradecimiento a Dios, ni a mi madre quien ha dado hasta la última gota de sudor para que yo llegue al hasta el escalón en el que me encuentro, por cuanto ella es merecedora de cualquier premio por haber cursado satisfactoriamente los estudios universitarios. Agradezco a mi hermanita, a Yanita, a mi padre, a tía Mercy y mi esposa, mujer, amiga y madre de hijita por la confianza que ha depositado en mí, quien me ha aportado una valiosa ayuda en el trayecto de mi Tesis.

Muchísimas gracias a todas mis amistades, por haber aportado por lo menos un granito de sí mismos para que de una forma u otra yo haya podido terminar este tema de investigación.

...para todos, infinitas gracias...

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado desde que comenzaron mis estudios universitarios a mi Madre, a mi hermanita, a Tía Mercy, a mi Padre, a mi esposa, a mi hijita y a toda la familia y amigos en general que de algún modo contribuyeron a que lograra mi objetivo a pesar de las dificultades que la vida me ostentaba.

PENSAMIENTO

La muerte es segura, lo inseguro es el momento...

W. Shakespeare.

*Goteara como la lluvia mi enseñanza destilara como el rocío mi razonamiento,
como la llovizna sobre la grama, como las gotas sobre la hierba.*

Dt. 32.2

ÍNDICE

Agradecimientos.....	2
Dedicatoria.....	3
Pensamiento.....	4
Índice.....	5
Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción.....	9
Capítulo I: Caracterización del Objeto de Estudio.....	12
1.1 Localización.....	12
1.1.1 Área del proyecto.....	12
1.2 Características físico-geográficas.....	14
1.2.1 Ubicación geográfica del área de estudio.....	14
1.2.2 Características geomorfológicas de la región.....	15
1.2.3 Rasgos medio-ambientales.....	16
1.3 Geología regional.....	16
1.3.1 Marco geológico regional.....	16
1.4 Geología del yacimiento.....	18
1.4.1 Corteza de meteorización.....	18
1.5 Historia de la concesión y trabajos previos.....	19
Capítulo II: La Geoestadística y su papel en la modelación de yacimientos minerales.....	21
2.1 Introducción.....	21
2.2.1 Principales elementos de la Geoestadística Operacional.....	22
2.2.1 Definición clásica de la estimación por kriging..	22
2.2.2 Elementos básicos en la practica del kriging.....	25
2.2.3 Simulación Geoestadística.....	30
2.2.4 Teoría de las variables regionalizadas (VR).....	33
2.3 Estimación por el Método de Inverso de la Distancia.....	34
2.3.1.Metodo Inverso de la Distancia.....	34
2.4 La Geoestadística como herramienta para la caracterización de un yacimiento.....	35
2.5 Modelación del yacimiento.....	36
2.6 Compilación de la información existente y creación de la base de datos.....	37
2.7 Análisis estadístico y estructural de la información disponible.....	38
2.8 El modelo geológico y partes que lo integran.....	39
2.8.1 El modelo geológico descriptivo.....	39
2.8.2 Modelo geométrico.....	40
2.8.3 Modelo matemático.....	40
Capítulo III: Análisis de los resultados.....	41
3.1 Introduccion.....	41
3.2 Modelación de la topografía.....	42
3.3 Estimación y simulación de los contenidos de los elementos	44
3.4 Modelo geológico.....	45
3.4.1 Método de las superficies.....	45
3.4.2 Método de los perfiles.....	46
3.5 Modelo matemático.....	50
3.5.1 Secuencia para la ejecución de la modelación matemática.....	50

3.5.2 Análisis Variográfico y parámetros de Estimación.....	51
3.5.2.1 Variogramas.....	52
3.5.2.2 Análisis de Anisotropía.....	55
3.5.2.3 Propuesta de bloques.....	55
3.5.2.4 Propuesta de parámetros de estimación.....	57
3.5.2.5 Validación cruzada.....	59
3.5.2 Modelo de bloque.....	63
3.5.3 Modelo de recursos.....	64
3.5.4 Modelo de capas.....	65
3.6 Cálculo de recursos.....	66
3.7 Cálculo de recursos por cut-off (0.1-0.6) → 1.5 %.....	67
3.8 Cálculo de recursos del acumulado.....	67
3.9 Cálculo por bancos de recursos.....	68
3.10 Curva Ley-Tonelaje.....	69
Conclusiones.....	70
Recomendaciones.....	71
Bibliografía.....	73
Anexos gráficos.....	78

RESUMEN

La siguiente investigación titulada **Modelo de recursos del sector III-1 del yacimiento ferroniquelífero Cantarana**. Dada a la no existencia del modelo de recursos del Sector III-1 del Yacimiento Cantarana del Municipio Moa, Provincia Holguín. Se alcanza dicho modelo de recursos a partir de los datos obtenidos en las redes de exploración cuadradas de lado igual a 100m, 50m y 33,33m de manera que se establezca el estado del arte sobre el objeto de estudio y los métodos geoestadístico para obtener un modelo de recursos; realizar el análisis geoestadístico de las variables seleccionadas y presentar el modelo de recursos del objeto de estudio mediante la aplicación GEMCOM. Como ha sido posible establecer mediante el software GEMCOM un modelo de recursos por bloques que contenga la distribución espacial de los elementos Ni, Fe y Co dados en porcentos. La obtención de los datos primarios mediante redes de exploración, pozos criollos, trincheras, etc. Estos datos son obtenidos mediante observaciones, mediciones y en muchas ocasiones se auxilian de técnicas de laboratorios y de cierto nivel de automatización y el procesamiento de los datos para obtener información de diferentes niveles. Este procesamiento se realiza mediante técnicas y procedimientos matemáticos, físicos, químicos, etc. Que se implementan de forma manual y automatizada. La información obtenida presupone saber algo nuevo sobre el objeto que se estudia. El procesamiento de la información disponible sobre el objeto de estudio de manera que al contrastarla con las teorías y experiencias disponibles, pueda establecerse el conocimiento sobre el campo de acción que nos interesa del objeto de estudio. En esta investigación los resultados a lograr es la confección del modelo de recursos que constituirá la base para desarrollar el modelo de reservas de dicho sector III-1.

ABSTRACT

The following research titled **Model of resources of the ferronickeliferous deposit Cantarana sector III-1**. Given to the non existence of the pattern of resources of the sector III-1 of Cantarana deposit of Moa Municipality, Holguín City. This model of resources is attained starting from the data obtained in the square exploration nets of side similar to 100m, 50m and 33,33m so that the art settles down on the study object and the geostatistic methods to obtain a model of resources; to carry out the geostatistic analysis of the selected variables and to present the pattern of resources of the study object by means of the application GEMCOM. As it has been possible to settle down by means of GEMCOM software a model of resources for blocks that contains the space distribution of the elements Nickel, Iron and Cobalt given by percents. The obtaining of the primary data by means of exploration nets, Creole wells, trenches, etc. These data are obtained by means of observations, mensurations and in many occasions they are aided of technical of laboratories and of certain automation level and the prosecution of the data to obtain information of different levels. This prosecution is carried out by means of technical and mathematical, physical, chemical procedures, etc. That are implemented in a manual and automated way. The obtained information presupposes to know something new envelope the object that is studied. The prosecution of the available information on the study object so that when contrasting it with the theories and available experiences, the knowledge can settle down on the action field that interests us of the study object. In this research the results to achieve are the making of the pattern of resources that will constitute the base to develop the pattern of reservations of this sector III-1.

INTRODUCCIÓN

Situación problemática

El proceso de evaluación de los yacimientos lateríticos de níquel contempla tres momentos importantes:

1. Obtención de los datos primarios mediante redes de exploración, pozos criollos, trincheras, etc. Estos datos son obtenidos mediante observación, mediciones y en muchas ocasiones se auxilian de técnicas de laboratorios y de cierto nivel de automatización.
2. Procesamiento de los datos para obtener información de diferentes niveles. Este procesamiento se realiza mediante técnicas y procedimientos matemáticos, físicos, químicos, etc. Que se implementan de forma manual y automatizada. La información obtenida presupone saber algo nuevo sobre el objeto que se estudia.
3. Procesamiento de la información disponible sobre el objeto de estudio de manera que al contrastarla con las teorías y experiencias disponibles, pueda establecerse el conocimiento sobre el campo de acción que nos interesa del objeto de estudio. En esta tesis el conocimiento que se busca es el modelo de recursos que constituirá la base para desarrollar el modelo de reservas de dicho sector III.

Los métodos específicos para procesar los datos y llegar a obtener el modelo de recursos han evolucionado notablemente en los últimos 40 años pasando de los métodos geométricos más simples, a los métodos estadísticos y luego a los geoestadísticos. La aplicación de los modelos geoestadísticos en las grandes minas explotadas a cielo abierto fue encabezado por un gran número de geólogos, mineros y matemáticos, quienes crearon las herramientas y los conceptos mineros de planificación modernos. La nueva modelación matemática es en esencia la caracterización del comportamiento de las variables regionalizadas (VR) y otras variables en el espacio, por lo tanto en función de ellas, determinar por diferentes vías su valor en un soporte (bloque) de tamaño determinado y definido en un campo geométrico previamente establecido, por lo que se resume dentro de los resultados la realización del *modelo de recurso* que caracteriza el tipo de recurso. Su ejecución depende del modelo de la ley del mineral y de un gran número de parámetros técnicos y económicos (los parámetros económicos no forman parte de los objetivos a determinar en este trabajo).

De hecho, si se conocen los resultados del cálculo de recursos estimados para cada bloque a partir del análisis de los diferentes variogramas con la determinación del cut-off óptimo, se puede establecer un modelo patrón de mayor precisión en los parámetros utilizados que pueda ser extrapolado a todo el yacimiento y a los yacimientos ubicados contiguamente con características similares.

Este tipo de modelación enfoca todo lo relacionado con el desarrollo de un proyecto minero de forma integral, el cual es una concepción nueva que a su alcance va desde el reconocimiento geológico hasta el cierre de la mina, y su máximo desarrollo se alcanza durante la exploración detallada y la explotación del yacimiento. El modelo de bloques es una representación física, en

términos de bases de datos que caracterizan una serie de bloques o celdas cuboidales orientadas en los ejes X, Y, Z del sistema cartesiano.

Obtener este tipo de modelos es una tarea laboriosa y conlleva cálculos complejos. Por estas razones se hace necesario utilizar softwares especializados tales como el DATAMINE, VULCAN, GEMCOM, VULCAN, SURPAC, etc. En particular el GEMCOM ha sido utilizado con éxito durante cierto tiempo por entidades relacionadas con la minería del níquel en Cuba tales como la Oficina Nacional de Recursos Minerales y la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara; teniendo en cuenta, además, la variabilidad que presenta el objeto del presente estudio, es que se ha escogido como herramienta informática de la investigación a este software.

Queda entonces planteada la necesidad y los medios de realizar el estudio necesario para caracterizar los recursos de cualquier yacimiento laterítico. En particular reviste importancia obtener este resultado para el Sector III del yacimiento Cantarana debido a que el mismo será puesto en explotación próximamente por la Empresa Pedro Soto Alba.

Problema

No existe el modelo de recursos del Sector III del Yacimiento Cantarana del Municipio Moa, Provincia Holguín

Objeto de estudio

Sector III del Yacimiento Cantarana del Municipio Moa, Provincia Holguín

Objetivo

Obtener el modelo de recursos del Sector III del Yacimiento Cantarana del Municipio Moa, Provincia Holguín

Campo de Acción

Modelo de recursos del Sector III del Yacimiento Cantarana del Municipio Moa, Provincia Holguín

Hipótesis de Trabajo

A partir de los datos obtenidos en las redes de exploración cuadradas de lado igual a 100m, 50m y 33,33m es posible establecer mediante el software GEMCOM un modelo de recursos por bloques que contenga la distribución espacial de los elementos Ni, Fe y Co dados en porcentajes.

Objetivos Específicos

1. Establecer el estado del arte sobre el objeto de estudio y los métodos geoestadísticos para obtener un modelo de recursos.
2. Realizar el análisis geostatísticos de las variables seleccionadas.
3. Presentar el modelo de recursos del objeto de estudio mediante la aplicación GEMCOM

Tareas de la investigación

1. Revisar y sistematizar la información geográfica y geológica correspondiente al objeto de estudio.
2. Organizar las bases de datos correspondientes a las redes de exploración cuadradas de lados igual a 100m, 50m y 33,33m realizadas sobre el objeto de estudio.
3. Sistematizar el conocimiento existente sobre el análisis variográfico y la estimación por kriging.
4. Estudiar y adquirir habilidades en el uso del software GEMCOM.
5. A partir de los datos disponibles, desarrollar el modelo de recursos para el objeto de estudio mediante el software GEMCOM.

Impacto de la Investigación

Los resultados obtenidos impactarán de manera positiva en la explotación del Sector III del yacimiento Cantarana debido a que permitirá una explotación de la mayor cantidad de los recursos en menor tiempo, con un menor daño al medio ambiente y mayor proyección a la restauración del mismo.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL YACIMIENTO.

1.1 LOCALIZACIÓN

1.1.1 Área del proyecto

La región comprendida en la que se realizan los trabajos se muestra en la siguiente tabla la cual se encuentra localizada entre los vértices de coordenadas nacionales siguientes a escala 1: 50 000:

Vértices	Coordenadas X	Coordenadas Y
1	711363	216046
2	712743	216046
3	712743	213563
4	712451	213563
5	712541	212414
6	710765	212414
7	710765	212965
8	710243	212965
9	710243	214636
10	709768	214636
11	709768	215785
12	711363	215785

Independientemente de los trabajos de prospección geológica realizados en exploraciones pretéritas, los materiales cartográficos y valores de coordenadas utilizados pertenecen a los trabajos topográficos realizados por la Empresa Geocuba Oriente Sur, es decir, todos los trabajos relacionados con el replanteo y amare de las labores de exploración tuvieron como puntos de partida los monumentos establecidos en el año 2008 por esta empresa de referencia.

Los trabajos se desarrollaron en un área total de 871.06 (8.71km ²) *gráfico No.1.1*. La base planimétrica y altimétrica de este proyecto está compuesta por los puntos certificados en el año 2008, el orden de precisión de los trabajos de acuerdo a las instrucciones técnicas vigentes para el desarrollo del levantamiento topográfico a 1^{ra} y 2^{da} Clase (1:1000), definido a las escalas

1: 2000, 1: 1000 y 1: 500. Área del Yacimiento: Cantarrana; sistema de Coordenadas: Cuba Sur; tipo de Proyección: Cónica Conforme de Lambert; Sistema de Alturas: Siboney. A continuación se relacionan por Orden de precisión y/o Categoría:

Tabla No. 1.1 Volumen de los trabajos realizados por Sectores

Métodos	UM	Cantidad
Pozos Replanteados	Pozo	422
Pozos Tumbados		128
Pozos Amarrados		294
• Sector CR I		20
• Sector CR II		47
• Sector CR III		177
• Sector CR IV		30
• Sector CR V		20

Ubicación Geográfica evaluada del área



El área total se encuentra situada al Sureste del poblado de Moa en plena zona rural, a una distancia aproximada de 18 Km, el acceso a la zona es complejo se realiza a través de caminos abiertos por topadores frontales.

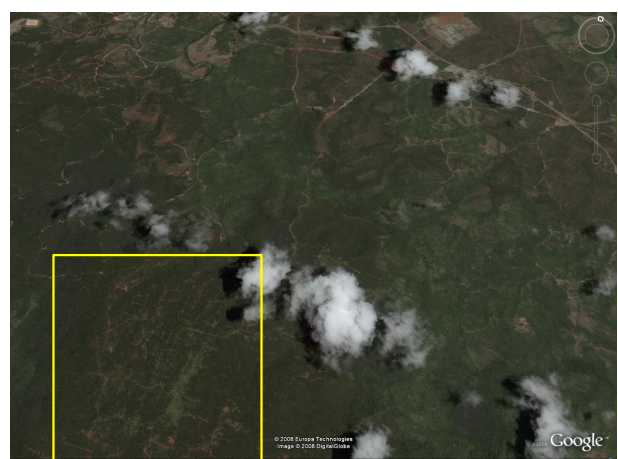
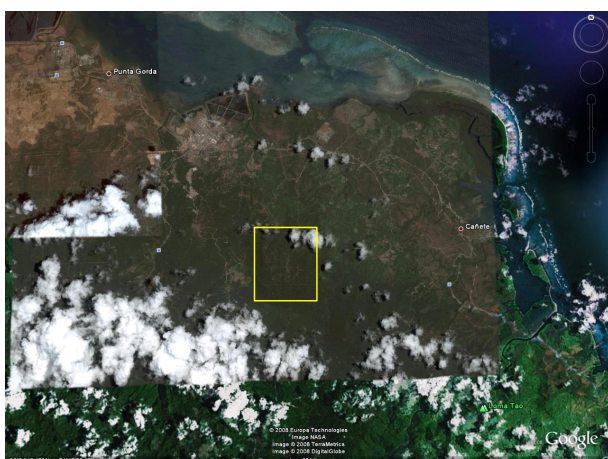
En este yacimiento, debido a la existencia de una red de apoyo previamente establecida no fueron planificados otros procesos que no estuvieran relacionados con los trabajos de replanteo y amarre de las labores de exploración, es por ello que en este informe nos referimos únicamente a estos procesos.

Por otra parte, es significativo destacar que durante todo el desarrollo del trabajo realizado en el terreno, se utilizaron las Estaciones Totales perteneciente a la familia Sokkia, que en este caso estuvieron representadas por 4 de ellas, todas del SET 3110 (1), 610k (2) y 610 (1), las cuales fueron verificadas y comprobadas en el Órgano Meteorológico No. 57, perteneciente a la Empresa Geocuba Oriente Norte (Certificada por la Norma ISO 9001-2002).

Grafico No. 1.1. Foto satelital de la ubicación geográfica del yacimiento Cantarrana.



Grafico No. 1.1.a Foto satelital de la ubicación geográfica del yacimiento Cantarrana.



1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS

1.2.1 Ubicación geográfica del área de estudio.

Geográficamente la región de estudio, que abarca un área de 143 Km², se encuentra enmarcada en el municipio de Moa provincia de Holguín, la cual limita al norte con el Océano Atlántico, al sur con el municipio de Yateras, al este con Baracoa y al oeste con los municipios de Sagua de Tánamo y Frank País, ubicándose según el sistema de Lambert entre las coordenadas:

X: 705 000-717 000.

Y: 207 000-217 000.

Se caracteriza por ser un área extremadamente compleja para el desarrollo de los trabajos topográficos debido a la abruptos del relieve, la vegetación y la transitabilidad. Los trabajos se han desarrollado en un rango de alturas comprendido entre los 70 – 600m en presencia de un relieve muy accidentado.

La concesión Cantarana está situada al este del río Quesigua y al oeste del río Yamanigüey limitada al norte por la falla El Medio y al sur por los cuerpos de gabro esta se ubica en las coordenadas:

X: 710699.99 ; 710699.99 ; 712151.77 ; 712151.77.

Y: 212802.67 ; 214616.6 ; 212799.33 ; 214616.6.

El clima de la región es tropical. Distinguiéndose en el año dos períodos de lluvia (Mayo-Junio) y (Octubre-Enero) y dos períodos de seca (Febrero-Abril) y (Junio-Septiembre). La cantidad de precipitaciones oscila dentro amplios límites y como promedio es de 1800-3000 mm/año. La temperatura media anual es de 25 °C siendo en verano de 30-32 °C y en invierno de 17-26 °C.

El área de estudio está cubierta de bosques de pinos y espesos arbustos entre los cuales se han desarrollado plantas espinosas, palmas enanas, cactus y helechos, que constituyen una vegetación típica de un país tropical.

En la región se ha desarrollado la industria minera y el procesamiento de las menas níquelíferas trayendo consigo que sea una de las zonas más industrializadas del país, debido a que cuenta con plantas procesadoras de níquel como: La Comandante Ernesto Che Guevara y La Comandante Pedro Soto Alba.

Además existen otras industrias y empresas relacionadas con la actividad minero metalúrgica tales como: La Empresa Mecánica del Níquel, Las Camariocas, La Empresa Constructora y Reparadora de la Industria del Níquel (ECRIN), el centro de investigación del Níquel (CEINIQ) y el Centro de Proyecto del Níquel (CEPRONIQUEL).

La ciudad de Moa dispone de excelente comunicación por carretera y terraplenes, con un aeropuerto para aviones de mediano porte y un puerto marino para buques de carga. Ella cuenta con una fuerte infraestructura de talleres de mecánica, servicios de alimentación, educación, salud médica, también se encuentran otros organismos de los cuales depende la economía de la región como son: Empresa Geólogo-Minera, el Combinado Lácteo, etc. En la región se explotan también los recursos forestales, lo que constituye un eslabón importante en la economía.

1.2.2 Características geomorfológicas de la región.

Genéticamente el relieve de Moa está clasificado de tipo Horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionadas.

Teniendo en cuenta los valores morfométricos, características litológicas y el nivel hipsométrico las zonas de montañas se dividieron en cuatro subtipos:

- Premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas.
- Submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas.
- Montañas bajas diseccionadas.
- Montañas bajas aplanadas.

En el área objeto de estudio de la presente investigación predomina el relieve de montañas bajas aplanadas que sobre las rocas ofiolíticas se ha desarrollado; haciendo posible la formación y conservación de las cortezas ferroniquelíferas.

Conjuntamente con estas zonas, aparecen en la región un conjunto de formas menores, que constituyen elementos importantes en la caracterización geomorfológica regional, como son las formas cársicas y barrancos.

En el relieve del área se observan elementos geomorfológicos desplazados o limitados por estructuras tectónicas activas, antiguas o recientes. Ello determina la importancia de los estudios tectónicos en la caracterización de los yacimientos niquelíferos.

1.2.3 Rasgos medio ambientales.

Para la realización de los trabajos se tuvieron en cuenta los problemas medio ambientales sin considerar los conflictos y afectaciones que han provocado los modelos de desarrollo seguidos hasta el presente, que se han basado en el saqueo de los recursos naturales, la concentración del poder económico, la desigualdad social y la inequidad en la distribución de las riquezas.

El ecosistema es una porción del medio natural espacialmente limitada, donde se relacionan entre sí y con el exterior los elementos vivos y no vivos que la integran, y que están conectados a través de flujos de energía y de los ciclos bioquímicos. El bosque es un ejemplo de ecosistema, pues se compone de aire, suelo, agua, nutrientes, y especies particulares de animales, microorganismos, árboles, y otras plantas, interrelacionados entre sí, donde cada elemento tiene un papel único, y de sus funciones depende la existencia y funcionamiento de los demás. Cualquier interferencia de uno afecta a los otros, y esto llega incluso a desencadenar efectos combinados que pueden atentar contra la existencia misma de todo el sistema en su conjunto.

Es por lo que se tomaron las medidas necesarias para erradicar los trastornos medio ambientales provocados debido a la extracción del mineral.

1.3 GEOLOGIA REGIONAL

1.3.1 Marco geológico regional.

En el macizo Moa-Baracoa afloran las secuencias rocosas pertenecientes al cinturón plegado cubano y las rocas del "neoa autóctono" (Iturralde-Vinent, 1996a, 1998; Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a, 2000).

El cinturón plegado está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorfizados de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades geológicas que lo integran grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental (Iturralde-Vinent, 1996a, 1998).

En la región de estudio (Ver gráfico 1.2) están bien representadas las unidades oceánicas, constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de piggy - back del Campaniense Tardío-Daniense (1ra generación), el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de piggy-back del Eoceno Medio-Oligoceno (2^{da} generación).

El complejo ultramáfico desde el punto de vista petrológico se caracteriza por un predominio de harzburgitas, y en menor grado dunitas; también se han descrito dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lherzolitas, y piroxenitas (Ríos y Cobiella, 1984; Fonseca y otros, 1985, 1992, Torres, 1987; Andó y otros, 1989; García y Fonseca, 1994; Proenza y otros, 1999a, 1999b). Los cumulos de gabros forman grandes cuerpos con dimensiones entre 1 y 3 Km de ancho, por 10 a 15 Km de longitud. El contacto entre los gabros y el complejo ultramáfico generalmente es tectónico. Los principales tipos petrológicos descritos son: gabros olivínicos, gabronorita, gabros, anortositas y noritas (Ríos y Cobiella, 1984; Fonseca y otros, 1985; Torres, 1987; Proenza, 1997; Proenza y otros, 1999a, 1999b; Rodríguez, R. 2000). En el área de estudio el más común es el gabro bandeado o modalmente transicional, cuyas bandas tienen una foliación concordante con el complejo de tectonitas. Las bandas son de color oscuro algo verdoso con textura masiva o fluidal. Los gabros isotrópicos al parecer no se desarrollan o están muy mal representados. En la región de estudio los gabros afloran siempre asociados a las serpentinitas, apareciendo en forma de bloques en las zonas de Quesigua-Cayo Guam-Mercedita, Centeno-Miraflores y Farallones-Caimanes.

El neoa autóctono (cobertura neógeno- cuaternaria) está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado. Estos sedimentos se pueden observar fácilmente hacia la zona costera representados fundamentalmente por la formación Jaimanitas.

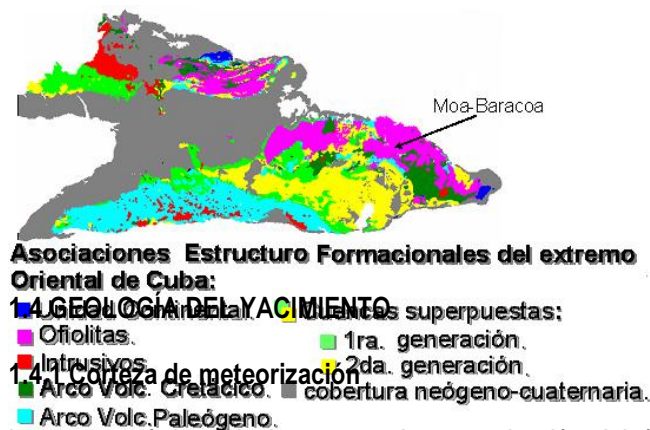
La corteza de intemperismo constituye un cuerpo geológico zonal formado sobre un substrato de rocas consolidadas (basamento o rocas madres) bajo la acción de los factores de meteorización, en los que juegan un papel decisivo el tipo o variedad de roca madre, la pendiente del terreno, las particularidades microclimáticas y el régimen hidrodinámico de la localidad.

Según la composición zonal, se establecen ocho tipos de perfiles litológicos de intemperismo: a) lateríticos inestructurales o estructurales, respectivamente con uno o dos litotipos inestructurales hematito-goethíticos gibbsíticos, o con éstos de igual forma y un litotipo estructural limonítico gibbsítico; b) laterítico-saprolítico estructural completo (con dos litotipos inestructurales

hematito-goethíticos gibbsíticos, un litotipo estructural limonítico gibbsítico y un litotipo estructural serpentínico-arcilloso limonítico), siendo incompletos si le faltara una o dos de las tres zonas lateríticas; c) saprolíticos que constituyen perfiles litológicos estructurales sin laterita, pudiendo ser completos o incompletos (si le faltara alguna de esas zonas saprolíticas).

La presencia, difusión areal y espesor de los tipos litológicos de perfiles de intemperismo se controlan por la variación de la pendiente del terreno, el microclima, fisuración tectónica y el quimismo y mineralogía de las rocas madres ultramáficas.

Grafico No. 1.2 Marco Geológico Regional



Las características de la corteza de meteorización del área del yacimiento Cantarrana se presentan en forma de manto superficial con predominio de los perfiles litológicos lateríticos estructurales y laterítico-saprolíticos, relacionados principalmente con la parte mineralizada para Ni y Co de rocas ultramáficas meteorizadas. Los perfiles saprolíticos tienen una difusión limitada en este yacimiento, y se asocian a las peridotitas plagioclásicas y mafitas meteorizadas, siendo prácticamente estériles, ya que no acumulan Ni y Co en forma significativa.

Dentro de los límites de los cuerpos minerales los perfiles presentan un carácter más heterogéneo con frecuentes transiciones entre los perfiles lateríticos y laterítico-saprolíticos. En estos casos, la corteza se ha desarrollado por rocas ultramáficas que son las productoras de minerales portadores de Ni+Co, por lo que estas localidades son las que encierran una importancia industrial. No obstante se debe tener en cuenta durante la extracción mineral en los cuerpos de las áreas localizadas en la parte Norte periférica del yacimiento (cuerpos minerales CRI y CR-V) y en la parte Central (cuerpo CRIII), por la existencia de sectores con contenidos significativos de aluminio (> 10 % Al, promedio 14.3 %) al parecer una corteza desarrollada a partir de un basamento constituido por rocas peridotíticas con plagioclasas, diques máficos o gabroides.

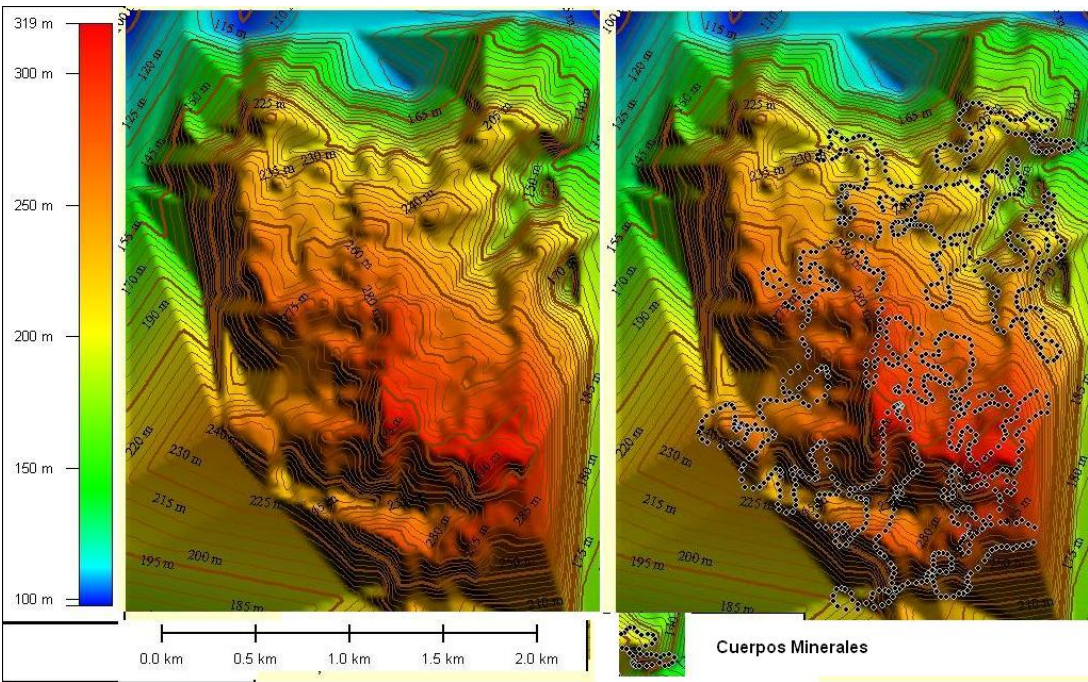
La posición de los cuerpos minerales en la geomorfología del área del yacimiento se muestra en el gráfico No.1.1 conjuntamente con el modelo digital del terreno, donde se puede ver que la mineralización útil industrialmente se asocia principalmente a una planicie (meseta) y aisladamente a los parteaguas, independientemente de sus altimetrías.

El espesor promedio de la corteza en general es 7.84m, fluctuando entre 0.5m y 27m con una variabilidad de 57.18 %; dentro del contorno de los cuerpos minerales, el espesor de la corteza es $\geq$ a 10.1m, fluctuando entre 1 y 32m con un coeficiente de variación de 56.62 %.

El grado de difusión areal y de la mineralización (LB de balance) de los tipos principales de perfiles litológicos son los siguientes:

Perfil Litológico	Difusión (%)	Coefficiente de Mineralización (%)
1. Lateríticos inestructurales	8.25	23.21
2. Lateríticos estructurales	51.03	43.06
3. Laterítico-Saprolíticos	39.18	50.98
4. Saprolíticos	1.03	1.96

Gráfico No. 1.3 Modelo Digital del Terreno del yacimiento Cantarrana con ubicación de los cuerpos minerales



Por consiguiente, en el yacimiento Cantarrana el mayor peso en el potencial menífero lo llevan principalmente los perfiles lateríticos estructurales, siendo estos además los más difundidos y en menor grado los perfiles lateríticos saprolíticos. Los perfiles lateríticos inestructurales y saprolíticos (sin laterita) presentan el 21.5 % de los pozos no balanceados y/o no-minerales, pero su difusión es subordinada (aproximadamente 13 % del área del yacimiento). El coeficiente global areal de mineralización

de la corteza de meteorización del yacimiento Cantarrana es de 55.71 %, el cual es bajo debido a la amplia propagación de corteza por peridotitos plagioclasicas y mafitas que ocupan una importante área (40 % del total), localizadas principalmente la parte norte, central y sur de la concesión.

La génesis de la corteza de meteorización es esencialmente eluvial (in situ), lo que se demuestra por la presencia de los elementos estructurales propios de las ofiolitas en forma meteorizada (diques, etc.).

1.5 HISTORIA DE LA CONCESION Y TRABAJOS PREVIOS

Los trabajos iniciales en el yacimiento fueron realizados en el año 1962 por especialistas soviéticos bajo dirección de A. Adamovich y otros, los cuales realizaron el levantamiento geológico 1:50 000 cuya finalidad fue confeccionar la base geológica para todos los trabajos que se realizaran en la región.

En el yacimiento los trabajos de prospección fueron realizados en 1965-1966, mediante la perforación con barrena espiral de la parte friable sin profundizar en las rocas duras. La densidad de laboreos en el área se correspondía aproximadamente a la red 300x300. Como resultado de estos trabajos fue realizada la evaluación de reservas de menas de níquel en el yacimiento según la categoría C₂ (Ver tabla 1.3).

En el año 1985 Rodríguez, O (1). y otros realizaron Trabajos Geológicos de Búsqueda Detallada y Evaluativa en los Sectores La Delta, Cupey, Cantarana, Santa Teresita y Piloto, calculándose recursos en categoría C₁ y C₂ (Ver tabla 11.1). El método de cálculo de recursos utilizado fue el de las áreas de influencia el cual fue realizado manualmente.

En los años posteriores a 1985, la ONRM (2006 y 2007) realizó la evaluación, completamiento y validación de la Base de Datos del yacimiento, ejecutando el cálculo de recursos limoníticos por el software Corte.Exe según el Cut-Off de Ni => 1.0 %. El estimado histórico de los recursos limoníticos se presenta en la tabla 4.1.

Tabla No. 1.3. Estimado histórico de los Recursos Limoníticos Indicados (Ind.) e Inferidos (Inf.) del yacimiento Cantarrana (Ogarkov, 1965, Rodríguez, O. y otros 1983, ONRM -BNR 2006, ONRM 2007).

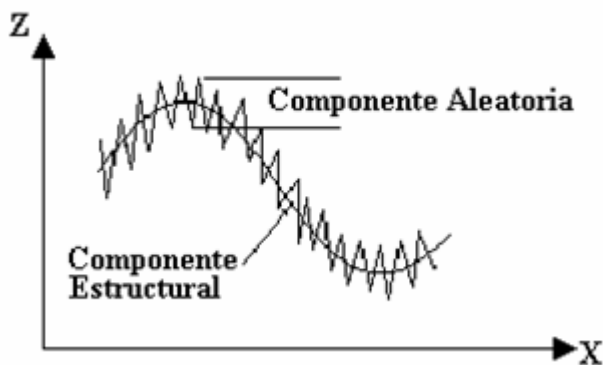
Año	Cut-Off Ni (%)	Categ.	Tipo de Mena	P. Mena Promedio (m)	Reservas de Menas (TM)	Contenidos promedios (%)		
						Fe	Ni	Co
1965	0.9	Ind.	LB	3.85	5584200	47.11	1.14	0.100
1985	0.9	Ind.	LB	4.17	5303643	46.67	1.20	0.156
2006	1.0	Ind.	LB	-	8469171	45.12	1.25	0.150
2006	1.0	Inf.	LB	-	95400	43.2	1.03	0.150
2007	1.0	Ind.	LB					
2007	1.0	Inf.	LB					

CAPÍTULO II. LA GEOSTADISTICA Y SU PAPEL EN LA MODELACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES.

2.1 Introducción

La Geoestadística se define como una aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, o simplemente, el estudio de las variables aleatorias distribuidas en el espacio y en el tiempo.

Muchos fenómenos naturales distribuidos en el espacio (por ejemplo, la mineralización en un yacimiento geológico), presentan un carácter mixto, un comportamiento caótico o aleatorio a escala local, pero a la vez estructural a gran escala:



Se puede sugerir la idea de interpretar este fenómeno en términos de Función Aleatoria (FA), es decir, a cada punto X del espacio E se le asocia la Variable Aleatoria $Z(X)$. Para dos puntos diferentes X e Y de E , se tendrán dos variables aleatorias $Z(X)$ y $Z(Y)$ diferentes pero no independientes, y es precisamente su grado de correlación el encargado de reflejar la continuidad de la mineralización, o de cualquier otro fenómeno en estudio. El éxito de esta técnica es la determinación de la función de correlación espacial de los datos $Z=Z(E)$.

El *Kriging* es un método de interpolación que tiene como objetivo encontrar la mejor estimación posible $Z^*(X)$ a partir de la información disponible. Este valor estimado de un valor real y desconocido $Z(X)$, se obtiene como una combinación lineal de pesos asociados a cada X_i donde fue muestreado un valor $Z(X_i)$ ($i = 1, \dots, n$). Para realizar esta estimación se deben cumplir dos condiciones;

- A. El estimador debe ser insesgado, o sea $E[Z^*(X) - Z(X)] = 0$.
- B. La varianza $\text{Var}[Z^*(X) - Z(X)]$ debe ser mínima, de este modo se logra minimizar la varianza de error de estimación.

A diferencia de otros métodos de interpolación, como por ejemplo el inverso de la distancia, el kriging utiliza las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, por lo que su uso implica un análisis previo de la información con el objetivo de definir o extraer de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial.

En ciertos puntos $\{P_1, \dots, P_n\}$ donde $P_i = (X_{i1}, \dots, X_{ik}) \in D \subseteq R^m$ se han medido los valores de una variable W y se han obtenido los valores aleatorio $W_i = W(P_i)$. Para poder estimar el valor de W_e en cierto punto P_0 debe realizarse primero lo que algunos autores llaman Análisis Variográfico que no es más que la búsqueda de una función que exprese la relación que hay entre la distancia entre los puntos de D y la variabilidad de W y luego, teniendo en cuenta las características particulares del problema que resolvemos, estableceremos el tipo de kriging que se utilizará y así como sus respectivos parámetros (forma y dimensiones de los paneles, estrategias de búsqueda, tratamiento de los pesos negativos, etc.) para obtener el valor estimado W_e y el valor de la varianza de estimación σ_e^2 que indica el error probable que se comete al estimar.

Comencemos explicando la definición clásica de la estimación por kriging cuando se supone estudiada la variabilidad que está expresada por el variograma $\gamma(h)$ o $g(h)$ que es una función de la distancia euclidiana h definida entre puntos del dominio D . La expresión analítica de este variograma usualmente se obtiene mediante el ajuste de uno o varios modelos teóricos a un variograma experimental y debe cumplir cierta restricción basada en la necesidad de que la varianza de cualquier estimación debe ser no negativa.

2.2.1 PRINCIPALES ELEMENTOS DE LA GEOESTADÍSTICA OPERACIONAL

2.2.1 Definición clásica de la estimación por kriging.

Siguiendo una exposición tradicional [David, 1977], la estimación por kriging parte del conocimiento de los valores de la variable W en un conjunto de n puntos P_i o sea se conocen los datos (P_i, W_i) con $i=1, 2, \dots, n$. Se supone estudiada la variabilidad del comportamiento de W en el dominio D donde se investiga y esta variabilidad la tenemos expresada por el variograma $\gamma(h)$ que es una función de la distancia euclidiana h definida entre puntos del dominio D . La expresión analítica de este variograma usualmente se obtiene mediante el ajuste de uno o varios modelos teóricos a un variograma experimental y debe cumplir cierta restricción basada en la necesidad de que la varianza de cualquier estimación debe ser no negativa.

La estimación por kriging del valor de W en un panel A se define como:

$$W_e = W(A) = \sum_{i=1}^k a_i W(P_i)$$

Donde debe anotarse que son considerados k puntos ($k \leq n$) para realizar esta estimación.

Se quieren encontrar valores adecuados de a_i (conocidos como pesos o ponderadores) tales que se cumplan dos condiciones:

$$1. \quad \sum_{i=1}^k a_i = 1$$

2. Se minimice la varianza de estimación:

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_{i=1}^k a_i \gamma(P_i, A) - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j \gamma(P_i, P_j) - \gamma(A, A).$$

Donde $\gamma(P_i, A)$ indica la variabilidad de cada punto P_i con respecto al panel A ; $\gamma(P_i, P_j)$ es la variabilidad entre los puntos P_i y P_j y finalmente $\gamma(A, A)$ es la variabilidad total del panel A . O sea que la varianza de estimación depende de la relación de las muestras con el panel A , de la relación entre las muestras y de la variación de calidad dentro del panel a estimar [Clark, 1977, página 88].

Aplicando el método de los Multiplicadores de Lagrange [David, 1977] se ha demostrado que estos valores a_i se determinan resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \gamma_{11}a_1 + \gamma_{12}a_2 + \dots + \gamma_{1k}a_k + \mu = \gamma_{1A} \\ \gamma_{21}a_1 + \gamma_{22}a_2 + \dots + \gamma_{2k}a_k + \mu = \gamma_{2A} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \gamma_{k1}a_1 + \gamma_{k2}a_2 + \dots + \gamma_{kk}a_k + \mu = \gamma_{kA} \\ a_1 + a_2 + \dots + a_k = 1 \end{cases}$$

Donde se ha simplificado la notación tomando $\gamma_{ij} = \gamma(P_i, P_j)$ y tomando $\gamma_{iA} = \gamma(P_i, A)$. El valor auxiliar μ es el Multiplicador de Lagrange.

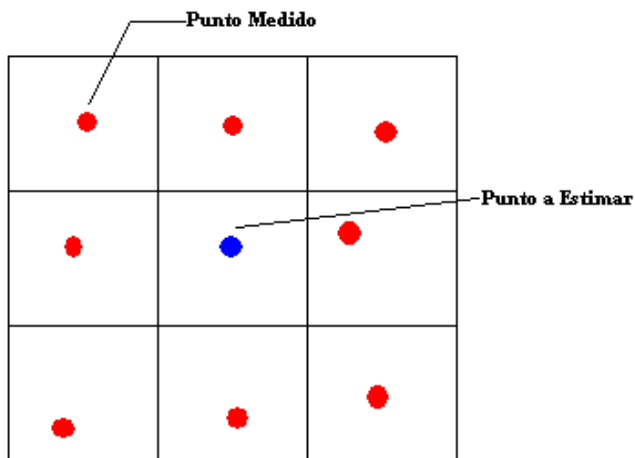
La varianza de estimación ahora queda determinada por la expresión:

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1}^k a_i \gamma(P_i, A) + \mu - \gamma(A, A)$$

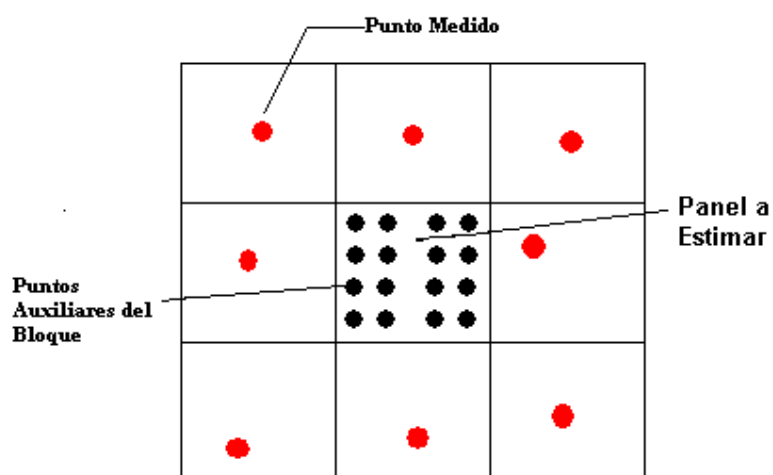
Manteniendo el mismo variograma para todo el dominio D y asumiendo constantes el tamaño y la forma del panel A , se tiene que para un conjunto dado de k puntos, la varianza de estimación solo depende de la posición geométrica de los puntos P_i ya que son las distancias entre cada dato usado y el panel los que determinan los valores de cada término $\gamma(P_i, A)$ y de cada peso a_i . O sea σ_e^2 no depende de los valores particulares $W(P_i)$, $i=1,2,\dots,k$.

De esta formulación puede derivarse el caso de la estimación puntual considerando idealmente el panel A con las dimensiones de un punto P_e . La expresión $\gamma(P_i, A)$ se reduce a $\gamma(P_i, P_e)$ y $\gamma(A, A) = 0$.

Gráficamente el **Kriging Puntual** tiene la siguiente interpretación:



La interpretación del Kriging de bloque es:



Existe una importante propiedad [David, 1977] de la estimación por kriging que resulta indispensable recordar:

Efecto Screen: A medida que la variabilidad de los valores de W tiende a ser independiente de la distancia entre los puntos, o sea el comportamiento de W tiende a ser completamente aleatorio, entonces los valores de a_i tienden a $\frac{1}{k}$ y μ tiende a $\frac{\sigma^2}{k}$ (σ^2 es la varianza de W en los datos).

2.2.2 Elementos básicos en la práctica del Kriging.

La práctica de la estimación por kriging tiene mucho de arte: Hay que conocer profundamente sus aspectos técnicos, es indispensable la práctica y además, es necesaria cierta dosis de inspiración. Todos los autores reconocen que lo primario es realizar un correcto análisis variográfico que consiste básicamente en determinar los siguientes elementos:

- Efecto pepita.
- Alcance.
- Meseta.
- Anisotropía.
- Zona de Influencia.
- Tipo de variograma.

Y teniendo en cuenta las características particulares del problema que resolvemos, establecer el tipo de kriging que se utilizará y así como sus respectivos parámetros (forma y dimensiones de los paneles, estrategias de búsqueda, tratamiento de los pesos negativos, etc.).

En la bibliografía enumerada al final de este trabajo (y en otras) han sido tratados profusamente las caracterizaciones y los procedimientos para determinar dichos elementos por lo que en esta exposición se concentra la atención en la influencia que tienen ellos y otros elementos, en el valor estimado W_e y en el valor de la varianza de estimación σ_e^2 .

Efecto Pepita: Desde el punto de vista numérico esta variable que generalmente se denota C_0 toma valores no negativos y en la medida que aumenta desde 0 hasta el valor de la varianza de los datos σ^2 , se tiene que:

- a. Los valores de los pesos a_i tienden al valor $\frac{1}{k}$.
- b. El valor estimado $\bar{W}_e$ tiende a la media aritmética de los datos $\bar{W}(P_i)$ con $i=1,2,\dots,k$.
- c. El valor de μ aumenta y tiende a $\frac{\sigma^2}{k}$.
- d. El valor de σ_e^2 aumenta hasta $\frac{\sigma^2}{k}$ cuando se trata de kriging de bloque y hasta $\sigma^2 + \frac{\sigma^2}{k}$ cuando se trata de kriging puntual.

Alcance: Para un variograma simple y transitivo, en la medida que el alcance aumenta desde 0 hasta el valor de la mayor distancia entre dos puntos pertenecientes a los datos, se produce un cambio importante en el modelo de la variabilidad expresado mediante el variograma. Se tiene que:

- a. Para variogramas no decrecientes, al aumentar el alcance entonces disminuye el valor puntual del variograma para cada una de las distancias menores que el nuevo alcance. En la práctica esto significa que el valor de σ_e^2 disminuye cuando aumenta el alcance.
- b. Las variaciones de $\bar{W}$ en general no están correlacionadas con los cambios del valor del alcance. Para valores relativamente altos del alcance con respecto a las distancias entre los puntos relacionados con una estimación, los cambios del alcance definen pocas variaciones en el valor de $\bar{W}$.

Cuando se trata de variogramas anidados entonces los cambios en el alcance de cualquiera de las estructuras que lo forman producen efectos análogos si se ha considerado una anisotropía global.

Meseta: En el caso de variogramas simples, permaneciendo invariables el resto de los elementos que analizamos, al aumentar el valor de la meseta:

- a. Permanece constante el valor estimado $\bar{W}$.
- b. Aumenta el valor de la varianza de estimación σ_e^2 .

Para variogramas anidados no permanece constante el valor de $\bar{W}$.

Anisotropía: La isotropía o anisotropía de un fenómeno se determina mediante el análisis de los variogramas direccionales. Algunos autores [Bleines, et. al., 2001, página 395] definen la anisotropía como la diferencia de la variabilidad de un fenómeno en las diferentes direcciones del espacio.

Un fenómeno se considera isotrópico cuando las características numéricas (efecto pepita, alcance, meseta, etc. y el tipo) de todos los variogramas direccionales son semejantes.

Hace tres décadas la Dra. Isobel Clark [Clark, 1977, página 112] planteaba que la anisotropía era el “problema” más sencillo de acometer. Esta idea ha evolucionado como consecuencia del desarrollo de la teoría Geoestadística y con la experiencia práctica de su aplicación. En mi opinión, la anisotropía es el aspecto más complicado de comprender y resolver en cada caso particular ya que su determinación visual (examinando los variogramas direccionales) o automatizado [Hart and Rudman, 1997] debe corresponderse con una realidad que generalmente es muy compleja.

Se comentarán dos tipos de anisotropía:

a. Geométrica: Para variogramas obtenidos en diferentes direcciones, sus alcances son diferentes y otras características coinciden. Si en una dirección el alcance $A_{\max}$ es máximo, entonces se debe considerar una extensión mayor de la zona de influencia en esa dirección; un dato situado en esa dirección a una distancia $A_{\max}$ deberá tener el mismo peso en la estimación que uno situado a la distancia $A_{\min}$ en la dirección de menor alcance $A_{\min}$. En estos casos el fenómeno anisotrópico es considerado durante la estimación como un fenómeno isotrópico corrigiendo las distancias entre los puntos mediante una expresión matemática lo cual en la práctica significa que el alcance de todos los variogramas direccionales será el mismo. Este asunto conlleva a una pregunta ¿Qué valor tomar como alcance general: $A_{\min}$, $A_{\max}$, otro?. La respuesta a esta pregunta es definitoria para el rango de los valores de σ_e^2 por tanto, el análisis de los mismos debe hacerse cuidadosamente ya que como se sabe aumentan si disminuye el alcance.

b. Zonal: Existen zonas del dominio tal que los variogramas direccionales que apuntan a esas zonas se diferencian marcadamente de los demás (por ejemplo, el caso de una mineralización estratiforme). La anisotropía zonal más distinguida por muchos autores es aquella donde se presentan diferentes mesetas y coinciden otras características. Estas anisotropías son modeladas mediante modelos anidados con anisotropías locales según cada estructura.

En la actualidad algunos autores se refieren a la Anisotropía Efecto Pepita [Deutsch and Journel, 1998, página 25] pero esto parece ser una condición impuesta por casos reales que se encuentran en muy pocas ocasiones. Más bien puede pensarse que este tipo de anisotropía se ha tomado a partir de la necesidad práctica del ajuste de variogramas anidados.

Otro fenómeno interesante relacionado con un comportamiento direccional de la variabilidad es el llamado Efecto Proporcional donde los variogramas presentan el mismo alcance y diferentes mesetas pero las mismas son una función de la media de W en cada dirección. El efecto proporcional puede ser directo (aumenta la meseta junto con las medias) o inverso y se determina

mediante un gráfico en el plano de las varianzas direccionales contra las medias direccionales. La solución básica de estos casos está ligada con la división de cada variograma por su respectiva media direccional [David, 1977, página 172].

Zona de Influencia y Geometría de los Puntos que se utilizan para estimar: Cuando se va estimar se procede a seleccionar los puntos que serán utilizados: pueden utilizarse todos los datos en cada estimación (lo cual significa un trabajo más laborioso) o seleccionar algunos datos cuya relación con el panel a estimar haga aconsejable su uso.

Se tienen varias estrategias de búsqueda de los puntos que se utilizarán en cada estimación. Entre las más conocidas [Deutsch and Journel, 1998] están:

- a. Para cada panel donde se estimará puede establecerse una zona de influencia con centro en el centro del panel. Generalmente la forma y tamaño de la zona de influencia se fijan para todas las estimaciones a partir de los resultados del estudio realizado considerando todos los datos, pero su posición cambia según el panel donde se estima W . Los datos que pertenecen a la frontera o al interior de la zona de influencia del panel a estimar son los que se utilizarán para realizar la estimación ya que son los que tienen influencia en la determinación del valor de W en el panel. Como zona de influencia se utiliza en muchas ocasiones una elipse en el plano y un elipsoide en el espacio.
- b. Fijar un valor $N_{\max}$ de puntos a usar. Se seleccionarán los puntos tomando los de menores distancias al panel donde se estima.
- c. Búsqueda por octantes: Se divide la vecindad del panel en zonas espaciales de intersección nula a las que llamaremos octantes. Se selecciona cierto número de puntos en cada una de estas zonas aunque en algunos octantes los puntos estén muy cercanos y en otros no.

Los algoritmos de Búsqueda son variados. Solo mencionaremos que en [Deutsch and Journel, 1998] se explican tres de ellas: Exhaustiva, Super Bloque y Espiral.

La geometría de los puntos seleccionados ejerce una importante influencia en la estimación por kriging. Consideremos cuatro aspectos:

- a. La varianza de estimación global σ_e^2 (conocida también como Error de Calidad y ligada a la extrapolación de información desde un punto de muestreo hasta un panel o un dominio) aumenta en la medida en que aumenta la irregularidad geométrica de la red. Tal como explica [García Guerra, 1988, páginas 98-99], el valor de σ_{e1}^2 en una red aleatoria pura es mayor que el valor de σ_{e2}^2 en una red aleatoria estratificada y este último valor σ_{e2}^2 es mayor que el valor σ_{e3}^2 para una red regular.
- b. Según [Diehl y David, 1982, página 5] se conoce que en general el valor de σ_e^2 decrece:

- i. Cuando aumente el número de datos alrededor del panel.
- ii. Cuando decrece la distancia media de los datos con respecto al centro del panel.
- iii. Cuando se incrementa la distancia media entre los datos que se usan (o sea cuando estos datos están regularmente distribuidos).

c. Cuando los datos tienen buena regularidad geométrica, varía poco el número k de puntos seleccionados para cada estimación por estar dentro de la zona de influencia correspondiente, pero si los datos están distribuidos irregularmente puede suceder que se produzcan grandes variaciones de k durante la estimación de los paneles. Esta situación puede ser contraproducente cuando se estiman paneles situados en una zona de grandes concentraciones de puntos (en este caso se presentarán sistemas de ecuaciones lineales SEL de un alto orden y aumenta la probabilidad de que se produzca el fenómeno de apantallamiento) y cuando se estiman paneles en zonas con pocas muestras (en este caso se estimarán valores de W a partir de unos pocos datos y en ocasiones con una posición geométrica desfavorable con respecto al panel). Se han estudiado varias soluciones matemáticas para este problema entre las que se pueden citar: la (en mi opinión, discutible) simulación de nuevos datos [Estévez y Cuador, 2003] para las zonas de escasos datos y la clusterización para las zonas de muestreos muy densos [David, 1977, páginas 162-163].

Otra solución práctica para el aspecto c. puede ser fijar el número de puntos que se usarán en las estimaciones y variar el tamaño de la zona de influencia aumentando o disminuyendo proporcionalmente sus dimensiones hasta que se tenga dentro de la zona aproximadamente el número deseado.

d. Apantallamiento: Este fenómeno se produce cuando se tienen dos o más datos cuyos puntos están alineados en una misma dirección con respecto al panel donde se estima. El método kriging, asigna pesos mayores a los puntos más cercanos al panel mientras que a los más alejados, "apantallados" por los más cercanos, se les asigna pesos menores donde en ocasiones pueden aparecer valores negativos.

Cuando se presenta la situación explicada en el aspecto d. y aparecen pesos a_i con valores negativos, puede considerarse la eliminación de los pesos negativos o su transformación en pesos no negativos. En [Kasuo Yamamoto, 2000] se explican el Método de Froidevaux (anula los pesos negativos), el Método de Journel y Rao y el Método de Deutsch (estos dos últimos estandarizan los pesos en el intervalo $[0,1]$). El Método de Deutsch asegura además el insesgamiento [Deutsch, 1996]. Otra forma de resolver el problema puede ser eliminar del conjunto de puntos que se usan en la estimación aquel que tenga menor peso negativo. Si es repetida esta operación hasta que todos los puntos tengan sus pesos no negativos, entonces se tiene un conjunto de puntos adecuados (me hubiera gustado probar que estos son los puntos necesarios y suficientes) para la estimación considerando la zona de influencia y el variograma definidos. Para ambos métodos se precisa de un tiempo de cálculo significativo pero admisible.

Mediante experimentos numéricos he encontrado que para aquellos variogramas que en todo su dominio de definición tienen signo no positivo en su segunda derivada respecto a h , se cumple que si es aumentado el número de puntos usados en estimaciones puntuales, entonces el valor de σ_e^2 disminuye. En estos casos debe buscarse una estrategia de cálculo que permita, sin aumentar demasiado el orden de los SEL, tomar un número de puntos suficientes.

Tipo de Variograma:

El modelo debe responder a la realidad y esto es lo más importante. La calificación de un modelo se basa en:

- a. El conocimiento que se tiene del fenómeno real.
- b. En la apreciación visual de la correspondencia entre el variograma experimental y el modelo que ajustamos.
- c. En criterios numéricos (tales como IGF, Indicative Goodness to Fit, propuesto por [Pannatier, 1994]), la validación cruzada [Deutsch y Journel, 1998; Bleines, et. al., 2001], ajustes mínimos cuadrados clásicos [Jian, et. al., 1996], programación lineal [Chen and Jiao, 2001], ajustes condicionados a pasar por ciertos puntos [Legrá, 1999]), por el método de los momentos [Pardo-Igúzquiza and Dowd, 2001], etc.

En la actualidad el tipo de variograma más general que se usa es el anidado con anisotropías globales y locales [Deutsch y Journel, 1998; Bleines, et. al., 2001]. Los mismos tienen la expresión matemática general:

$$\gamma(h) = C_0 + \sum_{k=1}^{NE} \gamma_k(h, Anisotropía_k)$$

Donde NE es el número de estructuras y se asume que para cada una de estas estructuras se define el tipo, los valores de sus parámetros numéricos y una Anisotropía Local que permite un tratamiento diferenciado de las distancias h en cada estructura. Este tipo de modelo es versátil y prácticamente cubre cualquier necesidad de modelos de variogramas, sin embargo obtener un modelo variográfico de este tipo es complejo y precisa de un software adecuado para su definición y uso.

Para un variograma anidado con anisotropías locales es bastante difícil predecir que cambios se producirán cuando las estructuras locales cambian pero para todo el modelo se cumple lo que ya hemos explicado: el valor de σ_e^2 varía junto con la variabilidad expresada en el variograma.

Características del Panel:

Siguiendo la exposición de [Diehl y David, 1982, página 5] se conoce que en general el valor de σ_e^2 (obtenido por kriging de bloque) decrece cuando las dimensiones del panel crecen.

La forma del panel y su orientación espacial influyen también en el valor de σ_e^2 pero de forma bastante compleja. Intuitivamente se puede asumir que es conveniente definir la forma y orientar espacialmente a los paneles teniendo en cuenta la anisotropía del fenómeno.

En conclusión puede reiterarse que el modelo de variograma que se ajuste al variograma experimental obtenido a partir de todos los datos, la anisotropía, la zona de influencia y las características del panel de estimación, tienen influencia decisiva en la estimación por kriging y en el valor de la varianza de estimación.

2.2.3 Simulación Geoestadística.

La simulación Geoestadística desde su creación por George Matheron, [Cuador Gil et.al., 2000] ha evolucionado para dar respuesta al problema de la búsqueda de posibles realizaciones de un proceso estocástico dentro del campo de la geología y de otras ciencias donde se aplica la Geoestadística.

En la idea están contenidos dos momentos importantes:

1. La simulación no condicional: Tiene como objetivo obtener valores simulados de una variable teniendo en cuenta la caracterización geoestadística de esa variable obtenida a partir de un conjunto de datos (muestra). Los datos simulados poseen similar continuidad espacial a la de los datos del muestreo.
2. La simulación condicional: Se ocupa de obtener valores simulados de una variable mediante el uso de nuevos datos obtenidos por simulación no condicional y estimación por kriging considerando la caracterización geoestadística de esa variable. Los datos simulados condicionalmente poseen la misma distribución estadística (histograma, media, varianza) y similar continuidad espacial que los datos originales. Además, los valores de la muestra y los valores simulados son iguales cuando ambos tienen la misma posición espacial.

La idea de la Simulación Condicional es matemáticamente sólida y puede ser expresada en su concepción más simple a partir de las ideas siguientes:

- a. Sea un conjunto de n datos $(x_i, Z(x_i))$ donde x_i es un punto del espacio (en general R^n). A estos datos se les ha caracterizado por su histograma, media, varianza, variograma, anisotropía y zona de influencia.
- b. Para una localización arbitraria x del espacio se estima por kriging el valor $Z_k(x)$. Definamos la diferencia $e = Z(x) - Z_k(x)$. Cuando la localización x no es uno de los puntos de la muestra se conoce el valor de estimado pero no se conoce el valor real $Z(x)$ y por tanto tampoco se conoce la diferencia e .

c. Sea la relación: $Z(x) = Z'(x) + e$. Por definición, el valor de e no tiene correlación estadística con ningún valor de los datos $\{Z(x_i)\}$ y tampoco está correlacionado con ninguna combinación lineal de estos datos (como por ejemplo la estimación por kriging) por lo que se puede concluir que la estimación y los residuos son dos funciones aleatorias independientes no necesariamente estacionarias [Bleines, C. et. al, 2001].

d. Si se considera que $Z(x)$ es una variable con distribución normal y se calcula la simulación no condicional $Z_s(x)$ de la misma función aleatoria definida sobre todo el dominio de interés y se calcula la estimación por kriging $Z_{sk}(x)$ a partir de los datos simulados $Z_s(x_i)$, se puede definir la simulación condicional como:

$$Z_{sc}(x) = Z_k(x) + [Z_s(x) - Z_{sk}(x)]$$

Para realizar la simulación condicional es imprescindible que la variable esté distribuida normalmente. Si esto no sucede entonces es forzoso transformar convenientemente los datos originales a una nueva variable con distribución normal, realizar la simulación en las nuevas variables y finalmente transformar de manera inversa el resultado para expresarlo en la variable original.

Las aplicaciones más conocidas de la Simulación Condicional son dos [Bleines, C. et. al, 2001]:

1. Estudio de las fluctuaciones o variabilidad de una variable. Lo más común es, tomar el promedio de un número finito de simulaciones en un conjunto de puntos y analizar la variabilidad zonal de la variable. Para una buena práctica de esta aplicación debe recordarse que ha sido demostrado que el promedio de un número muy grande de simulaciones en un punto converge al valor del kriging en el punto [Bleines, C. et. al, 2001, página 154].
2. Estudio de la probabilidad de que el valor de la variable que se estudia esté dentro de ciertos límites. En esta ocasión se simula un gran número n de veces el valor de la variable en un punto y se cuenta el número f de veces en que este valor está dentro de los límites que se analizan (frecuencia) y se establece la probabilidad de que la variable esté dentro de dichos límites como el cociente de f entre n .

Una posible aplicación que se muestra particularmente atractiva es la de considerar el valor simulado o un promedio de varios valores simulados en una localización que no pertenece al muestreo, como el valor real de la variable en ese punto. Veamos los siguientes razonamientos:

- a. Para que $Z_{sc}(x)$ pueda representar al valor real desconocido de Z en la localización x , es necesario y suficiente que $e = Z_s(x) - Z_{sk}(x)$ lo cual equivale a decir que $Z(x) - Z_k(x) = Z_s(x) - Z_{sk}(x)$.
- b. Recordemos que el conjunto de valores $\{Z(x_i)\}$ representa de manera ideal una de las infinitas realizaciones de un proceso estocástico $\{Z(x)\}$; puede suponerse la existencia de otra realización $\{Z_s(x_i)\}$ obtenida por otro "muestreo" independiente en las

mismas u otras localizaciones, que puede caracterizarse también por su histograma, media, varianza, variograma, anisotropía y zona de influencia y al realizar la estimación $Z_{SK}(x)$ en la localización x , se puede definir la diferencia $h = Z_S(x) - Z_{SK}(x)$.

c. Las técnicas de la Simulación No Condicional permiten obtener una realización $\{Z_S(x_i)\}$ a partir de los datos originales $(x_i, Z(x_i))$ tal que los nuevos datos $(x_i, Z_S(x_i))$ poseen similar continuidad espacial que los datos originales. Ahora pueden ser obtenidos también el valor $Z_S(x)$ mediante simulación no condicional y el valor $Z_{SK}(x)$ mediante kriging usando los datos $(x_i, Z_S(x_i))$.

La cuestión es: ¿Bajo que condiciones son iguales e y h en la localización x ?

Es evidente que bajo el pragmatismo que causa la necesidad, el valor de $Z_{SC}(x)$ obtenido por la Simulación Condicional pudiera ser considerado como “Real” en la localización x . Sin embargo recordemos, en primer lugar, que todo el proceso de Simulación Condicional se basa en la caracterización geoestadística de los datos $(x_i, Z(x_i))$ que pudieran no ser los más representativos para obtener la información necesaria sobre el comportamiento geoestadístico real de Z en toda la región donde se estudia sobre todo si este comportamiento presenta anomalías locales.

Además, el fenómeno de las Fluctuaciones Ergódicas [Deutsch and Journel, 1998] incide en la falta de unicidad en los resultados. En esto también influye el hecho de que los conocimientos, experiencia y opinión de cada grupo de investigadores en particular, definen en gran medida los resultados del ajuste del modelo teórico al variograma experimental, la definición de la zona de influencia y la determinación de la anisotropía.

Desde un punto de vista metodológico, es obvio que si tenemos suficientes razones para aceptar a $Z_{SC}(x)$ como el valor real de Z en la localización x , entonces no será necesario utilizar otros métodos, ya que el error con respecto al valor real, obtenido mediante la simulación condicional sería 0 en cualquier localización.

Desde la década de los 70 del siglo XX se manejó la idea de usar la simulación para comparar dos métodos y para incrementar la densidad del muestreo [David, 1977, página 324] pero al respecto este autor plantea:

“The criticism to this models is obvious. The simulation is not the reality. There is only one answers: The proof of the pudding is...! So far the few simulations made which it has been possible to check have a posteriori proves to be adequate”.

Una aseveración actual se establece en [Cuador Gil y Quintero Silverio, 2001, página 21] al plantear:

“La estimación tiene como objetivo proporcionar en cada localización a estimar un valor $Z^*(x)$ lo más próximo posible al valor real y desconocido $Z(x)$ del fenómeno estudiado. La estimación no reproduce la dispersión de los datos reales, más bien subestima en general esta dispersión (Journel, 1974). Por el contrario la simulación, o mejor la simulación condicional de la geoestadística, reproduce los dos primeros momentos experimentales (media y covarianza $C(h)$ o Semivariograma $\gamma(h)$) de los datos reales, así como el histograma, es decir, se reproducen las principales características de dispersión del fenómeno real de acuerdo a la

información disponible. Ahora, en cada localización, el valor simulado $Z_s(x)$ no es el mejor estimador de $Z(x)$ que es posible obtener”.

2.2.4 Teoría de las variables regionalizadas (VR)

La VR es aquella que caracteriza cualitativa y cuantitativamente un fenómeno en tiempo y/o espacio con estructura de auto-correlación, dicho de otra manera, es aquella cuyo valor en un punto dentro de un yacimiento es función de su magnitud y de su soporte (*volumen, forma y orientación*). De lo anteriormente planteado se deduce que las VR no son mas que aquellas variables, usualmente utilizadas en la vida práctica (Ni, Fe, Co, etc.) que se caracterizan por tener un carácter aleatorio y a su vez tener una estructura definida en una región determinada en el espacio, regida por sus propiedades y fenómenos geológicos que la controlan; esta estructura generalmente tiene un sentido geológico por lo que la convierte en una herramienta poderosa en la modelación de un yacimiento.

Como puede apreciarse claramente es importante la utilización de la VR para definir los diferentes campos geométricos donde estas se desarrollan en el espacio, esto es en esencia la determinación o mejoramiento del modelo geométrico. La VR permite a su vez determinar las características que tendrá el modelo matemático; es decir, el tamaño y forma de los bloques, la anisotropía de los datos, tiene gran influencia en la determinación de los valores de cada uno de los bloques del modelo matemático independientemente de su naturaleza, determinados estos por estimación y modelación.

Es importante destacar que para realizar esto es necesario tener muy en cuenta las otras partes del modelo geológico, pues la VR por sí sola no permite determinar las características de cualquiera de los sub-modelos de forma correcta, si no que la determinación de los componentes del modelo geológico se realiza de forma interactiva entre las VR y el resto de los sub-modelos (Geológico, geométrico y matemático).

Es importante resaltar la influencia de la geología en la forma y tamaño del bloque, las dimensiones en determinada dirección dependen de la variabilidad de los datos en el espacio, esto generalmente coincide con los ejes del elipsoide de la anisotropía y las dimensiones de los mismos. Los bloques son de forma regulares; a pesar de ser un yacimiento sedimentario sencillo con límites físicos bien definidos que constituyen el techo y el piso de estos bloques pero con una compleja red de distribución.

2.3 ESTIMACIÓN POR EL MÉTODO DE INVERSO DE LA DISTANCIA.

Es intuitivo suponer que la influencia potencial del valor de una muestra sobre un punto o bloque a estimar decrece cuando este se aleja de dicho punto. El atributo estimado cambiará como función inversa de la distancia. En otras palabras, se asigna mayor peso a los valores de las muestras más próximas y menor peso a las más alejadas del punto de estimación.

2.3.1. Metodo Inverso de la distancia

Este caso particular ($p=1$) fue posiblemente el primer método analítico para la interpolación de los valores de la variable de interés en puntos no muestreados. Esta técnica se ha convertido en una de las más populares por su sencillez. En principio se adopta la hipótesis de que importancia de un dato aislado responde a una función inversa de la distancia. El objetivo del método es asignar un valor a un punto o bloque mediante la combinación lineal de los valores de las muestras próximas. Este método se basa en una combinación lineal dada por: $Z'(x) = \sum \lambda_i Z(x_i)$

En la que λ_i son los pesos proporcionales al inverso de la distancia euclidiana entre las localizaciones muestreadas y la que se desea estimar, estos pesos son calculados por:

$$\lambda_i = (1/d_{oi}) / \sum 1/d_{oj}$$

Donde: d_{oi} es la distancia entre la localización a estimar y la localización de la muestra i .

Generalizando obtenemos:

$$Z'(x) = [\sum_{i=1,n} 1/d_{oi} Z(x_i)] / \sum_{i=1,n} 1/d_{oi}$$

Se pueden obtener distintos estimadores si escribimos la ecuación anterior como:

$$Z'(x) = [\sum_{i=1,n} (1/d_{oi})^\omega Z(x_i)] / \sum_{i=1,n} (1/d_{oi})^\omega$$

Cuando X coincide con uno de los puntos X_i entonces no se puede aplicar la fórmula anterior y se asume que $Z'(x) = Z(x_i)$.

Note que si $\omega = 1$ se obtiene la ecuación anterior.

Para aplicar el método es necesario en primer lugar escoger el valor del exponente del inverso de la distancia. Por la fórmula queda claro que en la medida que este aumenta disminuye la influencia de los valores de las muestras más alejadas, en esa misma medida aumenta la de las más próximas. Con el incremento de la potencia, la interpolación de las leyes entre 2 puntos pasa del principio de los cambios graduales ($(\omega=1)$) al principio de los vecinos más cercanos.

Se debe resaltar que difícilmente en la naturaleza la concentración de un elemento químico se subordine a la ley de la línea recta y mucho menos al principio de las zonas de influencia. Un exponente igual a dos produce una interpolación intermedia (solución de compromiso) entre ambos principios. Por esta razón, el método se conoce también como inverso de la distancia al cuadrado.

Para seleccionar el valor que se va a emplear se utilizó la validación cruzada. Como el exponente no es cero, el método del inverso de la distancia no se reduce a una media aritmética dentro de la vecindad de búsqueda o sea, a todas las muestras no se le asigna un mismo peso independientemente de la distancia que la separa del punto a estimar.

2.4 LA GEOESTADÍSTICA COMO HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN YACIMIENTO.

La geoestadística es una rama reciente que combina a las ciencias matemáticas con las geológicas que, a diferencia de la estadística convencional, sirve para cuantificar la incertidumbre y especificar la forma en que ésta varía en el espacio-tiempo. Uno de sus campos de aplicación es la caracterización de reservorios, que involucra un conjunto de métodos determinísticos y probabilísticos, cuyo objetivo es definir el modelo más probable de un reservorio, con sus formas de cuerpos, heterogeneidades petrofísicas, geometría estructural y caracterización paleoambiental.

El yacimiento posee pozos irregularmente distribuidos. Cuando la empresa Geominera Oriente tomó la decisión de llevar adelante la tarea de perforación, se necesitaba conocer qué porcentaje iba a tener de encontrar Ni, Fe y Co, lo cual implica minimizar las incertezas que se desprenden de la falta de homogeneidad del cuerpo. De esta forma, las posibilidades de hallar el recurso buscado aumentan o disminuyen según las condiciones oxidación, entre otros factores. Ahí es donde entra la geoestadística, por ser una herramienta que permite estimar en un punto qué valor aproximado se va a tener de una determinada propiedad, y qué incertidumbre asociada se tiene a esa estimación, que combinada con otras geociencias permite integrar la información de pozos a fin de determinar nuevas locaciones para una mayor explotación del yacimiento.

El método geoestadístico lineal es el que se ha empleado durante los trabajos de modelación geológicos del sector CRIII-1 del yacimiento Cantarana, el cual consiste en la determinación del volumen utilizados para los cálculos de recursos, además para trabajos posteriores permitirá ver el desarrollo de las diferentes litologías, tanto en la vertical como en la horizontal.

El Kriging es el término que se ha denominado para designar como mejor estimador lineal insesgado de un punto y al mejor promedio móvil lineal ponderado de un bloque. La confección y estimación de los variogramas, normalmente se aplica a la modelación de la función que refleja la correlación espacial de las variables. La continuidad espacial a investigar a partir de la confección de los variogramas experimentales y su ajuste a un modelo de variograma el cual se emplea para estimar, por lo que es necesario tener en cuenta el espaciamiento de los datos en cada dirección para definir la distancia entre pares de puntos (*lag*), por lo que se hace necesario la eliminación de valores anómalos. El cálculo de los recursos se realiza, cuantificando las unidades de selectividad minera, con posibilidades de ser explotadas.

2.5 MODELACIÓN DEI YACIMIENTO

Un modelo es una hipótesis de trabajo o simulación dentro de las ciencias de la tierra, por lo que en el sentido estricto se diseña un modelo basado en datos descriptivos, estadísticos y por métodos analógicos con un margen determinado de error. Existen varios esquemas para la realización de modelos, para el trabajo en estudio se tomó unos de los más representativos (modelo de bloque). El modelo aglutina el resto de las concepciones y formatos de modelos existentes, así como los procedimientos estandarizados para resolver esta tarea. El modelo es compatible a crear con los software de punta en el mundo del tipo sistema minero y optimización; entre los más populares están: DATAMINE, MICRO-LINX, GEMCOM, MICROMINE, SURPAC, VULCAN, WHITTLE. Se tiene la posibilidad de aplicar las técnicas y tecnologías de punta sin entrar en contradicción con la estructura del

modelo. Existe compatibilidad con técnicas de estimación reservas recuperables, así como una fácil implementación en cualquier proyecto minero, independientemente del estadio en que se encuentre. El modelo más utilizado es el aplicado a los softwares antes mencionados, por esto la estructura del modelo propuesto permite modelar el yacimiento de forma integral y eficiente.

Primeramente se define la correlación geológica de las capas o niveles productivos a través de un modelo tridimensional de carácter discreto en la medida en que permite disponer sólo de datos puntuales y parciales porque únicamente se modela la profundidad y el espesor del evento correlacionado. Para completar una descripción estática de reservas se calculan las propiedades limoníticas promedio de cada capa o nivel a partir de los datos de perfiles de pozo, y finalmente, a través del Kriging de los mapas de modelos generados.

Los datos disponibles sobre la concentración del Ni, Fe y Co, se obtuvieron en una campaña de exploración de pozos verticales utilizando tres redes cuadradas planas de $33 \cdot 33$ m; $50 \cdot 50$ m; $100 \cdot 100$ m. En los pozos se tomaron 3 621 muestras de mezclas del material a intervalos de 1 m. Para la proyección del modelo, de forma tal que se pudieran incluir los tres tipos de redes de exploración se creó una red de distribución plana de $16,66.5 \cdot 16,66.5$ m, la que condiciona una mejor aplicación del cálculo con basta efectividad del mismo.

Para alcanzar mayor precisión en la modelación es necesario utilizar soportes con determinados tamaños y formas, en dependencia de factores como: aspectos de índole geoestadístico tal como la malla de información experimental, el alcance del variograma, la anisotropía, entre otros; aspectos puramente geológicos. Estos son los más importantes pues determinan las características que influyen en el resto de los aspectos antes mencionados; entre los aspectos más relevantes se encuentra la morfología del yacimiento, su complejidad geológica, la descripción, referencias generales, ambiente geológico, etc. Para lograr resultados precisos se llevó a cabo la confección del modelo de bloques el cual se basa en una serie de celdas cuboidales, regulares en tres dimensiones acopladas en el espacio definido por un volumen determinado. Cada celda contiene una serie de atributos descriptivos del yacimiento, en el volumen ocupado por las mismas. El modelo depende de la información reflejada en forma de tabla o base de datos donde cada campo define las propiedades de cada celda y estas a su vez están definidas por cada record (*Se le llama record a la fila de una base de datos, generalmente cada fila representa los valores de cada bloque en el modelo, las variables están definidas por las columnas de la base de datos y se conocen como campo*). Es importante resaltar la influencia de la geología en la forma y tamaño del bloque, p. ej. las dimensiones en determinado ángulo α de dirección dependen de la variabilidad de los datos en el espacio, estos generalmente coinciden con los ejes del elipsoide de la anisotropía y las dimensiones de los mismos.

La ejecución del alcance total fue desarrollada por las nuevas herramientas mineras que aportó el Software Minero GEMCOM. Otros programas fueron utilizados para la entrada de datos como Microsoft Excel. A continuación se ilustra un diagrama del flujo de trabajo. Ver Figura N°. 1.

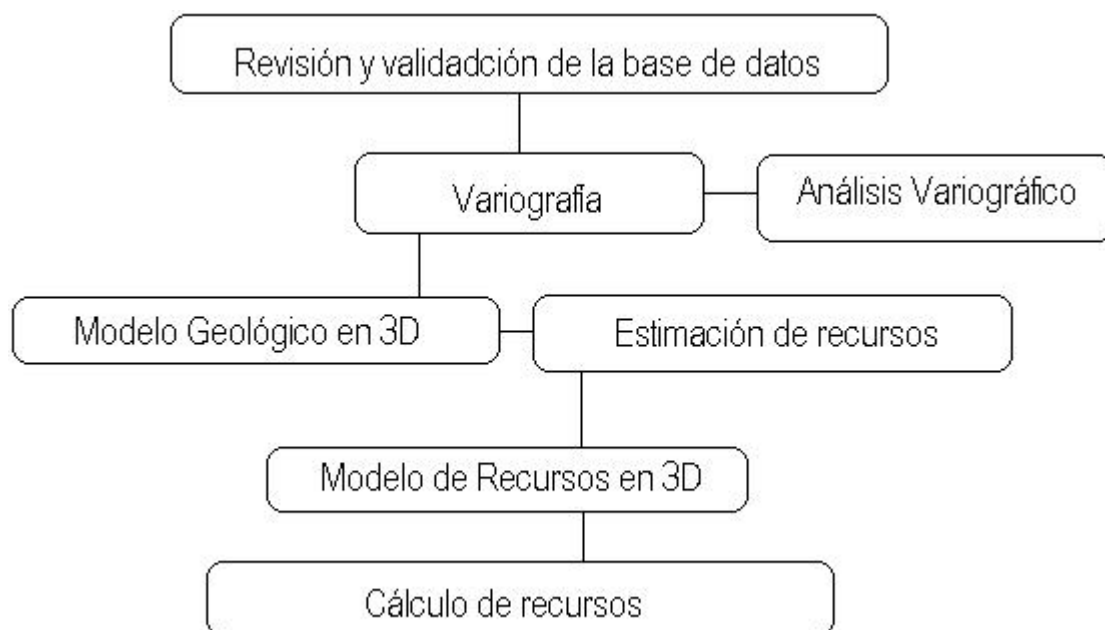


Figura N°. 1 Diagrama de flujo de trabajo

2.6 COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE Y CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS.

Fue recopilada, organizada y validada toda la información geológica y resultados de los análisis del muestreo realizado en diferentes etapas de las investigaciones anteriores correspondiendo a ella los siguientes volúmenes para la zona dentro de la Concesión:

- ✓ 304 pozos, un total de 1612.36 metros de perforación tomados a partir de la tabla Header.
- ✓ 3 621 muestreos para análisis químico completo: (Fe, Ni y Co).

Los resultados emitidos sobre los contenidos químicos de las muestras se corresponden a los estándares de control de la calidad para dichos elementos, según aparece en los informes aprobados por la Oficina Nacional de Recursos Minerales, además del complejo de métodos de apoyo empleados para esta interpretación y evaluación, lo que respalda adecuadamente el presente trabajo.

Para el presente trabajo, se procedió primero a realizar un levantamiento de la información disponible en los informes arriba referidos, que se encuentran en archivos, la cual fue posteriormente tecleada, validada y llevada a ficheros de formato ASCII, asimilables por GEMCOM, e importados a este software, quedando entonces estructurada la base de datos de la siguiente forma:

Tablas	Información que contienen
HEADER	Identificación del pozo, coordenadas de la boca de los pozos y su profundidad.

SURVEYS Contiene para cada pozo la siguiente información: Pozo, Desde, Hasta, Acimut y Ángulo de inclinación de cada intervalo.

ASSAY Esta tabla contiene un récord para cada una de las muestras a las que se les realizó análisis químico completo, por lo que cada récord tiene los siguientes campos: Pozo, desde, hasta, long., No. Muestra, Fe, Ni y Co.

LITHOLOGY Contiene las litologías presentes en cada uno de los pozos perforados.

Una tabla auxiliar, Compósito (muestras regularizadas a toda la potencia útil) fue generada y ofrece información dentro de la base de datos.

Para aquellos intervalos donde no se dispuso del análisis químico se emplearon los caracteres especiales NS que significa (No Sampled) y que son asimilados por el software empleado.

En las tablas N° 1, 2 y 3 se exponen la base de datos de referencia.

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ESTRUCTURAL DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Este análisis se realiza con el objetivo de establecer el carácter estadístico de la distribución de los principales parámetros geólogo-industriales y cuantificar su continuidad espacial.

El Análisis Exploratorio de los datos consiste en realizar un análisis estadístico de los datos disponibles o los generados a partir de los compósitos con el objetivo de caracterizar el comportamiento estadístico de las distintas variables en el depósito y en las unidades geológicas que lo integran.

El análisis estadístico comienza con el estudio de la distribución de frecuencia la cual indica como se distribuyen las muestras en intervalos regulares de los posibles valores. A partir de aquí la construcción de histogramas y gráficos de probabilidades, con lo cual se logra sacar conclusiones sobre el tipo de distribución que siguen los datos, la presencia de valores huracanados y la posible existencia de poblaciones complejas (bimodalidad o multimodalidad).

El Análisis Estructural o estudio variográfico según (Armstrong y Carignan 1997) esta compuesto por:

- ✓ El cálculo del semivariograma experimental.
- ✓ El ajuste a este de un modelo teórico conocido.

El calculo del semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado (Chica-Olmo 1987), es decir, tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra (Lamorey y Jacobsom 1995), (Issaks 1999), representando el útil más importante de que dispone el geoestadístico para el análisis del fenómeno mineralizado o de la variable de distribución espacial en estudio.

2.8 EL MODELO GEOLÓGICO Y PARTES QUE LO INTEGRAN

Es el más importante, pues define las características que tendrá el modelo del yacimiento; es decir, se hace referencia al modelo del yacimiento, se emplean los términos modelación geológica y modelo geológico del yacimiento. Regula el comportamiento, variabilidad y distribución de las variables regionalizadas en el espacio.

En este modelo se explica de forma sencilla, concreta y representativa las características geológicas del yacimiento. Se usa para tratar de reflejar dichas cualidades en modelos de bloques empleados posteriormente para la estimación, sobre todo, para garantizar mayor precisión a la hora de estimar los recursos minerales. La geología del yacimiento regula el conocimiento de un fenómeno geológico, es premisa previa para el empleo de cualquiera de las herramientas matemáticas.

Es obvio que fundamentalmente la modelación matemática, es el proceso que parte del análisis geológico, con el cual se realiza un modelo previo del yacimiento. El resto de los modelos y herramientas empleadas son simplemente una vía para alcanzar mayor precisión en los resultados.

El **modelo geológico** se ha confeccionado por tres partes fundamentales:

1. Modelo geológico descriptivo.
2. Modelo geométrico.
3. Modelo matemático o de bloques.

Estos están estrechamente relacionados, lo que indica que para obtener uno hay que tener en cuenta los otros. En su conjunto explican las particularidades del yacimiento modelado lográndose la estimación y simulación del fenómeno analizado de forma eficaz.

La utilización de la teoría de las variables regionalizadas (VR) tiene la ventaja de ser la única capaz de dar respuesta satisfactoria a los problemas con precisión óptima a partir de la información disponible, por la amplia aplicación que ha tenido la geoestadística en la modelación de yacimientos, se asume la teoría de la variable regionalizada como enlace cuantitativo y cualitativo de los tres Modelos anteriormente planteados.

2.8.1 El modelo geológico descriptivo

En su esencia recoge toda la información geológica relacionada con el yacimiento y objeto de estudio. Constituye la base de la organización sistemática de la información sobre el yacimiento y permite el agrupamiento de los mismos en diferentes categorías taxonómicas, de modo que engloba las VR que caracterizan el yacimiento como sistema. No es necesario tener en cuenta los datos experimentales, como datos inferidos por métodos analógicos, p-ej.: Proceso de evolución geológica de una zona determinada, reconstrucción de los sucesos geológicos a partir de datos estratigráficos, tipos de rocas, texturas, rango de edades, ambiente deposicional, encuadre tectónico, tipos de yacimientos asociados, etc.

2.8.2 Modelo geométrico

Separa el yacimiento de las *rocas de caja* y a su vez subdivide el yacimiento de forma tal que los límites espaciales de cada subzona constituyen soportes donde las variables regionalizadas caractericen poblaciones estadísticamente regulares, sin o con interpretación geológica posible.

Los límites se crearon desde un punto de vista con un carácter eminentemente técnico y ecológico, lo que facilitó la ejecución del proyecto en correspondencia con la litología, producto a los rasgos estructurales tridimensionales o cambios bruscos en la mineralización observada a través del comportamiento de los elementos químicos, en algunos casos, la determinación de estos límites se realizaron por análisis cualitativamente complejos.

2.8.3 Modelo matemático

También conocido como modelo numérico o de bloques, *es el resultado de la estimación o la simulación (condicional o no) de las propiedades de cada VR en un espacio limitado por el campo geométrico y la asignación de valores, que pueden o no caracterizar determinado espacio del modelo geométrico.* En esencia, *es la caracterización del comportamiento de las VR y otras variables en el espacio, y en función de ellas determinar por diferentes vías su valor en un soporte de tamaño determinado y definido en un campo geométrico previamente establecido;* es decir, una serie de celdas regulares en forma de cubos ubicados continuamente en tres dimensiones para abarcar un volumen en el espacio. Cada celda tiene atributos que describen las propiedades de la masa de roca que se encuentra en dicha celda. Es de gran importancia, pues permite conocer la variabilidad de los datos a escala espacial.

CAPÍTULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1 INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos de la investigación realizada en el yacimiento Cantarana, tuvo lugar por una correcta ejecución y conformación de la metodología de los trabajos realizados como se da claramente a conocer en el capítulo anterior. Puesto que en dicho capítulo ya mencionado no se hizo referencia a algunos procedimientos para de este modo aplicar la metodología propuesta, se hace alusión a los parámetros seguidos para que de este modo se puedan lograr los resultados propuestos. Antes que todo, se creó una base de datos en el Microsoft Office Access de donde se exportaron dos tablas al Microsoft Office Excel tales como BD-principal; BD-secundaria. Las mismas se convirtieron en la extensión (txt), por ser una extensión la cual es asimilada por el Gemcom (software tal, en el cual se realizaron todos y cada uno de los trabajos). Estas tablas se exportaron al programa, se revisaron y se validaron. Se cargaron los pozos en 3-D, se crearon perfiles en dirección Norte, se crearon gráficos tales como histogramas y de probabilidad, así como la realización de la estadística descriptiva. Una vez realizado este trabajo se llevó a cabo la metodología precisada en el capítulo anterior.

Es necesario hacer notorio que para la realización del modelo de leyes se hizo evidente el empleo del método de estimación para el Níquel por Kriging ordinario como bien se evidencia en el capítulo anterior. Para la estimación del escombros se empleó el método de El Inverso de la distancia al cuadrado, es un método muchísimo más sencillo el cual se empleó para la estimación del Fe pero de manera independiente del escombros y del Co el cual se determinó como todo en su conjunto por su distorsionado comportamiento.

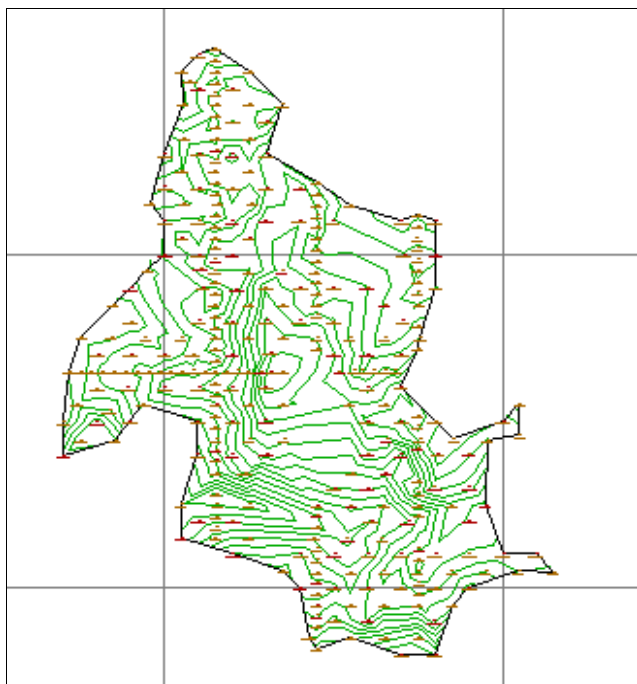
El sector III-1 del yacimiento Cantarana (Ver capítulo II *MODELACIÓN DEL YACIMIENTO* pág. 20) por presentar una compleja red cuadrada plana se conjugó a una sola red, la cual es múltiplo entre los tres tipos de redes existentes de exploración, por cuanto para la realización del modelo de bloques se determinó un tamaño representativo para todos los tipos de redes existentes de tal modo se le asignó un tamaño de 33,33 * 33,33 m * 3 m de altura. Se les asignó atributos como:

ESCOMBRO	OICP	OISP	MINERAL
12	1	2	345

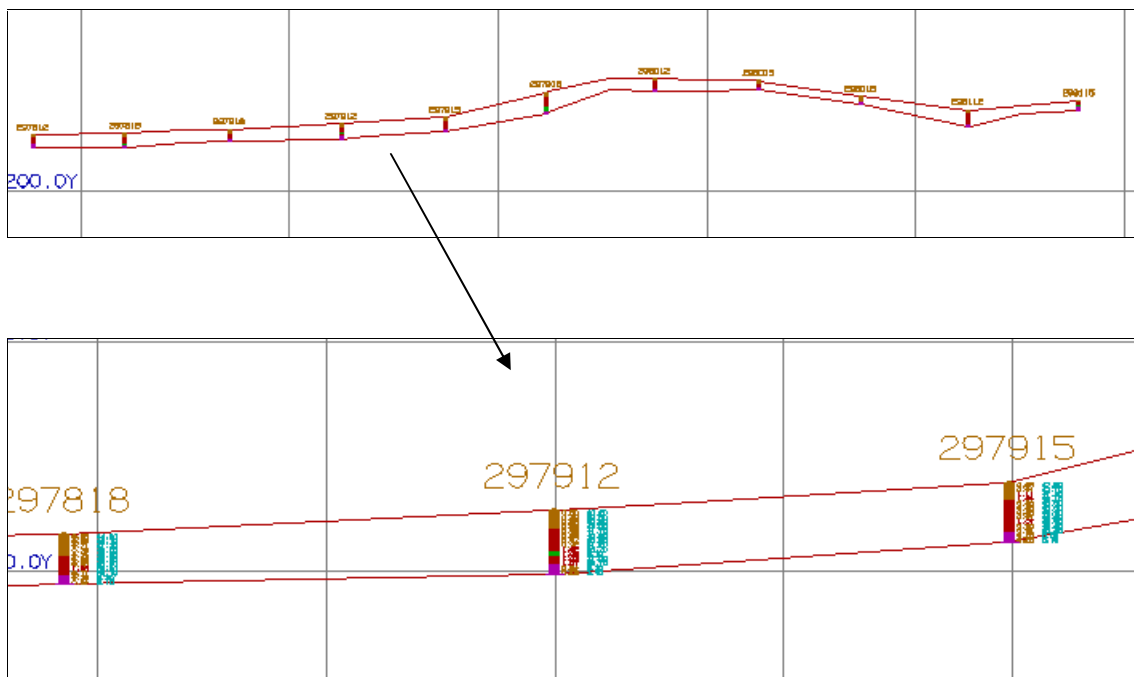
La validación cruzada se realizó de forma convencional, y empleando como criterios de relación del error y la varianza de kriging, entonces los gráficos de dispersión $(Z(x) - \hat{Z}(x)) \sim \sigma_k$.

En el cálculo empleando validación cruzada se determina la función de distribución de los residuales, la media y varianza experimental de estos estadígrafos y por último se calcula el error en términos probabilísticos. Esto no es más que la diferencia entre el valor real conocido en un punto y el valor estimado en ese punto, sin tener en cuenta su valor real durante la estimación.

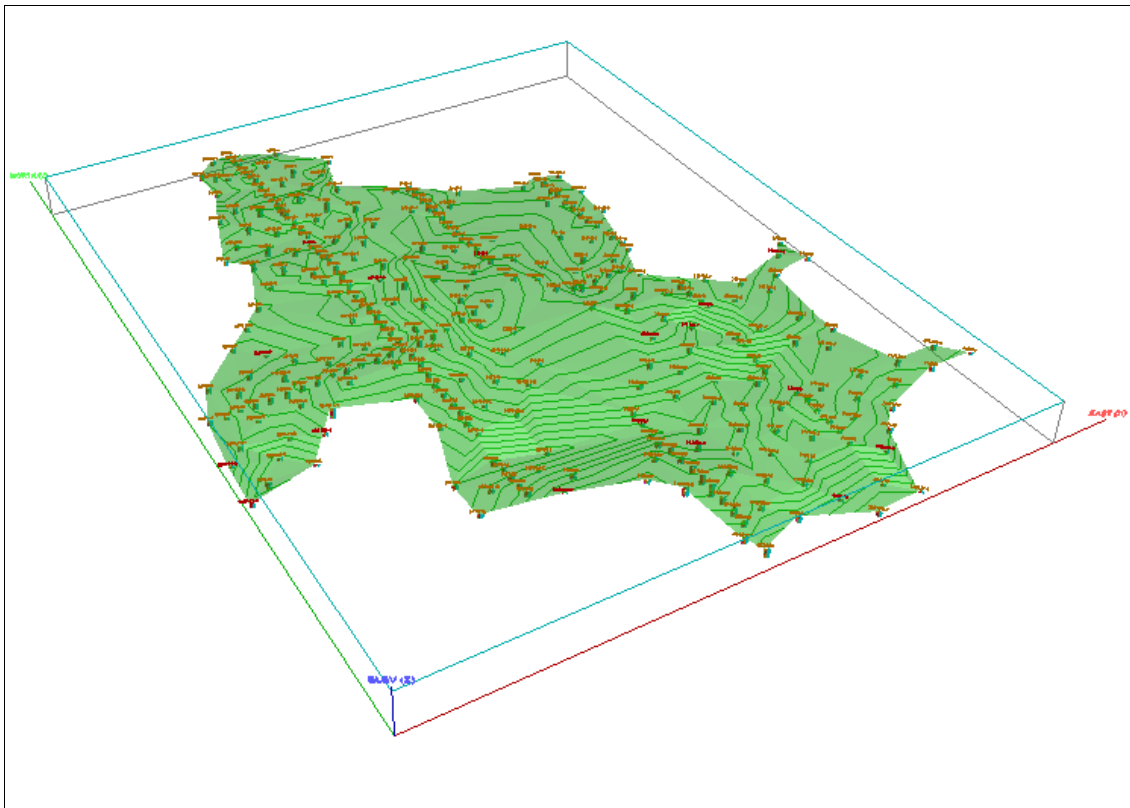
3.2 MODELACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA



Area de estudio. Sector III. Cantarana.



Perfil representativo corteza. 213750N



Vista 3D de la topografía con los pozos.

La modelación topográfica ha sido resultado vital para la obtención de datos más precisos para el desarrollo del presente trabajo, por lo que se hizo necesario realizar la topografía del sector III-1 del yacimiento Cantarana por problemas de dirección y por falta de conocimiento acerca de los datos necesarios a emplear por la Empresa Geominera Oriente la cual no presentó todos los datos necesarios desde el punto de vista topográfico. Dentro de la estructura de la base de datos que la empresa antes mencionada accedió a dar, es totalmente imprecisa la localización topográfica del área como objeto de estudio. El software GEMCOM tiene la opción de modificar y ajustar el relieve en el cual se desea modelar un sector determinado precisando los puntos estructurales sin que ocurran compilaciones ni imprecisiones entre el piso y el techo de la zona a modelar. Teniendo todas estas dificultades presentes, se procedió a la confección de perfiles en dos dimensiones con dirección Norte y se creó una vista en tres dimensiones para de este modo tener más clara el área en el cual se realizaría posteriormente el análisis estadístico en el Sector III-1 del yacimiento Cantarana, así como el modelo de bloque.

En la vista topográfica se muestran todos los pozos los cuales presentan en sus secciones estratigráficas la cantidad de Ni, Fe y Co en por ciento así como la profundidad, el tipo de pozo y las muestras de cada uno de los mismos. Se puede precisar con claridad los tipos de redes de exploración cuadrada que presenta el objeto de estudio de modo que se puede determinar con una exactitud media la distancia cuadrada de cualquier pozo de dicho sector III-1. Para cumplir con los objetivos propuestos, se

realizó un plan estratégico para la ejecución del presente trabajo, producto a los ajustes realizados por la escasa información existente con respecto a la topografía se tuvo que recurrir a diferentes literaturas disponibles, para poder tener una base informativa que permitiera emplear la metodología adecuada, se realizó una búsqueda bibliográfica, fundamentalmente sobre concepciones empleadas geográficamente.

3.3 ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS ELEMENTOS.

Se realizó una revisión de la confiabilidad de la base de datos, donde se separan los datos anómalos o aberrantes. La descripción de la data, es importante determinar algunos detalles con la distribución a la que se ajustan los datos y con qué precisión esto ocurre, la varianza, media y otros estadígrafos, coeficiente de variación, todo ello de forma espacial. Se efectuó un estudio de la estructura de los datos (análisis estructural), por lo que se tuvo mucho cuidado con la presencia de fenómenos que pudo afectar sensiblemente el resultado de la estimación, tales como:

- a. Presencia de tendencias locales.
- b. Mala continuidad de la data relacionada con el efecto pepita.
- c. Presencia de micro-regionalización.

Se hizo el estudio de la ley de distribución de las funciones aleatorias a través del estudio variográfico. En este caso nos referimos a presencia de estacionaridad, cuasi-estacionaridad y aleatoriedad. Estudio de la anisotropía y su interpretación geológica, se realizó la geométrica zonal y la ocurrencia de comportamientos particulares, como el efecto pozo, aleatoriedad pura, estructuras imbricadas. Estudio del efecto soporte, se realizó de forma experimental la simulación, estimación de carácter local, con el objetivo de determinar y conocer los soportes del modelo matemático y los problemas de precisión. Estudio exhaustivo de la varianza de dispersión y extensión, esto tiene estrecha relación con el punto anterior, su empleo también tiene como objetivo realizar análisis del error que se comete durante la estimación. Estudio del error de estimación y ejecución de la simulación y la estimación final. Como se puede apreciar, se requiere de una gran cantidad de parámetros para realizar estos dos procedimientos de forma eficiente.

Las mediciones se trasladan a un plano de referencia horizontal, teniendo en cuenta que los horizontes de la cortaza laterítica tienen forma de manto y propiedades contrastantes, este procedimiento garantiza que los pares de mediciones para el cálculo del variograma experimental sean de un mismo nivel en el perfil, a pesar de estar en una posición distinta en el espacio, con respecto a la dirección vertical. El tamaño del lag se variará por dos razones fundamentales: la primera es la diferencia de escala entre las mediciones verticales y horizontales y la segunda es la existencia de una estructura diferente de la variabilidad a medida que varía la escala de medición. De esta manera se garantizará que el número de puntos en cada lag sea relativamente homogéneo. El empleo de variogramas con estructuras imbricadas para garantizar la representatividad de la variabilidad de la data a diferentes escalas.

Son varias las variantes de esta forma de estimación que puedan ser utilizadas, pero teniendo en cuenta las restricciones del yacimiento, se relaciona con las particularidades geológicas y de la infraestructura minera, p. ej. es casi imposible la utilización

del Random Kriging pues no existen pozos de voladura ni observaciones densas del fenómeno geológico, el Kriging indicador no debe emplearse, pues es un método creado para otras condiciones geológicas. Es importante tener en cuenta antes de la ejecución de la estimación por Kriging los parámetros antes mencionados, las restricciones geométricas de explotación, el efecto soporte y el efecto información. Se realizó la validación cruzada para un estudio más detallado del error, empleando a su vez la información de la variable en el punto $Z(x)$ su valor estimado $Z^*(x)$ y la varianza de estimación, este método permitió encontrar zonas anómalas donde el variograma globalmente ajustado no es representativo, en esta zona se rectificó con el uso el modelo geométrico, de hecho los datos se trataron de forma diferenciada.

3.4 MODELO GEOLÓGICO.

La interpretación y adquisición de la información para la construcción del modelo geológico del yacimiento fue el punto de partida de la modelación, para ello se emplearon herramientas y métodos, es importante aclarar que en dependencia de las características de los mismos, brindan un grado de detalle lo suficientemente preciso.

Se definieron sub-modelos descriptivo. Con el sub-modelo descriptivo se obtuvo una serie de parámetros que son de particular importancia e interés; estos parámetros resumen en sí las características objetivas del yacimiento. Estas características crean las bases para la confección de distintas hipótesis relacionadas con la formación y evolución del sector CRIII-1 en el yacimiento. Se tuvo en cuenta para la confección del sub-modelo descriptivo la delimitación de las zonas donde se distribuyen las cortezas niquelíferas, teniendo en cuenta que estas se desarrollan exclusivamente sobre rocas ultrabásicas. La determinación, esclarecimiento y caracterización geólogo-matemática. La descripción del ambiente geológico donde se desarrolla el yacimiento. La realización de la caracterización mineralógica del yacimiento, determinando de este modo las fases minerales principales presentes en el material laterítico y cuales son las portadoras de Fe, Ni y Co.

La experiencia ha demostrado que el problema principal en la estimación de recursos no está relacionado directamente con el método de estimación empleado, sino con la correcta aplicación de los principios geológicos. La principal cuestión a resolver antes de la estimación de recursos propiamente dicha es establecer la continuidad de la mineralización y la ley dentro del yacimiento. Un muestreo representativo, análisis confiables y una coherente interpretación geológica son los componentes principales de la estimación de recursos (Arseneau y Roscoe, 1997).

La interpretación geológica siempre se basa en los datos y en el conocimiento que tiene el geólogo sobre el yacimiento o del modelo de yacimiento que se estudia. Esto conduce inevitablemente a que los mismos datos sean interpretados de forma diferente por distintos especialistas y por consiguiente resultados diferentes de la estimación de recursos.

El objetivo de este paso es crear un modelo geométrico tridimensional del yacimiento Cantarana que represente la posición y la forma de la capa útil a extraer en el área. Se construye un modelo tridimensional (superficies y sólidos) para la capa útil que se encuentra en el yacimiento. Los límites de la capa (techo y piso) son generados como superficies y los sólidos representan los bloques geológicos que son usados para validar los resultados.

El modelo geológico 3D (tridimensional) se emplea para aplicar el control geológico a la estimación de recursos. El software GEMCOM soporta dos maneras diferentes de construir el modelo geológico.

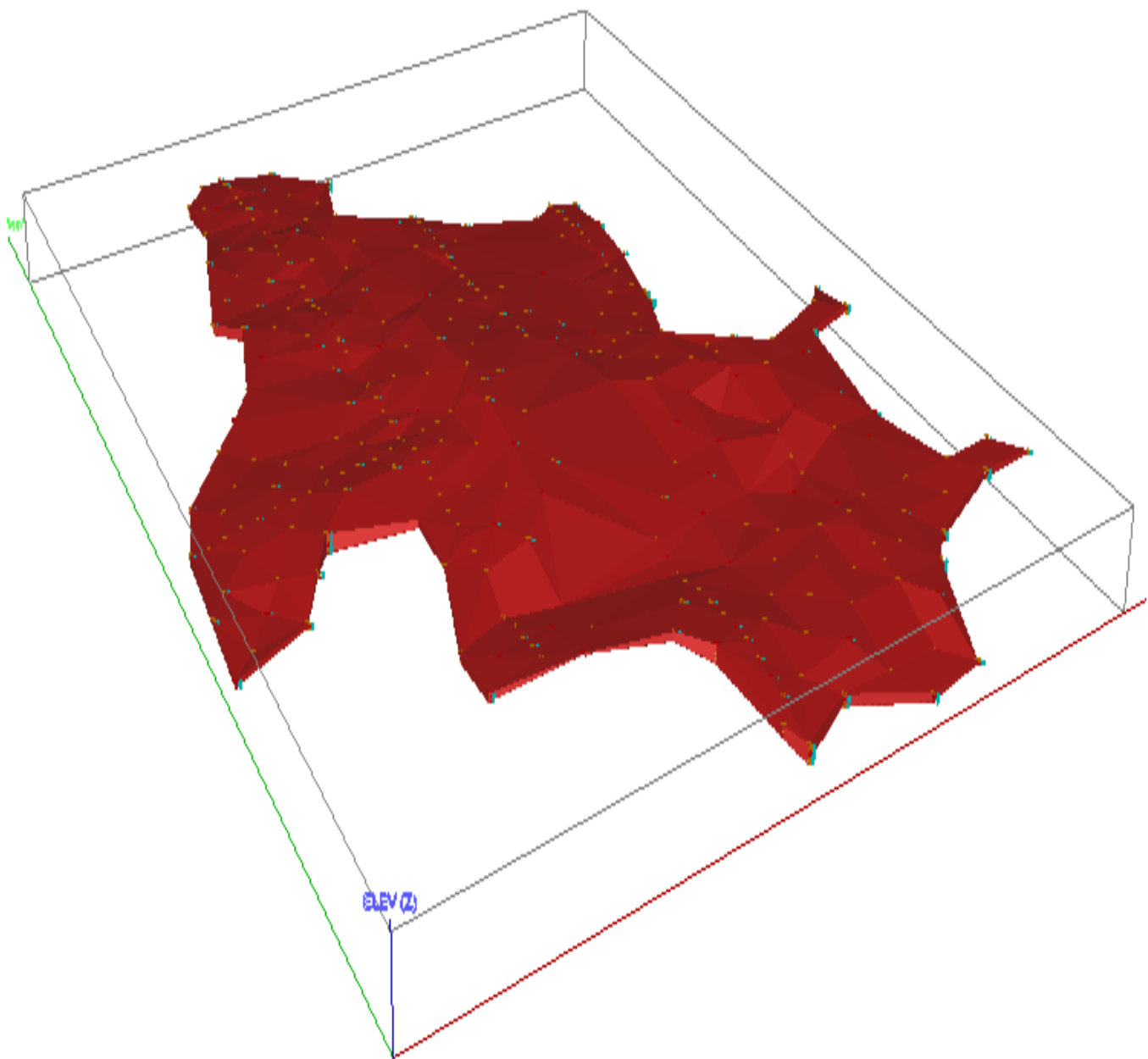
3.4.2 Método de las superficies

Se basa en la generación de dos planos que limitan los cuerpos u objetos geológicos por la parte superior e inferior (techo y piso correspondientemente).

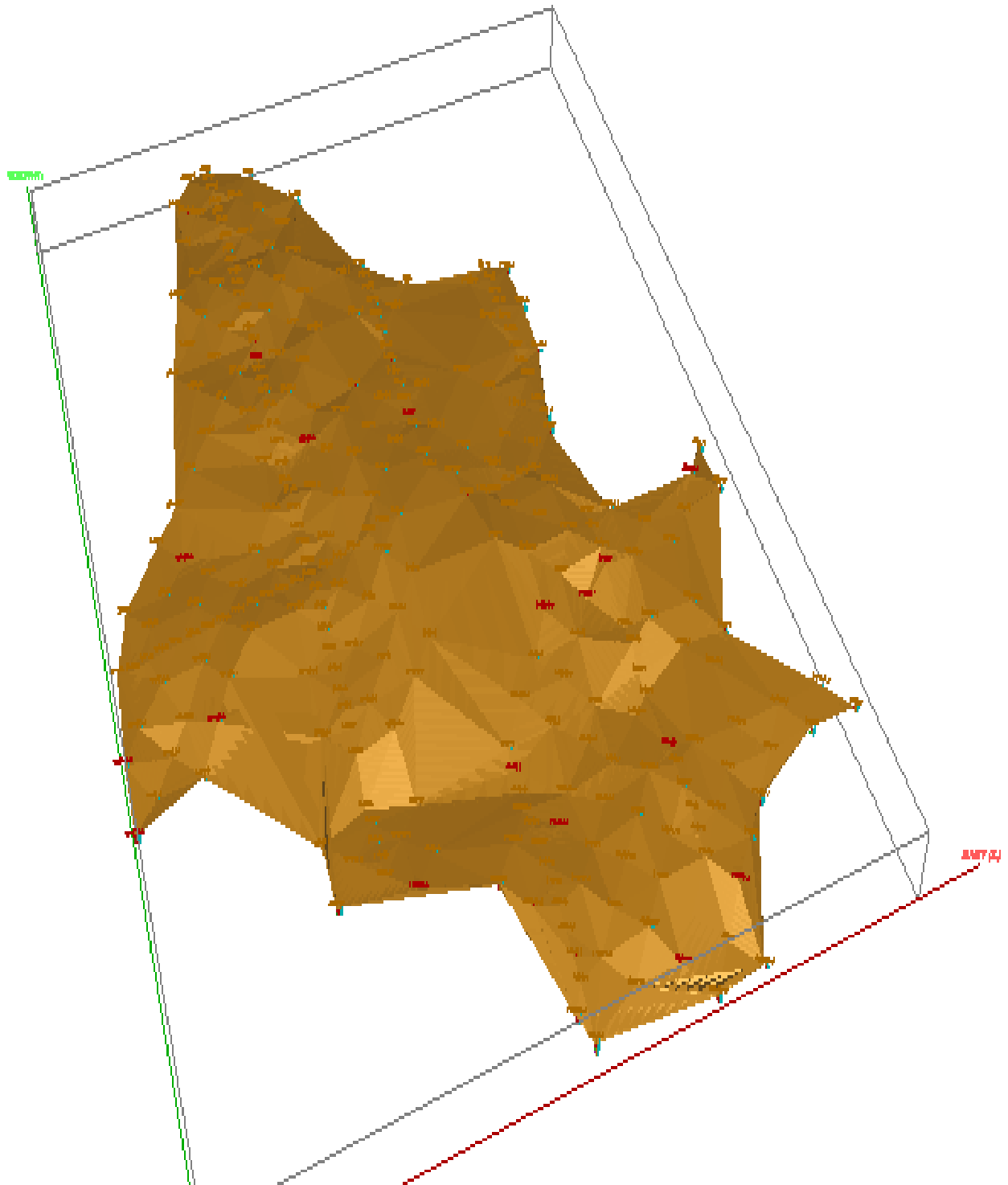
Posteriormente las superficies generadas son modeladas empleando el algoritmo de TIN (redes irregulares de triángulo). Los puntos (x, y, z) que yacen en las distintas superficies se extraen automáticamente de la base de datos o se extraen de los perfiles o secciones digitalizadas.

3.4.1 Método de los perfiles

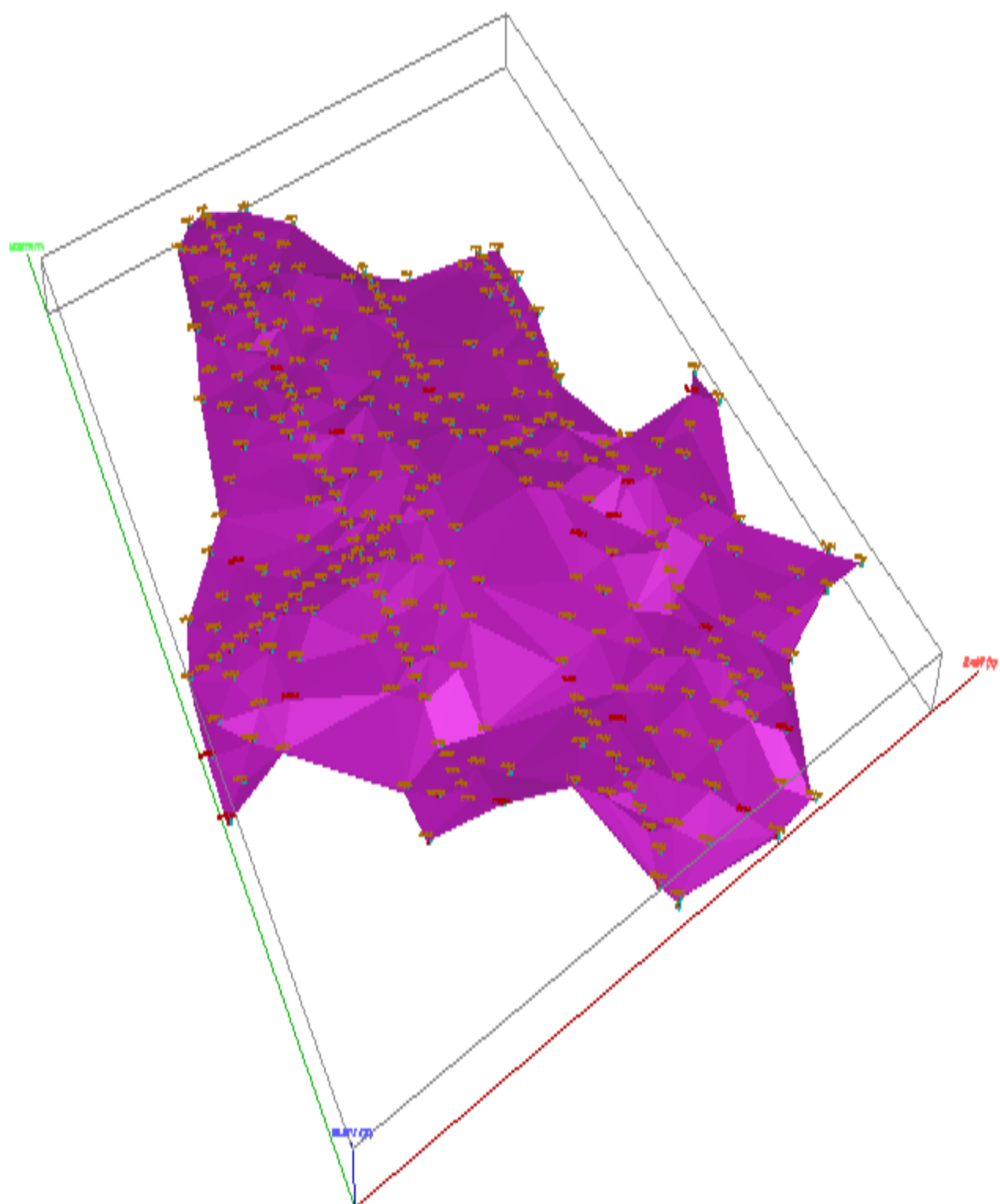
Se fundamenta en una serie de perfiles o secciones regularmente espaciadas. Las distintas unidades se digitalizan en las secciones y posteriormente se correlacionan los perfiles (puntos de inflexión) para conformar el modelo de alambre (wireframe) y a partir de este se confecciona el modelo geométrico 3D del yacimiento.



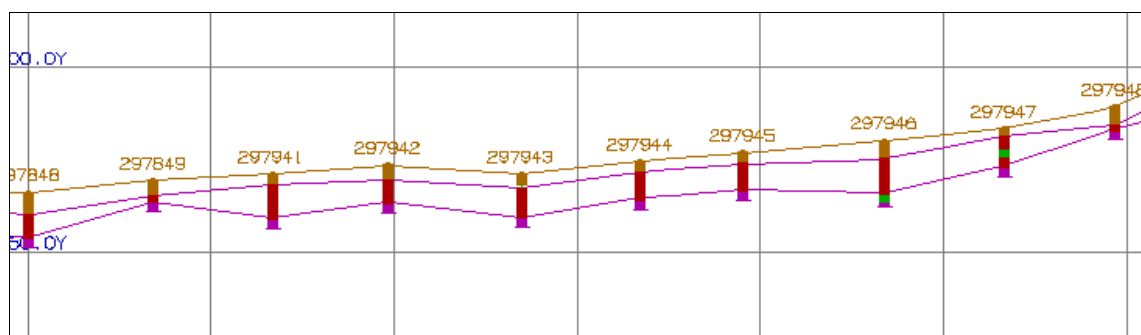
Modelo sólido 3D de la corteza del Ia.



Solido 3D escombros (codigos 1 y 2)



Sólido 3D mineral (litologías 1,2 y 3)



Perfil mostrando los sólidos escombros mineral de y. 213650N.

3.5 MODELO MATEMÁTICO

Se incluyeron en el modelo matemático variables a partir de puntos conocidos, extrapolados utilizando como base la información brindada por el modelo geológico y el modelo geométrico. Asumí que el modelo matemático será representado por un modelo de bloques que contiene información de las variables estimadas de interés en el sector del yacimiento. En este modelo se representa la información a través de bases de datos que caracterizan cada una de las unidades elementales del mismo, además se propone utilizar varios modelos, cada uno con un tamaño de soporte (bloque) diferente, con unidad mínima proporcional al volumen de mineral o el estéril mínimo que puede afectarse, según las restricciones puesta por la industria, en este caso la dimensión vertical es 1 m.

3.5.1 Secuencia para la ejecución de la modelación matemática

Etapas de la construcción del modelo matemático:

1. Construcción del modelo geológico.
2. Construcción del modelo geométrico.
3. Elección del conjunto de soportes que caracterizan el modelo.
4. Asignación a cada una de las unidades de las variables que por su naturaleza no se pudo tratar matemáticamente, ni existió información suficiente para un análisis de este tipo, p. ej. Litología, Masa Volumétrica y Granulometría.
5. Respecto al conocimiento obtenido de esta información y la adquirida durante la modelación geológica, se realizó la modelación de variables más simples, que por su naturaleza generalmente se trata de forma muy específica.
6. Realizar la estimación y simulación de los contenidos de los elementos disponibles en las bases de datos de los pozos de perforación.

3.5.2 análisis Variográfico y parametros de estimacion.

El variograma permite cuantificar la continuidad o nivel de correlación entre las muestras que se localizan en una zona mineralizada dada. Zona de influencia el semivariograma vertical por definición es nulo en el origen, las funciones obtenidas no presentan discontinuidad en el origen, por lo que no tiene efecto de pepita (Nugget effect). El presente fenómeno es estacionario ya que el variograma crece hasta un límite donde el valor máximo de variabilidad (Meseta) es el valor de (h) para el cual con el aumento de h su valor permanece constante, se representa como $(CT = C + C_0)$, a partir del cual se estacionariza, el valor de la meseta coincide teóricamente con la varianza experimental. El área de influencia de la correlación (Alcance), es la distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes; es decir, la distancia para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su Meseta. La meseta se obtiene trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada. El comportamiento continuo en el origen donde la gráfica del variograma es lineal y parte del origen caracteriza una (VR) continúa en media cuadrática pero no es derivable. Anisotrópicamente la VR presenta direcciones particulares de variabilidad con valores semejantes de meseta pero con diferentes áreas de influencias en la correlación de las mismas, por lo que presenta estructuras imbricas donde el origen de este comportamiento está relacionado con la superposición de variaciones a diferentes escalas distintas del mismo fenómeno estudiado. Los variogramas con estructuras imbricadas garantizan y hacen mas representativa la variabilidad de la data a diferentes escalas, típico en este yacimiento.

La zona de influencia del semivariograma no es nulo en el origen, las funciones obtenidas presentan discontinuidad en el origen, por lo que presentan efecto de pepita (Nugget effect). Se está en presencia de un fenómeno estacionario por lo que el variograma crece hasta un límite donde su valor máximo de variabilidad es el valor de (h) por cuanto aumenta su valor, h permanece constante, se representa como $(CT = C + C_0)$, a partir del mismo se estacionariza, el valor de la meseta coincide teóricamente con la varianza experimental. El área de influencia de la correlación (Alcance), es la distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes; es decir, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su Meseta. La meseta se obtiene trazando una línea paralela a la abscisa y se ajusta a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada. El comportamiento discontinuo en el origen donde la función $\gamma(h)$ presenta una discontinuidad en el origen llamado "efecto de pepita", esto implica que VR no es continua en media cuadrática por lo que representa una variable muy irregular. Así, dos puntos muy próximos presentan una diferencia de varianza al menos igual al valor del efecto de pepita C_0 . Anisotrópicamente, la VR es totalmente nula.

h : es la distancia total por el eje de las axisas.

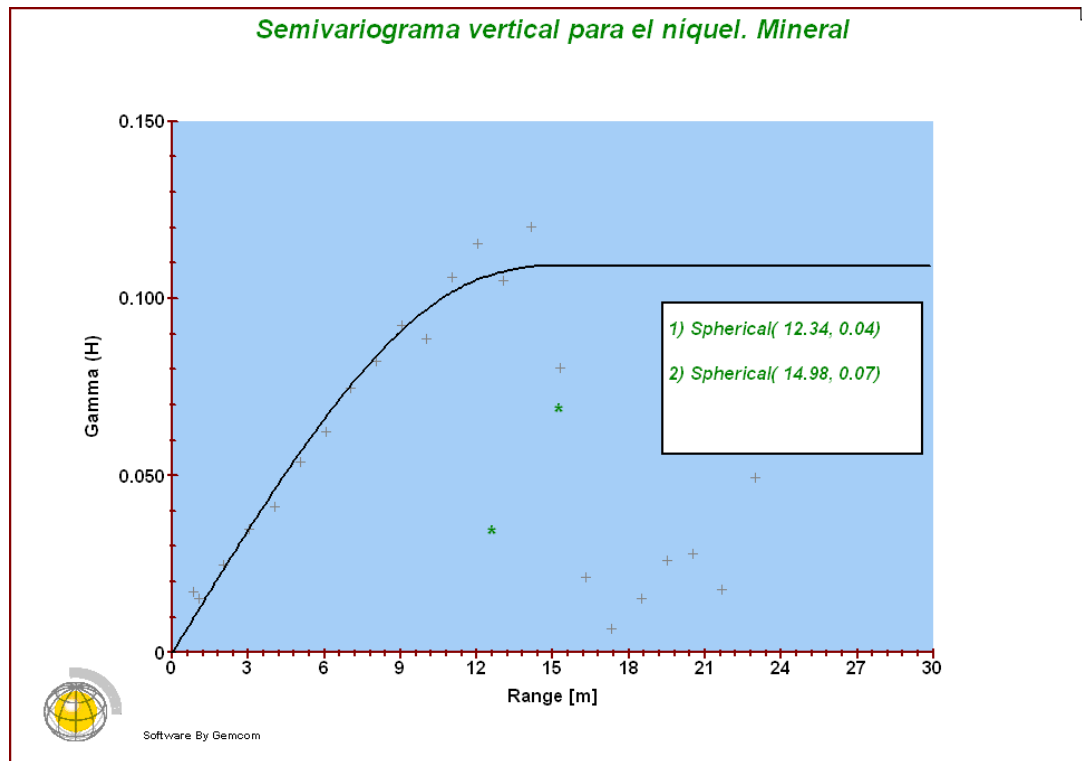
(h) : es la altura en el eje de las y .

CT: es la altura hasta el valor máximo de variabilidad.

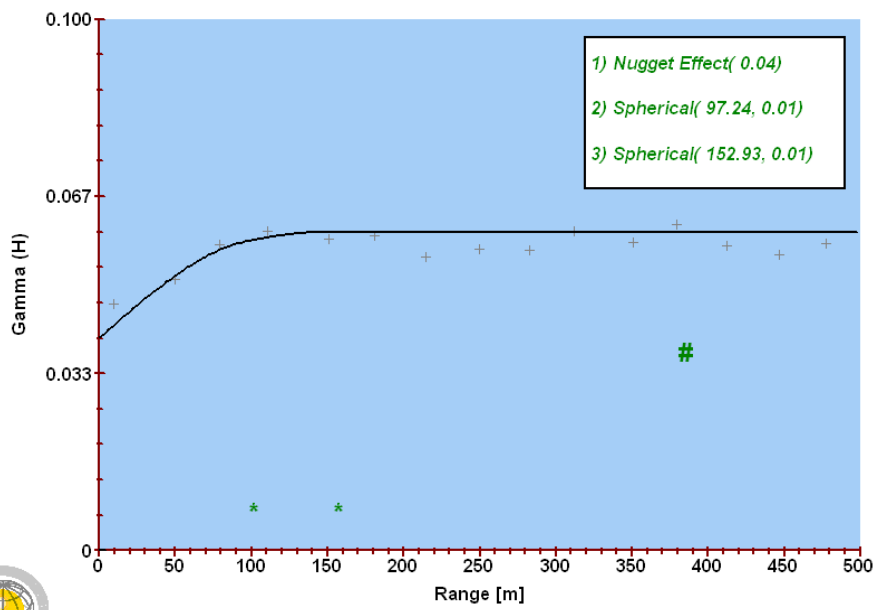
C : alcance de meseta.

Co : efecto de pepita.

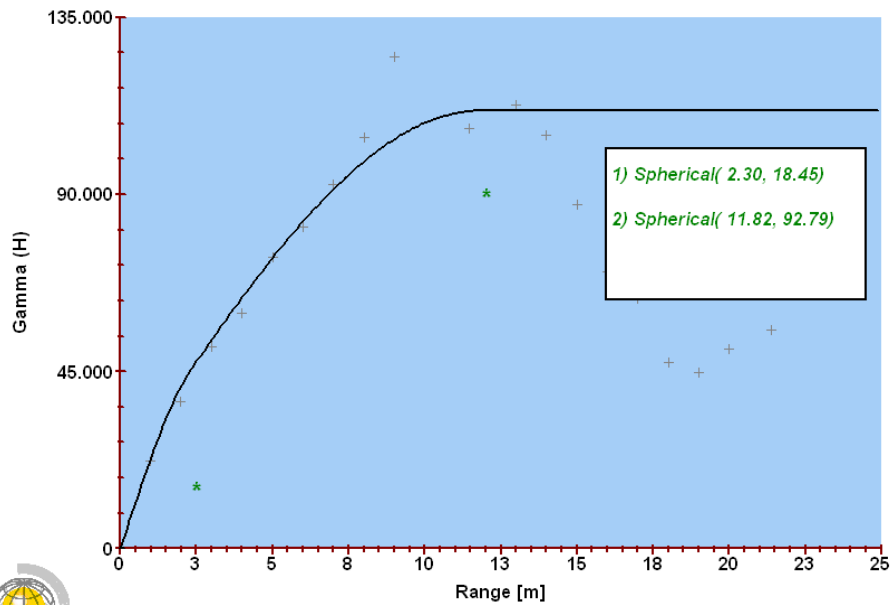
3.5.2.1 Variogramas



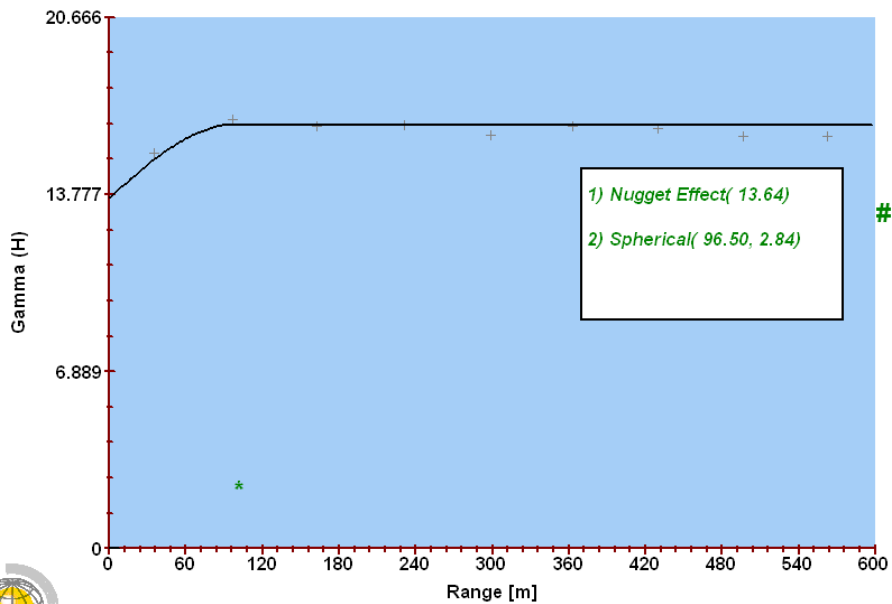
Semivariograma para el níquel. Mineral



Semivariograma vertical para el hierro. Mineral



Semivariograma para el hierro. Mineral

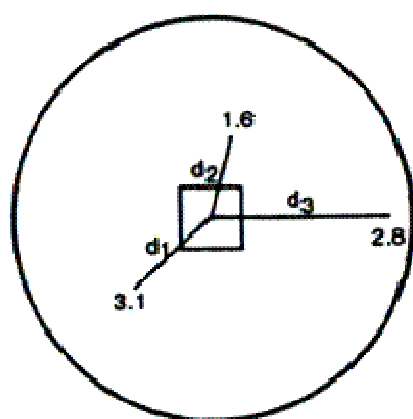


3.5.2.2 Análisis de Anisotropía

La anisotropía es función del modelo de bloques, por lo que influye en el peso que se le otorga a cada muestra en la estimación en dependencia de la dirección de los ejes de máxima y mínima variabilidad. Se toma la anisotropía como criterio de orientación y como distancia entre pozos $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$ de la distancia de correlación geológica (rango). Estudio de la anisotropía y su interpretación geológica, se establece con el tipo de geométrica zonal y la ocurrencia de comportamientos particulares, como el efecto pozo, aleatoriedad pura, estructuras imbricadas. La VR presenta distintos comportamientos de continuidad en diferentes direcciones. Este comportamiento anisotrópico direccional tiene siempre un significado geológico interpretado desde el punto de vista geoestadístico; en si por el doble aspecto estructural de la VR, y es lo que se conoce como anisotropía. El origen de este comportamiento está relacionado con la superposición de diferentes variaciones a escalas distintas del mismo fenómeno estudiado. se produce cuando los variogramas tienen el mismo valor de meseta pero alcances diferentes.

3.5.2.3 Propuesta de bloques

Método de bloques



Peso de las muestras (%)				Ley estimada del bloque
m	1.6 %	3.1 %	2.8 %	
1	44.8	34.7	20.5	2.37
2	55.2	33.2	11.6	2.34
3	64.0	29.9	6.1	2.12

Coordenadas de las muestras

1.6 = (10, 40)

2.8 = (90, 0)

3.1 = (-40, -35)

El método más usado en la modelación de recursos consiste en la discretización del espacio 3D en bloques o celdas tridimensionales (voxels) (fig.4.5). Cada celda contiene los atributos (litología, tipo de mineralización etc.) y las mediciones (leyes, propiedades físico mecánicas) del dominio geológico en que se encuentra. Los atributos de los bloques se determinan sobre la base de la intersección con el modelo geológico o su posición respecto a una superficie triangulada y las leyes a través de la estimación con técnicas de interpolación espacial.

El primer modelo de bloque fue utilizado a comienzos de los años 60 por la Kennecott Koper Corporation en un depósito de pórfido cuprífero. Se empleó para describir la distribución espacial de las leyes y no la geometría de los dominios geológicos.

Cada bloque debe contener toda la información disponible en las fases de desarrollo de un [proyecto](#): litología-mineralogía, contenidos de [metales](#), calidades en el caso del carbón y [rocas](#) industriales, contenidos de contaminantes, parámetros geomecánicos, datos hidrogeológicos, etc.

Para definir el modelo de bloque es necesario establecer los siguientes parámetros (Fig.4.6)

- Posición del modelo: se especifica a partir de las coordenadas del centroide del bloque llave (key block).
- Extensión del modelo en las distintas direcciones X, Y, Z (debe ser lo suficientemente grande para enmarcar la región de interés)
- Dimensiones de las celdas o bloques por la X, Y y Z.
- Orientación del modelo definido (ángulo de inclinación y el azimut)
- Conjunto de variables a almacenar en el modelo con sus correspondientes formatos: ley de los distintos metales, peso volumétrico, litología, tipo tecnológico de mena etc.

Con el objetivo de alcanzar una mayor resolución del modelo de bloque en los límites de los cuerpos [minerales](#) se utilizan bloques (sub bloques) con dimensiones menores que los originales. También se pueden utilizar voxels con tamaños variables en distintas partes del depósito (Ej. zonas con diferente grado de estudio o continuidad espacial). El modelo de bloques puede ser rotado y orientado de manera que se ajuste a la estructura geológica y respete los elementos de yacencia del yacimiento estudiado.

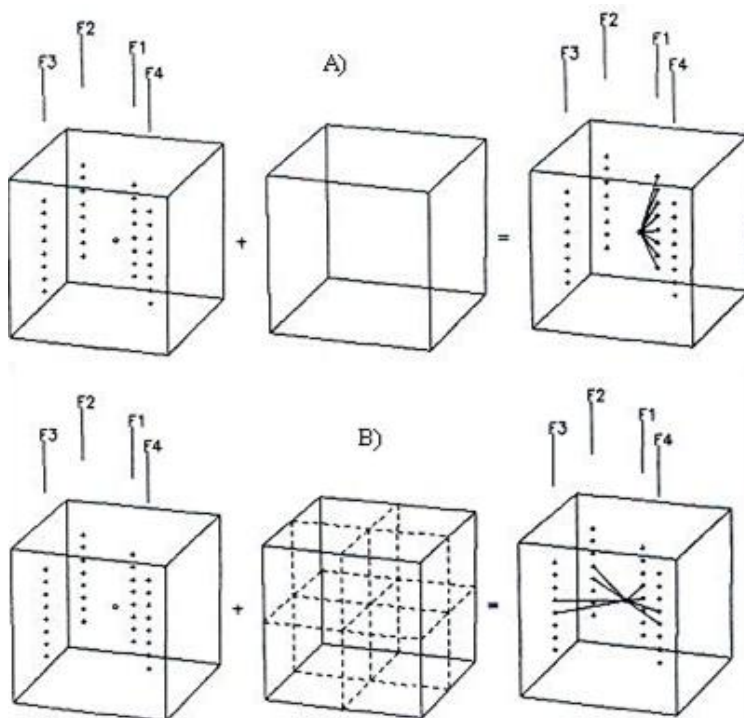


Figura 4.6 Parámetros que definen el modelo de bloque: Posición del bloque llave (X_{morg} , Y_{morg} , Z_{morg}), dimensiones del bloque (dx , dy , dz), extensión del modelo (X (n_x), Y (n_y), Z (n_z)).

Un aspecto de primordial importancia en el modelo de bloque lo constituye la selección de las dimensiones del bloque. Lo ideal en este caso es que el tamaño del mismo coincida con la unidad de selección minera que será empleada durante la explotación del yacimiento, sin embargo en muchas ocasiones esto no es posible pues no se cuenta con la densidad suficiente de información. Cabe destacar también que al disminuir el tamaño del bloque se aumenta el error de estimación, es decir, su ley se determina con un alto grado de incertidumbre. Ahora bien, al aumentar el tamaño del bloque las leyes son emparejadas artificialmente. Según la teoría geoestadística por lo menos un tramo del pozo debe quedar dentro de cada bloque, y que estos tramos estén uno del otro a una distancia menor que el alcance del variograma, o sea, dentro de la distancia que se estima que una muestra tiene influencia sobre la otra.

Este enfoque teórico en muchos casos no es práctico desde el punto de vista técnico (demasiados subbloques para poder respetar los límites del modelo geológico y lograr una buena precisión en el cálculo del volumen, distintas redes de exploración etc.) y generalmente se prefiere examinar el yacimiento en unidades de selección más pequeñas. Por esta razón se asume la siguiente regla ampliamente manejada en la literatura: ***el tamaño del bloque puede ser tan grande como el espaciamiento medio de la red y no debe ser menor a $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{3}$ del espaciamiento de esta*** (Houlding, 1994; Duke et. al., 1991).

La determinación de las dimensiones óptimas del bloque depende principalmente de:

- Variabilidad de las leyes.
- Continuidad geológica de la mineralización.
- Tamaño de las muestras y espaciamientos entre ellas.
- Capacidades de los equipos mineros.
- Taludes de [diseño](#) de la explotación.

3.5.2.4 Propuesta de parámetros de estimación

La simulación se realiza fundamentalmente a través de enfoques probabilísticos con diferentes objetivos, tales como el cálculo de recurso. La estimación no es más que la determinación del valor de una variable y la simulación es una combinación de técnicas matemáticas en las que se incluye la estimación.

Estimación

Es evidente que se toman en cuenta la información aportada por los variogramas así como el comportamiento de los mismos respecto a las técnicas de estimación para la realización de este trabajo utilizando métodos determinísticos:

El conjunto de procedimientos a estimar y simular para definir las diferentes de redes racionales de exploración y una nueva forma para obtener la masa volumétrica, apoyándose en un conjunto de datos. El tratamiento matemático de la simulación geoestadística no ha sido mucho más complejo que el de la estimación, mucho más compleja resulta la interpretación del análisis de los resultados que implica su uso, tanto como diversa es la distribución o comportamiento espacial que puede encontrarse en la naturaleza.

En esencia, la estimación y la simulación geoestadística. Por un lado la estimación tiene como objetivo proporcionar, en cada localización a estimar, un valor $Z^*(x)$ lo más próximo posible al valor real y desconocido $Z(x)$ del fenómeno estudiado, lo que se hace en función de las características de variabilidad y correlación espacial de la variable en estudio, y haciendo mínimo el error de estimación $Z^*(x) - Z(x)$. La estimación no reproduce la dispersión de los datos reales, más bien subestima en general esta dispersión.

Por estimación de recursos entendemos la determinación de la cantidad de materia prima contenida en un yacimiento o en una de sus partes. Estos tipos de recursos se calculan en toneladas métricas y se estiman en metros cúbicos. Esta cuantificación formal de las materias primas minerales estimada por procedimientos empíricos o teóricos se denomina Inventario Mineral. Este a su vez se expresa en términos de recurso y reservas.

La estimación de recursos es un fin de cada etapa de los trabajos de prospección y exploración de yacimientos minerales y este proceso continua durante la explotación del depósito. Todos los trabajos de exploración de un yacimiento contribuyen ante todo a la estimación de las materias primas minerales.

Kriging Ordinario

El Krigeage de bloques es similar al Kriging puntual, con la diferencia de que el valor calculado se le asigna a un bloque y no a un punto, el cálculo es simple y se basa en la determinación del valor de n puntos de discretización distribuidos regularmente en el bloque, al que se le asigna el valor medio del mismo.

Este método es conocido como método geoestadístico o método de krigeage, el cual ha desarrollado un gran número de variantes del Kriging, pero en su esencia consiste en estimar el valor de una variable regionalizada en un punto o volumen a partir de unos factores de ponderación que funcionan de forma semejante a como lo hace en el inverso de la distancia.

Este valor se caracteriza por ser el mejor estimador lineal insesgado; los factores de ponderación se determinan de forma tal que la varianza de estimación es mínima; *lineal* porque es una combinación lineal de la información; *insesgado* porque la esperanza matemática del error es nulo (considerando como error la diferencia entre el error real y el estimado). Los factores de ponderación se calculan a partir de un sistema de ecuaciones conocidas como ecuaciones de krigeage, donde las incógnitas para resolver el sistema se obtiene a partir del variograma modelado.

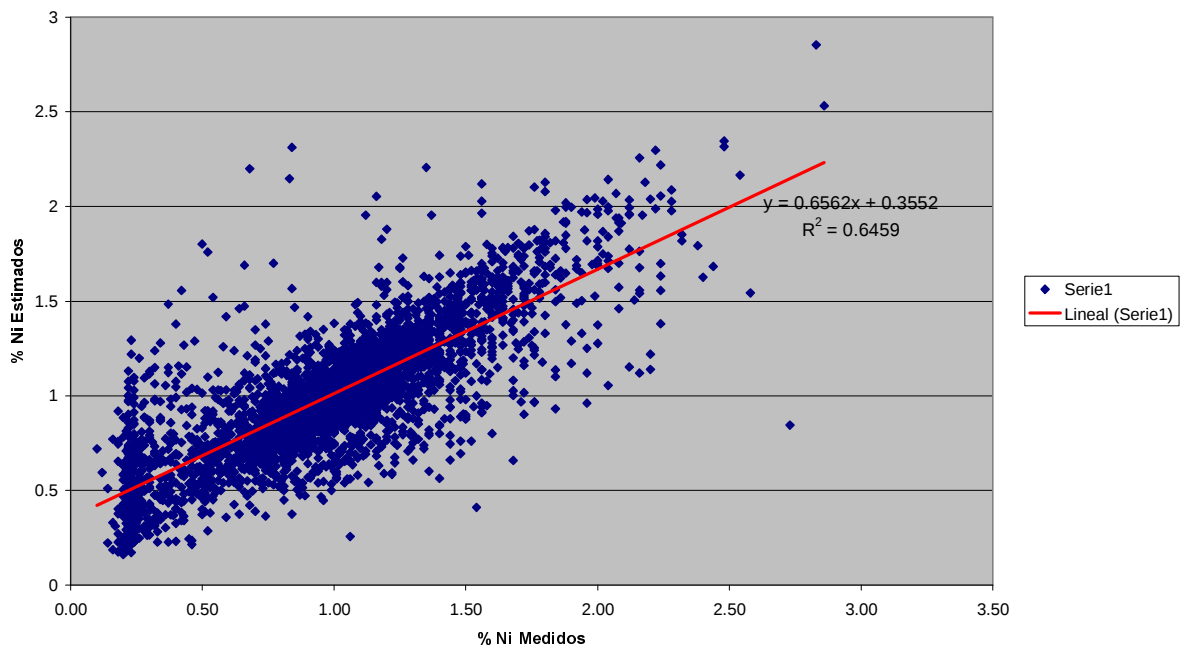
Método Inverso de la distancia

Este fue posiblemente el primer método analítico para la interpolación de los valores de la variable de interés en puntos no muestreados. Esta técnica se ha convertido en una de las más populares por su sencillez. En principio se adopta la hipótesis de

que importancia de un dato aislado responde a una función inversa de la distancia. El objetivo del método es asignar un valor a un punto o bloque mediante la combinación lineal de los valores de las muestras próximas. Este método se basa en una combinación lineal dada por: $Z^*(x) = \sum \lambda_i Z(x_i)$.

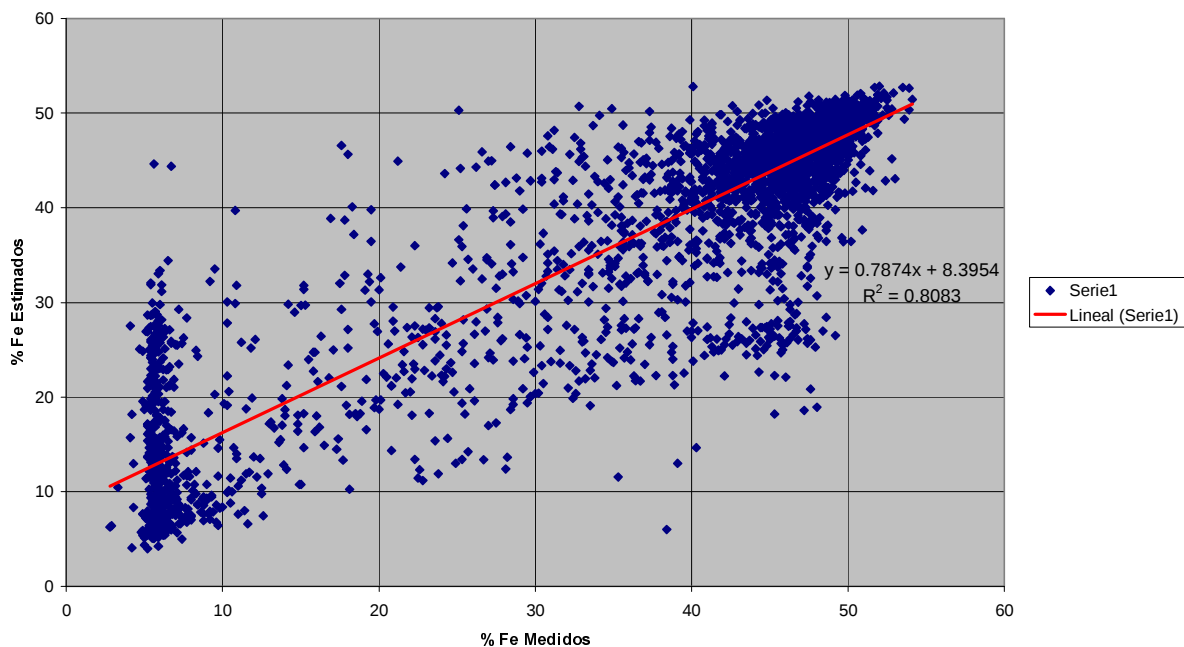
3.5.2.5 Validacion cruzada.

Dispersión para el Ni en el escombros



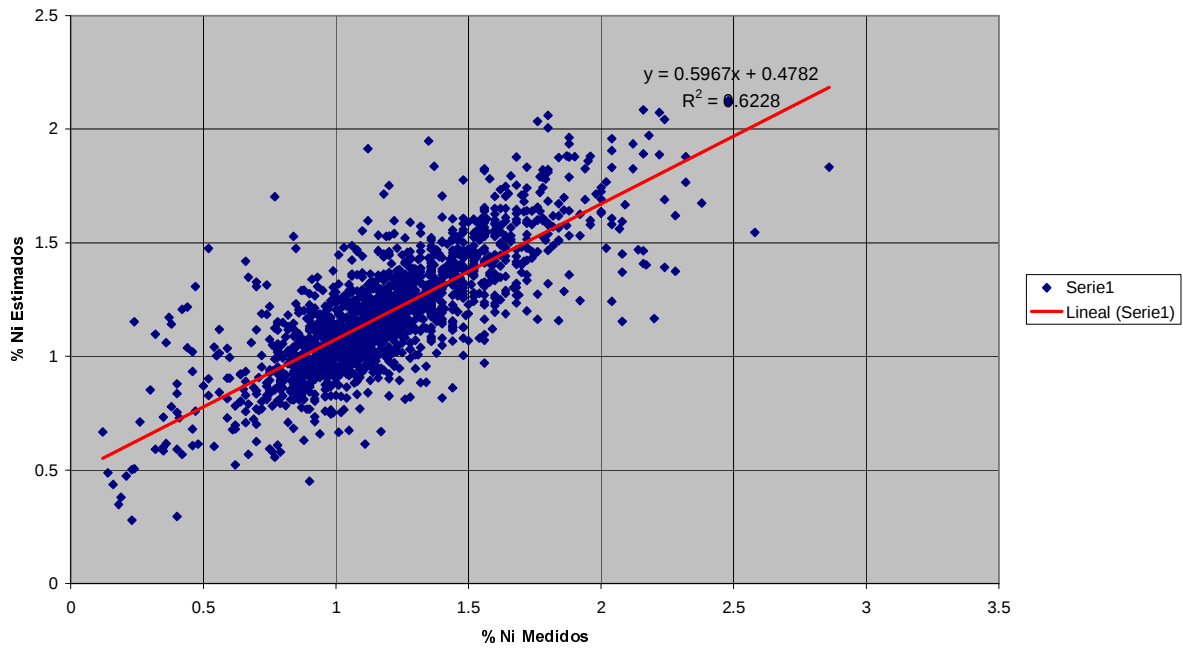
Dispersión para el níquel en el escombros

Dispersión para el Hierro en el Escombros



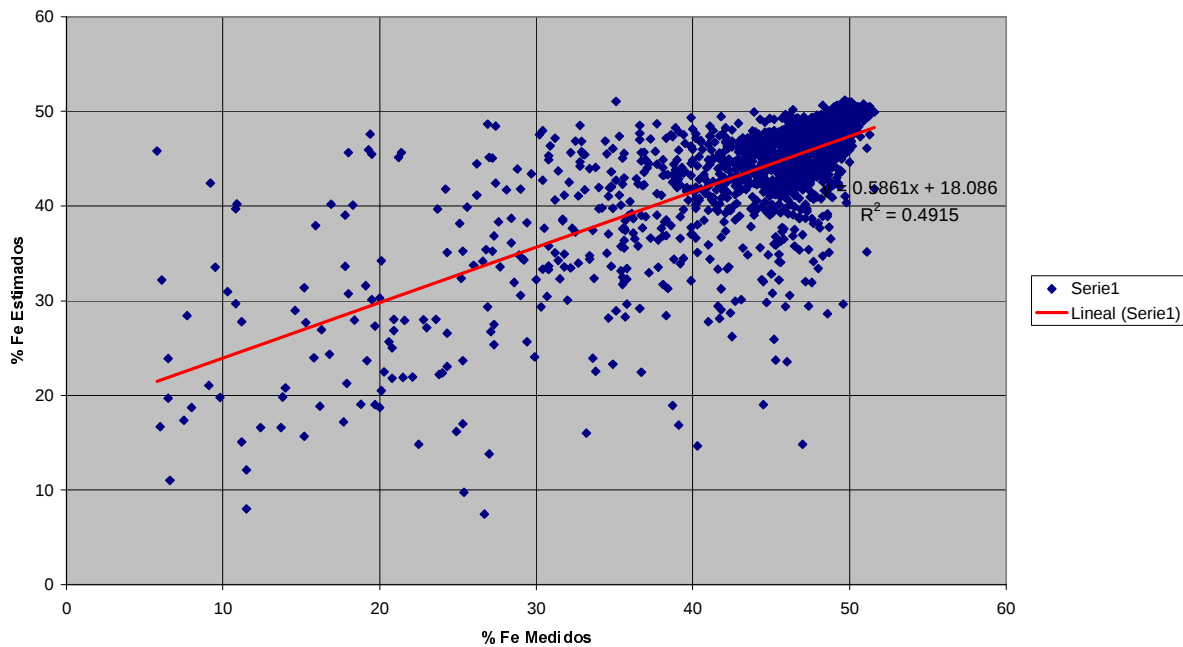
Dispersión para el hierro en el escombros

Dispersión para el Níquel en el mineral



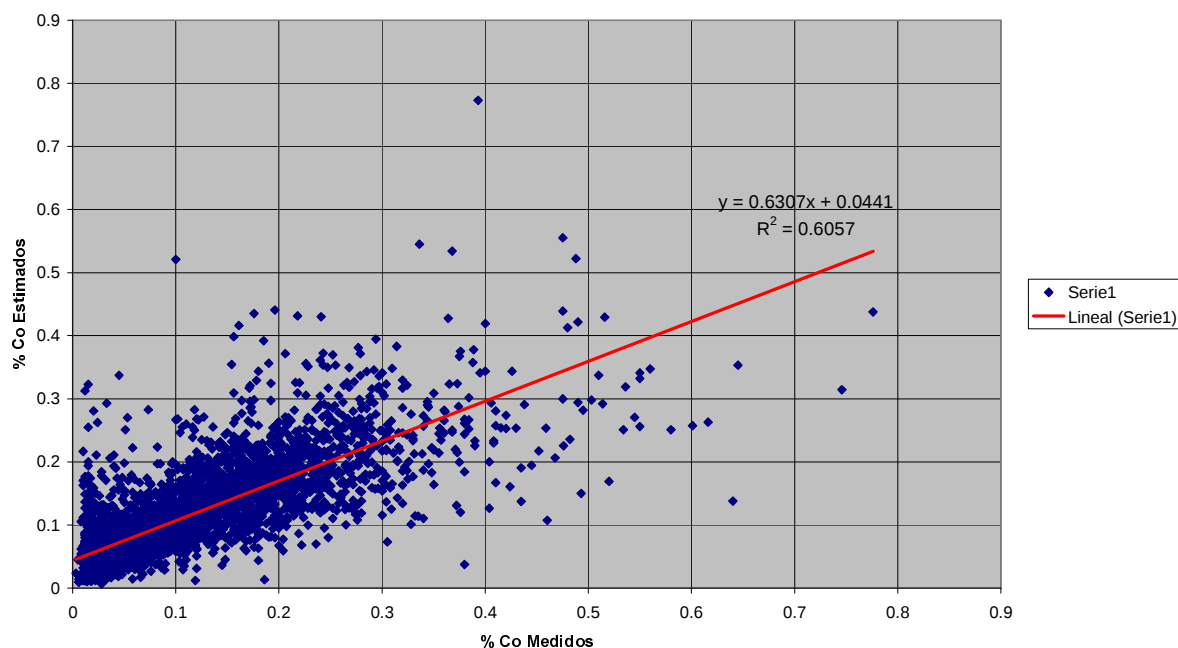
Dispersión para el níquel en el mineral

Dispersión para el Hierro en el Mineral



Dispersión para el hierro en el mineral

Dispersión para el Cobalto Esc-Mineral



Dispersión para el cobalto (todo)

Cálculo la validación cruzada es la diferencia entre el valor real conocido en un punto y el valor estimado en ese punto, sin tener en cuenta su valor real durante la estimación. Se determina la función de distribución de los residuales, la media y varianza experimental de estos estadígrafos y por último se calcula el error en términos probabilísticos.

Con lo resultados de validación cruzada se determina la efectividad de la estimación. Se realiza para un estudio más detallado del error, empleando a su vez la información de la variable en el punto $Z_{(x)}$ su valor estimado $Z^*_{K(x)}$ y la varianza de estimación, este método permitirá encontrar zonas anómalas donde el variograma globalmente ajustado no es representativo, en esta zona se rectificará el modelo geométrico y los datos serán tratados de forma diferenciada. El límite será de las zonas anómalas será estimado a través de la siguiente fórmula:

$$L = Z_{(x)} - Z^*_{K(x)} \quad \text{si} \quad L > K \cdot \sigma_{(K)}$$

La dispersión del Ni en el escombro es totalmente regular por el cual tiene un comportamiento normal pues no presenta zonas anómalas hasta 1.50 %, en cambio presenta varias zonas anómalas ya que su incremento es fundamentalmente entre el rango de 0-10 y 40-50 en el espacio entre los 11-39 % la mineralización es muy dispersa. El Ni en el mineral no presenta zonas anómalas con basta representatividad por lo que su mayor concentración se muestra entre los rangos permisibles en los que

presenta un cut-off el cual permite un mejor aprovechamiento industrial rango por cut-off para el Ni (0.9-1.7). El Fe medido presenta un distribución zonal con un rango que varia entre los 34-50 % en la zona mineral con un comportamiento normal en estos tipos de yacimientos. El Co se comporta de forma peculiar, la distribución del mismo muestra errores por la alta distribución el cual tiene una mayor concentración entre los rango (0-0.3 %).

3.5.2 Modelo de bloque

Consiste en una serie de bloques regulares, apilados en tres dimensiones para abarcar un volumen en el espacio. El tamaño del bloque debe reflejar el tamaño de la unidad de selección minera a ser usada, además debe ser lo suficientemente pequeña para permitir la definición exacta de la forma del cuerpo. Este modelo es conveniente para yacimientos tridimensionales con mineralización diseminada y masiva. Ver Figura N° 3.

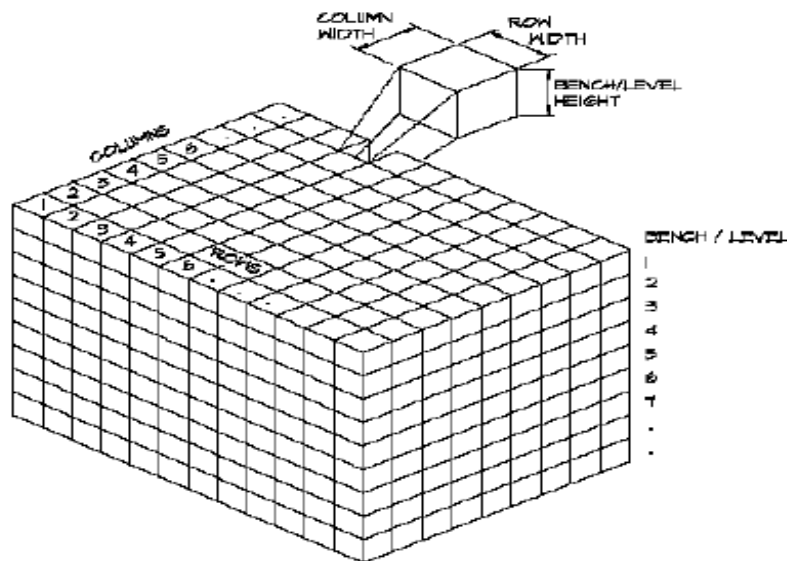
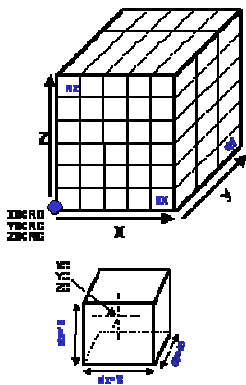


Figura N° 3. Modelo de bloques en la que se observan las columnas, las filas y los niveles.



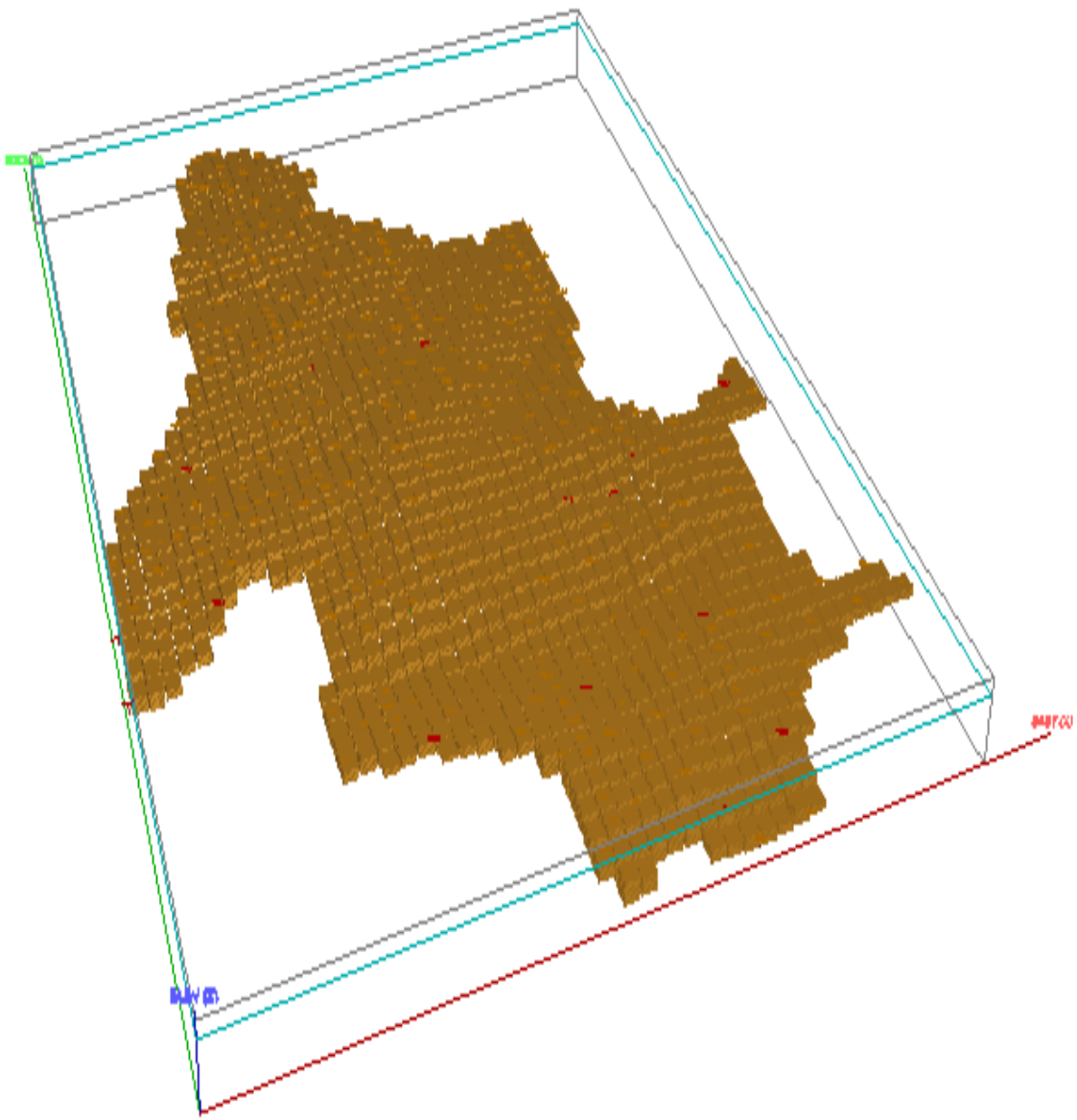
Los modelos sólidos creados pueden ser cortados por planos de cualquier orientación y espaciamiento, esto nos permite corroborar nuestras interpretaciones en otra dirección cualquiera.

Como toda la información en los softwares de modelación y estimación de recursos es manejada en el espacio no es necesario realizar la interpretación de los límites a partir de perfiles y planos, esta puede hacerse directamente en el espacio 3D.

3.5.3 Modelo de recursos

Una vez que se tiene el modelo geológico entonces se precisa conocer la variación espacial de las distintas variables de interés, y además de determinar los recursos, ley media y cantidad de materia prima en el yacimiento.

El software empleado ofrece dos métodos para la confección del modelo de recursos: modelo de bloque y modelo de capas. La selección del método que se debe emplear en cada caso depende de la morfología y la distribución de la ley de los cuerpos minerales.



Modelo de recursos 3D generado (33.33x33.33x3m)

12 0.98 47.40 0.05	12 1.07 47.42 0.04	345 0.96 46.94 0.07	345 0.89 43.76 0.06	12 1.02 50.72 0.03	12 0.94 49.95 0.04	12 0.77 48.57 0.05	12 0.78 48.09 0.04	
12 0.84 46.57 0.04	12 0.47 45.41 0.02	345 1.00 48.31 0.05	345 0.95 47.46 0.06	12 0.97 49.77 0.05	12 0.95 48.79 0.04	345 0.97 41.49 0.04	345 1.01 41.44 0.04	
12 0.90 46.63 0.06	12 0.87 44.73 0.02	345 1.04 48.02 0.06	345 1.01 45.70 0.06	12 1.00 45.06 0.07	345 1.04 40.13 0.05	345 1.25 41.31 0.05	345 1.05 42.07 0.06	345 1.14 41.27 0.06
345 1.13 46.53 0.10	345 1.04 44.66 0.08	345 1.25 44.99 0.09	345 1.31 39.37 0.08	345 1.18 32.84 0.06	345 1.21 38.72 0.07	345 1.31 39.34 0.09	345 1.40 40.12 0.09	345 1.20 40.90 0.06
345 1.23 47.35 0.13	345 1.17 47.42 0.09	345 1.71 41.73 0.14	345 1.85 40.53 0.13	345 1.56 38.49 0.09	345 1.43 38.20 0.10	345 1.46 38.61 0.10	345 1.48 38.80 0.11	345 1.33 39.37 0.06
345 1.35 47.34 0.17	345 1.38 47.80 0.21	345 1.93 41.54 0.17	345 2.10 41.39 0.19	345 1.82 42.99 0.21	345 1.62 39.28 0.10	345 1.54 38.98 0.11	345 1.49 39.97 0.11	345 1.41 40.48 0.07

Resultado esquemático estimación del los bloques

3.5.4 Modelo de capas

Es muy similar al modelo de bloques, este consiste en una serie de bloques que tienen tamaños regulares en dos dimensiones mientras la tercera dimensión de cada bloque es variable y depende de la potencia de los cuerpos minerales.

El modelo de capas se emplea en depósitos tabulares donde la dimensión transversal (vertical) del cuerpo es pequeña comparado a sus magnitudes laterales (horizontales) y la variación de la ley para el depósito es pequeña. En la figura se muestra un esquema de este método. Ver Figura N° 4.

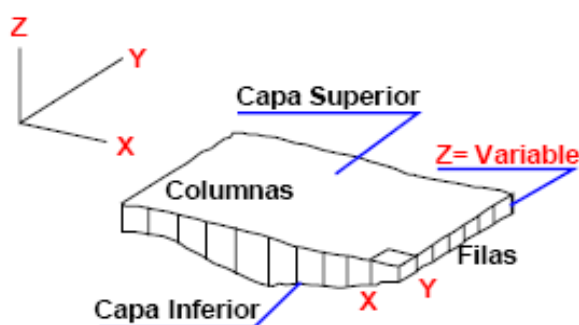


Figura N° 4. Modelo de capa

3.6 CÁLCULO DE RECURSOS.

El yacimiento *ha sido modelado de forma correcta y precisa* por tanto existe un modelo de recursos como resultado final de la modelación, formado por pequeñas unidades (bloque) con forma y volumen determinados según las necesidades de la minería para la planificación, con una precisión permisible a un $\pm$ del valor que le dirá al planificador de la minería: la cantidad de nocivos, de Fe, Ni y Co.

El grado de conocimiento de esta variabilidad de las menas in situ, mantienen la calidad de la materia prima minera y es necesario realizar una homogenización de la misma en una planta beneficiadora a partir de los flujos de carga existentes en la mina. Para esto es necesario mantener un determinado número de excavadoras, garantizando de esta manera la estabilidad de la calidad del mineral.

El calculo de los recursos se realizo haciendo una dicretizacion validando cada una de las intercalaciones con potencia inferior a los 2 m lo que no se toma como mineral según la ley minera. Existen zonas con un gran número de intercalaciones lo que imposibilita de forma exacta y precisa realizar el cálculo de recursos, tales pozos se desechan los cuales se clasifican como pozos estériles.

El modelo de recursos se llevo a cabo con la estimación que condiciona y de la cual depende el desarrollo del modelo de bloques, el que realiza un cálculo teniendo presente la información geológica, se le condicionaron atributos tales como (1-0ICP y 2-0ISP) por cuanto el sistema realiza una caracterización donde se le asigna la relación de ambos códigos de manera tal que conforme el sólido del escombros desde el piso hasta el techo tomando como valor para el escombros el código (12), de forma similar se realiza para el calculo del mineral con la diferencia de la asignación de los valores (3-0EF, 4-0EI Y 5-SD) de modo que cada bloque calculara la cantidad de escombros una vez separado de la capa mineral aplicando el modelo geométrico. El modelo de recursos se realizo tomando como referencia la red cuadrada de $33.33,5 \cdot 33.33,5 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}$, por cuanto esta red es múltiplo de las demás redes de exploración la que es optima para realizar la explotación del mineral, también se ajusto la altura de cada bloque a tres metros para no inferir la ley minera.

Se realizaron tres cálculos diferentes; uno por cut-off entre 0.1-0.6—1.5 %, con el cual se define para cada cut-off en % de mineral a extraer desde un rango mínimo de 0.1% a un rango máximo de 1.5 % de Ni; un segundo calculo de recurso del acumulado, el cual va sumando cada uno de los valores por cut-off con el objetivo principal de conformar el grafico de Curva de la Ley-Tonelaje para de manera grafica tener una visión mas acertada del comportamiento del mineral respecto a la Ley-tonelaje, por lo que se realizo para comparar ambos procedimientos y así verificar la precisión del calculo realizado por cut-off; un tercer calculo se hizo con el objetivo de precisar la cantidad de mineral que aparece por banco; es decir, este método muestra la cantidad de mineral que existe en cada intervalo de profundidad cada tres metros. A continuación se les muestran los cálculos de recursos:

3.7 CÁLCULO DE RECURSOS POR CUT-OFF (0.1-0.6) → 1.5 %.

Corte-fuera de	Volumen (m3)	PV (t/m)	Tonelaje	% Ni	% Fe	% Co
Ni-1.5	486797.18	1.08	527218.81	1.65	41.27	0.133
Ni-1.4	455990.60	1.09	494819.42	1.45	44.13	0.129
Ni-1.3	1025680.43	1.09	1114829.29	1.34	44.45	0.124
Ni-1.2	1766495.77	1.09	1921442.80	1.25	44.99	0.125
Ni-1.1	1918274.15	1.09	2087393.25	1.15	45.21	0.131
Ni-1.0	2149257.63	1.09	2339927.23	1.05	44.84	0.126
Ni-0.9	1653291.82	1.09	1801801.83	0.96	45.02	0.128
Ni-0.8	715438.83	1.09	780106.97	0.85	43.82	0.116
Ni-0.7	399822.15	1.09	436094.13	0.76	41.85	0.098
Ni-0.6	184781.15	1.09	201493.64	0.66	39.13	0.092
Ni-0.1	97616.23	1.09	106393.41	0.50	38.47	0.055
Total	10853445.94	1.09	11811520.78	1.12	44.40	0.124

3.8 CÁLCULO DE RECURSOS DEL ACUMULADO.

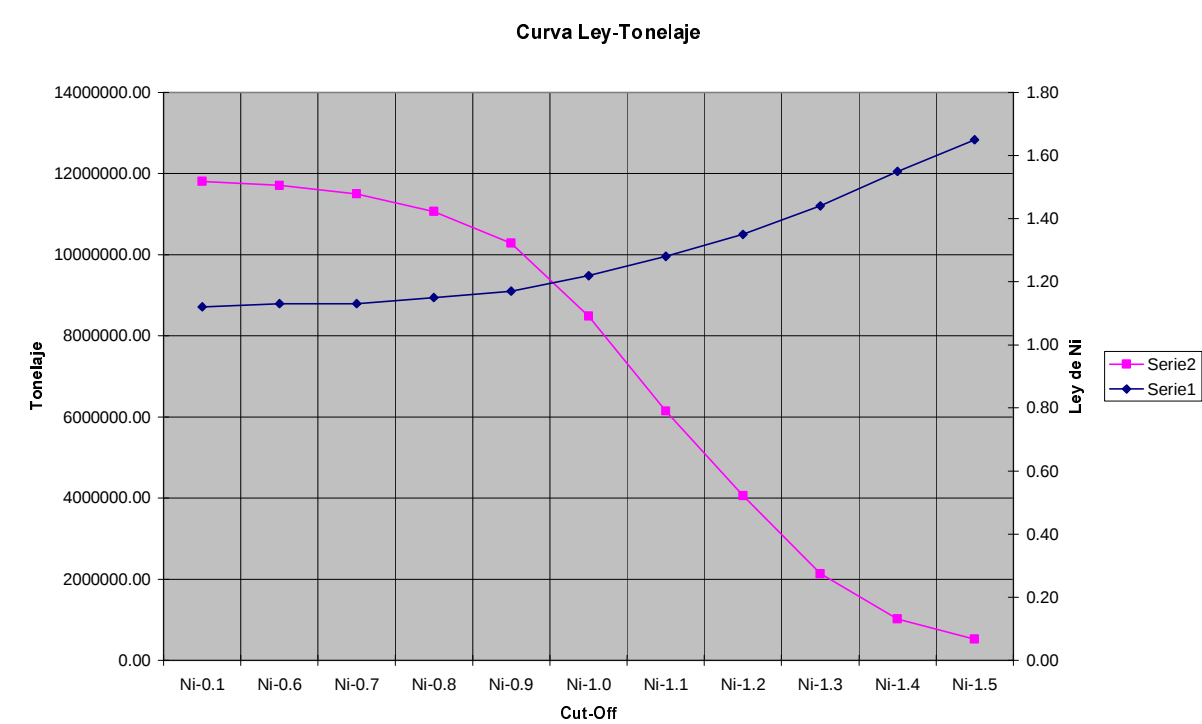
Corte-fuera de	Volumen (m3)	PV (t/m)	Tonelaje	% Ni	% Fe	% Co
Ni-1.5	486797.18	1.08	527218.81	1.65	41.27	0.133
Ni-1.4	942787.78	1.08	1022038.23	1.55	42.65	0.131
Ni-1.3	1968468.21	1.09	2136867.52	1.44	43.59	0.128
Ni-1.2	3734963.98	1.09	4058310.32	1.35	44.25	0.126
Ni-1.1	5653238.13	1.09	6145703.57	1.28	44.58	0.128
Ni-1.0	7802495.76	1.09	8485630.80	1.22	44.65	0.127
Ni-0.9	9455787.58	1.09	10287432.63	1.17	44.72	0.127
Ni-0.8	10171226.41	1.09	11067539.61	1.15	44.65	0.127
Ni-0.7	10571048.57	1.09	11503633.73	1.13	44.55	0.126
Ni-0.6	10755829.71	1.09	11705127.37	1.13	44.45	0.125
Ni-0.1	10853445.94	1.09	11811520.78	1.12	44.40	0.124
Total	10853445.94	1.09	11811520.78	1.12	44.40	0.124

3.9 CÁLCULO POR BANCOS DE RECURSOS.

Banco	Volumen (m3)	PV (t/m)	Tonelaje	% Ni	% Fe	% Co
Banco-318	419.77	1.09	458.39	0.87	48.38	0.112
Banco-315	12254.36	1.09	13381.76	0.89	49.04	0.122
Banco-312	38314.55	1.09	41839.49	0.93	48.71	0.189
Banco-309	81172.28	1.09	88575.68	0.99	47.81	0.109
Banco-306	123384.33	1.09	134634.51	1.10	47.40	0.101
Banco-303	161464.21	1.09	176113.89	1.13	46.38	0.114
Banco-300	189582.94	1.09	206817.05	1.12	44.35	0.129
Banco-297	217429.18	1.09	237085.99	1.07	45.27	0.130
Banco-294	224842.90	1.09	245157.84	1.12	43.43	0.129
Banco-291	232640.09	1.09	253511.41	1.15	44.11	0.118
Banco-288	297242.02	1.09	323944.25	1.09	45.61	0.099
Banco-285	418168.57	1.09	455884.12	1.05	44.58	0.115
Banco-282	516282.74	1.09	562675.35	1.06	43.92	0.128
Banco-279	610829.16	1.09	665329.03	1.08	44.84	0.103
Banco-276	701991.66	1.09	764834.14	1.09	43.53	0.100
Banco-273	837083.35	1.09	911555.80	1.13	44.35	0.103
Banco-270	928687.47	1.09	1010783.53	1.14	44.97	0.118
Banco-267	945553.98	1.09	1028912.01	1.14	44.85	0.138
Banco-264	919809.35	1.09	1000215.34	1.19	44.52	0.135
Banco-261	863420.35	1.09	938282.94	1.16	43.89	0.133
Banco-258	709165.85	1.09	770338.96	1.14	43.81	0.141
Banco-255	582510.26	1.09	632700.52	1.12	44.16	0.158
Banco-252	489947.55	1.09	532081.62	1.11	43.15	0.144
Banco-249	334385.27	1.09	363321.43	1.04	43.07	0.127
Banco-246	182509.34	1.09	198032.87	1.15	44.71	0.115
Banco-243	82613.80	1.09	90019.92	1.20	45.97	0.093
Banco-240	62007.16	1.09	67539.47	1.14	45.70	0.089
Banco-237	44546.99	1.09	48507.12	1.21	46.03	0.118
Banco-234	31324.62	1.09	34015.52	1.31	40.09	0.114
Banco-231	12511.49	1.08	13512.41	1.29	34.80	0.085

Banco-228	1350.38	1.08	1458.41	1.56	31.40	0.054
Total	10853445.94	1.09	11811520.78	1.12	44.40	0.124

3.10 CURVA LEY-TONELAJE.



Curva Ley-Tonelaje

Conclusiones

Dada a la no existencia del modelo de recursos del Sector III del Yacimiento Cantarana del Municipio Moa, Provincia Holguín y una vez terminado el presente trabajo para de este modo obtener el modelo de recursos a partir de los datos obtenidos en las redes de exploración cuadradas de lado igual a 100m, 50m y 33,33m ha sido posible establecer mediante el software GEMCOM un modelo de recursos por bloques que contenga la distribución espacial de los elementos Ni, Fe y Co dados en porcentos. Luego de haber realizado la interpretación geólogo-geoestadística de cada uno de los datos, así como de los diferentes diagramas y gráficos representados, se llegó a la siguiente conclusión:

- ✓ Modelo topográfico; en el cual se determinó el área de estudio del sector III-1 del cual se tuvo una mejor visión m la realización de los perfiles topográficos representativo de la corteza con dirección 213750N, por lo que se conformó el modelo topográfico en 3 dimensiones con los pozos incluidos desde la boca de los pozos.
- ✓ Se crearon diferentes de varogramas para todas las poblaciones, donde se conformó el:
 - Variograma general para el Ni con los códigos representativos para los OEF-3; OEI-4; SD-5.
 - Variograma vertical para el Ni.
 - Variograma general para el Fe.
 - Variograma vertical para el Fe.
- ✓ Modelo Geológico; ya obtenido el modelo topográfico se creó el fondo de la corteza dados por lo datos obtenidos por la profundidad de los pozos, por lo que se formó un sólido entre dos superficies (entre la corteza y el fondo de los pozos). Se conformó el techo del mineral codificando al mismo como variables discretas del primer intercepto (345), una vez seguido este paso se creó el fondo del mineral empleando el último intercepto por lo que se procedió a crear al sólido mineral conformando el escombros entre la superficie del modelo y el techo del mineral al que se codificó por: OICP-1 y OISP-2.
- ✓ Modelo de bloques; es una representación física, en términos de bases de datos que caracterizan una serie de bloques o celdas cuboidales orientadas en los ejes X, Y, Z del sistema cartesiano, regulares en tres dimensiones acopladas en el espacio definido por un volumen determinado, además contiene información de las variables estimadas a las que se le asignan los atributos a estimar tal como el escombros-12 y el mineral-345 las que se transforman en variables discretas.
- ✓ Modelos de Leyes; para la conformación de dicho modelo se emplearon diferentes técnicas de estimación. Donde:
 - Para el Ni se utilizó el método de estimación por Kriging Ordinario.
 - Para el escombros se empleó el método de estimación por Inverso de la Distancia al cuadrado.
 - El Fe se realizó por el método de estimación por Inverso de la Distancia al cuadrado.
- ✓ Cálculo de recurso; se realizó por el cut-off de (0.1-0.6) 1.5 %; por acumulado y por bancos de recursos que facilita la Curva de la ley de Tonelaje.
- ✓ Curva de la Ley de Tonelaje;

- ✓ Validación Cruzada; es la que permite visualizar gráficamente la forma en que se comparta la distribución de los diferentes tipos de elementos los que se estiman en % y en recursos medidos.

Recomendaciones

Se recomienda para trabajos posteriores los modelos que se obtienen mediante el llamado Análisis Variográfico (modelos geoestadísticos), incluyen la búsqueda del variograma omnidireccional experimental y el ajuste teórico de los diferentes tipos de modelos. Por lo que se hace referencia a una confección detallada de los diferentes tipos de modelos enfatizando dicha interpretación de los resultados de modo que se establezca la comparación con cualquier otro software de punta en el mundo:

1. El modelo geólogo-genético

En su esencia recoge toda la información geológica relacionada contra el objeto de yacimiento del estudio, tanto del experimentales del datos, como datos inferidos por métodos analógicos, ej. Proceso del geológica de la evolución del determinada de zona de una, reconstrucción del geológicos de sucesos de los un partir del estratigráficos del datos, etc.

Algunos autores subdividen éste modelo en descriptivo el genético de y, aunque esta concepción fue planteada contra las multas de la prospección, adaptamos de la de nosotros un etapas de las de todas del geológica de investigación de la.

2. Subalterno-modelo el descriptivo

Los Este constituye la basan del sistemática de organización de la de la información del la el uno sobrio el grupos de o del yacimientos el y permite el agrupamiento del los mismos en diferentes categorías taxonómicas, sobretudo durante la etapa de la prospección.

3. Modelo Geométrico

Este tiene como objetivo separar el yacimiento del rocas del las de la caja y un su vez subdividir el yacimientos del forma tal que los límites espaciales del cada subzona constituyan soportes donde las variables regionalizadas caractericen poblaciones estadísticamente regulares, pecado o contra el posible de geológica de interpretación. Los límites también pueden tener un carácter eminentemente técnico, económico, ecológico, o legal de la algún otro tipo que facilite la ejecución del proyecto minero en cuestión.

4. Modelo Hidrogeológico

Caracteriza el movimiento del flujo del las aguas subterráneas del yacimiento, así como su régimen el particularidades de y de la los diferentes complejos acuíferos presentes en la zona.

5. Económico de Modelo

Caracteriza los parámetros económicos del yacimiento del espacial de la forma, para cada bloque del modelo matemático el o para cada campo del modelo geométrico. Ejemplo de Un del es de parámetros de estos: el el costo minero por tipo de la roca, entre en otros. Utilización de La del este modelo es esencial para realizar la optimización económica de la minería del la.

6. Modelo de la densidad

Caracteriza la densidad del las rocas en el espacio, se emplea esencialmente para el cálculo del reservas la y para la planificación de la la minería en dependencia de la calidad del mineral.

7. Modelo de la ley del mineral

Caracteriza la distribución espacial de la ley del mineral, es el más importante del modelos de los de todos la y la columna vertebral de la planificación del la de la minería del la.

8. Modelo de reservas

Caracteriza los recursos y un partir de los él se calculan las reservas sitios el globales de y, yacimiento del del, el su ejecución depende del modelo y anterior del numero de gran de un del técnicos del parámetros el económicos de y, es de la ejecución del difícil el y se considera uno de los finales de productos de los del la modelación del yacimiento.

9. Modelo Estadístico

Caracteriza la estructura la y la variabilidad del los datos en el espacio, así como la continuidad, estadística de la distribución, recuerdos, etc., se emplea en la obtención del los dos modelos anteriormente mencionados el y en la planificación minera, para simular la mezcla óptima de la prima de materia de la el y el esquema más sostenible mineral del flujos del los de la carga.

Bibliografía

Belete Fuentes, Orlando, 1999: "Vías para el perfeccionamiento del cálculo de volumen de mineral extraído en los yacimientos lateríticos cubanos". Departamento de Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Tesis Doctoral. 103 páginas.

Bernal Hernández, S., 1994a: "Determinación de la tendencia de la variabilidad de la calidad de la mena en los bloques de extracción del yacimiento laterítico de Moa". Revista Minería y Geología, No 1, Moa, 1994, páginas 43-46.

Bernal Hernández, S., 1994b: "La formación de la calidad de la mena en la planificación operativa de los trabajos mineros en la cantera Moa". Revista Minería y Geología, No 1, Moa, 1994, páginas 47-49.

Bernal Hernández, S. y Elena Cardero Cardero, 1994: "Determinación de la componente casual de la variabilidad de la mena en los bloques de extracción del yacimiento laterítico de Moa". Revista Minería y Geología, No 2, Moa, 1994, páginas 51-54.

Bernal Hernández, S., Elena Cardero Cardero, Aristides A. Legrá Lobaina, Rafael Trujillo Codorniú, 1996: "Elaboración de la teoría y de la tecnología del minado que eleve la homogeneidad de la materia prima laterítica suministrada al proceso metalúrgico de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Etapas 01 y 02: Mejoramiento de la ley de mineral abastecido al proceso". Centro de Investigaciones de la Laterita, Moa, Informe Técnico. 67 páginas.

Bleines, C., J. Deraisme, F. Geffroy, S. Parseval, F. Rambert, D. Renard, Y. Touffait (2001) - ISATIS Software Manual. Geovariance and Ecole des Mines de Paris. Paris, January 2001, 531 p.

Chen, Yongliang and Xiguo Jiao (2001) - Semivariogram fitting with linear programming. Computers & Geosciences, v. 27, Issue 1, February 2001, 71-76 p.

Clark, Isobel (1977) - Practical Geostatistics. Geostokos Limited, United Kingdom. Digital version of <http://uk.geocities.com/drisobelclark/PG1979>, 119 p.

Casarreal Valdés, Guillermo, Orestes Díaz Valdés, Wilman M. Oliva Márquez, 1999: "El Modelo Digital del Terreno y el uso del criterio geomorfológico para la búsqueda de yacimientos minerales". Revista Geología y Minería, Número 3, Volumen 17 del 2000, páginas 12-15.

Casarreal Valdés, Guillermo, Orestes Díaz Valdés, Wilman M. Oliva Márquez, 2001: "El Modelo Digital del Terreno y el uso del criterio geomorfológico para la búsqueda de yacimientos minerales". Sección Geomática en las Memorias del IV Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2001.

Cuador Gil, José Quintín y Arelys Quintero Silverio, 1999: "Análisis estructural: punto de partida de todo estudio geoestadístico". Revista Geología y Minería, Número 1, Volumen 16 del 1999, páginas 16-22.

Cuador Gil, José Quintín y Arelys Quintero Silverio, 2001: "Simulación condicional de variables regionalizadas y su aplicación al comportamiento de la porosidad efectiva en un yacimiento fracturado-poroso". Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIV del 2001, páginas 19-27.

Cuador Gil, José Quintín, Arelys Quintero Silverio, Edmidio Estévez Cruz, 2000: "La simulación condicional en geoestadística". Revista Geología y Minería, Número 1, Volumen 17 del 2000, páginas 47-50.

Cuador Gil, José Quintín, 2002: "Estudios de Estimación y Simulación Geoestadística para la Caracterización de Parámetros Geólogo - Industriales en el Yacimiento Laterítico Punta Gorda". Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saiz Montes de Oca". Tesis Doctoral. 108 páginas.

Cuador Gil, José Quintín, Estévez Cruz, Elmidio y Lavaut Copa, Waldo, 2003a: "Definición de redes racionales de exploración en yacimientos lateríticos usando procedimientos conjuntos de estimación y simulación geoestadística". Memorias del V Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2003.

Cuador Gil, José Quintín, Estévez Cruz, Elmidio y Lavaut Copa, Waldo, 2003b: "Propuesta para la determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos". Memorias del V Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2003.

David, Michel, 1977: "Geostatistical Ore Reserves Estimation". Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1977, 364 p.

De Dios Leyva, Dictinio, 2001: "Particularidades de la distribución espacial de las intercalaciones no industriales en el Sector Central del Yacimiento Punta Gorda". Departamento de Geología, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Tesis de Maestría. 130 páginas.

Deutsch, Clayton V. (1996) - Correcting for negative weights in ordinary kriging. Computers & Geosciences, v. 22, Issue 7, August 1996. 765-773 p.

Deutsch, Clayton V. and André G. Journel (1998) - GSLIB: Geoestatistical software library and User's Guide. Oxford University Press, New York, 1998, 369 p.

Diehl, P y David, M. (1982) - Classification of Ore reserve/resources based on Geostatistical Methods. Bulletin CIM, February 1982. 1-10 p..

Estévez Cruz, Elmidio, 2000: "3d orebody modelling and resource estimation of the Jucaro Deposit, Pinar del Rio, Cuba". Revista Geología y Minería, Número 2, Volumen 17 del 2000, páginas 27-33.

Estévez Cruz, Elmidio y José Quintín Cuador Gil (2003) - El kriging indicador y el control de la ley en el yacimiento Oro Castellano. Memorias del V Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2003.

Estévez Cruz, Elmidio y José Quintín Cuador Gil, 2001: "Comparación de técnicas de estimación del contenido, Oro Castellano un caso de estudio.". Sección Geología de Yacimientos Minerales en las Memorias del IV Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2001.

Estévez Cruz, Elmidio y J. Q. Cuador Gil, 2003a: "Yacimiento Oro Castellano: Evaluación y comparación de técnicas de estimación espacial". Revista Geología y Minería, Número 1, Volumen 19 del 2003, en prensa.

Estévez Cruz, Elmidio y José Quintín Cuador Gil, 2003b: "El kriging indicador y el control de la ley en el yacimiento Oro Castellano". Memorias del V Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2003.

García Guerra, Pedro Alfonso (1988) - Geoestadística Operacional. Dpto. Nacional da Produção Mineral, Ministério das Minas e Energia, República Federativa de Brasil, Brasília DF, 1988. 145 p.

Golden Software, Inc (1999) - Surfer® Version 7, User Manual. USA, Copyright © 1999.

Hart, David and Albert J. Rudman (1997) - Least-squares fit of an ellipse to anisotropic polar data: application to azimuthal resistivity surveys in Karst regions. Computers & Geosciences, v. 23, Issue 2, March 1997, 189-194 p.

Jian, Xiaodong, Ricardo A. Olea and Yu Yun-Sheng (1996) - Semivariogram modeling by weighted least squares. Computers & Geosciences, v. 22, Issue 4, May 1996, 387-397 p.

Journel, A.G. and Huijbregts CH. J. (1978) - Mining Geostatistics. Academic Press, London, 600p.

Kasuo Yamamoto, Jorge (2000) - An Alternative Measure of the Reliability of Ordinary Kriging Estimates. *Mathematical Geology*, v. 32, No 4, 2000, 489-509 p.

Hernández Díaz, Rebeca, José Quintin Cuador Gil, Arsenio González Martínez, Emilio Romero Macías, Robert Ramírez Hernández, 1999: "Estudio del comportamiento de la continuidad espacial del quimismo en el acuífero cársico costero de la Península de Guanahacabibes". *Revista Geología y Minería*, Número 1, Volumen 16 del 1999, páginas 23-26.

Legrá Lobaina, Aristides A. (1999) - Metodología para el Pronóstico, Planificación y Control Integral de la Minería en Yacimientos Lateríticos. ISMM, Moa, Cuba, Tesis Doctoral, 187 p.

Legrá Lobaina, Aristides A., Ramón G. Polanco Almanza, Juan Miguel Miranda Domínguez, 1999, "Propuesta para el establecimiento de la masa volumétrica en los yacimientos lateríticos de Cuba", *Revista Minería y Geología*, Vol. XVI, No. 2, páginas 77-81.

Legrá Lobaina, Aristides A. (2003) - Software Tierra, Versión 2.0. Cuba, Copyright © 2003.

Mallet J.L. (2002) – Geomodeling. Applied Geostatistics Series. Academic Press, London, 624 p.

Matheron, G. (1963) – Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, 1246-66.

Matheron, G. (1971) – The Theory of Regionalized Variables and its Applications. Cahier No 5, Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 211 p.

Pannatier, Yvan (1994) - VarioWin 2.1. Phd Project. University of Lausanne, Lausanne, Switzerland.

Pardo-Igúzquiza, Eulogio and Peter A. Dowd (2001) - VARIOG2D: a computer program for estimating the semi-variogram and its uncertainty. Computers & Geosciences, v. 27, Issue 5, June 2001, 549-561 p.

García Guerra, Pedro Alfonso, 1988: "Geoestadística Operacional". Departamento Nacional de Producción Mineral, Ministerio de Minas y Energía, República Federativa de Brasil, Brasilia DF, 1988. 145 páginas.

Quintero Silverio, Arelys, Robert Ramírez, Elmidio Estévez Cruz, 1998: "Métodos Geoestadísticos aplicados al análisis de variabilidad de algunos parámetros del sector central del yacimiento Varadero". Memorias del Evento Geología y Minería 98, Tomo II, Sociedad Cubana de Geología, La Habana, 1998, páginas 179-181.

Quintero Silverio, Arelys, J. Q. Cuador Gil, E. Estévez Cruz, 2000: "Simulación no condicional, método de las Bandas Rotantes". Revista Geología y Minería, Número 1, Volumen 17 del 2000, páginas 51-54.

Quintero Silverio, A. y J. Q. Cuador Gil, 2000: "Análisis Estructural de la Porosidad Efectiva en el Horizonte Tobas Fina del Yacimiento Pina, Ciego de Avila". Revista Minería y Geología. Vol. XVII, Números. 3-4, páginas 8-11.

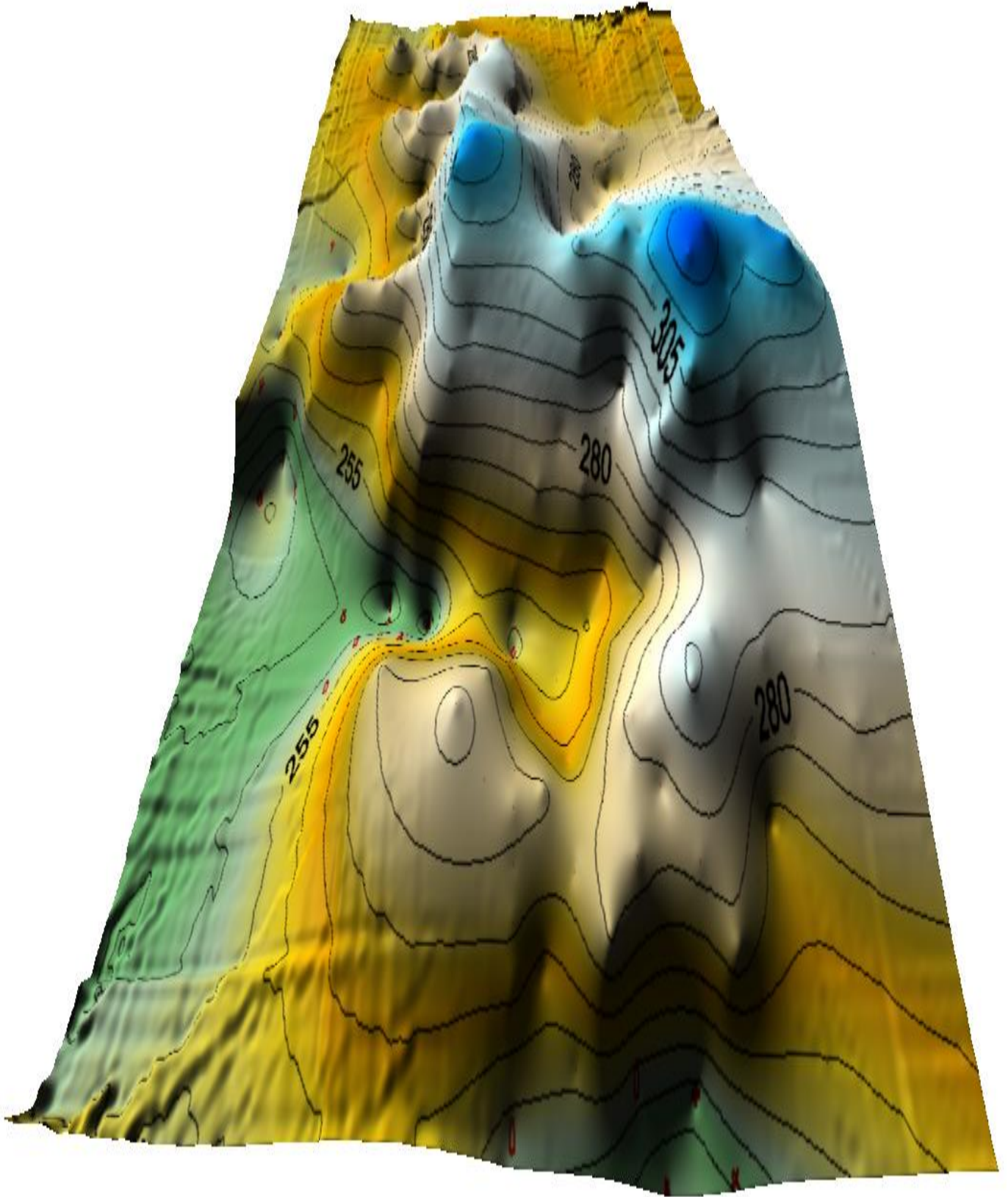
Rodriguez Ruíz, Héctor J., 1990: "Premisas geológicas para la automatización integral de los trabajos de prospección en yacimientos niquelíferos de interperismo". Departamento de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Tesis Doctoral. 124 páginas.

Toirac Proenza, Raidel, 2003: "Modelo tridimensional y reestimación de recursos (arena para la construcción) al oeste de Guane". Memorias del V Congreso de Geología y Minería. Edición Digital de la Sociedad Cubana de Geología. Ciudad de La Habana, Marzo, 2003.

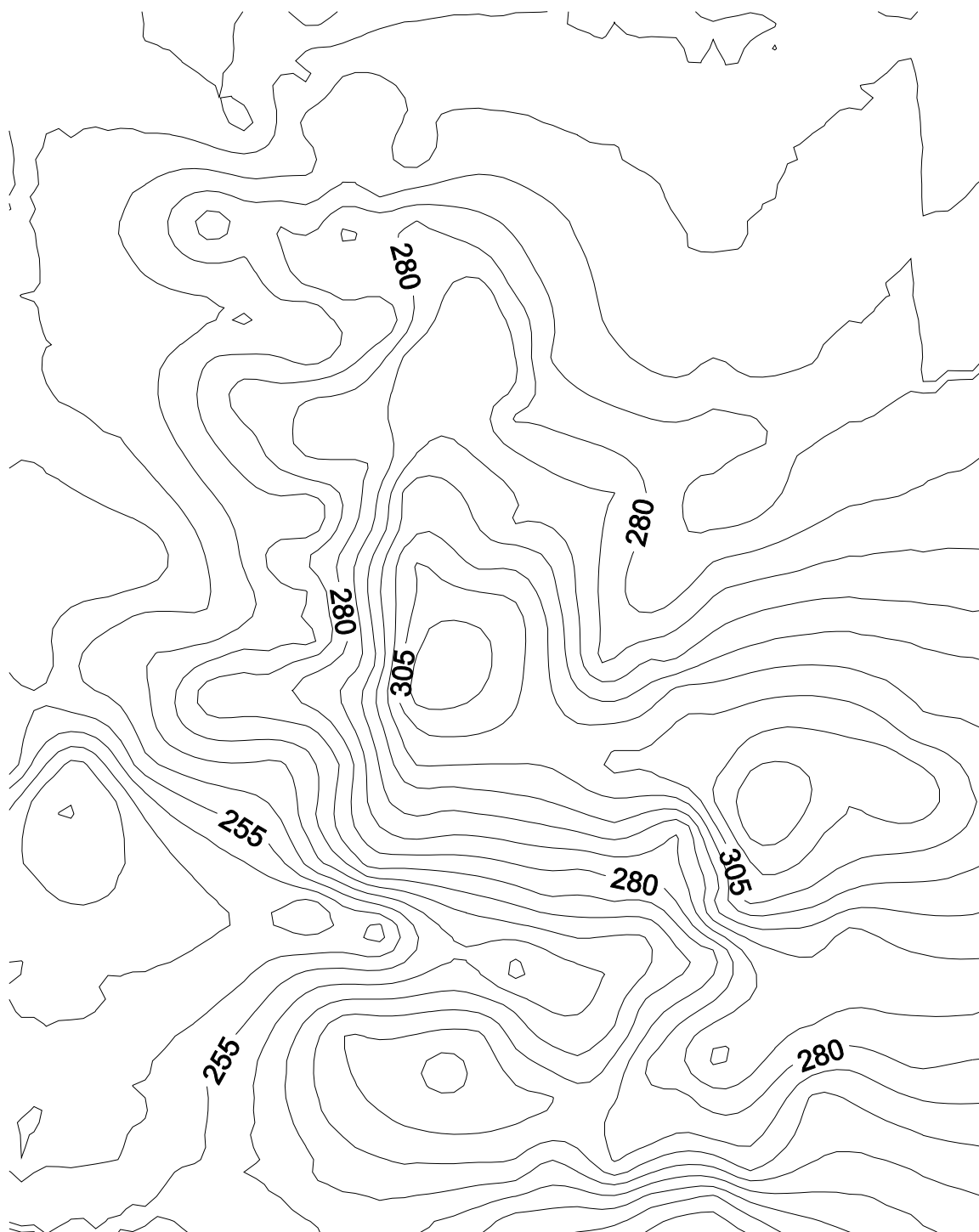
Vera Sardiñas, León Ortelio, 2001: "Procedimiento para la Determinación de las Redes Racionales de Exploración de los Yacimientos Lateríticos de Níquel y Cobalto en la Región de Moa". Departamento de Geología, ISMM, Moa, Cuba. Tesis Doctoral. 147 páginas.

Vera Sardiñas, León O. y Arístides A. Legrá Lobaina (2001) - Racionalización de redes en la exploración de los yacimientos lateríticos cubanos. Revista Minería y Geología, v. 18, #1 del 2001, Cuba, 85-91 p.

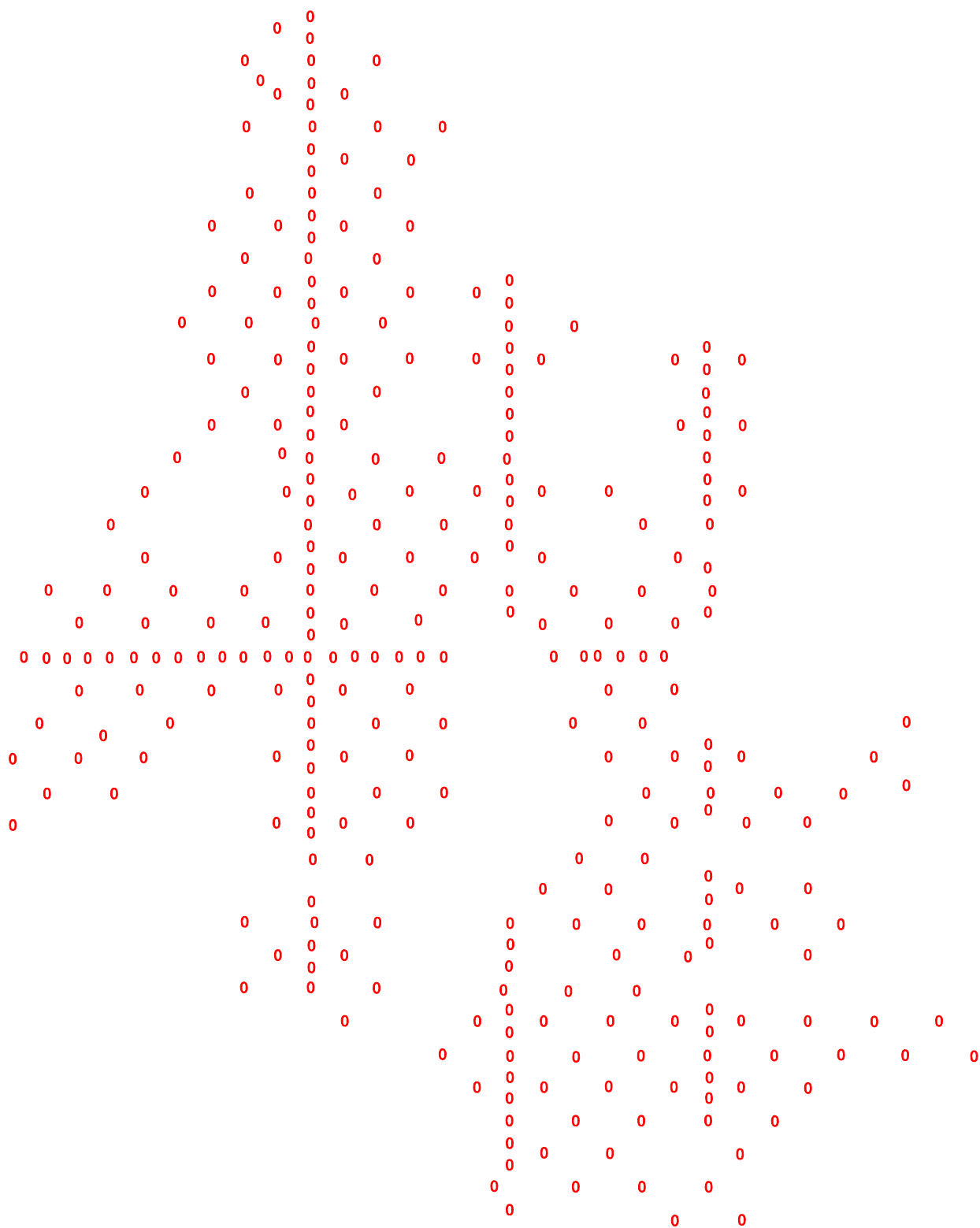
Anexos graficos



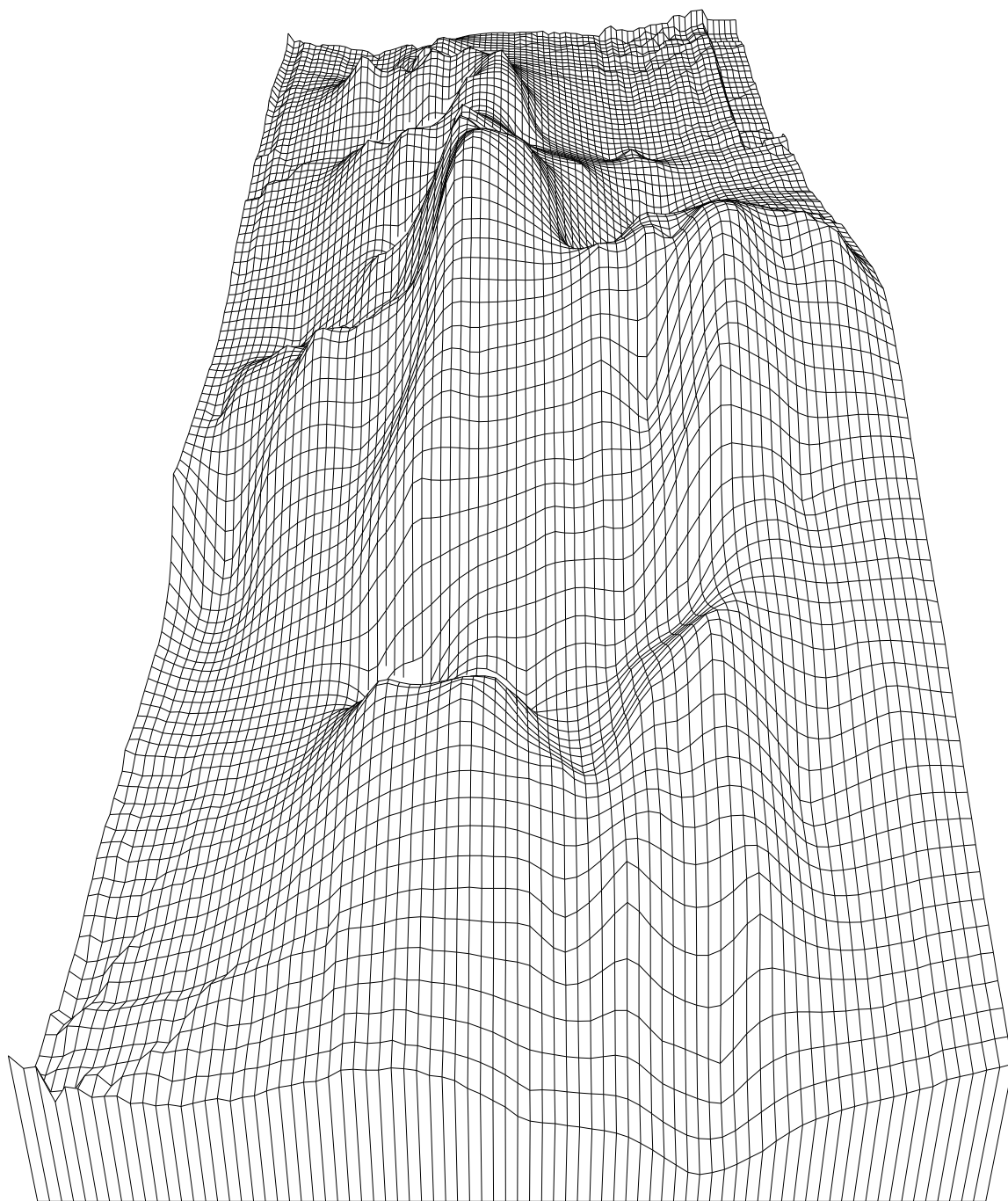
Mapa en 3 dimensiones con un ambiente de Surface.



Mapa de contorno.



Mapa de puntos.



Mapa de mallas.