

**ESTUDIOS DE ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN
GEOESTADÍSTICA PARA LA CARACTERIZACIÓN
DE PARÁMETROS GEÓLOGO - INDUSTRIALES
EN EL YACIMIENTO LATERÍTICO PUNTA GORDA**

(RESUMEN DE TESIS DOCTORAL / 2002)

José Quintín CUADOR-GIL / cuador@geo.upr.edu.cu

Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río

INTRODUCCIÓN

La revolución científico técnica en la geología y la minería, que ha abarcado durante décadas a todo el mundo, se manifiesta en un aumento brusco del ritmo de extracción y utilización de la materia prima mineral. Por este motivo los trabajos de búsqueda, exploración y evaluación geológica-económica de yacimientos minerales útiles, constituye una de las tareas más importantes en las empresas y compañías geo-mineras. En esta actividad el cálculo de reservas minerales útiles "*in situ*" juega un papel fundamental.

La estimación de reservas es una operación de alta responsabilidad que determina en gran medida el valor industrial de un yacimiento mineral. Este cálculo puede ser realizado por métodos clásicos o modernos: En los primeros se utilizan fundamentalmente valores medios o medias ponderadas para la estimación de bloques definidos convenientemente, por lo que su uso ha estado relacionado con problemas de precisión. Además, la utilización de los métodos clásicos no se recomienda porque aún cuando permiten cuantificar las reservas a escala global, no son adecuados para la caracterización local de las reservas. En los segundos predominan los métodos geoestadísticos, los cuales consisten en el uso de técnicas de regresión, teniendo como premisa fundamental la realización de las estimaciones a partir de las características de variabilidad y correlación espacial de los datos originales. La Geoestadística es resultado de la aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, fundamentalmente los relacionados con la actividad geólogo minera. Es precisamente en esta actividad donde surge, se desarrolla y consolida en los últimos 35 años como ciencia aplicada, dando respuesta a necesidades prácticas y concretas.

La Geoestadística ha sido ampliamente utilizada internacionalmente. Se ha extendido en la actualidad a otros campos de las Ciencias Naturales que presentan problemas de estimación. En Cuba el uso de estas técnicas de estimación ha estado limitado a la incursión empírica de especialistas, tomando auge en las empresas geo-mineras y en las instituciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra en general.

La cantidad de cálculos que implica el uso de estos métodos hace imprescindible la utilización de medios automatizados para su práctica y desarrollo. En la esfera internacional existen programas informáticos profesionales que aplican estas técnicas modernas a los problemas de estimación de fenómenos naturales en el campo de las Ciencias de la Tierra, donde se destacan los referidos al modelaje de yacimientos minerales. Entre éstos se pueden citar: DATAMINE, GEMCOM, VULCAN, MICROMINE, GEOPACK, SURPAC, GEOSTAT, MICROLYNX, MINEMAP, etc., muy pocos introducidos en Cuba. Los sistemas antes mencionados implementan la aplicación de los métodos geoestadísticos de forma muy variada, ofreciendo posibilidades en algunos casos limitadas para los especialistas no entrenados en el tema, fundamentalmente en la determinación de los modelos que describen la continuidad espacial y en el uso del krigeaje como interpolador.

La actividad geólogo - minera cubana tiene en los recursos niquelíferos un renglón importante de la economía nacional, a partir de las menas lateríticas de la corteza de intemperismo, fundamentalmente en la región oriental. Estos recursos son conocidos desde hace más de 200 años, ubicándose la producción de níquel en el cuarto grupo de prioridades de la ciencia y la innovación tecnológica para el 2001-2003, establecidas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y recogidas en la Proyección Estratégica del Ministerio de Educación Superior para ese mismo período. En este renglón económico se han invertido en los últimos 5 años más de 400 MM de USD, proponiéndose actualmente como objetivos fundamentales: elevar la competencia internacional en calidad y costos, incrementar la recuperación del níquel y el cobalto contenido en el mineral a los niveles internacionales y reducción sensible de los costos energéticos. En la estimación de las reservas de níquel se han usado fundamentalmente métodos clásicos, siendo reciente la aplicación de los métodos geoestadísticos. De modo que cualquier investigación en este campo se justifica plenamente, ya que contribuye sin lugar a dudas al cumplimiento de los objetivos anteriores.

De lo expresado hasta aquí, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- El cálculo de reservas constituye una actividad de vital importancia en las empresas geólogo - mineras, que da respuesta a necesidades económicas.
- Todas las especialidades de las Ciencias de la Tierra realizan actividades que requieren de cálculos y generan problemas de estimación.
- La práctica actual en la actividad minera y en la geociencias de forma general exige de métodos modernos de estimación.
- En Cuba la práctica y desarrollo de la Geoestadística ha estado limitada a la incursión empírica de especialistas, tomando auge en la actualidad en la actividad minera y en las instituciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra.
- Todo este proceso requiere de grandes cantidades de cálculos y almacenamiento de grandes volúmenes de información, por lo que es imprescindible el uso de herramientas informáticas.
- Internacionalmente, los sistemas automatizados que utilizan técnicas modernas de estimación aplicadas al cálculo de reservas, y a los más diversos problemas de las geociencias, ofrecen posibilidades limitadas para especialistas no entrenados en el tema.
- Los contenidos de la Geoestadística no se incluyen ampliamente en los planes de estudio de las carreras de Ciencias de la Tierra.

- Los recursos niquelíferos de las menas lateríticas fundamentalmente de la región oriental de Cuba representan un renglón importante de la economía nacional.
- La estimación de las reservas de níquel en yacimientos lateríticos cubanos se ha realizado utilizando fundamentalmente métodos clásicos, siendo reciente la introducción de métodos modernos como los geoestadísticos.
- La alta variabilidad en los parámetros geólogo – industriales presentes en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, obstaculiza la aplicación de los métodos de la geoestadística lineal para la estimación de reservas a partir de la red de exploración actual.

Este trabajo de investigación parte de la necesidad de organizar y sistematizar los contenidos de la geoestadística, aplicados a la actividad geólogo - minera en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, así como proponer soluciones a la estimación de reservas debido a la alta variabilidad espacial de los parámetros geológicos- industriales en estos yacimientos. Como consecuencia de esto, lograr mayor precisión en la estimación y caracterización de sus reservas minerales. Esto es debido a que la Geoestadística no ha sido empleada cotidianamente en la estimación de reservas minerales, ni todas sus potencialidades, fundamentalmente las relacionadas con: el análisis estructural, la estimación y la simulación. Se ha comprobado la disparidad de criterios e inconsistencias metodológicas en las aplicaciones que se realizan actualmente. Por lo que se considera que abordar la base conceptual de la geoestadística, desarrollando criterios para su empleo en estos tipos de yacimientos, contribuye a elevar el conocimiento que se posee de estos recursos.

Objeto

El objeto de esta investigación son los métodos geoestadísticos aplicados a la estimación y caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos.

Problema Científico

Los métodos empleados para la estimación y caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos no permiten describir detalladamente los parámetros geólogo - industriales, no tienen en cuenta las características de variabilidad y correlación espacial, no tratan adecuadamente la alta variabilidad espacial presente en estos yacimientos y no utilizan procedimientos modernos para la integración de información que incorporen fuentes con distinto grado de conocimiento, por lo que no se adaptan a las complejidades de estos yacimientos. Por consiguiente los resultados del cálculo de recursos minerales resultan inexactos y poco detallados, lo cual repercute desfavorablemente en la explotación racional de éstos.

Hipótesis General

La elaboración y aplicación de una metodología que regule el uso de los métodos geoestadísticos en la estimación y caracterización de las reservas minerales, en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, haciendo uso de la estimación, la simulación y la integración de información, permitirá la realización de la actividad geólogo minera en estos yacimientos con una mayor precisión, aumentará el

conocimiento que actualmente se posee de estos recursos, contribuirá a dirigir este proceso en la industria del níquel de forma más eficiente e incidirá positivamente en la planificación minera. Esto garantiza indudablemente una explotación de este recurso en Cuba de forma más racional y el cumplimiento de los objetivos que se proponen en este renglón económico.

Hipótesis Específicas

- La determinación de los modelos que describen adecuadamente las características de variabilidad y correlación espacial de los contenidos de Fe, Ni y Co, garantizará una caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos con mayor precisión.
- El uso de la simulación geoestadística, permitirá proponer soluciones a los problemas relacionados con la estimación de reservas, fundamentalmente con la alta variabilidad espacial de los parámetros geólogo - industriales, al permitir proponer posibles valores reales y cambio de soporte en la exploración.
- La búsqueda de los bloques de estimación obtenidos dentro del límite de error permitido por la tecnología de la empresa niquelífera cubana, que tengan en cuenta: la unidad de selección minera, los modelos de continuidad espacial y las potencialidades que ofrece la simulación de variables regionalizadas, permitirá proponer la red racional para la determinación lo más adecuada posible de las reservas locales en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos.
- La integración de la información geológica mediante el uso de la geoestadística multivariada permitirá una caracterización de la masa volumétrica y el recálculo de las reservas de forma más precisa.

Objetivo General

Elaborar una metodología que permita la caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos a partir de la aplicación de métodos de estimación y simulación geoestadística, tomando como caso de estudio el yacimiento Punta Gorda del noreste de Holguín.

Objetivos Específicos

1. Obtener los modelos que describen las características de variabilidad y correlación espacial de los parámetros geólogo - industriales empleados en el cálculo de reservas, que garantice la estimación y la caracterización de estos recursos con mayor precisión tanto a escala global como local.
2. Buscar la red racional de exploración que garantice valores de error de estimación aceptables, en función de la unidad de selección minera a utilizar en la explotación y de las características propias de variabilidad y correlación espacial, haciendo uso conjunto de técnicas de estimación y simulación geoestadística.
3. Integrar diferentes fuentes de información en el proceso de estimación, utilizando los contenidos de Fe, Ni y Co de pozos de perforación, las

mediciones de masa volumétrica en pozos criollos y de las características de autocorrelación y correlación espacial entre éstos, para lograr un recálculo de las reservas de forma más objetiva.

4. Elaborar una metodología a partir de los resultados prácticos, para la aplicación adecuada de los métodos geoestadísticos en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, que garantice de la mejor forma posible la caracterización de los recursos minerales, incidiendo en la estimación de reservas.

Tareas

1. Revisión bibliográfica de información relacionada con la aplicación de la geoestadística, particularizando en la actividad geólogo minera, fundamentalmente en la industria del níquel. Estableciendo el marco teórico y práctico de la geoestadística.
2. Participación en eventos nacionales e internacionales con el objetivo de conocer el estado del arte de las aplicaciones geoestadísticas en la industria del níquel y en la minería de forma general en nuestro país e internacionalmente.
3. Recopilación de la información geológica, elaboración, organización y verificación de la base de datos de los parámetros geólogos industriales del yacimiento Punta Gorda, a partir de la información en formato digital obtenida en la Empresa Che Guevara.
4. Recopilar sistemas automatizados que permitan la aplicación de los métodos geoestadísticos y diseñar e implementar algoritmos para los cálculos fundamentales de la geoestadística relacionados con el análisis estructural, que permitan consecuentemente desarrollar aplicaciones informáticas futuras.
5. Definir los elementos fundamentales para la elaboración de una metodología para la aplicación de la geoestadística a la estimación y caracterización de reservas minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos, y que sea extensible a otros campos de las geociencias de forma general.
6. Procesar la información del yacimiento, a través del empleo de la metodología elaborada.
7. Visualizar los resultados obtenidos en el procesamiento.

Los métodos de investigación utilizados para el cumplimiento de las tareas son: la revisión bibliográfica, el análisis de los documentos aprobados por la Oficina Nacional de Recursos Minerales, la modelación numérica y la simulación geoestadística. Los métodos geoestadísticos empleados incluyen: el análisis exploratorio de datos, análisis estructural, estimación por Krigeaje Ordinario de bloque, métodos de integración de información como el Krigeaje con Deriva Externa y Co-Krigeaje con Variable Colocalizada y Simulación Condicional. Se utilizaron en el procesamiento los programas informáticos: Statistics for Windows (versión 5.0), Golden Software Surfer 7, Gslib90 (versión 2.905), MicroLYNX98, Microsoft Office 97, VarioWin (versión 2.2) y algoritmos implementados por el autor para la organización de la información y el desarrollo del análisis estructural.

La necesidad actual de la investigación está dada en obtener un mejor conocimiento de los recursos níquelíferos en yacimientos lateríticos ferroníquelíferos cubanos, que contribuya a la explotación adecuada de este renglón de la economía nacional.

Esta investigación contribuye al programa estratégico de la expansión de la producción de níquel. Involucra a la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, especialistas de la Empresa Geominera de Oriente y a la Universidad de Pinar del Río.

La novedad del tema es la definición e introducción de una metodología óptima para la aplicación de los métodos geoestadísticos en la estimación y caracterización de los recursos en yacimientos lateríticos ferroníquelíferos cubanos, a partir de la alta variabilidad espacial presente en los contenidos tratados en éstos, teniendo como aporte fundamental la organización y aplicación de los elementos fundamentales que proporciona la estimación y simulación geoestadística para la caracterización de estos recursos.

En resumen, con el desarrollo de este trabajo se lograron los siguientes resultados:

- Obtención de los modelos que describen la variabilidad espacial de los parámetros geólogo - mineros en algunos bloques del yacimiento Punta Gorda.
- Se demostró que la calidad de las estimaciones que se realizan no es satisfactoria debido a la alta variabilidad espacial presente en los parámetros estudiados.
- Propuesta y comprobación de la efectividad que representa la aplicación de métodos de simulación geoestadística para la caracterización de los recursos en estos yacimientos, principalmente los relacionados con el cambio de soporte en la exploración.
- Se demuestra que el uso de la varianza de krigeaje no proporciona resultados confiables en la certidumbre de las estimaciones en el yacimiento laterítico tratado, ni en la definición de redes racionales de exploración.
- Se obtuvo por medio de procedimientos conjuntos de estimación y simulación una secuencia metodológica para la definición de redes racionales de exploración.
- Elaboración de una nueva forma de determinación de la masa volumétrica sobre la base de la aplicación de métodos de integración de información con diferente grado de conocimiento.
- Elaboración de una metodología para la estimación y la caracterización de los recursos en yacimientos lateríticos ferroníquelíferos.

El trabajo abarca un total de 98 páginas y consta de: resumen, introducción, 7 capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y 50 anexos gráficos y dos apéndices.

En el Capítulo I se hace una referencia a los trabajos fundamentales de geología realizados en la zona de estudio y de la aplicación de métodos geoestadísticos en los yacimientos lateríticos ferroníquelíferos.

El Capítulo II contiene una breve caracterización geológica actualizada del área de estudio.

En el Capítulo III se describe la metodología propuesta por el autor para la aplicación de la geoestadística a la estimación y caracterización de reservas minerales, extensible a los problemas de estimación de las especialidades de las Ciencias de la

Tierra de forma general, detallando todos los elementos a tener en cuenta en el procesamiento geoestadístico.

En el Capítulo IV se aplica la metodología propuesta a algunos bloques del yacimiento Punta Gorda sobre un modelo geométrico tridimensional, se obtienen los modelos que describen las características de variabilidad y correlación espacial de los parámetros, se realizan las estimaciones por el procedimiento krigeaje de bloque y se caracteriza la varianza de krigeaje tomando decisiones acerca de su empleo en la definición de redes racionales de exploración.

En el Capítulo V se describe la secuencia metodológica obtenida para la definición de redes racionales de exploración, sobre la base del empleo conjunto de la estimación y la simulación geoestadística.

En el Capítulo VI se aplica la secuencia metodológica para la obtención de redes racionales de exploración en los bloques O53, O54, O55, P53, P54, P55.

En el Capítulo VII se aplican métodos de integración de información de la geoestadística multivariada para la caracterización de la masa volumétrica en el bloque experimental O48.

Se presenta además como apéndices un clasificador litológico y de menas vigentes para el modelado geológico de yacimientos lateríticos y otro con los conceptos fundamentales de la Geoestadística.

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Introducción

Se presenta en este capítulo un breve resumen de los trabajos más importantes realizados en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos de la región oriental relacionados con: la geología regional y la formación de estos yacimientos; la variabilidad de los parámetros y la determinación de redes de exploración; los métodos de cálculo de reservas empleados en la estimación de los recursos minerales, y el estado actual de la aplicación de los métodos geoestadísticos. Se hace referencia a la esfera internacional.

1.2. Trabajos relacionados con la geología regional

La región Sagua - Baracoa presenta los yacimientos lateríticos de mayor volumen de reservas y calidad de las menas con elevados contenidos industriales de Ni y Co, representando la columna vertebral del desarrollo minero metalúrgico de Cuba. El conocimiento que actualmente se tiene de la región se debe a un conjunto de investigaciones que desarrollaron trabajos profundos de carácter regional. En este sentido se describen en los trabajos de [Rodríguez \(1998\)](#), [Legrá \(1999\)](#) y [Vera \(2001\)](#) un amplio resumen sobre las investigaciones más importantes. De estos trabajos es digno mencionar los nombres de: [Adamovich y Chejovich \(1962\)](#), [Knipper y Cabrera \(1974\)](#), [Cobiella et al. \(1984\)](#), [Lavaut \(1987\)](#), [Quintas \(1989\)](#), [Iturralde \(1996\)](#) entre otros, los cuales hicieron importantes aportes al conocimiento de la geología regional, incluyendo las zonas de desarrollo de cortezas de intemperismo ferroniquelíferas.

1.3. Trabajos relacionados con la variabilidad de los parámetros, las redes de exploración y aplicación de los métodos geoestadísticos en yacimientos lateríticos cubanos

La variabilidad de los parámetros geólogo - industriales de estos yacimientos ha sido objeto de estudio por diferentes autores, que se han centrado en la aplicación de métodos analíticos: de ramificación o enrarecimiento; de comparación de resultados de la exploración y explotación y el estadístico, para el cálculo de redes óptimas. Se obtienen como principales resultados que la potencia mineral es el parámetro más variable así como, diferentes criterios sobre la densidad de la red. En este sentido ([Vera, 2001](#)) utiliza los métodos geoestadísticos a través del error porcentual que incluye a la varianza de krigeaje para la definición de redes racionales de exploración. Aún cuando se obtienen resultados importantes, se asume para este error porcentual un valor del 10%, con lo que se discrepa debido al carácter puramente geométrico de este término ante yacimientos con alta variabilidad espacial en sus parámetros geólogo – industriales. Se considera que la definición de redes de exploración usando la varianza de krigeaje, debe satisfacer criterios prácticos ([Chica, 2002](#)). En la presente investigación se abandona el uso de este criterio y se sustituye por la comparación de valores reales y estimados haciendo uso de las bondades que ofrece la simulación geoestadística.

En 1993 comienzan a introducirse en este campo los conceptos de la Geoestadística y el uso de los semivariogramas para la caracterización de la variabilidad de los parámetros. Deben ser mencionados los trabajos de [Gutiérrez y Beyra \(1993\)](#), [Proenza y Fernández \(1994\)](#), [Legrá \(1994\)](#), [Ildio \(1999\)](#), [Legrá et al. \(1999a\)](#), [Jordan \(2000\)](#) y [Lavaut \(2000\)](#), los cuales han representado el inicio de aplicaciones geoestadísticas en yacimientos lateríticos. Algunos de estos trabajos no presenta gráficos ni expresiones analíticas que caractericen la continuidad espacial, otros resultan más completos de acuerdo a criterios que se señalan en [Armstrong y Carignan \(1997\)](#), [Cuador \(1997\)](#), [Cuador y Quintero \(1999\)](#) y se aplican en otros campos ([Quintero y Cuador, 2000](#); [Hernández et al., 1999](#); [Estévez y Cuador, 2002](#)). También se coincide con [Journel y Huijbregts \(1978\)](#) y [Armstrong y Carignan \(1997\)](#) en que es necesario un entrenamiento previo para la explotación de los sistemas que incluyen cálculos geoestadísticos. Dos trabajos importantes que representan lo más actualizado sobre el tema, en este campo, que incluyen la Geoestadística Lineal son los de [Legrá \(1999\)](#) y [Vera \(2001\)](#).

1.4. Métodos de cálculo de reservas empleados en los yacimientos lateríticos cubanos

Para la estimación de reservas se ha usado el método de áreas de influencia que, como método geométrico, presenta deficiencias, por lo que no se recomienda para la caracterización local de las reservas debido a la alta variabilidad espacial presente en estos yacimientos. Recientemente se ha introducido la Geoestadística Lineal, la cual ha reportado beneficios en la esfera internacional ([Armstrong y Carignan, 1997](#)). Aquí se puede hacer la siguiente reflexión: si se logra determinar el comportamiento espacial de un atributo, éste se puede predecir en todo su dominio; esta es la esencia de los métodos geoestadísticos.

1.5. Métodos geoestadísticos en la esfera internacional

La Geoestadística tuvo su origen en los problemas de estimación de reservas, fue consolidada por G. Matheron ([Matheron y Kleingeld, 1987](#)) quien sentó las bases de lo que se conoce como la **Teoría de la Variable Regionalizada**. En la actualidad es amplio su uso en la esfera internacional en instituciones que utilizan sus bondades en las

Ciencias de la Tierra, existiendo dos polos fundamentales: El Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia y la Universidad de Stanford, Estados Unidos.

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Introducción

En este capítulo se hace una caracterización actualizada de la región del yacimiento de estudio y del área patrón de la investigación (bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 y el O48) utilizando las concepciones actuales ([Lavaut, 1998](#)) y ([Ariosa et al., 2002](#)) de la clasificación litológica de la corteza de intemperismo y sus rocas madres en Cuba. Los materiales geológicos utilizados fueron actualizados por los resultados de las últimas prospecciones geológicas realizadas en el yacimiento y áreas aledañas ([figuras 1 y 2](#)).

2.2. Yacimientos en corteza de intemperismo laterítica en Cuba

Los yacimientos están situados geográficamente en la zona Cuba oriental y desde el punto de vista geológico en la región al Este de la zona de la falla del Cauto, representada por rocas típicas de una secuencia ofiolítica completa (peridotitas con estructuras de tectonitas, cumulos ultramáficos, cumulos máficos, diques de diabasas y niveles efusivos sedimentarios). Estas secuencias constituyen la denominada Faja Ofiolítica Mayarí – Baracoa. Actualmente se reconocen en la zona 39 yacimientos, asignados a las industrias (Comandante Ernesto Che Guevara y Moanickel S.A. Pedro Soto Alba de Moa y René Ramos Latour de Nicaro), a los proyectos Cupey y Pinares y otros son reservas estatales. El estudio de estos yacimientos sigue siendo una necesidad y una tarea de actualidad ([Legrá, 1999](#)).

2.3. Generalidades sobre la geología de los procesos de intemperismo en la región del yacimiento Punta Gorda y del área de estudio

La región del yacimiento constituye una porción del macizo Moa – Baracoa con amplia propagación de rocas ofiolíticas máficas y ultramáficas, ocupa un área de 6.5 km². Este macizo fue obducido durante el colapso de la paleoestructura volcánica de Cuba, manteniendo una elevada base erosional (+50 hasta +900m) durante un tiempo geológico no menor de 80 – 85 millones de años, es decir, desde el Cenomaniano ([Lavaut, 1998](#)). Unido a la coincidencia de varios factores como: las condiciones climáticas favorables al intemperismo, desde el Cretácico Superior (post – Campaniano) y la prolongada estabilidad tectónica ha dado lugar a vastos y potentes yacimientos.

El área patrón de estudio representan un área de 0.63 km². Estos bloques fueron seleccionados por ser dos áreas representativas de la geología actual del yacimiento, constituido por rocas puramente ultramáficas (bloque O48) y rocas ultramáfica permeadas por material gabroideo (diques, vetas, impregnaciones) representada por gabroides olivinico y peridotitas con plagioclasas y plagioclasitas (bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55). La estructura y composición química y mineral de estas rocas ultramáficas y de la corteza de intemperismo se presentan en [Lavaut \(1987, 1998 y 2000\)](#). En la [figura 3](#) se puede observar una preponderante difusión de perfiles lateríticos – saprolíticos en el bloque O48 y una alta difusión de perfiles lateríticos en los O53, O54, O55, P53, P54 y P55.

Los yacimientos lateríticos de la región nororiental de Cuba, particularmente el yacimiento Punta Gorda, son muy complejos geológica y estructuralmente, lo que hace que sus parámetros geólogo - industriales sean extremadamente variables espacialmente. Lo anterior se evidencia en los siguientes elementos: existencia de variedades de rocas madres con diferente resistencia a los procesos de meteorización; existencia de grietas, fallas y exfoliaciones en las rocas madres; estructura litológica variable de la corteza de intemperismo con diferencias en la estructura del campo mineral y diferentes condiciones geomorfológicas, hidrogeoquímicas y microclimáticas.

Desde el punto de vista geomatemático, la variabilidad espacial de los depósitos minerales es compleja, tanto para la capa de escombros superior como para el cuerpo menífero, lo que no impide su modelación con el aparato geoestadístico. La suficiencia de la modelación geomatemática dependerá de la existencia de una red suficientemente detallada que capture las fluctuaciones reales del depósito, lo que implica la necesidad de la argumentación de la geometría y paso de la red de mediciones (muestreo) para cada área en particular.

CAPÍTULO III

ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA

3.1. Introducción

El uso de los métodos geoestadísticos exige un análisis previo de la estructura espacial de la información disponible. Antes de proceder a la realización de las estimaciones por el procedimiento kriging se deben tomar en consideración algunos aspectos que son ampliamente descritos en el desarrollo de este capítulo haciendo especial énfasis en el caso de estudio tratado.

3.2. Elementos para la aplicación de la Geoestadística

La Geoestadística permite obtener la mejor estimación posible a partir de la información disponible, teniendo en cuenta las características estructurales del parámetro de estudio ([Christensen, 1993](#); [Chauvet, 1994](#); [Armstrong, 1994](#); [de Fouquet, 1996](#); [Christakos y Raghunath, 1996](#); [Armstrong y Roth, 1997](#)). Esta se basa en la teoría de la variable regionalizada ([Matheron, 1970](#)), se describe y aplica en diferentes trabajos entre los que se pueden mencionar a modo de ejemplo ([Journel y Huijbregts, 1978](#); [Pawłowsky et al., 1995](#); [Curran y Atkinson, 1998](#); [Isaaks & Co., 1999](#); [Isaaks y Srivastava, 1999](#)) entre otros. En la aplicación de estos métodos se transita por cuatro etapas fundamentales, cuyos elementos fundamentales se pueden apreciar en la [figura 4](#), los cuales se aplican de acuerdo al problema particular a resolver. En los cuatro epígrafes siguientes se hace una breve descripción de cada una de estas etapas

3.3. Conocimiento del problema

El control integral de los datos, su verificación, corrección de errores numéricos y el estudio de la geología del yacimiento para tener conocimiento del modelo geológico son los elementos fundamentales que se tienen en cuenta antes de comenzar un estudio geoestadístico ([Armstrong y Carignan, 1997](#)). Esta etapa incluye varios pasos ([figura 4](#)).

3.4. El análisis estructural

Es la etapa fundamental de todo estudio geoestadístico. Tiene como objetivo determinar las características estructurales del fenómeno estudiado, utilizando el semivariograma

experimental y modelos teóricos de semivariogramas. ([David, 1977](#); [Armstrong y Carignan, 1997](#)). Este análisis debe ser validado ([Lajaunie, 1997](#); [Legrá y Guardiola, 1999](#)) y se corresponde con la interpretación geológica ([Sahin y Hassan, 1998](#)) (figura 4).

3.5. Estimación o Simulación

La estimación proporciona valores lo más próximo posible a los reales y desconocidos, a través del estimador krigeaje. Se exige además del modelo de continuidad espacial una vecindad de búsqueda ([Arik, 1990](#); [Schaug et al., 1993](#)). Para el caso que nos ocupa es suficiente utilizar el Krigeaje Ordinario de bloques. En este proceso se obtiene para cada localización estimada un error de estimación, la varianza de krigeaje, como criterio de la certidumbre de la estimación realizada ([Armstrong y Carignan, 1997](#)) que lo distingue de otros interpoladores, ([de Fouquet, 1996](#)). Este valor se ha usado para la definición de redes racionales de exploración y clasificación de reservas, criterio que en muchas ocasiones no ofrece buenos resultados debido a su carácter puramente geométrico, fundamentalmente cuando existe alta variabilidad espacial de las variables estudiadas. Pueden ser utilizadas otras variantes de krigeaje ([Carr, 1995](#); [Myers, 1992](#); [Pan y Arik, 1993](#)).

Para caracterizar las fluctuaciones existentes en la realidad se propone la Simulación Geoestadística. Esta se obtiene a partir de las características de dispersión del fenómeno real ([Lantuéjoul, 1997 y 1998](#); [Rivoirard, 1998](#)). Proporciona una representación que puede sustituir la realidad del yacimiento sobre la que se puede experimentar ([Cuador et al., 2000](#); [Quintero et al., 2000](#)).

3.6. Tratamiento de los resultados geoestadísticos

En esta última etapa se utilizan los resultados de las estimaciones obtenidas del procesamiento Geoestadístico con diferentes fines ([Chica, 1987](#); [Armstrong y Carignan, 1997](#)), los cuales pueden ser 1.- Estimación de reservas, 2.- Mapas de isovalores, 3.- Categorización de reservas y 4.- Optimización de redes.

3.7. Sistemas para el procesamiento geoestadístico

Las etapas descritas anteriormente pueden ser ejecutadas en cualquier sistema informático disponible sobre el tema. Existen sistemas profesionales que ofrecen, en ocasiones, posibilidades limitadas para profesionales no entrenados en el tema. Los sistemas de dominio público de más amplia difusión en Cuba que pueden ser utilizados para el procesamiento geoestadístico son: VarioWin ([Pannatier, 1993](#)), Surfer7 ([Surfer v7.0, 1999](#)), Geostatistical Library (GsLib) ([Deutsch y Journel, 1998](#)). Se han introducido sistemas profesionales limitado sólo al uso de las empresas que los han adquirido, éstos ofrecen posibilidades en ocasiones limitadas para especialistas no entrenados en el tema.

Los aspectos metodológicos tratados en este capítulo permiten profundizar de forma teórica y práctica en la aplicación de los métodos geoestadísticos, particularmente en yacimientos lateríticos, constituyendo una guía útil para la aplicación de estos métodos en la actividad geólogo - minera y en el campo de las geociencias en general.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS GEOLÓGICO - INDUSTRIALES DE ALGUNOS BLOQUES DEL YACIMIENTO LATERÍTICO FERRONIQUELÍFERO PUNTA GORDA

4.1. Introducción

La estimación y caracterización de reservas minerales "*in situ*" de los contenidos de níquel, hierro y cobalto, mediante el empleo de la metodología presentada en el capítulo anterior sobre los bloques estudiados del yacimiento Punta Gorda, constituyen el objetivo fundamental de este capítulo. Se abordan otros aspectos de importancia significativa para este trabajo tales como: caracterización de la varianza de krigeaje para comprobar las posibilidades que ofrece al valorar la certidumbre de las estimaciones; comprobación de las estimaciones sobre la información aportada por el bloque O48 y comparación de los resultados de aplicar los criterios de error porcentual que incluyen la varianza de krigeaje y el error real de las estimaciones.

4.2. Presentación y análisis de los datos

El estudio se realiza sobre los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, a partir de 478 pozos de perforación distribuidos en una red de 33.33x33.33 m. La profundidad promedio de los pozos es de 16,81 m, oscilando de 2.30 m a 33.00 m, con una desviación estándar de 5.44 m, lo que es un índice de la variabilidad de este parámetro y del contacto con la roca madre. A partir del análisis exploratorio de datos desarrollado, la cantidad de muestras utilizadas en el procesamiento, la inexistencia de heterogeneidad estadística y considerando el Teorema Central del Límite, ([Walpole y Myers, 1996](#); [Clark, 2002](#)) se puede asumir normalidad en la información, por lo que se justifica la aplicación de técnicas geoestadísticas.

4.3. Análisis estructural

Las [figuras 5 y 6](#) muestran los semivariogramas direccionales para cada variable y zona estudiada y a la izquierda en las [figuras 7 y 8](#) se presentan los semivariogramas verticales. Es de notar que los semivariogramas direccionales no presentan grandes diferencias entre sí e incluso ni con el semivariograma medio u omnidireccional y que para cortas distancias muestran un comportamiento similar. Por este motivo se decide realizar el ajuste de modelos teóricos al semivariograma medio y al obtenido según la dirección vertical. Se debe destacar que los semivariogramas verticales muestran un comportamiento continuo con crecimiento exponencial hasta aproximadamente la distancia de 8 m, lo que concuerda con la consideración de que hasta esta distancia son significativos.

La variabilidad espacial en la dirección vertical no presenta efecto de pepita. Esto induce a plantear que existe una continuidad espacial de todos los contenidos según esta dirección. Por otro lado los semivariogramas horizontales muestran una alta variabilidad en los contenidos estudiados. Este razonamiento indica que es la variabilidad espacial en la dirección vertical la que determina la existencia o no de un valor de efecto de pepita en el modelado de los semivariogramas. A continuación de forma analítica se muestran los ajustes realizados:

Zona de escombros superior:

Níquel: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.005 + 0.040 \text{ Exp}(20, 20, 14) + 0.012 \text{ Sph}(650, 650, 6)$

Hierro: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 5 + 92 \text{ Exp}(30, 30, 15) + 31 \text{ Sph}(500, 500, 8.2)$

Cobalto: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.0001 + 0.0032 \text{ Exp}(30, 30, 12) + 0.0012 \text{ Sph}(700, 700, 10)$

Zona mineralizada:

Níquel: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.010 + 0.075 \text{ Exp}(20, 20, 36.6) + 0.042 \text{ Sph}(560, 560, 2.4)$

Hierro: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 6 + 92 \text{ Exp}(28, 28, 15.2) + 30 \text{ Sph}(780, 780, 5.8)$

Cobalto: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.00030 + 0.00345 \text{ Exp}(22, 22, 9) + 0.00052 \text{ Sph}(650, 650, 6)$

Los modelos ajustados utilizando los compósitos por pozos en cada zona para el tratamiento bidimensional se presentan a continuación:

Zona escombros superior:

Níquel: $0.012 \text{ Exp}(9) + 0.010 \text{ Sph}(500)$

Hierro: $35 \text{ Exp}(16) + 15 \text{ Exp}(90) + 12 \text{ Sph}(580)$

Cobalto: $0.00100 \text{ Exp}(12) + 0.00035 \text{ Exp}(120)$

Zona mineralizada:

Níquel: $0.047 \text{ Exp}(12) + 0.034 \text{ Sph}(580)$

Hierro: $56 \text{ Exp}(12) + 8 \text{ Exp}(30) + 14 \text{ Sph}(600)$

Cobalto: $0.00175 \text{ Exp}(10) + 0.00025 \text{ Sph}(200)$

En las [figuras 7 y 8](#) se muestran los ajustes para las variables y zonas estudiadas en el tratamiento tridimensional. Estos modelos fueron validados, reportándose criterios aceptables en cada caso, coincidiendo con el hecho de que las curvas teóricas describen lo mejor posible las curvas experimentales de los semivariogramas.

4.4. Estimación

Se utilizó el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques sobre un modelo geométrico tridimensional formados por un modelo de capas con bloques de dimensiones $8.33 \times 8.33 \text{ m}^2$ y un modelo de bloques con bloques de dimensiones de $8.33 \times 8.33 \times 1 \text{ m}^3$ ([figuras 9 y 10](#)). Para este proceso fue necesario modelar las zonas de interés haciendo una interpretación de la información aportada en los pozos de perforación, lo que permitió crear el modelo geométrico de la mineralización y posteriormente aplicar el control geológico. Para la realización de los modelos geológicos descritos se utilizó el sistema MicroLYNX ([Lynx mining systems, 1998](#)). Se debe señalar que es posible hacer estimaciones para cualquier configuración y variable, atendiendo a las exigencias de la selectividad minera ([Lantuéjoul, 1994](#)).

4.5. Cálculo de las reservas

Las estimaciones realizadas permitieron obtener las reservas para cada variable estudiada. Para la zona de escombros superior se obtuvo 9 200 000 ton de mena con ley media (en %) de: Ni =0.47, Fe=39.42 y Co=0.058. Para la zona mineralizada 2 600 000 ton con ley media de Ni =1.25, Fe=35.85 y Co=0.102. A modo de ejemplo en las [figuras 11 y 12](#) se muestran algunos perfiles y un plano de las estimaciones para la variable níquel obtenidos sobre los modelos geométricos.

4.6. Comprobación de las estimaciones obtenidas

Para comprobar las estimaciones obtenidas, teniendo en cuenta la alta variabilidad de los contenidos estudiados, se procedió a aplicar igual procedimiento sobre el bloque O48 explorado en una red de 8.33x8.33 m. Es posible realizar las estimaciones con los datos de las redes de 33.33x33.33 m y 16.67x16.67 m y compararlas con los datos de la red de 8.33x8.33 m. Se realizó de igual forma un modelo geométrico tridimensional. Se desarrolló el proceso de análisis exploratorio de datos y análisis estructural, utilizando los datos de la variable níquel, utilizada como ejemplo por ser el contenido fundamental.

Para la estimación en el modelo de capas y el modelo de bloques, se obtiene el gráfico de dispersión mostrado en la [figura 13](#). La poca correlación puede ser explicada a partir de la falta de control geológico, es decir, el espaciamiento entre las muestras en la dirección horizontal es superior a la distancia de correlación espacial de los datos experimentales y a la variabilidad natural de los contenidos presentes en estos yacimientos. Todo esto constituye una premisa indispensable de la necesidad de realizar estudios de redes racionales de exploración en función de la unidad de selección mineral a utilizar.

Se pueden hacer algunas reflexiones importantes: a) La falta de correlación espacial entre las muestras a pequeñas distancia en el plano de la mineralización indica el grado de independencia entre éstas, por lo que no es posible realizar una adecuada estimación de los recursos y b) Los valores asignados a los bloques de estimación a partir del pozo central, no son representativos de los mismos.

4.7. Posibilidades del uso de la varianza de krigeaje en yacimientos lateríticos

A partir de los resultados obtenidos en el epígrafe anterior, se decide evaluar la certidumbre de las estimaciones y la definición de redes racionales de exploración. Uno de los criterios que más se usa en la literatura es el cociente de la desviación estándar de la varianza de krigeaje entre el valor estimado, para cada bloque procesado, esto es σ_k^*/Z_k^* . Este criterio ha reportado resultados en yacimientos con continuidad en la mineralización a gran escala ([Chica, 1987](#)) y ha sido usado en la definición de redes racionales de exploración, incluso en yacimientos lateríticos cubanos ([Vera, 2001](#)). En este último trabajo se asumen reservas determinadas en categoría de probadas con un valor inferior al 10% para este criterio. Consideramos que debido a la alta variabilidad espacial presente en los contenidos estudiados en el caso particular del yacimiento analizado, es importante probar las bondades del uso de este criterio.

La varianza de krigeaje es una medida de la certidumbre de las estimaciones que tiene un carácter puramente geométrico, es decir, es relativa a la configuración espacial de los datos y a la variabilidad de éstos, pero no tiene en cuenta los valores de los datos, ([Journel y Huijbregts, 1978](#); [Krajewski y Gibbs, 1993](#); [Armstrong y Carignan, 1997](#); [Deutsch y Journel, 1998](#)). Por esto es importante comparar los valores del criterio antes mencionado con los errores permisibles de la empresa. Como el bloque O48 ofrece información en una red de 8.33x8.33 m es posible utilizar los datos de las redes de 33.33x33.33 m y 16.67x16.67 m para estimar y comparar los datos de la red de 8.33x8.33 m. De este modo se comparan los valores reales con los estimados usando dos criterios: el error porcentual que ofrece la Geoestadística a través de la varianza de krigeaje y el error permisible dado por la siguiente expresión $\text{Abs}(Z^*-Z^R)/Z^*$, donde Abs es el valor absoluto, Z^* es el valor estimado y Z^R es el valor real.

Los resultados utilizando el criterio $\sigma_k^*/Z_k^* \cdot 100$ se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Rango de valores del error porcentual (σ_k^*/Z_k^*100) para diferentes redes.

Variable	Red 33.33x33.33 m	Red 16.67x16.67 m	Red 8.33x8.33 m
Níquel	De 3.63 a 8.50	De 3.39 a 8.28	De 2.89 a 5.20
Potencia	De 7.58 a 29.39	De 6.76 a 28.30	De 5.44 a 25.77

En la [tabla](#) anterior se nota que para la variable níquel en todos los casos los valores son inferiores al 10%, lo que conduce a considerar que esta variable queda correctamente determinada con la red de 33.33x33.33 m. Para la potencia un alto por ciento del rango de valores es superior al 10%. En la [tabla](#) siguiente se muestran los resultados utilizando el criterio $Abs(Z^*-Z^R)/Z^*100$.

TABLA 2. Estimación y comparación del criterio $Abs(Z^*-Z^R)/Z^*100$ para diferentes redes.

Variable	Por ciento de bloques con error inferior a 10%		
	Red 33.33x33.33 m	Red 16.67x16.67 m	Red 8.33x8.33 m
Níquel	62.68	69.78	90.09
Potencia	22.50	30.11	49.05

De la [tabla](#) anterior se infiere que a medida que disminuye la red de estimación el por ciento de bloques con error inferior al 10% aumenta. Para el caso de la red de 8.33x8.33 m la variable níquel, como es de esperar, alcanza un alto por ciento de bloques en categoría de reservas probadas, sin embargo para la potencia mineral, existe un alto por ciento de bloques con error superior al 10%, lo cual constituye un índice de la variabilidad de este parámetro.

Comparando los resultados arrojados por los dos criterios se puede llegar a la conclusión de que asumir el error del 10%, como el error porcentual que brinda la Geoestadística, no es conveniente y conduce a la idea de que las reservas quedan determinadas por la red de 33.33x33.33 m. Aquí se considera importante visualizar los gráficos de líneas según ambos criterios analizados a través de un perfil en las direcciones X o Y ([figura 14](#)), lo cual permite mostrar el carácter geométrico de la varianza de krigeaje y la imposibilidad de establecer una relación entre éstos.

Este valor de varianza de krigeaje ha sido frecuentemente utilizado por algunos autores para la clasificación de las reservas y para la definición de redes racionales de exploración. Es opinión del autor de este trabajo que los valores de este elemento deben ser cuidadosamente utilizados en unión de otros criterios que se presentan en las metodologías para la clasificación de reservas ([ONU, 1996](#) y [ONRM, 1999](#)), de modo que contribuya como un elemento más a tener en cuenta, pero sin tener un carácter definitorio.

Ahora, como el segundo criterio $Abs(Z^*-Z^R)/Z^*100 < 10\%$ es un criterio real, se decide abandonar el uso del primer criterio para el estudio de los contenidos en yacimientos lateríticos, tomando como referencia el caso de estudio abordado. Esto no

quiere decir que este primer criterio pueda ofrecer resultados ventajosos en otros tipos de yacimientos, incluso en otros yacimientos del mismo tipo que presenten mayor continuidad espacial en la mineralización.

Otro elemento importante a tener en cuenta es que el valor medido en el pozo no es representativo de su área de influencia correspondiente, debido a las fluctuaciones que presentan los parámetros analizados. Por lo anterior se considera más conveniente asignar un valor más representativo obtenido por ventanas móviles, usando las posibilidades que ofrece la simulación geoestadística. En el siguiente capítulo proponemos el uso de la simulación con este fin y para obtener redes racionales de exploración y realizar cambio de soporte en la exploración, todo lo cual se revertirá en una mejor caracterización de los parámetros en estos yacimientos.

CAPÍTULO V

ESTUDIOS DE ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN PARA PROPONER REDES RACIONALES DE EXPLORACIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN DE LAS RESERVAS EN LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS

5.1. Introducción

En este capítulo se utilizan las bondades de la simulación geoestadística para obtener redes racionales de exploración, utilizando los valores generados por la simulación, se toman como ejemplo las variables níquel y potencia mineral del bloque O48. Se obtiene además, una secuencia metodológica para la definición de redes racionales de exploración.

5.2. Simulación

El objetivo fundamental de la simulación geoestadística es reproducir la distribución espacial de los datos a partir de la variabilidad espacial revelada de los parámetros en estudio y con ésta las fluctuaciones presentes en la práctica ([Carrasco y Jara, 1998](#); [Cuador y Quintero, 2001](#)). Así se logra una representación equivalente al yacimiento real. Para implementar la simulación se utilizó la librería Geoestadística GsLib ([Deutsch y Journel, 1998](#)). Se generaron valores simulados en una red densa, los cuales permitieron la descripción detallada del comportamiento de las variables.

Antes de proceder a utilizar los valores de la simulación se justificó la veracidad de la misma. Para esto se comprobó que: la estadística de los valores simulados es similar a de los datos reales; el semivariograma calculado sobre los valores simulados revela la misma variabilidad espacial de los datos originales y la dispersión entre los valores reales y simulados presentan correlación en ambos casos. Por todo esto se puede plantear que la simulación obtenida es representativa del comportamiento de las variables y los resultados obtenidos utilizando una simulación son equivalentes a los esperados si se contara con los valores reales del yacimiento. Sobre los valores simulados se puede experimentar, al realizar la exploración con redes de diferentes tamaños sin necesidad de hacer nuevas perforaciones, lo cual es mucho más económico en la etapa de pronóstico, cuando se realizan estudios de redes racionales de exploración.

5.3. Posibles valores reales más representativos

Para proponer posibles valores reales más representativos se tomaron los valores medios de las simulaciones obtenidas en la red de 1x1 m, incluidos en el interior del bloque de 8x8 m. Los valores obtenidos se proponen como reales. A continuación se explora la simulación para obtener redes de 8x8 m, 16x16 m, 24x24 m y 32x32 m y así realizar un análisis similar a cuando se disponía de sólo un valor central por pozo, que representaba el contenido del bloque correspondiente. Utilizando el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques se estimaron los valores de las variables analizadas en la misma red donde fueron obtenidos posibles valores reales, realizándose la comparación y obteniendo los resultados que se presentan en la [tabla 3](#). En esta tabla se representa el por ciento de bloques estimados con un error inferior al 10% para cada red y variable estudiada.

TABLA 3. Comparación de los resultados para el níquel y la potencia.

Variable	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	82.26	84.85	88.94	95.51
Potencia	37.35	38.73	40.82	53.01

De la [tabla](#) anterior se observa que para la red de 32x32 m, es mayor la cantidad de bloques con error de estimación inferior al 10%, que en la comparación realizada en el capítulo anterior, donde se utilizaba el valor del pozo central como representativo. Esto demuestra que el valor medio obtenido por ventanas móviles es más representativo. Aunque se mejora el por ciento de bloques con error inferior al 10% para la variable níquel en las diferentes redes, no se satisface la calidad de las estimaciones para la potencia, ni en la red más densa, representando esto una evidencia más de la variabilidad de este parámetro.

A partir del resultado anterior y con el objetivo de mejorar las estimaciones, se considera apropiado realizar un cambio de soporte en la exploración, ya que es imposible realizar en la práctica un barrenos con dimensiones superiores a la de los pozos de perforación. Se propone entonces, a partir de los valores simulados, realizar la exploración, ahora con los valores medios entorno a los puntos de las diferentes redes utilizadas anteriormente.

5.4. Cambio de soporte en la exploración

Los resultados usando bloques de dimensiones de 8x8 m² se presentan en la [tabla 4](#). Aquí de igual modo se muestra el por ciento de bloques estimados con error inferior al 10% para cada red y variable estudiada.

TABLA 4. Comparación de los resultados para el níquel y la potencia.

Variable	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	84.86	87.58	91.84	100.00
Potencia	41.05	46.86	57.64	87.58

De esta [tabla](#) se observa que para la variable níquel en todas las redes se obtiene un alto por ciento de los bloques estimados con error inferior al 10%. Considerando la tabla de clasificación de reservas de Deah y Davis ([Annels, 1991](#)) y ajustando ésta a las normas establecidas al efecto para los recursos y reservas ([ONRM, 1999](#)), se puede apreciar que en las estimaciones para esta variable se supera suficientemente el 80% de los bloques estimados con error inferior al 10% permitido para reservas probadas. Esto indica que la variable níquel queda determinada con la red actual de 33.33x33.33 m, utilizando en la comparación valores reales más representativos. Sin embargo, para la potencia se satisface la condición sólo para la red más densa, lo que permite inferir que la red racional para la determinación de este parámetro tiene un espaciamiento ligeramente mayor a 8x8 m. En ambos casos es posible obtener la red racional si construimos gráficos del espaciamiento de la red contra el por ciento de bloques estimados con error inferior al establecido para la categoría de reservas que se desee (probadas o probables) según [Annels \(1991\)](#). Esto permite proponer un nuevo método para la definición de redes racionales de exploración utilizando las ventajas que brinda la simulación geoestadística de variables regionalizadas.

5.5. Obtención de la red racional de exploración

La obtención de la red racional de exploración es posible a partir de los resultados obtenidos y la construcción de nomogramas ([figura 15](#)). A los puntos ploteados se les puede ajustar una curva teórica, la cual permite conocer la red que determina un por ciento de bloques cualquiera con error de estimación inferior a la categoría de reserva utilizada. Los límites de error a considerar siguiendo las definiciones de clasificación de reservas presentadas en [Annels \(1991\)](#) y equiparándolas con las normas nacionales ([ONRM, 1999](#)) son: para las reservas probadas, más del 80% de bloques determinados con un error inferior al 10% y para las reservas probables, más del 60% de los bloques determinados con un error inferior al 20%.

Para la variable níquel se garantiza más de un 80% de bloques estimados con error inferior al 10%, lo que permite plantear que la red racional para esta variable es superior a la red actual. En la [figura 15\(a\)](#) se obtiene un espaciamiento de 40.25 m y en la [figura 15\(c\)](#) de 51.85 m. Ahora, para la potencia mineral no es posible obtener una red racional utilizando valores puntuales en la estimación, sólo haciendo un cambio de soporte se puede lograr una red racional con espaciamiento ligeramente superior a las dimensiones de los bloques de estimación. La red racional para este parámetro puede ser obtenida de la curva ajustada en la [figura 15\(d\)](#), la cual es de 9.22 m. Esto reafirma la alta variabilidad de la potencia y la necesidad de buscar soluciones para su determinación, soluciones que no pueden ser encontradas a partir de la información de geoquímica de pozos, debido a que una red con estas características sería extremadamente costosa. En este sentido es muy conveniente incrementar los trabajos geofísicos con el objetivo de caracterizar este parámetro, para lo cual ya existen trabajos realizados en la esfera

internacional ([Peric, 1981](#); [Queen y Parkinson, 1998](#); [Francké y Parkinson, 1999](#)) y el ámbito nacional ([Mondelo y Acosta, 1998](#); [Acosta y Dussac, 1999](#); [Hernández, 1999](#)), además de resultados y experiencias aportadas por especialistas de otras instituciones nacionales como por ejemplo el ISPJAE.

5.6. Secuencia metodológica para la caracterización de parámetros geólogo - industriales con la obtención de redes racionales de exploración

Los resultados obtenidos permite proponer una secuencia metodológica para la definición de redes racionales de exploración a través de los siguientes pasos.

Primero: Obtener la red racional de exploración para los parámetros geólogo - industriales.

1.- Partir de una red básica. Una posibilidad es utilizar la información obtenida en los estadios de exploración y exploración preliminar y desarrollar perforaciones en crucetas con poco espaciamiento entre los pozos en una zona geológicamente representativa del depósito. Esto permite revelar las características de variabilidad y correlación espacial a pequeñas distancias.

2.- Desarrollar el análisis exploratorio de datos y análisis estructural.

3.- Generar simulaciones, en una red densa (puede utilizarse 1x1 m) que permita caracterizar los parámetros geólogos industriales con elevado nivel de detalle.

4.- Buscar por el método de los promedios móviles, los valores medios de bloques de tamaño igual a la unidad de selección minera a utilizar de acuerdo al grado de estudio buscado.

5.- Construir gráficos del espaciamiento de la red contra el por ciento de bloques estimados con error inferior al permisible para cada categoría (10% para la categoría de reservas probada y 20% para la categoría de probable). Ajustar una curva teórica y obtener la ecuación correspondiente.

6.- Encontrar por medio de la curva ajustada en el paso anterior la red que cumple los requisitos de la tarea técnica (reservas probada o probables y recurso). Esta sería la red que determina las reservas y recursos en la categoría correspondiente, cumpliendo con las normas exigidas, pero con un soporte igual a la unidad de selección minera a utilizar.

Segundo: Si se utiliza el método de áreas de influencia proponer una modificación al mismo, consistente en sustituir el valor del pozo central para cada variable por uno más representativo. Lo que implica:

1.- Desarrollar el análisis exploratorio de datos y análisis estructural.

2.- Generar simulaciones, en una red densa (puede utilizarse 1x1 m) que permita caracterizar los parámetros geólogos industriales con elevado nivel de detalle.

3.- Buscar por el método de los promedios móviles los valores medios de bloques de tamaño igual al espaciamiento entre las perforaciones, es decir, a su área de influencia y de esta forma obtener un valor más representativo para cada parámetro a utilizar en el cálculo de reservas.

CAPÍTULO VI

OBTENCIÓN DE REDES RACIONALES EN LOS BLOQUES O53, O54, O55, P53, P54 Y P55 DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA

6.1. Introducción

En este capítulo se aplica la secuencia metodológica obtenida en el capítulo anterior, sobre los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 del yacimiento Punta Gorda, con el objetivo de obtener una red racional de exploración, para la determinación de los parámetros geólogo – industriales en los mismos. El procedimiento se desarrolla sobre las variables níquel y potencia mineral.

6.2. Obtención de redes racionales de exploración para los bloques O53, O54, O55, P 53, P54 y P55

En la [figura 16](#) se muestran los mapas de estimaciones y simulaciones obtenidos para la variable potencia mineral de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55. En los mapas estimados se observa una imagen más suave, característica propia de todo interpolador, lo que no ocurre en el proceso de simulación en el que se reflejan más las fluctuaciones siempre presentes en la realidad. Se puede notar la similitud entre los valores estimados y simulados, es decir, en las zonas ricas los valores simulados fluctúan alrededor de los correspondientes valores estimados y de igual modo ocurre para las zonas pobres. Lo expuesto anteriormente representa un índice de las ventajas de la simulación para la caracterización de los parámetros geólogo - industriales tratados. Esta característica de la simulación ha sido utilizada en esta investigación para realizar estudios de redes racionales de exploración.

En la [tabla 5](#) se presentan la comparación de los resultados a partir de la secuencia metodológica descrita en el capítulo anterior utilizando valores puntuales en la estimación.

TABLA 5. Comparación de los resultados usando valores puntuales en la estimación.

Variable	Por ciento de bloques con error inferior a 10%			
	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	75.23	80.86	83.95	94.35
Potencia	32.34	34.60	37.85	45.15

Haciendo similar análisis, pero esta vez tomado valores medios entorno a los puntos de las redes de estimación utilizadas, es decir, haciendo cambio de soporte, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 6.

TABLA 6. Comparación de los resultados usando cambio de soporte en la estimación.

Variable	Por ciento de bloques con error inferior a 10%			
	Red 32x 32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	81.67	85.332	89.45	99.69
Potencia	37.80	45.18	55.06	81.48

En las [tablas 5 y 6](#) se puede observar que el por ciento de bloques aumenta cuando disminuye el espaciamiento de la red, y aumenta aún más, cuando se realiza el cambio de soporte. Para la variable níquel se alcanza en la red de 32x32 m un por ciento de bloques superior al 80% establecido. Para la potencia mineral este por ciento sólo se alcanza para la red de 8x8 m.

La [figura 17](#) muestra los nomogramas obtenidos para los bloques estudiados sobre los resultados presentados en las tablas anteriores. A partir de las curvas ajustadas en esta figura se obtienen las redes racionales de exploración: para el níquel 26.29 m ([figura 17 a](#)), utilizando valores puntuales en la estimación y 36.85 m haciendo cambio de soporte ([figura 17 c](#)) y para la potencia 8.24 m, sólo para el caso en que fue utilizado el cambio de soporte ([figura 17 d](#)). Comparando los resultados con los obtenidos en el bloque O48 en el capítulo anterior ([tablas 3 y 4, figura 15](#)) se puede afirmar que estamos en presencia de una de las zonas del yacimiento con mayor variabilidad en el comportamiento de sus parámetros, lo que coincide con los resultados relacionados con las complejidades de esta zona conocida como Altos Escombros, obtenidos por otros autores, por ejemplo en el estudio de dominios geológicos en el yacimientos Punta Gorda ([Vera, 2001](#)).

En el caso de la potencia mineral es imposible obtener una red racional utilizando en la estimación valores puntuales, sólo se obtiene una red con espaciamiento de 8.24 m cuando se realiza el cambio de soporte, es decir, un espaciamiento ligeramente superior al tamaño de los bloques de estimación de dimensiones de 8x8 m². Como resultado de esta investigación el autor considera que se deben introducir el uso de redes de perforación operativas, termino que expresa aquella red intermedia entre la obtenida para la potencia y los contenidos de interés, de modo que se ajusten a una adecuación económica y haciendo cambio de soporte. Conjuntamente se debe incrementar la realización de trabajos de geofísica encaminados a la caracterización de los contactos y con éstos el parámetro potencia en el espacio inter-red. La unión de estas informaciones permite una mejor caracterización de las reservas.

CAPÍTULO VII

PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA EN YACIMIENTOS LATERÍTICOS

7.1. Introducción

En este capítulo se presenta un nuevo procedimiento para la determinación de la masa volumétrica (MV), usando métodos de la Geoestadística Multivariada de integración de información. Estos métodos aprovechan la variabilidad espacial del parámetro de interés o variable primaria, MV en nuestro caso, y su relación con las variables que llamaremos secundarias, contenidos Fe, Ni, Co, para la estimación de la primaria. Se aplica el método en el bloque O48.

7.2. Propuestas de determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos

En los yacimientos lateríticos cubanos se han empleado métodos para la determinación de la MV descritos en ([Vera, 1979](#)). Otros autores han propuesto métodos ingeniosos para el establecimiento de la MV en yacimientos lateríticos ([Legrá et al., 1999b](#)), basados en que éste es un parámetro geólogo - industrial que juega un papel importante en el cálculo del tonelaje de las reservas de un yacimiento. Su determinación es importante para el cálculo final de las reservas tanto a escala global como local. Cualquier inexactitud existente en la determinación de la MV empleada se refleja también como inexactitud de los valores de las reservas de metal calculadas ([Legrá et al., 1999b](#)). Según este autor el abuso de valores medios, en aras de simplificar los cálculos, ha conducido a la aceptación de métodos simplistas y burdos.

7.3. Nuevo método para la determinación de la masa volumétrica

Un nuevo método a aplicar para la determinación de la MV en yacimientos lateríticos lo brinda la Geoestadística Multivariada ([Wackernagel, 1994, 1995 y 1998](#)), a través de métodos de integración de información con diferente grado de conocimiento. Esto es, si se puede establecer alguna relación entre los valores de una o varias variable (que llamaremos secundaria) conocida en todo el dominio de estimación, con la variable de interés (que llamaremos primaria), es posible usar métodos para estimar la variable primaria en los puntos donde es conocida la variable secundaria, haciendo uso de su variabilidad espacial y sus relaciones.

Los valores de Fe, Ni y Co obtenidos en los 18 275 bloques de estimación con dimensiones $8.33 \times 8.33 \times 1 \text{ m}^3$, definidos por el modelo geométrico tridimensional desarrollado para el bloque O48 son considerados para conformar la variable secundaria. Los valores de MV medidos en muestras de 1m de longitud en 44 pozos criollos se consideran como variable primaria o de interés. Se propone buscar, una ecuación de regresión que relacione los contenidos Fe, Ni y Co con los de MV, de modo que a partir de esta relación y la continuidad espacial de la variable primaria o de interés, se estimen valores de MV en las localizaciones donde ya se conoce un valor de la variable secundaria. Se utiliza el procedimiento Co-Krigeaje con Variable Colocalizada (Collocated CoKriging) y posteriormente se pueden utilizar los valores estimados de la MV en el cálculo de reservas.

7.4. Ecuación de regresión

Para analizar la relación entre las variables MV y los contenidos de Fe, Ni y Co, se aplica la técnica de análisis de correlación y regresión múltiple. La ecuación de

regresión estimada y la significación de sus parámetros es: $MV = 1.509 + 0.004 Fe - 0.311 Ni - 1.267 Co$. El por ciento de la variabilidad total que es explicado por el modelo de regresión obtenido es aceptable para la aplicación de métodos de integración de información planteados ([Deutsch, 2002](#) y [Pardo-Iguzquiza, 2002](#)). El análisis de varianza de la regresión realizado es significativo ($p < 0.05$).

7.5. Análisis de variabilidad de la masa volumétrica

El análisis de variabilidad espacial de la MV, para la zona mineralizada utilizada como ejemplo, se realiza en la dirección vertical y en la dirección del plano de la mineralización. El modelo obtenido ([figura 18 a y b](#)) se expresa por la siguiente expresión.

$$G(h_x, h_y, h_z) = 0.030 \text{Exp}(500, 500, 5) + 0.058 \text{Sph}(1650, 1650, 10)$$

7.6. Estimación de la masa volumétrica

Para la estimación de la MV se emplea la variante del procedimiento Co-Krigeaje descrita, con la ecuación de regresión y variabilidad espacial presentadas en los epígrafes anteriores. Los resultados de la estimación se muestran en las [figuras 19 y 20](#). La [figura 19](#) muestra un perfil con las estimaciones de la MV y la [figura 20](#) muestra dos gráficos de línea como ejemplo del comportamiento de la MV estimada y los valores promedios tradicionalmente usados en el yacimiento Punta Gorda, para una intersección entre los bloques contenidos en un perfil y un nivel cualquiera del depósito (B).

El método empleado permite obtener valores MV de acuerdo a dos elementos importantes: su variabilidad espacial y su relación con los contenidos de los metales medidos o estimados. Por lo que se proporciona una estimación de reservas más precisa a escala local. Para el caso particular del bloque O48 las reservas globales calculadas son ligeramente inferiores a las obtenidas considerando los valores medios de la MV utilizados en el yacimiento Punta Gorda.

CONCLUSIONES

1. La modelación numérica de los yacimientos lateríticos cubanos se dificulta por la compleja estructura geológica y, consecuentemente, del campo menífero, lo que está condicionado por la naturaleza irregular de la constitución de la roca madre, la distribución de las propiedades físico – mecánicas, estructura litológica variables en la corteza de intemperismo y diferentes condiciones geomorfológicas, hidrogeológicas y microclimáticas.
2. Las características de variabilidad espacial de los parámetros de los depósitos minerales lateríticos solamente es posible modelarla eficientemente a través de mecanismos geoestadísticos detallados y conjuntos de estimación y simulación: Análisis estructural, Estimación por krigeaje, Simulación geoestadística y Geoestadística Multivariada.
3. Los modelos de variabilidad espacial obtenidos demuestran la ineficiencia de la información sobre los contenidos de metales Fe, Ni, Co y morfología del depósito (Potencia de mena) a partir de la información por la red estándar actual de (33.33x33.33 m), a pesar de obtenerse a partir de éstos los mejores estimados posibles. Por lo que la correcta caracterización de los parámetros geólogo – industriales de los yacimientos lateríticos cubanos requieren de la aplicación de una red más adecuada.

4. La exploración geológica racional a aplicar durante la prospección ha de definirse sobre la base de una red de perforación operativa (mínima), complementada con mediciones geofísicas en el espacio íter-red, hasta la conformación de un tamaño óptimo de la red.

Esta red operativa se argumentará de acuerdo a los siguientes pasos: simulación geoestadística en una red compatible a la longitud de muestreo; promediación estadística según ventanas móviles igual a la unidad de selección minera; estimación de la densidad de la red racional acorde al error de la categoría en cuestión del recurso mineral con cambio de soporte; realización de perforaciones por una red operativa con paso igual a N veces la densidad de la red racional obtenida por el parámetro más variable para su adecuación a la factibilidad económica (siendo N un valor real). El espacio íter-red se estimará a través de mediciones geofísicas.

5. En el área patrón de estudio (bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 y el O48) del yacimiento Punta Gorda, el modelado geomatemático logrado se caracteriza por:
 - a. Los semivariogramas experimentales calculados en el plano de la mineralización presentan una alta variabilidad, muestran estructuras definidas y similares en todas las direcciones, considerándose el comportamiento de las variables como isotrópico.
 - b. Los semivariogramas verticales calculados presentan continuidad espacial según esta dirección, lo que induce a la existencia de continuidad a pequeña escala en los contenidos de Fe, Ni y Co estudiados.
 - c. El uso de la varianza de krigeaje para la definición de redes racionales de exploración es inadecuado, no se adapta a las condiciones de alta variabilidad presentes en los parámetros estudiados, no es posible asignar un error permisible por la empresa del 10% al coeficiente de error porcentual que incluye a la varianza de krigeaje.
 - d. La simulación geoestadística desarrollada permitió: reproducir el comportamiento de las variables a través de sus características de dispersión, proponer posibles valores reales, simular el proceso de exploración puntual y con cambio de soporte, definir una secuencia metodológica para la definición de redes racionales de exploración y proponer una modificación al método de áreas de influencia.
 - e. Los resultados de redes racionales obtenidos a partir de una de las simulaciones para las variables níquel y potencia, representativas de las mismas, al ser realizaciones con iguales característica de variabilidad y correlación espacial que los datos originales, permiten asegurar que serán los resultados que se obtendrían si se contara con los valores reales.
 - f. Para la caracterización de la potencia mineral es imposible obtener una red racional utilizando valores puntuales en el proceso de estimación, sólo es posible obtener una red con espaciamiento ligeramente superior al tamaño de los bloques de estimación haciendo cambio de soporte a partir de los datos simulados. Sin embargo, para la determinación de los contenidos de níquel es posible obtener redes del orden de la actual. En los bloques estudiados O53, O54, O55, P53, P54 y P55 la red racional para la determinación de la potencia

mineral es de 8.24 m utilizando cambio de soporte, y para el níquel es de 26.29 m utilizando valores puntuales y 36.85 m haciendo cambio de soporte.

1. La determinación de la masa volumétrica por métodos de la Geoestadística Multivariada de integración de información arroja resultados satisfactorios para el completamiento de la información de este parámetro y su aplicación al cálculo de reservas.
2. La metodología propuesta para la utilización de los métodos geoestadísticos sirve como guía útil para el desarrollo de aplicaciones de esta herramienta en los yacimientos lateríticos.
3. Haciendo uso conjunto de las técnicas de estimación y simulación geoestadística, se puede contribuir a una mejor caracterización de sus recursos ante las complejidades geológicas de éstos yacimientos.
4. Partiendo de la similitud en las condiciones de formación de los yacimientos lateríticos, la metodología propuesta puede ser aplicada en depósitos similares.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la aplicación de la metodología propuesta para obtener una caracterización más precisa de los parámetros geólogo - industriales en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos.
2. Obtener redes racionales de exploración a partir de la secuencia metodológica propuesta frente a cada prospección geológica sobre la base de un detallado análisis de variabilidad en el depósito en cuestión.
3. Puntualizar con un estudio especial el complejo de métodos geofísicos más eficientes para caracterizar la potencia, dada la alta variabilidad de este parámetro en los yacimientos lateríticos y la disparidad de criterios existentes al respecto.
4. Realizar estimados de la masa volumétrica en función de su variabilidad espacial y su relación con los contenidos de Fe, Ni y Co en otras zonas y bloques de los yacimientos lateríticos cubanos.
5. Continuar profundizando en el uso de la simulación geoestadística para la caracterización de los parámetros geólogo - industriales y precisar el método definitivo para el cálculo de los recursos (reservas) minerales.
6. Estudiar comparativamente las bondades de los métodos de cálculo del recurso mineral con geoestadística y con métodos geométricos con el objetivo de obtener un mayor margen de informatividad.

BIBLIOGRAFÍA DEL AUTOR

Cuador Gil, J.Q., 1997, GeoRes, Una Aplicación Geoestadística para el Cálculo de Reservas. Tesis en opción al título de Master en Informática Aplicada. ISPJAE, Ciudad de la Habana.

Cuador Gil, J. Q. y Quintero, A., 1999, Análisis estructural: punto de partida de todo estudio geoestadístico. **Revista Minería y Geología**, Vol. XVI, No. 3, pp. 16-22.

Hernández, R., **Cuador Gil, J.Q.**, González, A., Romero, E. y Ramírez, R. 1999, Artículo: "Estudio del Comportamiento de la Continuidad Espacial del Acuífero Cárstico Costero de la Península de

Guanahacabibes por Métodos Geoestadísticos". **Revista Minería y Geología**, Vol. XVI, No.3, pp 23-26.

Cuador Gil, J.Q., Quintero, A., y Estévez, E., 2000, La simulación condicional en Geoestadística. **Revista Minería y Geología**, Vol. XVII, No.1, pp 47-50.

Quintero, A., **Cuador Gil, J. Q.**, y Estévez, E., 2000, Simulación no Condicional, Método de las Bandas Rotantes en 3D. **Revista Minería y Geología**, Vol. XVII, No. 1, pp 51-54.

Quintero, A. y **Cuador Gil, J. Q.**, 2000, Análisis Estructural de la Porosidad Efectiva en el Horizonte Tobas Fina del Yacimiento Pina, Ciego de Avila. **Revista Minería y Geología**. Vol. XVII, Nos. 3-4, pp 19-22.

Cuador Gil, J. Q. y Quintero, A., 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**, ISSN: 1405-3322, Tomo LIV, pp 19-27.

Estévez Cruz, E. y **Cuador Gil, J.Q.**, 2002, Yacimiento Oro Castellanos: evaluación y comparación de técnicas de estimación espacial, **Revista Minería y Geología**, Vol. XVIII, Nos. 1-4.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA FUNDAMENTAL

Acosta, J. y Dussac, O., 1999, Sondeo eléctrico vertical de polarización inducida. Informe, EGMO.

Adamovich A. y Chejovich V., 1962, Principales características de la geología y minerales útiles de la región norte de la provincia de oriente. Revista Tecnológica.

Annels, A.E., 1991, Mineral Deposit Evaluation, Practical Approach, Chapman & Hall, 431p.

Arik, A., 1990, Effects of Search Parameters on Kriged Reserve Estimates, International Journal of Mining and Geological Engineering, Vol. 8, No.12, p.305-318.

Ariosa Iznaga, J. D., Lavaut Copa, W. y Bergues Garrido P. S., 2002, Aproximación a un modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de fe-ni-co en el macizo Ofiolítico Mayari - Baracoa de Cuba Oriental, Revista Minería y Geología (en prensa)

Armstrong, M., 1994, "Bon Sens et Géostatistique", Bulletin de Liaison des Anciens Stagiaires du Centre d'Etudes Supérieures des Matières Premières CESMAT, No.40 Novembre 1994, 8 p.

Armstrong, M., y Roth, C., 1997, Notas de clases del curso Geoestadística Lineal, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso: 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Nacional Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.

Armstrong, M., y Carignan, J., 1997, "Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.", École de Mines de Paris, 112 p., "Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.", École de Mines de Paris, 112 p.

Carr, J.R., 1995, Numerical Analysis for the Geological Sciences, Prentice Hall Inc, 592 p.

Carrasco-Castelli, P., y Jara-Salame, E., 1998, Information Impact in Mining Decisions Case Study Radomiro Tomic, Journées de Géostatistique, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 25 et 26 Mai 1998, 14 p.

Chauvet, P., 1994, "Aide-Memoire de Géostatistique Minière", École des Mines de Paris, 210p.

Chica-Olmo, M., 1987, Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 387 p.

Chica-Olmo, M., 2002, Comunicación personal por correo electrónico, Universidad de Granada, España.

Christakos, G., y Raghu, V.R., 1996, Dynamic Stochastic Estimation of Physical Variables, Mathematical Geology, Vol. 28, No. 3, p. 34-365.

Christensen, R., 1993, Quadratic Covariance Estimation and Equivalence of Predictions, Mathematical Geology, Vol. 25, No. 5, p.541-558.

Clark, I., 2002, Normal Distribution, Lista de discusión Ai-Geostats.

- Cobiella R. J, Rodríguez J, Campos M., 1984**, Posición de Cuba Oriental en la Geología del Caribe. Revista Minería y Geología, Vol. 2, pp. 65-74.
- Curran, P.J. y Atkinson, P.M., 1998**, Geostatistics and Remote Sensing, Progress in Physical Geography, 22, 1, p. 61-78.
- David, M., 1977**, Geostatistical Ore Reserve Estimation, Elsevier, Amsterdam, 364 p.
- de Fouquet, C, 1996**, Quelques Rappels Sur les Méthodes Géostatistiques, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, Fontainebleau, France, 4 p.
- Deutsch, C.V., 2002**, Comunicación personal por correo electrónico., PhD, Universidad de Stanford.
- Deutsch, C.V., y Journel, A.G., 1998**, "GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide", Second Edition, Oxford University Press, 369p.
- Francké, J.C., y Parkinson, G.J., 1999**, The new Role of Geophysics in Nickel Laterites Exploration and Development.
- Gutiérrez M. A y Beyra M. L., 1993**, Introducción al Análisis Variográfico de Yacimientos de Corteza de Intemperismo [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Hernández, A., 1999**, Tarea No.2 del tema de lateritas, geofísica de superficie, sondeo eléctrico vertical de polarización inducida, Informe, EGMO.
- Ildio L. D., 1999**, Análisis Variográfico del Yacimiento Camarioca Norte [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Isaaks, E. H., y Srivastava, R.M., 1989**, Applied Geostatistics, New York Oxford, Oxford University Press, 561p.
- Isaaks & Co., 1999**, SAGE2001, A Spatial and Geostatistical Environment for Variography, San Mateo, California, <http://www.isaaks.com>, 67 p.
- Iturralde V.M., 1996**, Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba. Contribución Especial No. 1. IGCP Project W364. Miami. USA. 265 pp.
- Jordan R. M., 2000**, Análisis Variográfico del Grupo VII del Yacimiento Martí [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Journel, A. G. y Huijbregts, C. J., 1978**, Mining Geostatistics, Academic Press, New York, 600 p.
- Knipper A., y Cabrera R., 1974**, Tectónica y Geología Histórica de la Zona de Articulación entre el mio y eugeosinclinal de Cuba y el Cinturón hiperbasáltico de Cuba. Contribución a la Geología de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba. Pp 15-77.
- Krajewski, S. A. y Gibbs, B.L., 1993**, A Variogram Primer, Gibbs Associates, 93 p.
- Lajaunie, C., 1997**, Iterative Cross Validation, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, France, 8p.
- Lantuéjoul, Ch., 1994**, Cours de Selectivité, Centre de Geostatistique, Ecole des Mines de París, 72 p.
- Lantuéjoul, Ch., 1997**, Iterative Algorithms for Conditional Simulation, E.Y.Baafi and N.A. Schofields (eds) Geostatistics Wollongong'96, Volume 1, p 27-40.
- Lantuéjoul, Ch., 1998**, Notas de clases del curso Simulación, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Lavaut Copa, W., 1987**, Control litológico mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramáficas en el Campo Mineral de los yacimientos Punta Gorda, Las Camariocas y Piloto, Tesis Doctoral.
- Lavaut Copa, W., 1998**, Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental. Minería y Geología No. 15, pág. 9-16.
- Lavaut Copa, W., 2000**, Sobre el Estudio Preliminar de las Redes de Perforación y Muestreo para el Cálculo del Mineral Laterítico. E.G.M. Santiago de Cuba. 2 000.
- Legrá, A., 1994**, Consideraciones sobre el cálculo de volúmenes geólogo mineros por métodos clásicos, Revista Minería y Geología, Vol. XI, No. 2.

- Legrá, A., 1999**, Metodología para el pronóstico, planificación y control de la minería en yacimientos lateríticos [Tesis en opción al grado de doctor en ciencias técnicas] . ISMM, Moa Holguín
- Legrá, A., Silva, O., y Belele O, 1999a**, Modelación de una superficie topográfica a partir de su relación entre Kriging y la interpolación lineal en R^n , Revista Minería y Geología, Vol. XVI, No. 1.
- Legrá, A., Polanco, R., y Miranda, J. 1999b**, Propuesta para el establecimiento de la masa volumétrica en los yacimientos lateríticos de Cuba, Revista Minería y Geología, Vol. XVI, No. 2.
- Legrá, A., y Guardiola R, 1999**, Contribución a la práctica del análisis variográfico y de la estimación por Kriging, Revista Minería y Geología, Vol. XVI, No. 2.
- Lynx Mining Systems, 1998**, microLYNX98, MicroLYNX Reference Manual.
- Matheron, G., 1970**, "La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications" Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, Ecole de Mines de Paris, 212 p.
- Matheron, G., y Kleingeld, W.J., 1987**, "The Evolution of Geostatistics", APCOM 87. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Volume 3. Geostatistics. Johannesburg, SAIMM, pp. 9-12.
- Mondelo, F., y Acosta, J., 1998**, Exploración detallada Camarioca Este. Informe, EGMO.
- Myers, D.E., 1992**, Kriging, Cokriging, Radial Basic Functions and The Role of Positive Definiteness, Computers Mathematical Application, Vol. 24, No.12, p.139-148.
- ONRM, 1999**, Clasificación de los recursos y reservas de minerales útiles sólidos, Ministerio de la Industria Básica, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Dirección de Documentación, Ciudad Habana.
- ONU, 1996**, Marco Internacional de las Naciones Unidas Para la Clasificación de Reservas/Recursos, Combustibles Sólidos y Sustancias Minerales, Versión Definitiva. Establecida y Presentada por el Equipo Especial de las Naciones Unidad. p. 77-88.
- Pan, G., y Arik, A., 1993**, Restricted Kriging for Mixture of Grade Models, Mathematical Geology, Vol. 25, No. 6, p 713-736.
- Pannatier, Y., 1993**, Ms-Windows Program for exploratory variography and variogram modelling in 2D, International Workshop on Statistics of Spatial Processes-Theory and Applications, Bari, Italy 27-30 September 1993.
- Pardo Iguzquiza, 2002**, Comunicación personal por correo electrónico, PhD, Universidad de Granada.
- Pawłowsky, V., Olea, R.A., y Davis, J.C., 1995**, Estimation of Regionalized Composition: A Comparison of Three Methods, Mathematical Geology, Vol.27, No. 1, p.105-127.
- Peric, M., 1981**, Exploration of Burundi Nickeliferous Lateritic by Electrical Methods, Geophysical Prospecting, 29, pp 274-287.
- Proenza F. J., y Fernández, M. L, 1994**, Calculo de errores de evaluación de reservas minerales a través del análisis variográfico. Potencialidad de su utilización en los yacimientos ferroniquelíferos de Cuba oriental, Revista Minería y Geología, Vol. XI, No. 3. Pág. 27-30.
- Queen, L.D., y Parkinson, G.J., 1998**, The Integration of Ground Penetrating Radar in Resource Delimitation for Nickel Lateritics in Papua New Guinea.
- Quintas C.F., 1989**, Análisis Estratigráfico y Paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la Provincia Guantánamo y Areas Cercanas. [Tesis Doctoral], ISMM, Moa, Holguín.
- Rivoirard, J., 1998**, Notas de clases del curso Simulación, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Cursos: 1995-96 y 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Rodríguez I. A., 1998**, Estudio Morfotectónico de Moa y Areas Adyacentes para la evaluación de riesgos de Génesis tectónica. [Tesis Doctoral] . I.S.M.M, Moa, Holguín.
- Sahin, A., y Hassan, H.M., 1998**, Enhancement of Permeability Variograms Using Outcrop Data, The Arabian Journal for Sciences and Engineering, Vol. 23, No. 1C, p. 137-144.

Schaug, J., Iversen, T., y Pedersem, U., 1993, Comparison of Measurements and Model Results for Airborne Sulphur and Nitrogen Components with Kriging, *Atmospheric Environment*, Vol.27A, No. 6, p.831-844.

Surfer® Version 7, User Manual: Copyright © 1999. Golden Software, Inc.

Vera Sardinias L. O., 2001, Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. [Tesis Doctoral], I.S.M.M, Moa, Holguín.

Vera Yeste A., 1979, Introducción a los yacimientos de níquel cubanos, Ciudad de la Habana: ORBE.

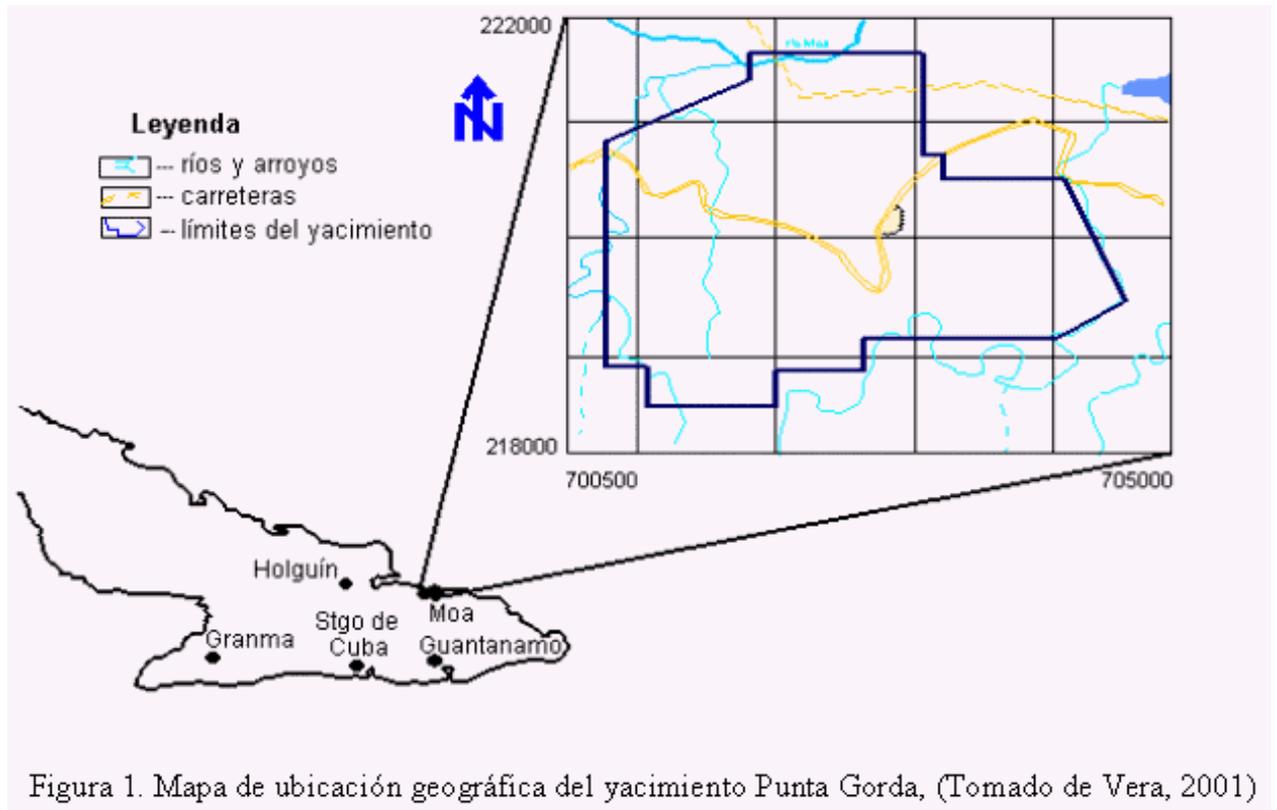
Wackernagel, H., 1994, Cokriging versus Kriging in Regionalized Multivariate Data Analysis, *Geoderma*, 62, p- 83-92.

Wackernagel, H., 1995, "Multivariate Geostatistic, an Introduction with applications.", Berlin: Springer, 256 p.

Wackernagel, H., 1998, Notas de clases del curso Geostatística Multivariada, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia.

Walpole, R.E., y Myers, R. H., 1996, Probabilidad y Estadística., Cuarta edición, Ed. Mc Graw – Hill, México, 218 p.

FIGURAS



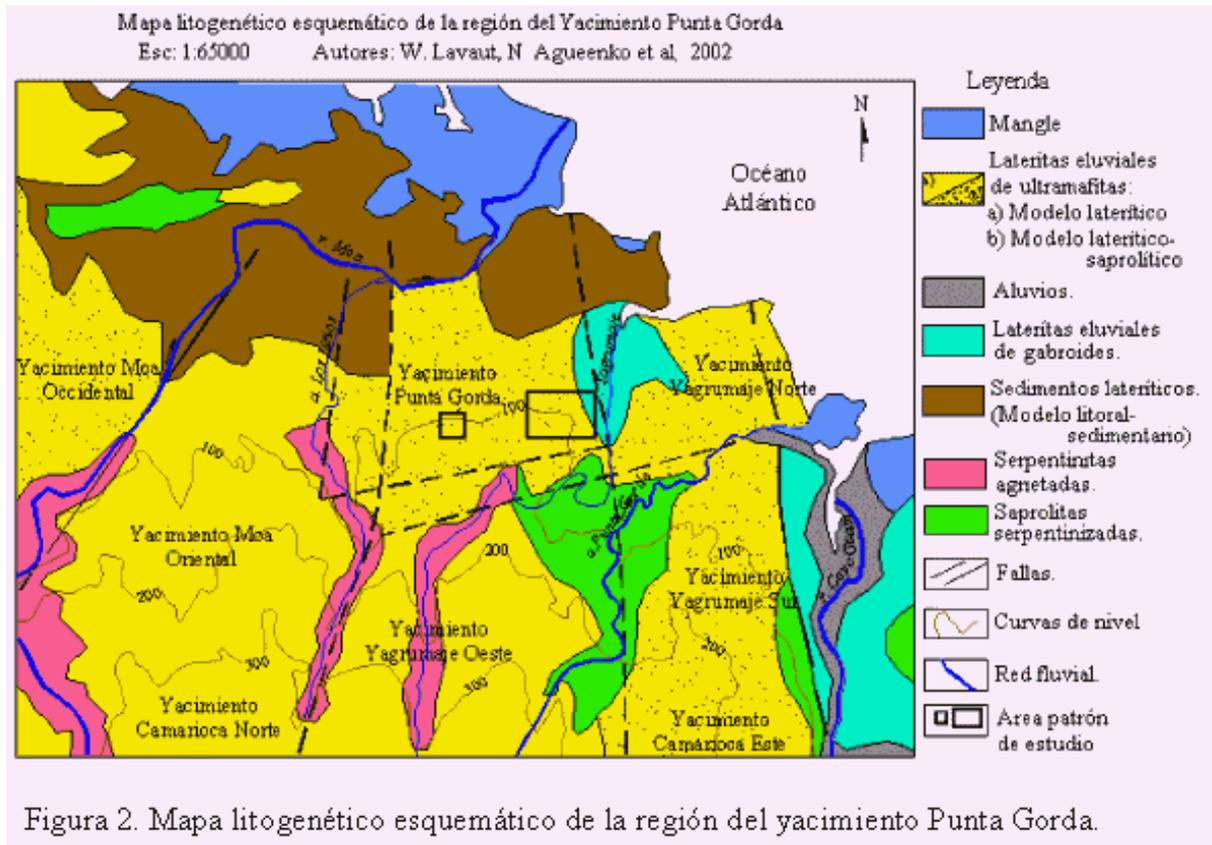


Figura 2. Mapa litogenético esquemático de la región del yacimiento Punta Gorda.

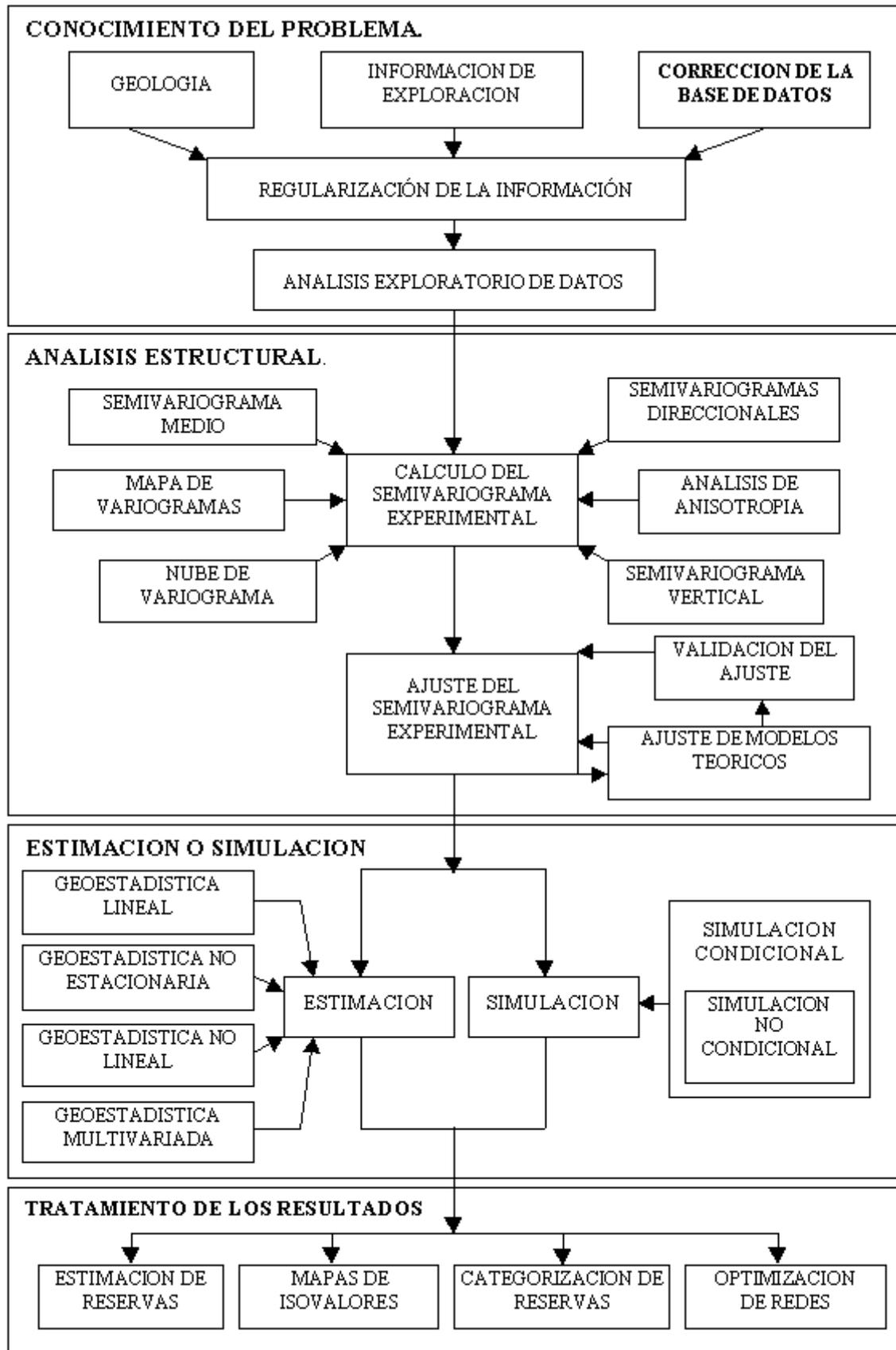


Figura 4. Elementos que integran un estudio Geoestadístico.

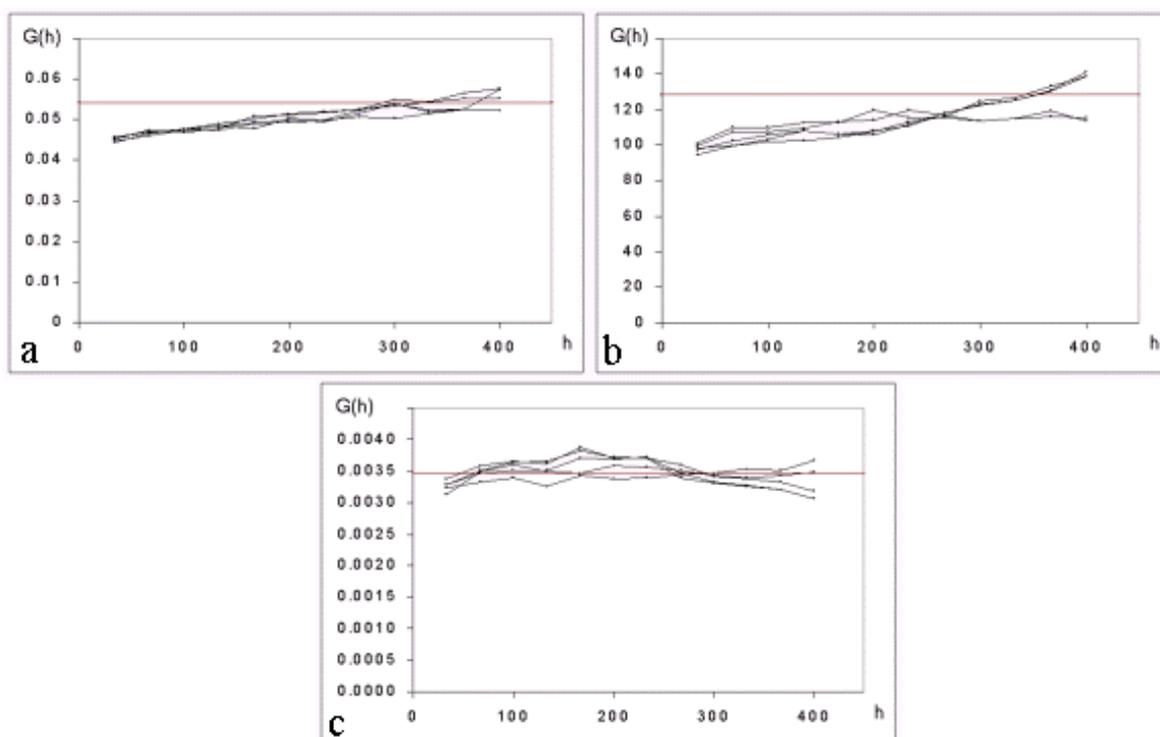


Figura 5. Semivariogramas direccionales de la zona de escombro superior, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto

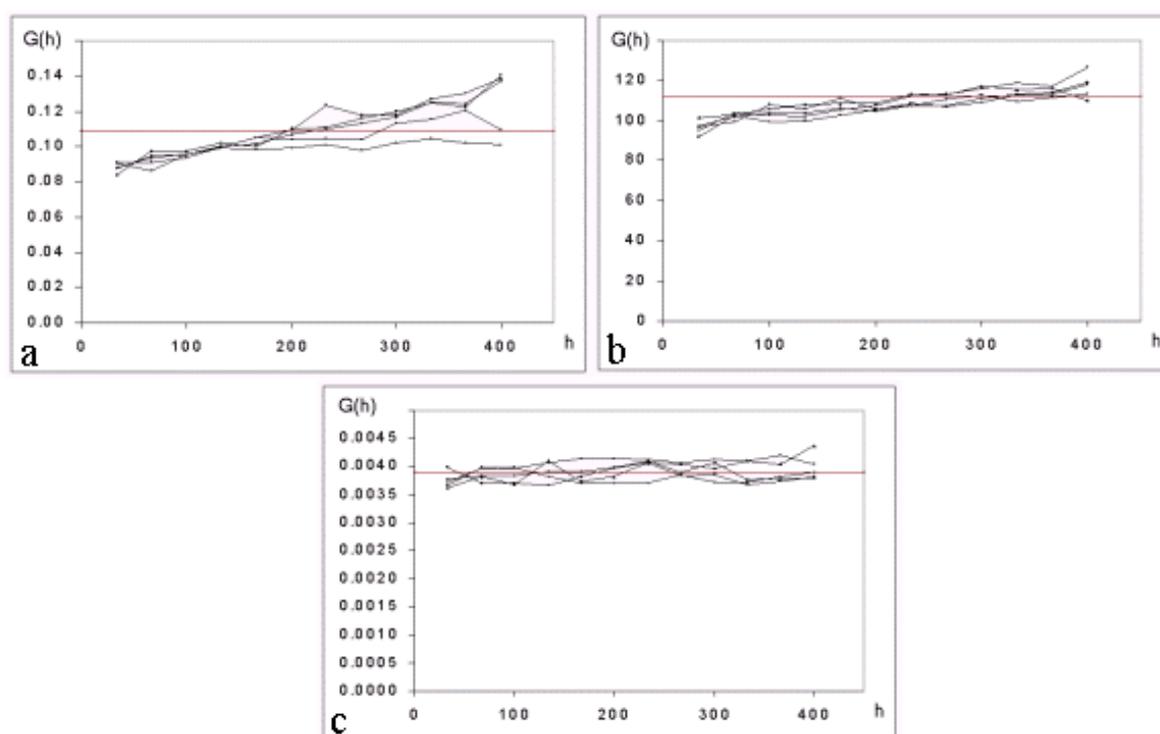


Figura 6. Semivariogramas direccionales de la zona mineralizada, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto

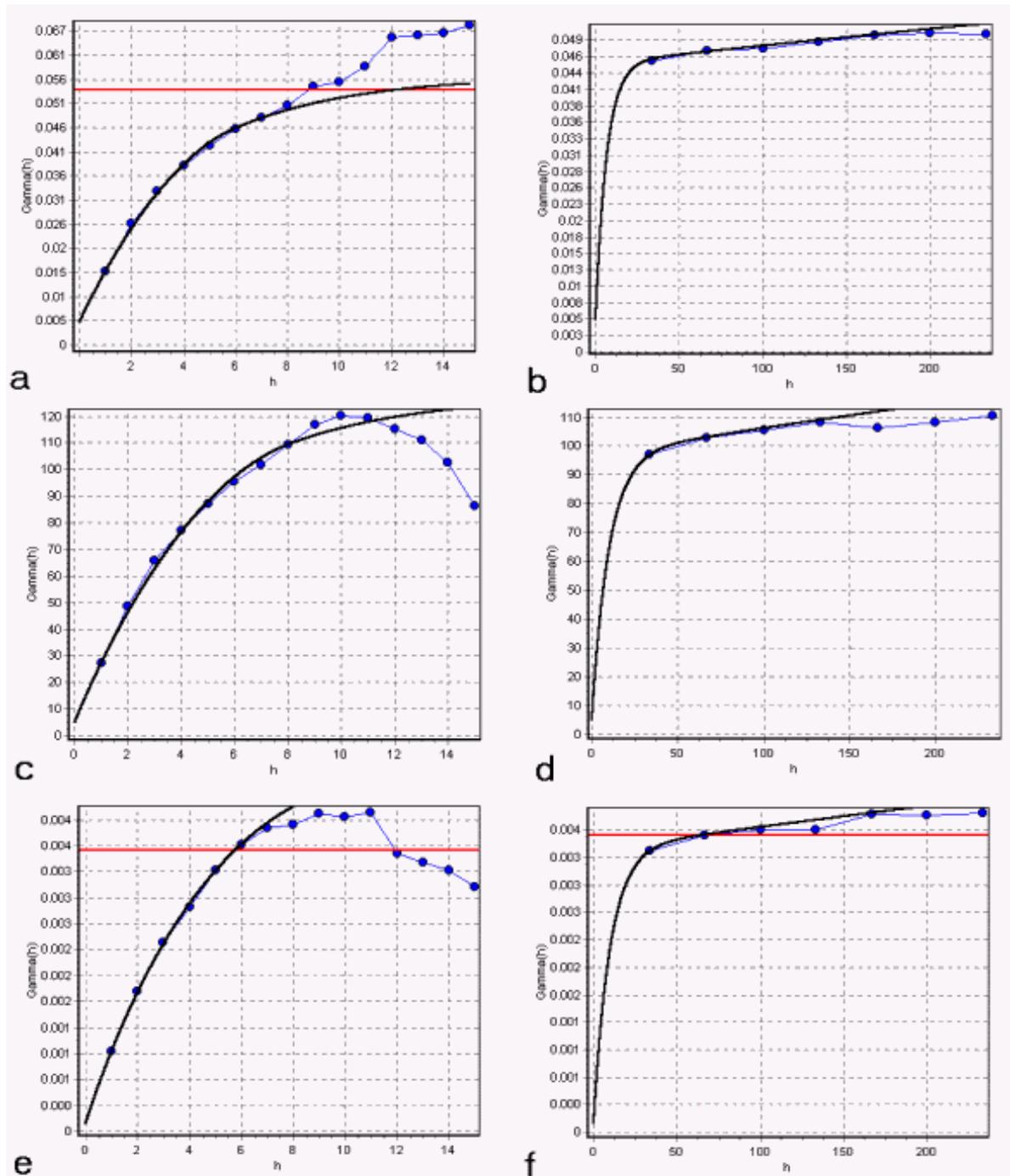


Figura 7. Ajuste de los semivariogramas de la zona de escombros superior, semivariograma vertical, a) Níquel, c) Hierro y e) Cobalto semivariograma medio, b) Níquel, d) Hierro y f) Cobalto

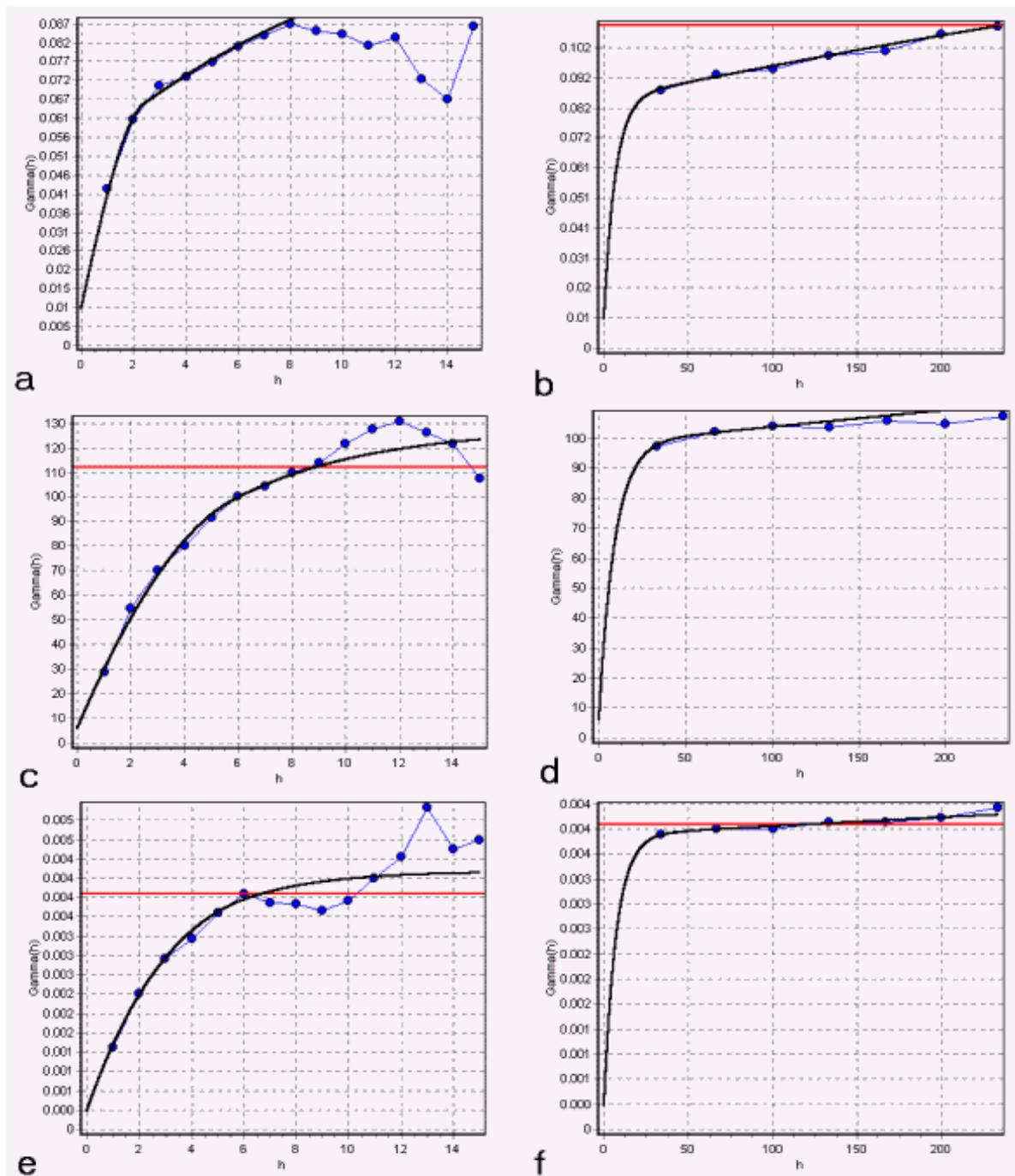
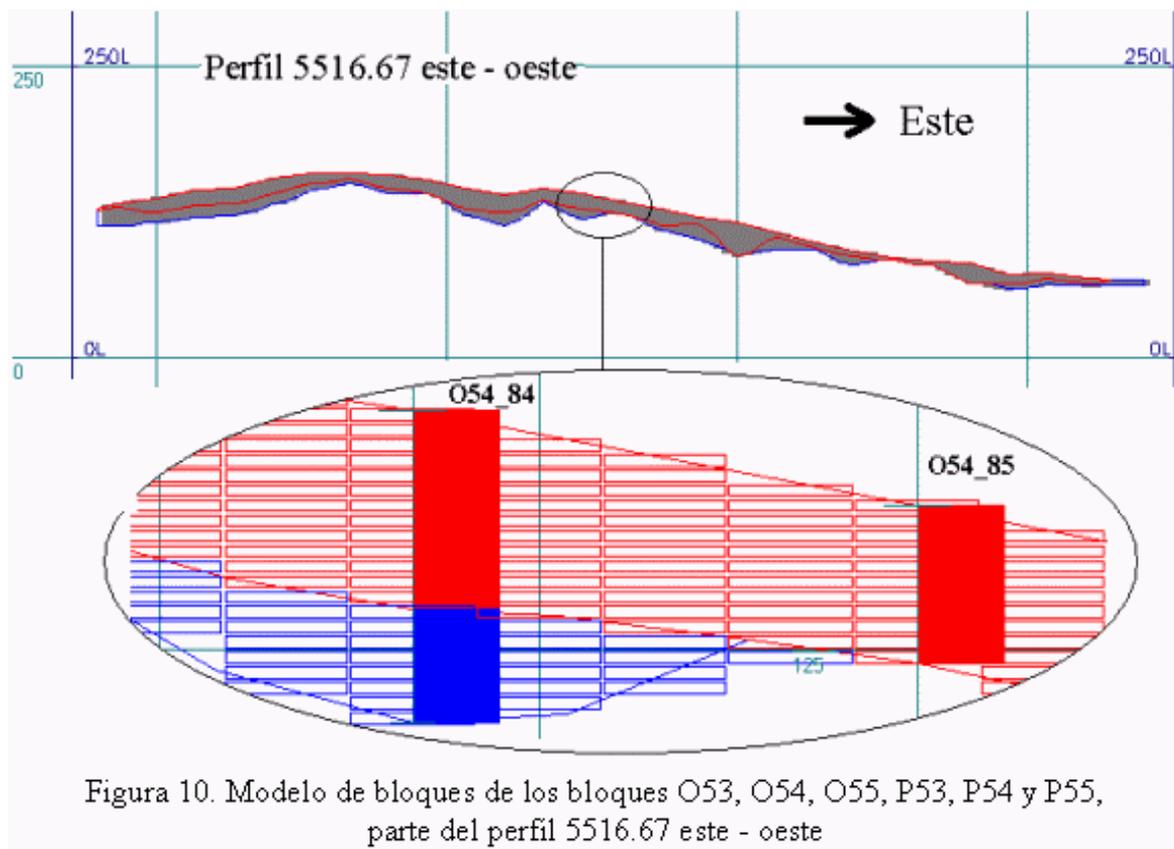
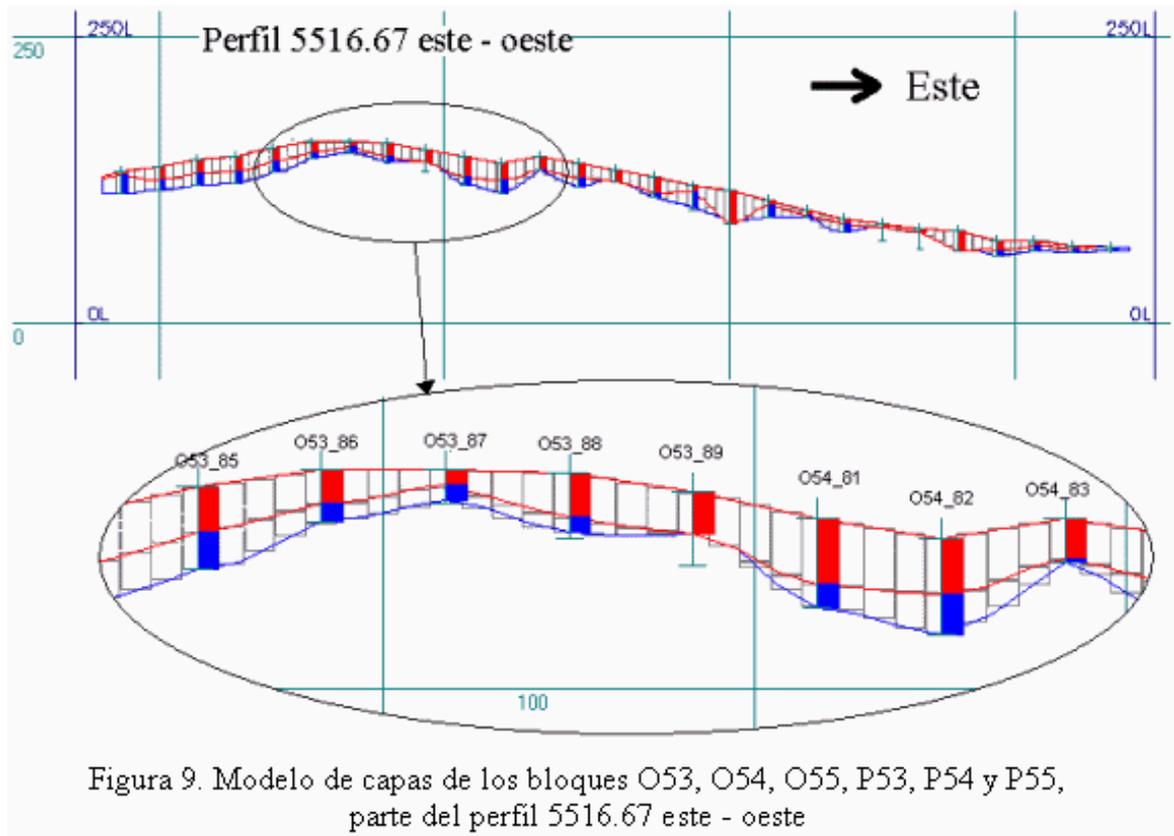


Figura 8. Ajuste de los semivariogramas de la zona mineralizada, semivariograma vertical, a) Níquel, c) Hierro y e) Cobalto, semivariograma medio, b) Níquel, d) Hierro y f) Cobalto



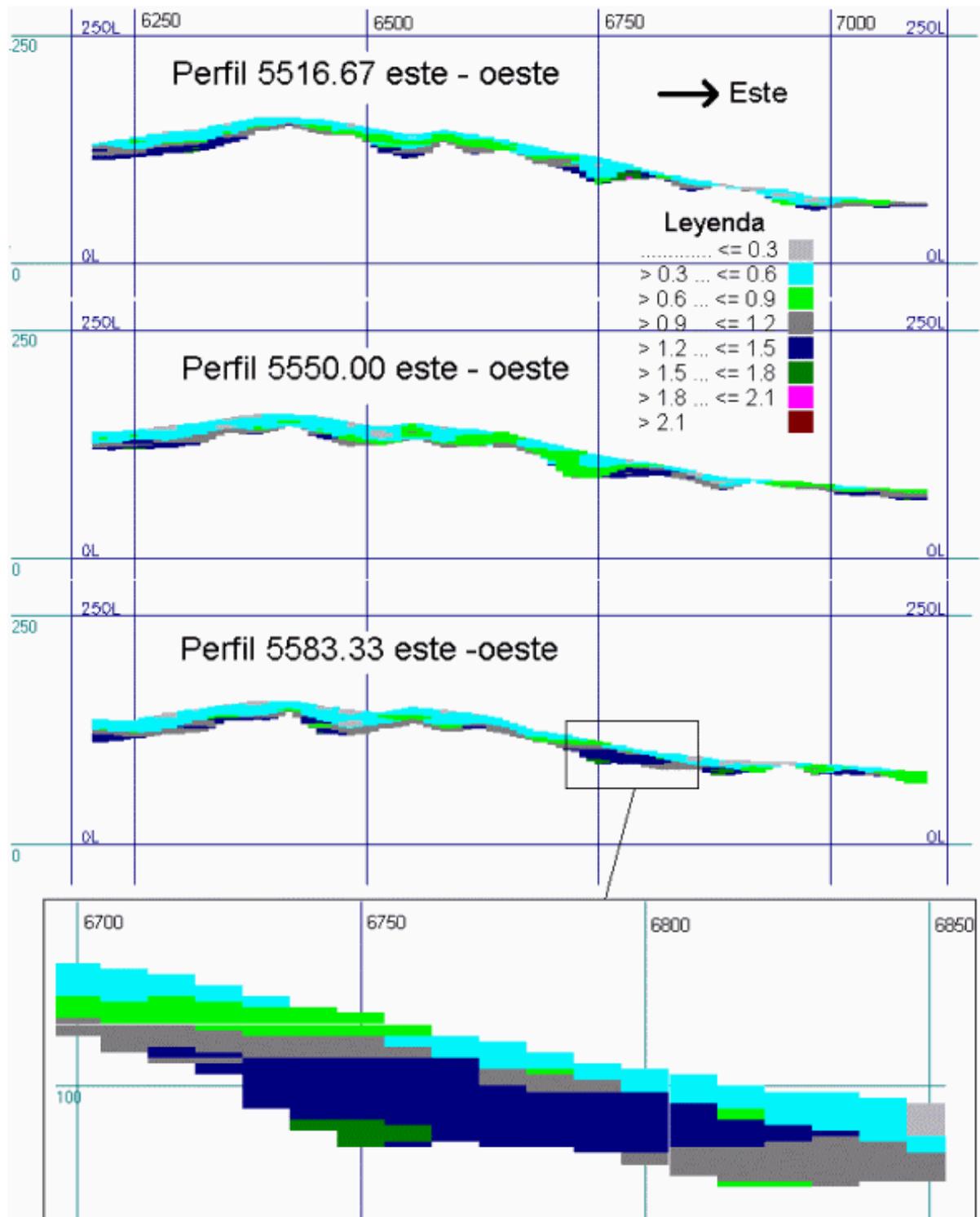
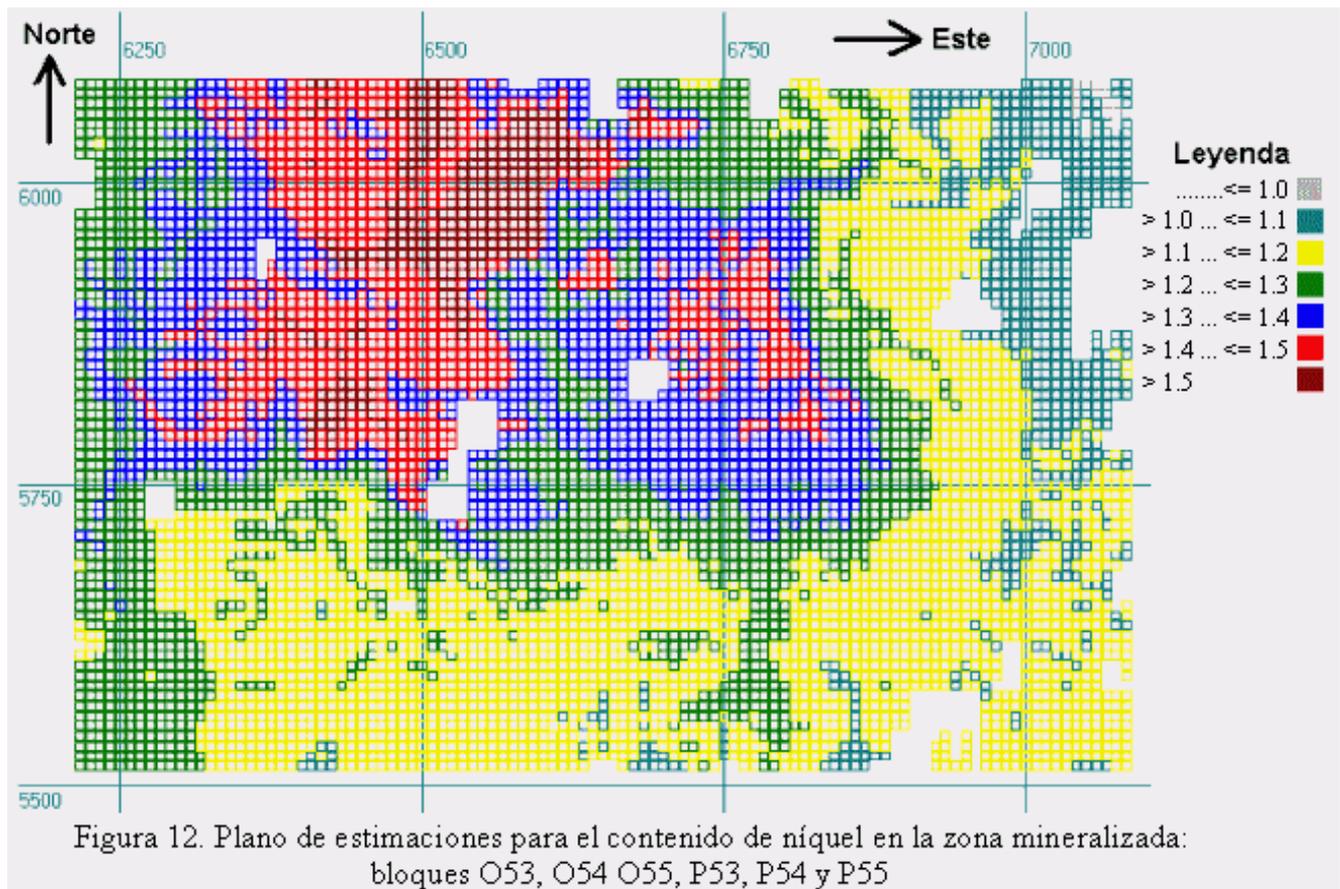
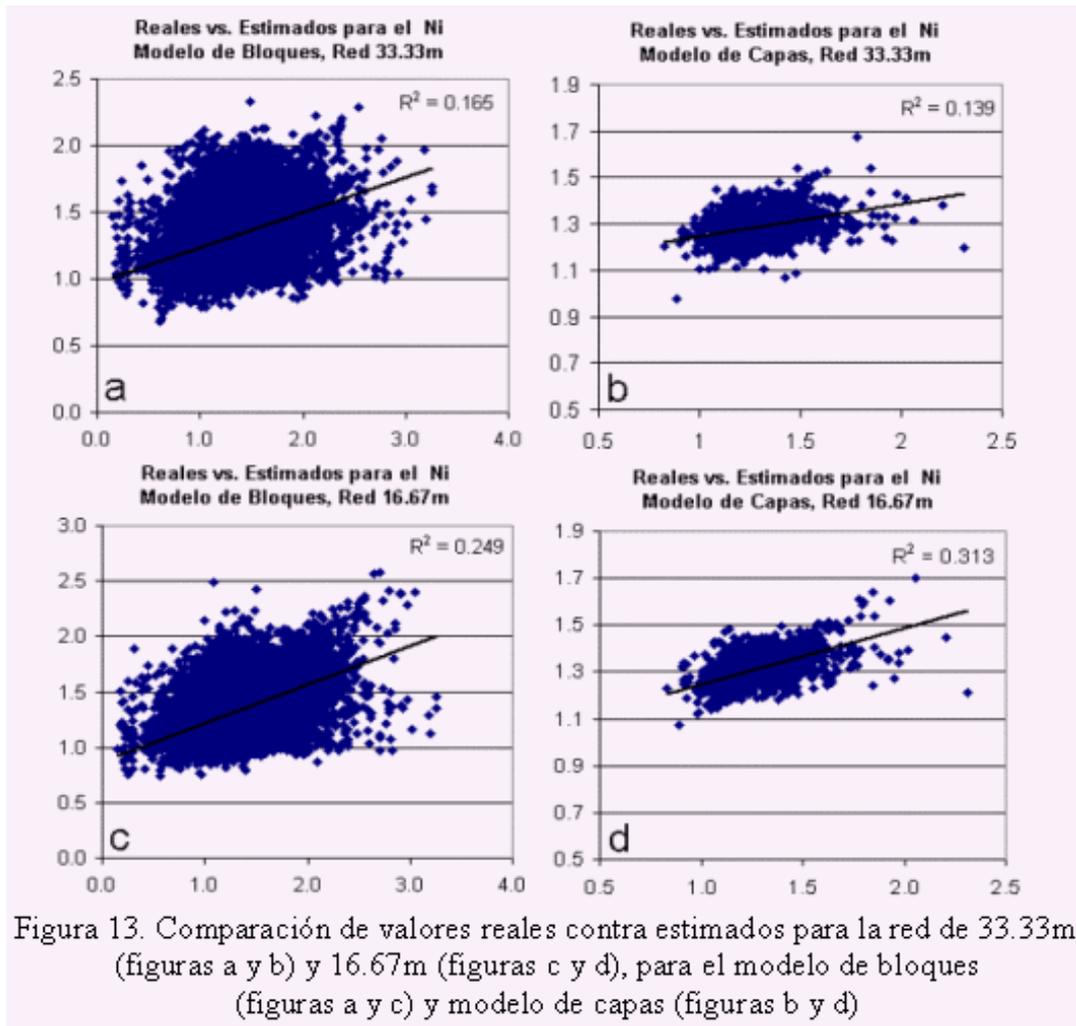


Figura 11. Ejemplo de perfiles estimados para el níquel





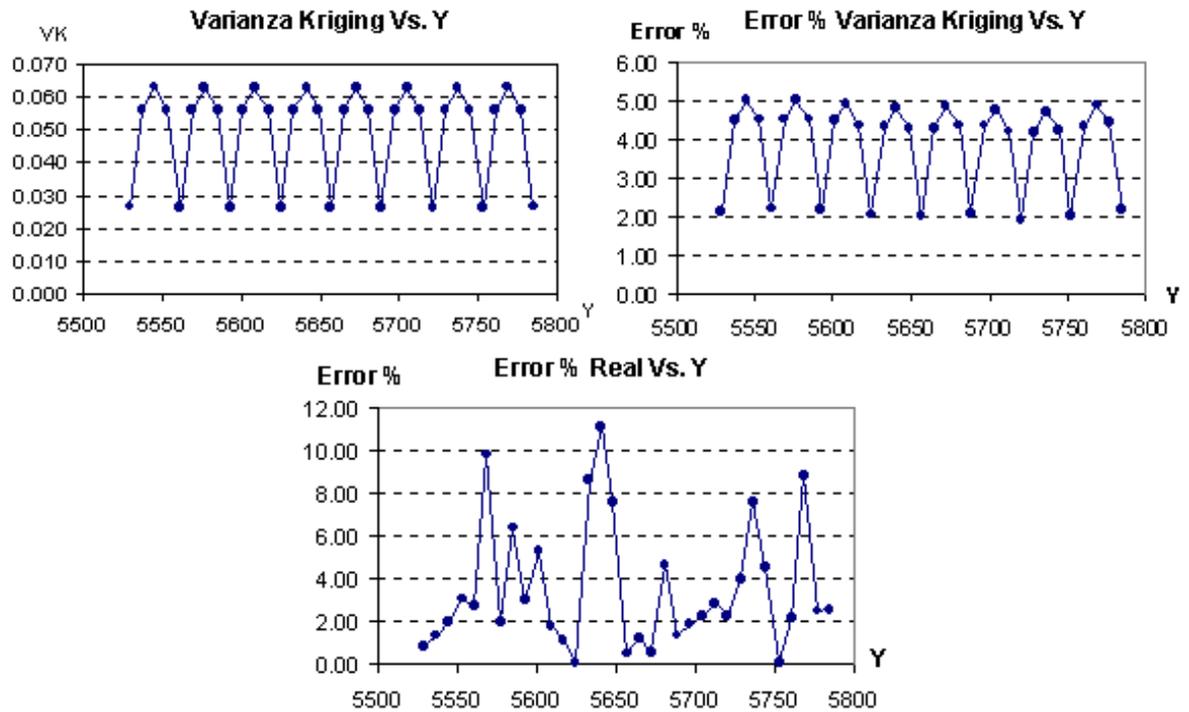


Figura 14. Gráfico del comportamiento de la varianza de krigeaje y de los criterios de error a través de un perfil (perfil norte - sur).

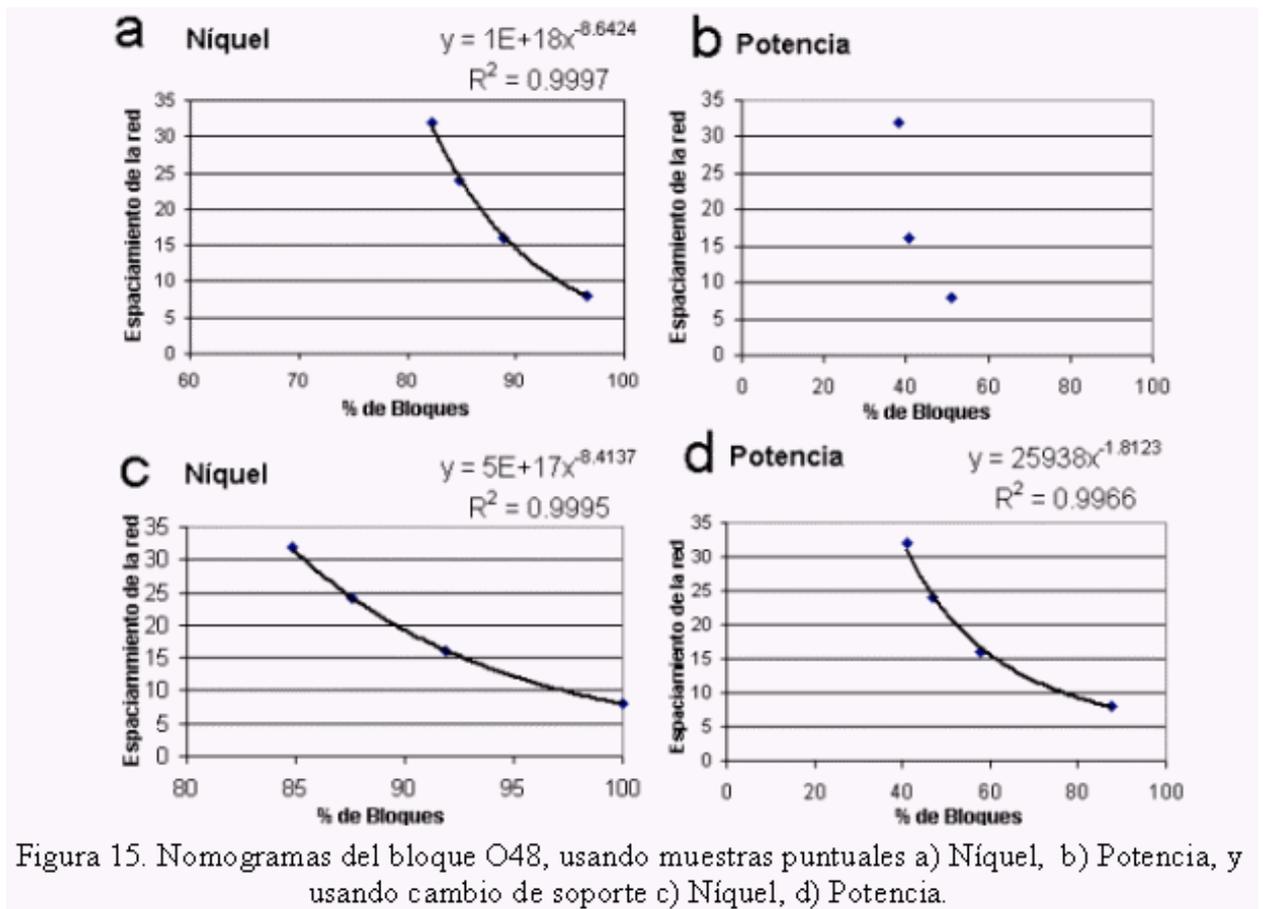


Figura 15. Nomogramas del bloque O48, usando muestras puntuales a) Níquel, b) Potencia, y usando cambio de soporte c) Níquel, d) Potencia.

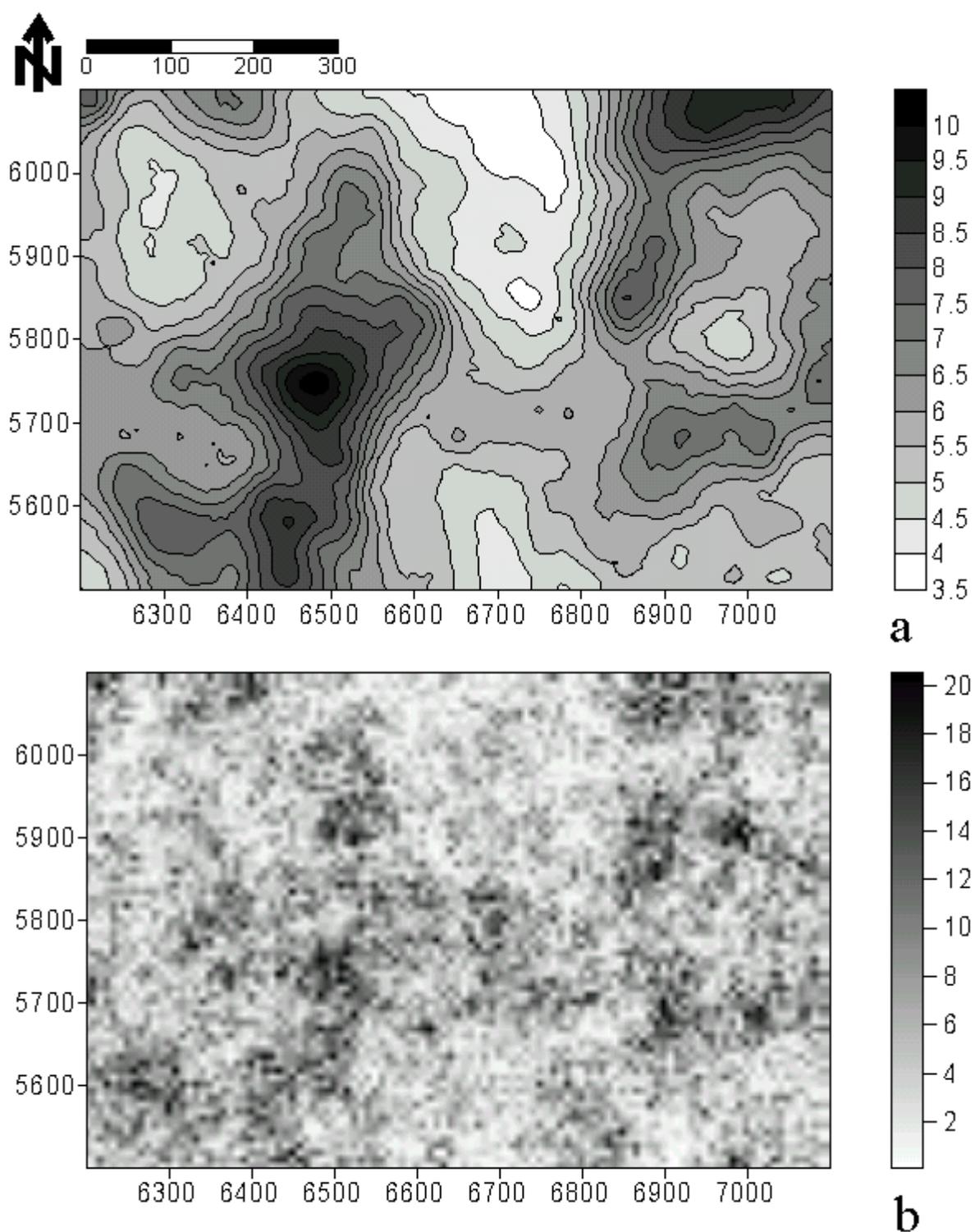
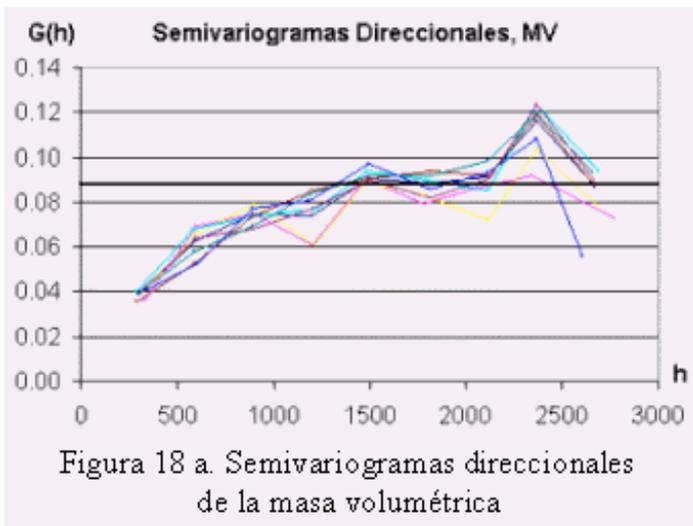
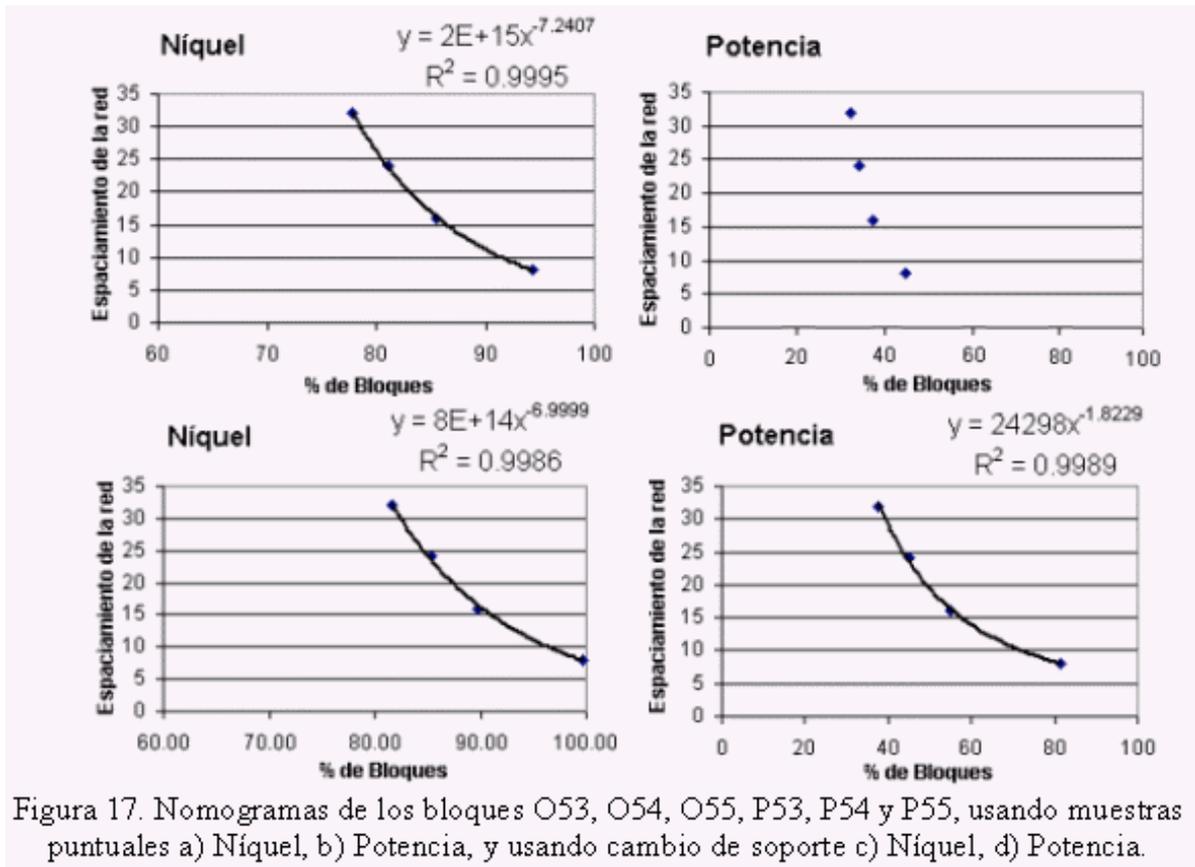


Figura 16. Mapa de estimación y simulación de la potencia mineral de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, a) Estimación y b) Simulación



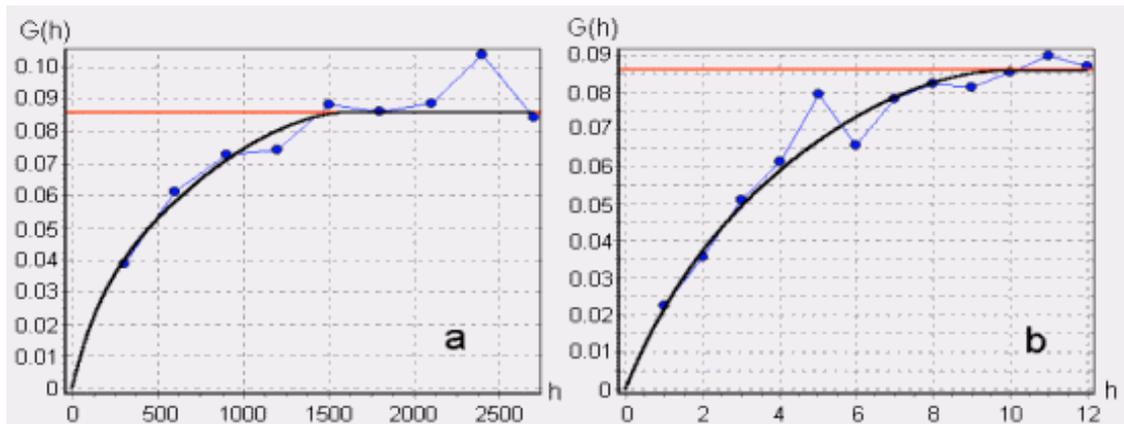


Figura 18 b. Ajuste de los semivariogramas de la masa volumétrica, a) Semivariograma medio y b) Semivariograma vertical

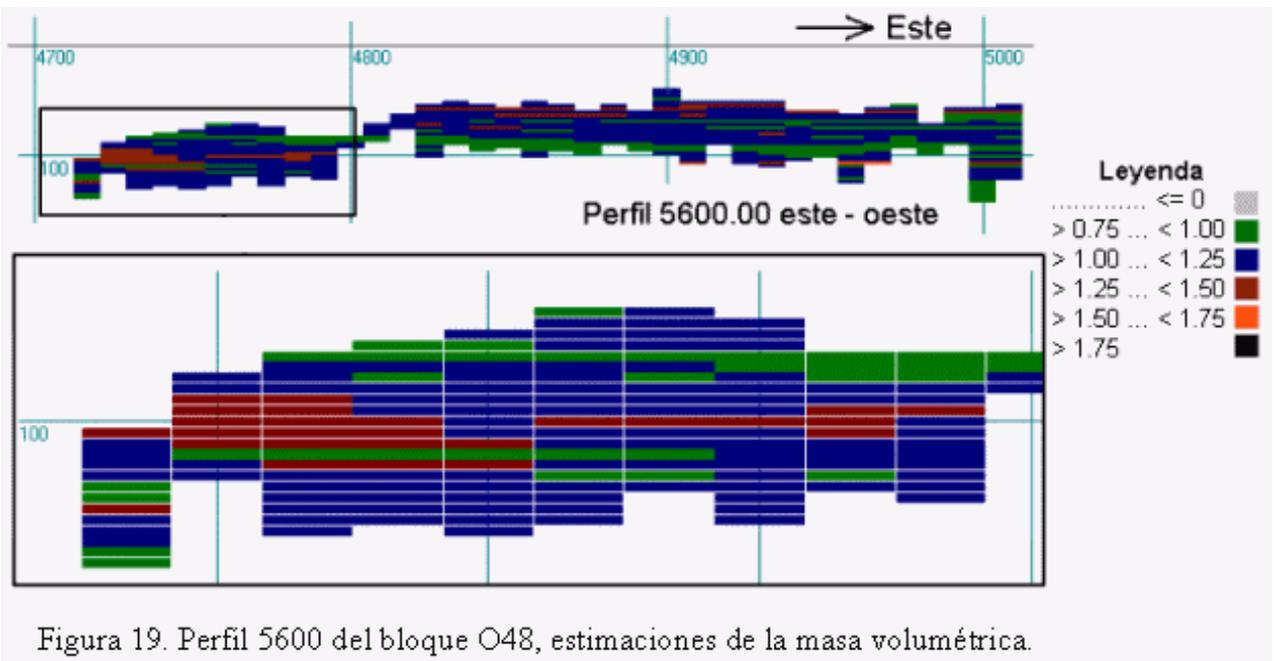


Figura 19. Perfil 5600 del bloque O48, estimaciones de la masa volumétrica.

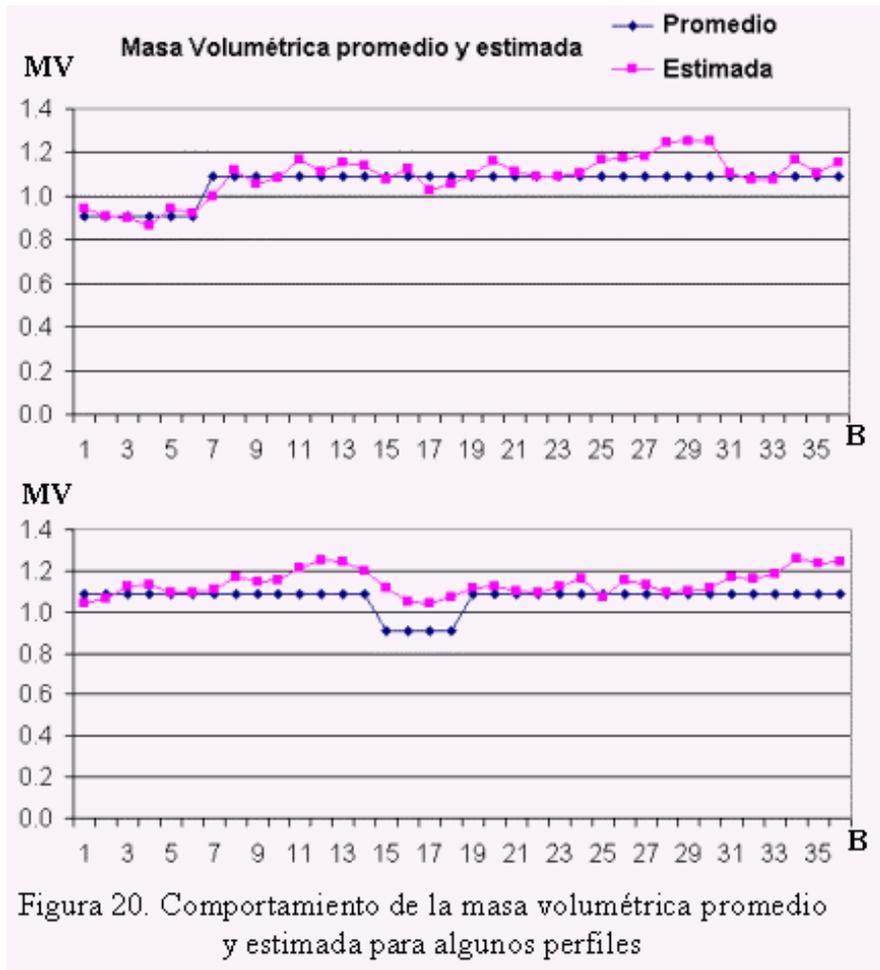


Figura 20. Comportamiento de la masa volumétrica promedio y estimada para algunos perfiles

