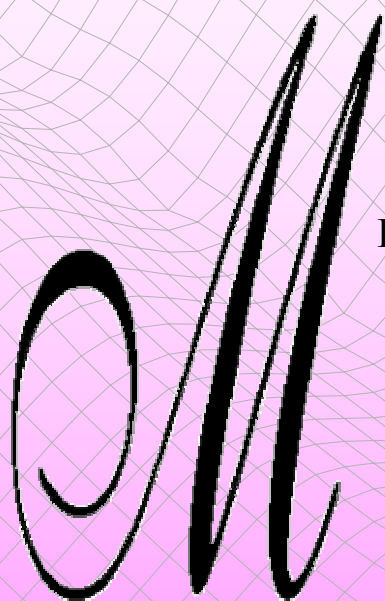




REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD DE GEOLOGÍA-MINERÍA
TRABAJO DE DIPLOMA



ETODOLOGÍA PARA LA
MODELACIÓN DE
YACIMIENTOS
RESIDUALES DE NÍQUEL

AUTORES:

ADRIAN MARTÍNEZ VARGAS.

YUSNEURIS PÉREZ MARTÍNEZ.

TUTORES:

Dr. ARÍSTIDES A. LEGRÁ LOBAINA.

Dr. FÉLIX QUINTA CABALLERO.

ISMM MOA, 2000

*Nada en este mundo parece sino varía su forma,
nacer sólo es comenzar a ser algo diferente de
lo que antes éramos, y morir es dejar de ser ese
algo. A pesar de toda la transformación, la
suma de cada cosa permanece constante.*

OVID (año 43 Antes de Cristo).

Adrian Martínez Vargas.

Dedicatoria.

*A mi hijo, en quien pongo toda mi
confianza, amor, dedicación y fe en
el futuro.*

Yusneuris Pérez Martínez.

Dedicatoria.

*A mis padres, familia y a todos mis
seres queridos.*

Agradecimientos.

Deseamos que llegue nuestro más cálido y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a la exitosa realización de este trabajo de diploma y a los que supieron transmitirnos los conocimientos necesarios para forjarnos como ingeniero geólogo, en especial a:

Dr. Arístides Alejandro Legrá Lobaina, por su dedicación y ayuda constante durante la realización de este trabajo.

Dr. Félix Quintas Caballero, por el apoyo espiritual y colaboración durante todo el desarrollo de la investigación.

Ing. León Ortelio Vera Sardiñas, por la cautela y ahínco con que siguió nuestra enseñanza.

A los compañeros profesores del Departamento de Geología del ISMM.

Índice.

RESUMEN.	1
OBJETIVOS	2
<i>CAPÍTULO 1</i> ASPECTOS GENERALES.	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 COMPOSICIÓN DE LA MEMORIA.	4
1.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA MODELACIÓN Y OTRAS CONCEPCIONES.	5
1.3.1 EL ORIGEN DEL MODELO GEOLÓGICO CLÁSICO.	6
1.3.2 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.	6
1.3.3 ANTECEDENTES NACIONALES	7
1.4 IMPORTANCIA DE LA MODELACIÓN.	7
1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	8
1.6 ANÁLISIS CRÍTICO DE LA BIBLIOGRAFÍA Y LA INFORMACIÓN EMPLEADA.	9
<i>CAPÍTULO 2</i> EL MODELO GEOLÓGICO DE UN YACIMIENTO.	12
2.1 MODELACIÓN DE YACIMIENTOS.	12
2.2 EL MODELO GEOLÓGICO Y PARTES QUE LO INTEGRAN.	13
2.2.1 EL MODELO GEÓLOGO – GENÉTICO.	14
2.2.2 MODELO GEOMÉTRICO.	16
2.2.3 MODELO MATEMÁTICO.	17
2.3 LA TEORÍA DE LAS VARIABLES REGIONALIZADAS Y SU RELACIÓN LAS DISTINTAS PARTES DEL MODELO GEOLÓGICO.	18
2.3.1 INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA TEORÍA DE LAS VARIABLES REGIONALIZADAS (VR).	18
2.3.2 EL VARIOGRAMA COMO ÚTIL PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS DATOS.	22
2.3.3 OTROS ASPECTOS A TENER EN CUENTA.	27
2.4 LA TEORÍA DE LAS VR Y SU RELACIÓN CON LA MODELACIÓN GEOLÓGICA.	28
2.5 LA ESTIMACIÓN Y LA SIMULACIÓN DEL FENÓMENO GEOLÓGICO, COMO HERRAMIENTA IMPRESCINDIBLE PARA LA MODELACIÓN MATEMÁTICA.	35
2.5.1 LA ESTIMACIÓN.	35
2.5.2 LAS TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN UTILIZANDO MÉTODOS PROBABILÍSTICOS Y EL KRIGING.	37
2.5.3 SIMULACIÓN CONDICIONAL.	42
2.5.4 OTROS ASPECTOS A TENER EN CUENTA.	46
2.5.5 LA ESTADÍSTICA MULTIVARIADA Y ESTADÍSTICA CLÁSICA EN FUNCIÓN DEL DESARROLLO DEL MODELO GEOLÓGICO.	46
<i>CAPÍTULO 3</i> LA MODELACIÓN EN YACIMIENTOS RESIDUALES DE NÍQUEL.	51

3.1	GENERALIDADES DE LOS YACIMIENTOS RESIDUALES DE NÍQUEL Y COBALTO.	51
3.2	CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL LATERÍTICO.	53
3.2.1	HORIZONTE SAPROLÍTICO.	53
3.2.2	HORIZONTE ARCILLOSO.	55
3.2.3	HORIZONTE FERRALÍTICO.	56
3.2.4	HORIZONTE DE CORAZAS.	56
3.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES LATERÍTICOS CUBANOS.	57
3.3.1	NOMENCLATURAS UTILIZADAS EN LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS CUBANOS.	58
3.3.2	GRADO DE MADUREZ DE LA CORTEZA DE METEORIZACIÓN.	60
3.3.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL LATERÍTICO.	62
3.3.4	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS HORIZONTES DE LA CORTEZA DE	
	INTEMPERISMO.	64
3.3.5	CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DE LA CORTEZA DE INTEMPERISMO DE NÍQUEL.	64
3.3.6	PRINCIPALES FASES MINERALES PORTADORAS DE NÍQUEL EN LOS HORIZONTES	
	LATERÍTICOS.	66
3.4	PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA MINERÍA Y LA METALURGIA DE LAS MENAS	
	NIQUELÍFERAS.	67
3.4.1	FACTORES QUE REGULAN LA MINERALIZACIÓN (GEOLÓGICOS).	67
3.4.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MINERÍA.	72
3.4.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL BENEFICIO DEL MINERAL.	74
3.5	SOLUCIÓN A ALGUNOS PROBLEMAS UTILIZANDO LA MODELACIÓN DEL YACIMIENTO.	76
3.5.1	SOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CANTIDAD DE	
	INFORMACIÓN GEOLÓGICA, ESTUDIO DE REDES Y ALTERNATIVAS.	77
3.5.2	SOLUCIÓN DE PROBLEMAS MINEROS.	85
3.5.3	SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE LA METALURGIA.	89
<u>CAPÍTULO 4 PARTES DEL MODELO EN UN YACIMIENTO DE NÍQUEL.</u>		<u>90</u>
4.1	MODELO GEÓLOGO-GENÉTICO.	90
4.1.1	PARÁMETROS A DETERMINAR EN EL MODELO GEÓLOGO - GENÉTICO. SU IMPORTANCIA	
	EN LA INDUSTRIA MINERA Y LA MODELACIÓN.	90
4.2	MODELO GEOMÉTRICO.	94
4.2.1	LÍMITES GEÓLOGO – TÉCNICOS.	94
4.2.2	LÍMITES ECONÓMICOS.	95
4.2.3	LÍMITES GEOLÓGICOS.	95
4.2.4	LÍMITES RELACIONADOS CON LA ESTIMACIÓN Y LA SIMULACIÓN CONDICIONAL.	95
4.2.5	ALGUNOS ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN EL MODELO GEOMÉTRICO DESTINADO A	
	LA ESTIMACIÓN, EN UN YACIMIENTO RESIDUAL DE NI.	96
4.3	MODELO MATEMÁTICO.	99
4.3.1	BREVE DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS DE LAS ETAPAS DE LA MODELACIÓN.	101
4.3.2	LA ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS ELEMENTOS.	101
4.3.3	MODELACIÓN ECONÓMICA.	104
4.3.4	MODELOS RECURSOS Y RESERVAS, EMPLEANDO TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE	
	RECURSOS RECUPERABLES (MODELOS RRE).	106
4.4	COMPATIBILIDAD CON PROYECTOS MINEROS, EN YACIMIENTOS LATERÍTICOS CUBANOS.	

CONCLUSIONES.	110
----------------------	------------

RECOMENDACIONES.	113
-------------------------	------------

REFERENCIAS.	114
---------------------	------------

Resumen.

Para poder realizar una minería sostenible y rentable, que satisfaga las necesidades de los procesos metalúrgicos hay que partir obligatoriamente de un conocimiento geológico amplio, por esto en el mundo se han desarrollado concepciones y técnicas de diversa índole para organizar y mejorar el grado de detalle de este conocimiento; dentro de estas concepciones la más utilizada es la de **modelación de yacimientos**.

La introducción de esta técnica en los yacimientos de Ni y Co del país ha sido y sigue siendo aún en estos momentos una necesidad, dado los problemas que ha presentado esta industria con la rentabilidad de la explotación minera y el beneficio metalúrgico; para ello, en este trabajo se muestran los principales elementos metodológicos para la introducción de la modelación de nuestros yacimientos lateríticos, como condición indispensable para la modernización y aumento de la rentabilidad de la explotación minera.

El **modelo geológico del yacimiento de lateritas ferroniquelífera** propuesto, está formado por tres partes fundamentales:

Modelo geólogo- genético: En su esencia recoge toda la información geológica relacionada con el yacimiento objeto de estudio, tanto de datos experimentales, como datos inferidos por métodos analógicos.

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

Modelo matemático: También conocido como modelo numérico o de bloques, es el resultado de la estimación o la simulación de las propiedades de cada *variable regionalizada* en un espacio limitado por el campo geométrico y la asignación de valores, que pueden o no caracterizar determinado espacio R^n del modelo geométrico.

Para enlazar cada una de las partes del modelo del yacimiento asumimos **la teoría de la variable regionalizada** como enlace cuantitativo y cualitativo de los tres Modelos anteriormente planteados, siempre y cuando sea posible y lógico este camino. Esto permite mejorar la estimación y la simulación del fenómeno geológico y su utilización como herramienta imprescindible para la modelación matemática, también posibilita un enfoque más real del manejo de la información geológica, técnica y económica, entre otras cosas.

El modelo será empleado para resolver la mayor parte de las tareas relacionadas con los proyectos mineros, partiendo de la información técnica, geológica y económica que este brinda para optimizar la planificación de la minería y por esta vía **augmentar la rentabilidad, realizar una explotación sostenible y preservar el medio ambiente**.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es lograr la creación de una **metodología preliminar** para la realización de la modelación de los yacimientos de níquel y cobalto cubanos.

Para esto se adoptaron las siguientes tareas:

1. Conceptualizar y adaptar las concepciones relacionadas con la modelación de yacimientos existentes en el mundo a las particularidades de los yacimientos residuales de Ni y Co cubanos.
2. Crear las bases teóricas para la inclusión de técnicas relacionadas con la modelación de yacimientos.
3. Demostrar mediante ejemplos y proponer basándose en consideraciones teóricas el empleo de técnicas de diversa índole en la ejecución de algunas de las tareas relacionada con la modelación.
4. Destacar la influencia de las particularidades geológicas de los yacimientos lateríticos cubanos y del mundo en la modelación.
5. Plantear y proponer mediante el empleo de la modelación una solución para cada uno de los principales problemas que existen en la minería, y geología de estos yacimientos.
6. Proponer diferentes direcciones e investigaciones temáticas para solucionar las dificultades principales a las que se enfrenta el desarrollo de la modelación de yacimientos como herramienta para mejorar la eficiencia económica.

Capítulo 1 Aspectos Generales.

En este capítulo se recogen las generalidades de la investigación desarrollada.

1.1 Introducción

Con el desarrollo mundial de la ciencia y la técnica, la minería de los yacimientos residuales de níquel y cobalto así como los procesos metalúrgicos para la extracción de estos dos metales se han hecho más exigentes en cuanto a calidad y rentabilidad de estos dos metales, se han hecho más exigentes en cuanto a calidad y rentabilidad como consecuencia de la existencia de una alta competencia en el mercado mundial y las amplias oscilaciones de los precios de estos productos.

La solución a este reto está en el aumento de la rentabilidad del beneficio de la materia prima mineral, pero esto se logra incorporando a este proceso menas o mezclas de menas con características cualitativas y cuantitativas lo más próximo posible a las fijadas para el diseño del esquema tecnológico empleado; entonces, es aquí cuando (como decimos en nuestro país) “*la papa caliente*” cae en manos del minero, quien es responsable de abastecer a la industria con mineral de la calidad máxima y estable posible, con gastos mineros mínimos y una explotación sostenible del yacimiento; esto se logra con un ordenamiento óptimo de las operaciones mineras en función del conocimiento geológico existente (conceptualización minera); es decir que para poder realizar una minería sostenible y rentable, que satisfaga las necesidades de los procesos metalúrgicos hay que partir obligatoriamente de un conocimiento geológico amplio, con un grado de detalle proporcional a la rentabilidad y calidad de la minería; ahora, la “*papa caliente*” cae en manos del geólogo y con ella la responsabilidad de garantizar que la industria minera sea rentable.

Este problema existe para todos los tipos de yacimientos, incluso para los reservorios de agua y petróleo; por esto en el mundo se han desarrollado concepciones y técnicas de diversa índole para organizar y mejorar el grado de detalle del conocimiento geológico (partiendo de la cantidad de información disponible) de manera tal que permita optimizar la minería; dentro de estas concepciones la más utilizada es la de **modelación de yacimientos**, para lo cual se emplean *técnicas modernas de adquisición de la información primaria* y las *técnicas de análisis de la información* que trataremos aquí en función de la modelación.

Para tener una idea de la importancia que encierra la modelación de un yacimiento pondremos un ejemplo simplificado:

Para el proceso de lixiviación ácida de las menas, por cada 110 toneladas de materia prima mineral se extrae 1 tonelada de concentrado con 56 % de níquel y 7 % de cobalto, es decir, 1254.4 lb. de Ni (multiplicadas por el precio en el mercado mundial en USD) y 156.8 lb. de Co (multiplicadas por el precio en el mercado mundial en USD), de esto solo se pierde un pequeño porcentaje en el refinado. La rentabilidad del proceso metalúrgico aumenta o

disminuye en dependencia de la calidad y estabilidad del flujo de materia prima mineral que llega al proceso de beneficio, en este momento la “*papa caliente*” está en manos del minero.

Se tienen 110 toneladas de materia prima mineral con peso volumétrico de 1.8 t/m^3 y están contenidas en un volumen de 61 m^3 y se extraen con una pala de $4 - 6 \text{ m}^3$ (en 10 o 12 veces que se introduzca la pala se arranca esta cantidad); pero en todos los yacimientos existen fluctuaciones locales de la calidad de las menas y presencia de elementos y minerales nocivos que incluidas en una o varias veces que se introduzca la pala pueden hacer no rentable el beneficio de las 110 toneladas de mineral (pérdidas por empobrecimiento), por esto el minero debe conocer donde mete la pala (y no la *pata*); ahora es donde cae la “*papa caliente*” en las manos del geólogo:

Si el yacimiento *ha sido modelado de forma correcta y precisa* existe un modelo de recursos y reservas como resultado final de la modelación, formado por pequeñas unidades (bloque) con forma y volumen determinados según las necesidades del minero para la planificación, con una precisión permisible (un $\pm$ del valor) que le dirá al planificador de la minería: la cantidad de nocivos, de Ni, Co y otros, si es rentable o no minar ese bloque, el beneficio económico para ese bloque (muchas veces teniendo en cuenta el tiempo), el costo de extracción, valores no numéricos como el tipo de roca, minerales existentes, etc.

Como puede verse *la implementación de un modelo geológico operativo, encaminado a resolver los problemas reales de la industria minera* implica en ocasiones aumentar en miles y hasta millones de dólares las ganancias netas de la minería, haciendo más rentable para todo el proceso la extracción y procesamiento de cada una de las cientos de 110 toneladas.

1.2 Composición de la memoria.

La memoria escrita de este trabajo está formada por una parte introductoria recogida en el primer capítulo, donde se exponen algunas de las generalidades de la modelación, se explican los objetivos, metodología de la investigación y algo de la historia de esta técnica en el ámbito mundial y nacional.

También incluye una parte teórica donde se brinda toda la información referida a la modelación como concepción revolucionaria del trabajo en el segundo capítulo, en el cual se incluye la teoría mínima necesaria de algunas de las técnicas y postulados más empleados en la modelación, de manera tal que permita comprender el resto de la metodología planteada.

Dentro de la parte teórica se incluye el tercer capítulo, en el que se tratan las particularidades de los yacimientos lateríticos, su influencia en la modelación y aplicación encaminada a resolver algunos de los problemas que traen aparejados estos yacimientos en su estudio geológico, explotación y procesamiento de las menas, dada su complejidad.

En un cuarto capítulo se profundiza aún más en cuanto a las especificidades de la modelación de los yacimientos de níquel y cobalto, además se crean las bases para la incorporación dentro de la modelación económica de estos yacimientos los modelos del tipo RRE.

1.3 Antecedentes históricos de la modelación y otras concepciones.

A pesar de que existen muchos criterios de lo que es la modelación de yacimientos, con todas sus concepciones y particularidades (M. David, 1984; Chica Olmo, 1989, etc.), ésta se ha convertido en una herramienta indispensable para la exploración y explotación de los yacimientos minerales.

En la década del sesenta, con el desarrollo de los métodos geoestadísticos y la aparición de nuevas técnicas de cálculo de reservas, posibilitadas por los avances en la informática, comenzó a crecer el embrión de la modelación como herramienta para todas las etapas de cualquier proyecto minero y se unieron las concepciones existentes para dar lugar a las que se utilizan en la actualidad.

De forma general se desarrollaron concepciones por separado de lo que es la modelación, fundamentalmente encaminadas a la exploración y explotación de los yacimientos y otras.

Con el desarrollo en la década del sesenta de los métodos geoestadísticos y la aparición de nuevas técnicas de cálculo de reservas, posibilitadas por los avances en la informática comenzó a crecer el embrión de la modelación como herramienta para todas las etapas de cualquier proyecto minero y se unen las concepciones existentes para dar lugar a lo que se utiliza en la actualidad.

La aplicación de la modelación se hizo común y luego indispensable con el surgimiento de software mineros, los cuales tuvieron un desarrollo controlado por las exigencias y los avances de las técnicas geoestadísticas; este desarrollo transitó por tres estadios fundamentales: El primero se basaba en la amplia utilización de métodos determinísticos de cálculo y el empleo de métodos tradicionales de cálculo de reservas; el segundo dado por el aumento de los métodos geoestadísticos, con modelos matemáticos creados de forma arbitraria sin tener en cuenta límites geológicos y el tercer ó actual estadio, con amplia utilización de los modelos geológicos y geométricos en el cálculo, la incorporación de nuevas técnicas geoestadísticas, de simulación, de optimización[▲] etc.

Es posible afirmar que estamos en el comienzo de una cuarta etapa, donde los modelos económicos comienzan a alcanzar un lugar importante en las empresas mineras y los modelos matemáticos en general se caracterizan por tener valores fluctuantes de contenidos proporcionales (Grade Ore Proportion) y cut-off, proporción escombros - mena (Ore Proportion) y toda esa información para cada bloque. Es decir se introduce un modelo basado en proporciones en dependencia del cut-off elegido; A partir de estos datos y otros

[▲] Optimización: en el contexto de la planificación industrial es un grupo de técnicas que introducen métodos analíticos matemáticos en las actividades de planificación (Ken Lane 1999)

como costo minero, costo de procesamiento y precio en el mercado se presenta un modelo final con información del valor del bloque con respecto al cut-off, lo que resulta mucho más eficiente en la planificación minera, estos modelos se conocen como ***Recoverable Resources Estimation*** o simplemente ***RRE*** (J. L. Pretorius & L. F. Baars, 1999), todo esto de forma dinámica regido por el valor variable del dinero en el tiempo, avance de la tecnología y otros.

1.3.1 El origen del modelo geológico clásico.

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

El primero en plantear este método fue Lerchs Grossmann en 1964, con el objetivo de representar la realidad modelada del yacimiento para poder aplicar el algoritmo de optimización del corte de la cantera a cielo abierto creado por él. En 1982 W. P. C. Stokes fue el primero en presentar el primer modelo computarizado. Al principio no se aceptaba las formas regulares para su representación, en 1984 Peter Stokes menciona muchas formas interesantes de la forma de los bloques, pero al final la forma cuboidal prevaleció.

La aplicación de los modelos del tipo clásico comenzó en las grandes minas de cobre explotadas a cielo abierto, encabezado por un gran número de matemáticos, los cuales crearon las herramientas y los conceptos mineros de planificación modernos (utilizados actualmente en las principales empresas mineras del mundo).

1.3.2 Antecedentes Internacionales.

La modelación tiene como cuna las principales potencias mineras y económicas del mundo, cada una de ellas destacándose en unas o varias de sus etapas, por ejemplo Australia aún lleva a la cabeza la optimización y la modelación económica de los yacimientos dirigida por la Whittle Programming, la cual puede ser considerada como un monopolio en esta materia. Países como Francia y Canadá acogieron en sus centros de investigación a los así nombrados “padres de la geoestadística”, entre los que se destacan Matheron, M. David y otros.

Actualmente estos países precursores de la modelación y dueños de la tecnología necesaria para ejecutarla son los que llevan la cabecera en su aplicación; con el desarrollo de la globalización las inversiones mineras de estos países se han multiplicado en el tercer mundo transfiriendo de esta manera las técnicas y parte de las tecnologías y el conocimiento científico, es fácil comprobarlo observando que las publicaciones en la materia en su inmensa mayoría pertenecen a las potencias económicas, por lo que no es absurdo afirmar que esta técnica en el tercer mundo aún es incipiente.

1.3.3 Antecedentes Nacionales

Nuestro país tiene en esta materia una situación general similar a la del resto del tercer mundo; solo con carácter muy localizado se realizan investigaciones en este campo. En la actualidad se comienzan a dar los primeros pasos en la aplicación eficiente, y organizada a niveles empresariales, de estas técnicas y ya se ha implementado en algunas minas pequeñas, como Oro Castellano y otras. En las lateritas se han realizado algunos trabajos encaminados a esta materia, pero con objetivos muy específicos, fundamentalmente dirigidos a la modelación geológica, destacándose el proyecto Pinares de Mayarí, donde se sigue de forma interesante la metodología propuesta para este estadio de la modelación, además resulta poco convencional por las técnicas empleadas en el mundo.

Algunos investigadores han realizado aportes importantes puntuales en este campo y no es excesivamente optimista ni ilusa la afirmación de que Cuba tiene posibilidades de convertirse en un centro de referencia en la modelación de este tipo de yacimiento, aunque aun estamos muy lejos de alcanzar esta meta.

1.4 Importancia de la modelación.

De una manera u otra, hasta aquí se ha hablado de la importancia que tiene la modelación de un yacimiento, pero en este acápite abundaremos más sobre este asunto.

Como ya habíamos dicho la modelación es una concepción nueva que enfoca todo lo relacionado con el desarrollo de un proyecto minero de forma integral, y su alcance va desde el reconocimiento geológico hasta el cierre de la mina, aunque su máximo desarrollo se alcanza durante la exploración detallada y la explotación del yacimiento.

Se basa en el análisis de la información geológica disponible, para determinar la necesidad de adquirir más información (durante la exploración), especificando donde, como y cuanto, además permite generar nueva información a partir del análisis integral de un mínimo de información existente, empleando para ello las técnicas de análisis más eficientes. Durante la explotación permite realizar una minería más económica, eficiente y sostenible basada en el conocimiento geológico amplio del yacimiento, integrado al conocimiento técnico.

Los beneficios económicos que trae aparejados se evidencian en las inversiones que a escala mundial se realizan para su implementación, solo en tecnología los gastos son impresionantes, un solo software creado específicamente para estas faenas (Gemcom) ha costado para una empresa cubana, 40 000 USD para un puesto de trabajo y la licencia anual es de 9000 USD (además de los costos de entrenamiento del personal), por supuesto que no dispone de manera directa de todas las herramientas necesarias para las empresas mineras que explotan las lateritas cubanas.

De forma indirecta la modelación brinda una herramienta para disminuir los costos y aumentar la calidad de la minería a través de decisiones óptimas en función del conocimiento geológico; pero, como parte de la modelación también existen herramientas

diseñadas para realizar la modelación económica del yacimiento en este caso la decisión puede tener carácter económico, encaminado al aumento de la rentabilidad, carácter geológico, dirigido al aumento de la calidad de las menas o puede tener carácter mixto encaminado a hacer más sostenible la minería; Estas decisiones pueden ser a corto, mediano y largo plazo, pues en el modelo económico se puede incluir parámetros técnicos, geológicos (generalmente en este caso se utiliza un modelo de bloques) y económicos variables en el tiempo o no. Estos programas se conocen como sistemas de optimización minera y se venden por valor de 10 000 – 40 000 dólares por paquetes de programas sin tener en cuenta la licencia, pero su empleo en la modelación es casi obligatorio en muchos casos. Para más información contacte manuales de usuario o directamente con Whittle Programming.

1.5 Metodología de la investigación.

Para cumplir con los objetivos propuestos se realizó un plan estratégico para la ejecución del presente trabajo, el principal problema fue la escasa información existente con respecto al tema y la amplia gama de conceptos de modelación encontrados en la literatura disponible, por esto para poder tener una base informativa que permitiera realizar una metodología flexible y generalizada se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con la modelación, fundamentalmente sobre conceptos fundamentales y concepciones empleadas en el ámbito mundial.

Partiendo de la información recopilada se realizó una revisión y análisis de algunas de las herramientas (las más importantes) que podrían ser empleadas en la modelación, aunque la mayoría de ellas no se han utilizado de forma generalizada en esta tarea dentro del país, haciendo mayor énfasis en aquellas que son poco conocidas y sin embargo brindan resultados importantes, esta es la causa que algunas de ellas solo se mencionan sin embargo se profundiza de manera importante en otras.

A partir de los resultados alcanzados en esta etapa, creamos nuestra propia definición de modelación, incluyendo las partes que la integran y puntualizando en detalle algunas de sus particularidades. Posteriormente se realizó una caracterización detallada de los yacimientos de níquel cubanos en función de la modelación, teniendo en cuenta como y en que medida puede influir cada uno de los parámetros en el modelo y el modelo en la caracterización de cada uno de estos parámetros; también se realizó un inventario de los principales problemas existentes en la industria del níquel y se determinó de qué forma éstos pueden ser solucionados empleando la modelación como base teórica y el modelo como herramienta práctica y eficiente.

Por último se tomó a modo de ejemplo un trabajo realizado por nosotros relacionado con la modelación, con el objetivo de demostrar de forma práctica la eficiencia en la modelación de técnicas utilizadas tradicionalmente para otros fines y la utilización de ciertas herramientas matemáticas para el análisis de los datos.

1.6 Análisis crítico de la bibliografía y la información empleada.

Por las características del trabajo el análisis bibliográfico constituyó uno de los pilares principales para su confección, es por esto el gran número de referencias bibliográficas que se recomiendan al lector en todo el trabajo.

Las bibliografías analizadas tienen diversa índole:

- Geológica.
- Matemática.
- Económica.
- Minera.
- Metalúrgica.
- Mixta.
- Otras relacionadas.

Geológicas: estaban fundamentalmente relacionadas con las características de los yacimientos lateríticos, tanto cubanos como del extranjero; del análisis realizado resaltan los siguientes aspectos: al parecer el estudio *general* de los yacimientos cubanos es insuficiente, no encontramos trabajos relevantes relacionados con la génesis de los mismos, es evidente la mala calidad de la técnica analítica empleada para arribar a resultados de carácter mineralógico y geoquímico. Se constató además en comparaciones realizadas con artículos publicados en el extranjero que existen grandes diferencias entre los yacimientos cubanos y los del exterior por lo que hay que tener cuidado con las generalizaciones; existe una marcada tendencia a la simplificación de la morfología de los yacimientos cubanos, no se tiene en cuenta variaciones espaciales y no existen zonaciones geológicas eficientes, ni descripciones precisas de carácter “*local*” de los fenómenos geológicos que rigen la mineralización.

Estas deficiencias dificultan considerablemente la modelación de yacimientos en etapas donde se supone que deba existir la información necesaria, por lo que hay que encaminar la modelación de forma poco convencional, fundamentalmente dirigida a modelar la “**geología**” del yacimiento.

Por otra parte se recomienda el análisis de yacimientos extranjeros disponibles para realizar cuidadosas comparaciones que facilitan en muchos casos vencer de forma alternativa la mala calidad de la información geológica y romper la tendencia a la simplificación del esquema impuesto y generalizado en la mayoría de los casos.

Matemática: se analizaron trabajos nacionales y extranjeros considerados como clásicos, fundamentalmente de geoestadísticas y estadística multivariada. Parte de los trabajos nacionales constituyen ejemplos de aplicación de estas técnicas a los yacimientos cubanos; respecto a los trabajos revisados se puede decir que:

- Recomendamos la lectura de los artículos de Michel David, Mario Chica Olmo, A. A. Legrá y otros, por la profundidad con que se analizan las temáticas relacionadas con la modelación matemática.
- Se encontraron técnicas novedosas como la simulación condicional, que demostró ser mucho más eficiente que las técnicas tradicionales y los tipos de Kriging más utilizados, relacionado con esto.
- Se encontraron ejemplos prácticos muy interesantes, por su importancia se recomienda el estudio del artículo (David Michel. Applied Advanced Geoestatistical Ore Reserve Estimation, 1984, página 1015-1030) donde se muestra un ejemplo de construcción de un modelo de bloques de un yacimiento de Nueva Caledonia. En éste artículo se destaca un detalle interesante y es que se logró construir el modelo de bloque de forma eficiente utilizando simulación condicional con una red de 70 x 70 y redes auxiliares más densas en pequeños sectores del yacimiento, el mismo modelo se creó utilizando Kriging, el efecto de suavizado conllevó a la poca representatividad de los resultado y necesidad de una red más densa.
- En el mismo libro existe información acerca de la clasificación de reservas utilizando geoestadísticas, la influencia del tipo de contacto entre una mena y otra en la estimación y una gran cantidad de detalles metodológicos que es necesario conocer para poder realizar la modelación del yacimiento.
- En otras publicaciones mostradas en la relación de las bibliografías aparece información importante acerca de estudio de redes óptimas, estudios variográficos, perfectamente adaptable a los yacimientos objeto de estudio.

También aparece una gran cantidad de información en el manual de los software utilizados, no solo de índole matemática, sino también relacionada con el concepto de modelación de diferentes tipos.

Lamentablemente muchas de las mejores técnicas no están implementadas en software de uso generalizado como el Gemcom y mucho menos en el caso de los yacimientos cubanos, por esto hacemos tanto énfasis en la necesidad de validar estas técnicas para nuestros yacimientos, pues técnicas como el Kriging 3D de uso prácticamente obligado en la modelación (mundialmente empleado) no se ha implementado de forma generalizada en nuestros yacimientos excepto en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara con las limitaciones señaladas más arriba respecto a la falta de información de algunas variables.

Económica: esta temática está recogida de forma dispersa en la bibliografía empleada, pero para tener una noción de la importancia de la modelación para el análisis económico se recomienda la lectura del manual de usuario del Gemcom (parte relacionada con la modelación, modelos de bloques e interfases con programas de la Whittle), el manual del Micro-LINX (en la parte de planificación minera, interfases con Whittle), el manual de la Whittle, Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras, etc.

Minera: relacionado con este tema se centró la atención en los problemas de la minería de los yacimientos de la parte oriental de Cuba.

La información más completa de la minería de los yacimientos de Ni y Co de la parte oriental cubana se encontró en la tesis doctoral del Dr. Polanco Almanza, así como cursos inéditos del mismo autor, su empleo fue decisivo para determinar algunos de los parámetros tenidos en cuenta para confeccionar nuestro trabajo.

Otros trabajos de gran importancia fueron analizados cuidadosamente, entre los autores de estas temáticas relacionadas con la minería se destaca el doctor A. A. Legrá y otros de carácter internacional ya mencionados, en los que se destaca M. David.

Mixta: en esta se destacan libros de uso general como: Exploration and Mining Geology, Recursos minerales – tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia e impacto ambiental y otros.

Además de toda esta bibliografía con información generalizada, se analizaron un gran número de cursos, artículos y libros inéditos, publicaciones, manuales de usuarios o ayudas de los software empleados y otros que tienen un gran valor científico por la profundidad con que se recogen ciertos aspectos particulares, estrechamente relacionados con la modelación; Todas éstas aparecen relacionadas en la bibliografía.

Capítulo 2 El Modelo Geológico de un Yacimiento.

Existen muchas concepciones diferentes de lo que es el modelo geológico, cada una adaptada a los objetivos con que se realiza la modelación, ya sea con fines de exploración, cálculo de reserva, optimización minera, etc., pero todos de forma general coinciden en muchos aspectos. Por esto nos dimos a la tarea de aglutinar todas estas concepciones de forma tal que sea posible aplicarlas en cualquier etapa de un proyecto minero y por último crear nuestro propio formato generalizado.

2.1 Modelación de yacimientos.

Modelar, en el sentido estricto de las ciencias de la tierra es diseñar un modelo. Y un modelo es una hipótesis de trabajo o simulación de un proceso o fenómeno con un margen determinado de error, basado en datos descriptivos, estadísticos o métodos analógicos.

Existen muchos esquemas para la realización de modelos, nosotros tomamos los más importantes o más utilizados y construimos nuestro propio diseño para la realización de la modelación de los yacimientos teniendo en cuenta los siguientes factores:

- La necesidad de compatibilizar la metodología de obtención del modelo con los organigramas de cualquier tipo de empresa que se dedique a la prospección, exploración y explotación de yacimientos minerales (fundamentalmente metálicos).
- La capacidad del modelo de aglutinar el resto de las concepciones y formatos de modelos existentes, así como los procedimientos estandarizados utilizados mundialmente para resolver esta tarea.
- La compatibilidad del modelo a crear con los software de punta en el mundo del tipo sistema minero y optimización; Entre los más populares están: DATAMINE, MICRO LINX, GEMCOM, MICROMINE, SURPAC, VULCAN, WHITTLE.
- Posibilidad de aplicar las técnicas y tecnologías de punta sin entrar en contradicción con la estructura del modelo.
- La compatibilidad con técnicas de **estimación reservas recuperables (RRE)**.
- Compatibilidad y fácil implementación en cualquier proyecto minero, independientemente del estadio en que se encuentre.
- Otras.

Entre los esquemas de modelos existentes, el más utilizado es el aplicado a los software antes mencionados, por esto la estructura del modelo propuesto tiene gran parecido con estos, solo que le añadimos un sentido más dialéctico y más geólogo – minero, que permita modelar un yacimiento de forma integral y eficiente.

Otros de los aspectos que se tuvo en cuenta e influyó mucho en la concepción del modelo fueron los ejemplos de aplicación en otros lugares del mundo, donde su utilización envuelve todas las fases de desarrollo de un yacimiento minero (reconocimiento, prospección, exploración y explotación, incluso hasta el cierre de la mina).

2.2 El modelo geológico y partes que lo integran.

Es el más importante pues *define las características que tendrá el modelo del yacimiento*[▲].

“Deposit interpretation and modeling consist of establishing the continuities, the distribution, the limits, and the grade of the mineral/metal of interest, thereby establishing a discrete zone or body. The basic principle for deposit interpretation is to make maximum use of geological framework to establish the geological continuity of the mineral/metal or other specific property of interest.” De esta manera Michel David (1991) define su concepto de modelación de yacimientos y la importancia que tiene para la modelación el conocimiento geológico del yacimiento y el entorno geológico en que se enmarca el mismo.

Como es obvio, la geología del yacimiento regula el comportamiento, variabilidad y distribución de las variables regionalizadas en el espacio; además, el conocimiento de un fenómeno geológico, es premisa previa para el empleo de cualquiera de las herramientas matemáticas que describiremos más adelante.

En la mayoría de las modelaciones realizadas en otros yacimientos, fundamentalmente la modelación matemática, este proceso parte del análisis geológico, con el cual se realiza un modelo previo del yacimiento. El resto de los modelos y herramientas empleadas son simplemente una vía para alcanzar mayor precisión en los resultados, o simplemente para facilitar las decisiones y operaciones mineras.

El **modelo geológico** está formado por tres partes fundamentales:

1. Modelo geólogo- genético^{▲▲}.
2. Modelo geométrico.
3. Modelo matemático.

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

Por la amplia aplicación que ha tenido la geoestadística en la modelación de yacimientos, asumimos **la teoría de la variable regionalizada** como enlace cuantitativo y cualitativo de los tres Modelos anteriormente planteados, siempre y cuando sea posible y lógico este camino.

La utilización de la teoría de las *variables regionalizadas* (**VR**) tiene la ventaja de ser la única capaz de dar respuesta satisfactoria a los problemas con precisión óptima (a partir de la información disponible), considerando a la vez los aspectos de variabilidad del fenómeno

[▲] Cuando nos referimos al modelo del yacimiento y modelación de yacimientos, lo hacemos en el mismo sentido con que se emplean los términos modelación geológica y modelo geológico del yacimiento.

^{▲▲} En la literatura especializada se le denomina también modelo geológico.

natural; las fluctuaciones locales de éste sugieren una interpretación probabilística del mismo, por lo que es lógico sugerir un modelo de esta naturaleza (Primer Congreso de Geoestadística de Roma, MATHERON 1976); por todo lo planteado es posible afirmar que el modelo probabilístico y la teoría de la VR permiten presentar siempre en términos operativos los problemas de estimación y simulación del fenómeno cosa que no es posible con una óptica determinística del asunto (no considera la variabilidad del fenómeno estudiado) a pesar de que los métodos determinísticos en ciertos casos aportan modelos adecuados de los fenómenos.

2.2.1 El modelo geólogo – genético.

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

Algunos autores subdividen éste modelo en descriptivo y genético, aunque esta concepción fue planteada con fines de prospección, nosotros la adaptamos a todas las etapas de la investigación geológica.

2.2.1.1 Submodelo descriptivo.

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

Durante la etapa de exploración y explotación del yacimiento se utiliza toda la información geológica acumulada para determinar las principales características de las menas y sus diferentes tipos tecnológicos. También permite describir los procesos geológicos (espacialmente separables o no), caracterizados cada uno o grupos de ellos por características particulares que pueden ser consideradas como poblaciones estadísticas diferentes, con una disposición espacial determinada y muchas veces describable perfectamente de forma estructural a través de la teoría de las VR.

Este submodelo se construye a través de un método operativo que consiste en la realización de una sinopsis que resume las características objetivas del yacimiento. Estas características permiten la confección del marco geológico regional y el marco geológico local del yacimiento, con un grado de subjetividad mínimo.

Un ejemplo de modelo descriptivo puede ser el siguiente (Cox y Singer, 1986):

Sinopsis del modelo descriptivo.

1. Nombre del tipo de yacimiento.

2. Descripción.
3. Referencias generales.
4. Ambiente geológico.
 - Tipos de rocas.
 - Texturas.
 - Rango de edades.
 - Ambiente deposicional.
 - Encuadre tectónico.
 - Tipos de yacimientos asociados.
5. Descripción del yacimiento.
 - Mineralogía.
 - Textura /estructura.
 - Alteraciones (no relacionadas con la mineralización).
 - Controles de la mineralización.
 - Alteración (de la mineralización).
 - Modelos del yacimiento.
 - Criterios de exploración.
6. Ejemplos.

Este esquema es bastante generalizado, pero en la realidad y en dependencia de la fase de la investigación geológica que se realice, también es necesario tener en cuenta los problemas que más influyen en la minería y la metalurgia de las menas explotadas de manera que se particularice y se adapte este submodelo a las necesidades reales, por lo que es necesario que la exploración y por ende, la caracterización geológica del yacimiento, resuelva problemas concretos de la producción y explotación del yacimiento.

Para la obtención de todos estos datos son válidas todas las posibles herramientas utilizables por un geólogo: Remote Sensing o teledetección - procesamiento de imágenes, mapeo geológico, geoestadísticas, perforación, interpretación de datos geofísica, etc.

Por supuesto, este esquema varía según las necesidades, el grado de conocimiento geológico, la etapa en que se encuentra el proyecto minero y las particularidades del yacimiento que se está modelando.

2.2.1.2 El submodelo genético.

Es el resultado de la evolución del submodelo descriptivo y su calidad depende de la complejidad del contexto geológico y el grado de conocimiento geológico reflejado de una forma u otra en el submodelo descriptivo; estos se subdividen dos tipos: el de probabilidad de presencia y los de cuantificación de procesos. Los primeros predicen la probabilidad de que un depósito o una de sus partes (ej. redepósitos y menas in situ) aparezca en una posición determinada en el espacio. Por su parte, los submodelos de cuantificación de procesos son aquellos que describen cuantitativamente los procesos relacionados con la formación de un depósito mineral y solo en muy pocos casos, es posible que alcance una exactitud importante por lo complejo que resulta esta faena.

De forma general, el submodelo geólogo - genético engloba las VR que caracterizan el yacimiento como sistema, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo; sobre esto abundaremos más adelante.

2.2.2 Modelo geométrico.

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

Los límites pueden ser de dos tipos en dependencia de su naturaleza; para su determinación es necesario contar con observaciones visuales y con pruebas estadísticas. (Michel David, 1991):

Primarios: Son límites explícitos, que se corresponden con la litología, los rasgos estructurales tridimensionales o cambios bruscos en la mineralización observada, estos son considerados como **límites físicos**.

Secundarios: son aquellos que se determinan a través del comportamiento de los elementos químicos, en ocasiones estos límites no se pueden determinar fácilmente. A este tipo de límite nosotros les llamamos **límites matemáticos**

En la práctica la determinación de estos límites se realiza a través de:

- a) El Modelo geólogo- genético que permite obtener los límites físicos con diferentes grados de precisión.
- b) Modelo matemático: por su esencia requiere la determinación de los límites del tipo secundario para definir por separado las características de las diferentes *poblaciones estadísticas* separadas, la existencia de cambios en la variabilidad o zonas con alto error de estimación, así como cualquier otro tipo de *anomalía matemática* espacialmente describible, que indique la existencia de dos o más poblaciones estadísticas sin subdividir espacialmente.
- c) Utilización conjunta de los modelos anteriormente mencionados: es el método más utilizado donde es posible separar el yacimiento utilizando los dos tipos de límites.

Desde el punto de vista probabilístico *el modelo geométrico es el conjunto de campos geométricos que definen las VR en el espacio*, sobre esto abundaremos más adelante.

La subdivisión espacial del yacimiento, utilizando herramientas matemáticas, se realiza a través de técnicas de la estadística multivariada (análisis cluster y otras técnicas de clasificación supervisada y no supervisada), así como el análisis estructural del fenómeno utilizando la teoría de las VR. Para la subdivisión según límites físicos se emplean un gran

[▲] Para mejor comprensión del asunto en este capítulo cuando nos referimos a límites hablamos en el sentido del primer concepto.

número de herramientas geológicas y geofísicas, en el que juega un papel principal el mapeo geológico y la perforación.

2.2.3 Modelo matemático.

También conocido como modelo numérico o de bloques (GENCOM software, 1998), en esencia *es el resultado de la estimación o la simulación (condicional o no) de las propiedades de cada VR en un espacio limitado por el campo geométrico y la asignación de valores, que pueden o no caracterizar determinado espacio R^n del modelo geométrico.*

Para su confección se utilizan un gran número de útiles metodológicos, en los que se incluyen métodos estadísticos y determinísticos, solamente utilizables si se cuenta con medios técnicos poderosos como son los software mineros especializados, por la complejidad y el gran número de cálculos involucrados.

La estimación y la simulación se pueden realizar por dos enfoques fundamentales: *determinísticos y probabilístico* anteriormente mencionados, nosotros utilizamos el enfoque probabilístico por las ventajas que este proporciona (José R. Alfonso Roche, 1989; Mario Chica Olmo, 1988; Michel David, 1991).

La modelación matemática también tiene otros enfoques pero en su esencia no es más que *la caracterización del comportamiento de las VR y otras variables en el espacio y en función de ellas determinar por diferentes vías su valor en un soporte de tamaño determinado y definido en un campo geométrico previamente establecido.*

Es de gran importancia, pues permite conocer la variabilidad de los datos a escala espacial, de esta se desprenden un sinnúmero de modelos también de carácter numérico, que permiten simular todos los procesos naturales y artificiales llevados a cabo en el desarrollo del proceso minero (explotación, almacenamiento, economía, etc.).

Los principales tipos de Modelos matemáticos se muestran a continuación, estos se diferencian por la naturaleza de los datos y por su utilización:

- **Modelo hidrogeológico:** caracteriza el movimiento del flujo de las aguas subterráneas del yacimiento, así como su régimen y particularidades de los diferentes complejos acuíferos presentes en la zona.
- **Modelo económico** (GENCOM software, 1998): caracteriza los parámetros económicos del yacimiento de forma espacial, para cada *bloque del modelo matemático o para cada campo del modelo geométrico*. Un ejemplo de estos parámetros es: el costo minero por tipo de roca, entre otros. La utilización de este modelo es esencial para realizar la optimización económica de la minería.
- **Modelo de densidad** (GENCOM software, 1998): caracteriza la densidad de las rocas en el espacio, se emplea esencialmente para el cálculo de reservas y para la planificación de la minería en dependencia de la calidad del mineral.

- **Modelo de la ley del mineral o *grade model*** (GENCOM software, 1998): caracteriza la distribución espacial de la ley del mineral, es el más importante de todos los modelos y la columna vertebral de la planificación de la minería.
- **Modelo de recurso y reservas o *resource model*** (GENCOM software, 1998, Micro LYNX, 1998): caracteriza los recursos y a partir de él se calculan las reservas locales y globales, del yacimiento, su ejecución depende del modelo anterior y de un gran número de parámetros técnicos y económicos, es de difícil ejecución y se considera uno de los productos finales de la modelación del yacimiento.
- **Modelo estadístico** (Mario Chica Olmo, 1988; Michel David, 1991 y 1976; Matheron, 1978): Caracteriza la estructura y la variabilidad de los datos en el espacio, así como la continuidad, distribución estadística, momentos, etc. se emplea en la obtención de los dos modelos anteriormente mencionados y en la planificación minera, para simular la mezcla óptima de la materia prima mineral y el esquema más sostenible de los flujos de carga.
- **Modelos creados con técnicas de RRE**: aplicado recientemente a algunas minas de oro sudafricanas; se caracteriza por el empleo de proporciones de los parámetros que los caracterizan, en función de *n* cantidad de posibles Cut – Off. No está generalizado en todos los tipos de yacimientos por su reciente aplicación pero se puede considerar un ejemplo del alcance y poder de análisis que facilita la modelación del yacimiento.
- **Otros**: existe una gran cantidad de modelos particulares para cada tipo de mina, entre ellos se destacan el modelo físico mecánico de las rocas, entre muchos otros.

2.3 La teoría de las variables regionalizadas y su relación las distintas partes del modelo geológico.

En 1965 el matemático francés Matheron, conocido como el padre de la geoestadística define el concepto de la variable regionalizada de la siguiente manera:

“Dans un grand nombre d’activités humaines, notamment dans les sciences de la terre, l’art de mines, etc ... on s’intéresse à la répartition dans l’espace de certaines grandeurs, que nous appellerons, d’un terme général, des variables régionalisées...”

2.3.1 Introducción al estudio de la teoría de las variables regionalizadas (VR).

La VR es aquella que caracteriza cualitativa y cuantitativamente un fenómeno en tiempo y/o espacio con estructura de autocorrelación, dicho de otra manera, es aquella cuyo valor en un punto dentro de un yacimiento es función de su magnitud y de su soporte (volumen, forma y orientación).

De lo anteriormente planteado se deduce que las VR no son más que aquellas variables, usualmente utilizadas en la vida práctica (Ni, Fe, Co, Etc.) que se caracterizan por tener un carácter aleatorio y a su vez tener una estructura definida en una región determinada en el

espacio, regida por sus propiedades y fenómenos geológicos que la controlan; esta estructura generalmente tiene un sentido geológico por lo que la convierte en una herramienta poderosa en la modelación de un yacimiento (Fig. 2.1).

2.3.1.1 Características de las VR.

Desde punto de vista geoestadístico una variable regionalizada es una función $Z(x)$ que da el valor correspondiente a una característica Z en el punto x , perteneciente al espacio R^1 , R^2 o R^3 . Tal función es altamente variable y no continua, por lo que no puede ser estudiada directamente; la estructura que aparecerá en estas variaciones será examinada estudiando sus incrementos.

La idea básica de esta teoría es considerar la función $Z(x)$, donde x es un punto o vector en el espacio R^n , como una relación de funciones aleatorias. **Por lo tanto estamos convirtiendo una relación de procesos aleatorios en un valor único.**

La VR presenta una distribución espacial o temporal dentro del dominio de estudio caracterizado por: el **carácter aleatorio** que induce a la noción de la variable aleatoria pero sin suponer independencias entre ellas y el **carácter estructural** que es inherente a cada fenómeno y se pone de manifiesto en la continuidad de la regionalización (Fig. 2.1).

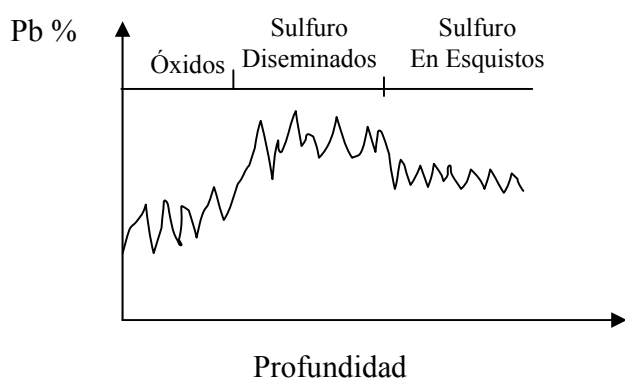


Figura 2.1: Carácter Aleatorio y Estructural de la variable regionalizada.

2.3.1.2 El soporte y el campo geométrico de la VR.

La VR está definida en un dominio o región del espacio y/o tiempo, denominado **campo geométrico**, sobre la cual la variable toma una serie de valores puntuales o medios; el volumen físico sobre el cual se observan los valores de las variables recibe el nombre de **soporte**.

Otra característica importante es la relación que existe entre la dispersión y el tamaño del soporte, *si se modifica el tamaño del soporte se obtiene una regionalización diferente, una*

nueva VR, pero estrechamente relacionada con la primera. En todos los casos se cumple que la dispersión de los valores de la VR en el bloque es menor que la dispersión de los valores en un soporte puntual; también se cumple que se mantiene la media y la distribución teórica a la que se ajusta esta variable (Michel David, 1984).

El conocimiento del comportamiento de la VR es de extrema importancia para el cálculo de los recursos y reservas minerales, la planificación minera y otras (Michel David, 1984).

2.3.1.3 La continuidad.

Se refiere a que a pesar de las variaciones o fluctuaciones que puede experimentar la variable, ésta presenta un carácter de continuidad en el espacio, es decir, que:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} E\{Z(x) - Z(X_0)\} = 0$$

Cuando tal continuidad no se cumple este límite tiende a C_0 , distinto de cero; esto se conoce como efecto de pepita, y sus causas fundamentales son las siguientes:

- Errores de medida.
- Microregionalización de escala inferior a la de observación.

En la práctica es difícil discernir entre estos dos motivos, solo un buen conocimiento del fenómeno geológico puede ayudar a hacerlo.

2.3.1.4 La anisotropía.

La VR presenta distintos comportamientos de continuidad según diferentes direcciones. Este comportamiento anisotrópico direccional tiene siempre un significado geológico que puede ser interpretado desde el punto de vista geoestadístico; la anisotropía no es mas que el doble aspecto estructural de la VR.

2.3.1.5 Hipótesis restrictiva.

Para realizar la inferencia estadística (determinación del valor de la VR en puntos no conocidos) a partir de las funciones aleatorias $[FA Z(x)]$ es necesario conocer, al menos, una parte de su ley de distribución.

Para un depósito mineral la VR es una relación particular de un punto x de una función aleatoria $\{FA Z(x)\}$, la función aleatoria también puede ser relación particular de varias variables aleatorias.

Existen dos caminos para realizar la inferencia estadística:

- a) La estimación de las características y momentos de dicha función con la ayuda de las medias obtenidas sobre un número suficiente de relaciones de FA $Z(x)$.
Dicho de otra manera, cuando se emplea el valor de n variables predictoras para determinar el valor de una variable dependiente.
- b) La introducción de una serie de hipótesis restrictivas que permiten encontrar una solución a la inferencia estadística. Se emplea especialmente cuando la inferencia estadística por la vía anterior no se puede utilizar por no conocerse una relación de n variables en ese punto, y se emplean técnicas de estimación geoestadística para resolver este problema (Ej. el cálculo del contenido de Fe en un punto no explorado, a partir de los contenidos de este elemento en los testigos de perforación de los pozos circundantes).

Estas hipótesis restrictivas permiten establecer o asumir la existencia de una determinada estructura de la variable, a pesar de la variabilidad de las mismas de carácter local.

Las hipótesis restrictivas son:

Hipótesis estacionaria: plantea que FA $Z(x)$ tiene una ley de distribución de probabilidad invariable por traslación, esto es sí:

$$f\{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)\} = f\{Z(x_1+h), Z(x_2+h), \dots, Z(x_n+h)\}$$

La traslación vendría marcada por el módulo del vector h .

Dicho de otro modo, un fenómeno es estacionario si tiene una cierta homogeneidad de naturaleza estadística.

Para su aplicación, solo se hace referencia a la estacionaridad de segundo orden (estacionaridad débil), que asume que sus dos primeros momentos de la ley de distribución existen y son invariables por traslación, la esperanza matemática existe y no depende del punto de apoyo x (ver cambio de soporte en la literatura especializada):

$$E\{Z(x)\} = m(x) = m \quad \text{Cte.} \quad \forall x \in \text{Campo geométrico (G)}$$

Para la pareja del conjunto de variables aleatorias (VA_s) $\{Z(x), Z(x+h)\}$, la covarianza $C(h)$ existe y solo depende del vector h que la separa:

$$\text{Cov}\{Z(x), Z(x+h)\} = E\{Z(x), Z(x+h)\} - m^2 = C(h) \quad \forall x \in G$$

$C(h)$ solo depende del vector h que la separa.

Hipótesis intrínseca o cuasi- estacionaria: En la práctica ocurre que el concepto de estacionaridad está ligado a la escala de trabajo, de forma que fenómenos que reflejan un comportamiento no estacionario a gran escala (presencia de una deriva regional) pueden serlo a escala local, es decir, para $h \leq d$ no existe un comportamiento estacionario a gran

escala pero sí de carácter local (Fig. 2.2). También puede ocurrir que exista un comportamiento estacionario a gran escala y una tendencia de carácter local en el dominio d^n .

Es decir, FA $Z(x)$ es intrínseca si para la pareja $\{Z(x+h), Z(x)\}$ se cumple que:

- La esperanza matemática de los incrementos de primer orden existe y no depende del punto de apoyo x .

$$E\{Z(x+h) - Z(x)\} = 0$$

- La varianza de los incrementos de primer orden existen y no dependen de los puntos x y $x+h$

$$\text{Var}\{Z(x+h) - Z(x)\} = 2\gamma(h)$$

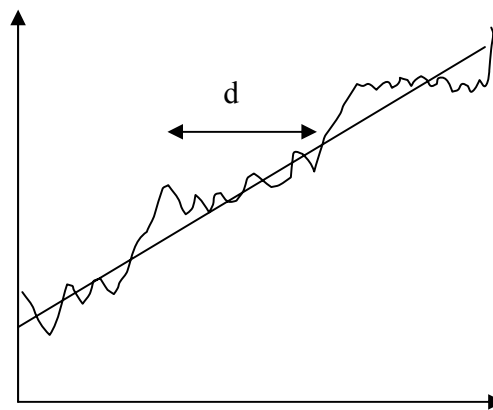


Figura 2.2: Deriva y cuasi – estacionaridad. La hipótesis cuasi – estacionaria implica un compromiso entre la escala de homogeneidad del fenómeno y la cantidad de información disponible sobre el mismo.

La función $\gamma(h)$ se llama variograma y es el útil base para la aplicación de los métodos geoestadísticos, en la resolución de problemas de estimación y simulación de variables espaciales.

De lo visto se puede arribar a la conclusión que la hipótesis estacionaria de segundo orden implica la intrínseca pero la relación inversa no se cumple.

2.3.2 El variograma como útil para el análisis estructural de los datos.

El variograma es una función aleatoria intrínseca, que representa la mitad los incrementos cuadráticos medios de la variable para puntos distantes el vector de distancia h ,

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var} \{Z(x+h) - Z(x)\}^2 \text{ con } \gamma(h) = 0 \text{ para } h = 0.$$

El estimador experimental del variograma se calcula a partir de los datos experimentales aplicando la fórmula:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2NP(h)} \sum_{i=1}^{NP(h)} \{z(x_i + h) - z(x_i)\}^2$$

donde:

- $z(x_i)$ = datos experimentales,
- $NP(h)$ = número de parejas distantes de h ,
- h = paso del variograma,
- x_i, x_i+h = puntos experimentales de un espacio n - dimensional.

esto se representa a través del siguiente gráfico:

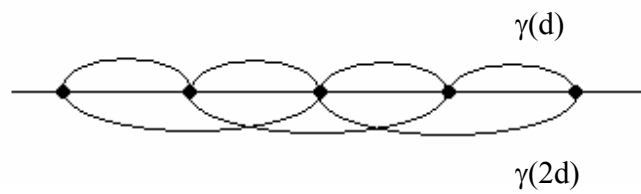


Figura 2.3: Cálculo esquemático del variograma, utilizando pares de muestras a una distancia dada.

Desde el punto de vista físico el variograma se puede comprender como el momento de inercia a lo largo de la diagonal del diagrama h – scatterplot (diagrama de dispersión entre $Z(x)$ y $Z(x+h)$)

2.3.2.1 Principales propiedades del variograma.

Para una dirección α cualquiera el variograma calculado indica como aumenta la variabilidad o disminuye la correlación entre los datos cuando crece la distancia entre los puntos.

El variograma al igual que la covarianza es una función simétrica y siempre toma valores positivos.

En caso de estacionaridad se cumple la siguiente relación:

$$\gamma(h) = C_{(0)} - C_{(h)}$$

donde:

$C(0)$ y $C(h)$ son la covarianza en el origen y entre dos puntos separados a una distancia h .

El estudio del comportamiento del análisis del variograma brinda una descripción sintetizada de la estructura de variación del fenómeno, así como, la precisión de la estimación de dicha variable en dependencia de la estructura.

La información de carácter estructural que brinda el variograma es:

a) Zona de influencia.

Cuando el fenómeno es estacionario el variograma crece hasta un límite llamado meseta (Fig. 2.4) a partir del cual se estacionariza, donde el valor de la meseta coincide teóricamente con la varianza experimental; Esta distancia se conoce como alcance y corresponde a la distancia para la cual desaparece la relación existente entre $Z(x)$ y $Z(x+h)$. Cuando el fenómeno no es estacionario $\gamma(h)$ crece por encima de la varianza experimental. En geología este parámetro es conocido como zona de influencia o continuidad geológica.

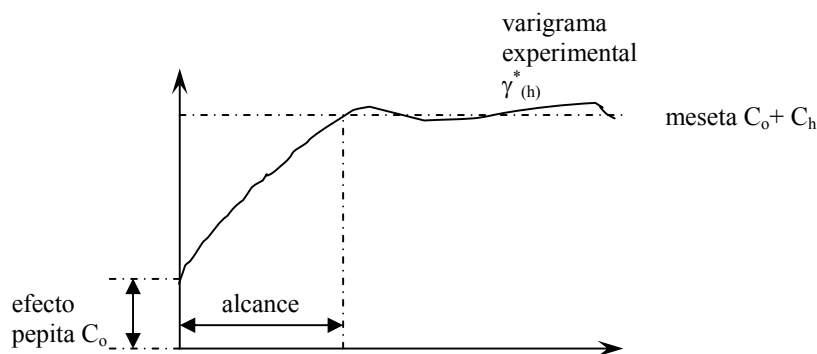


Figura 2.4: Partes del variograma.

b) Comportamiento en el origen.

Para valores de h pequeños el comportamiento reflejado gráficamente está en función del grado de continuidad y regularidad del fenómeno. Según el comportamiento gráfico los datos pueden ser (Fig. 2.5):

- 1) Muy continuos, el variograma presenta una figura de tipo parabólica; caracteriza una variable extremadamente regular siendo derivable la variable regionalizada.
- 2) Continuos: la gráfica del variograma es lineal y parte del origen; caracteriza una VR continua pero menos irregular que el caso anterior. La VR es continua en media cuadrática pero no derivable.
- 3) Discontinuo: la función $\gamma(h)$ presenta una discontinuidad en el origen llamado “efecto de pepita”, esto implica que VR no es continua en media cuadrática por lo que representa una variable muy irregular. Así, dos puntos muy próximos presentan una diferencia de varianza al menos igual al valor del efecto de pepita C_0 .
- 4) Aleatorio: el variograma presenta un gráfico que se puede ajustar a una recta paralela al eje de distancia, es el caso de mínima continuidad “aleatorio puro”, en el que la pareja

$\{Z(x+h), Z(x)\}$ no presenta correlación alguna; este es el caso límite de ausencia de estructura.

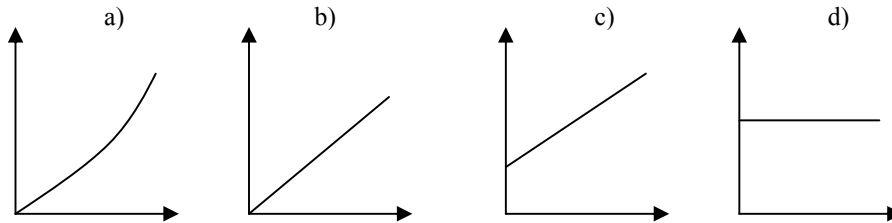


Figura 2.5: comportamiento en el origen:

- a) Muy continuo.
- b) Continuo
- c) Discontinuo.
- d) Aleatorio

c) Anisotropía.

La VR tienen comportamiento anisotrópico cuando presenta direcciones particulares de variabilidad. Tales direcciones privilegiadas corresponden generalmente a direcciones genéticas o estructurales del fenómeno geológico. Se determinan a través del cálculo del variograma en diferentes direcciones o utilizando superficies variográficas (VARIOWIN 2.1©, Surfer 7.0®)

Se distinguen en la práctica tres tipos de comportamiento anisotrópico del variograma (Fig. 2.6):

- I- Anisotropía geométrica: se produce cuando los variogramas tienen el mismo valor de meseta pero alcances diferentes.
- II- Efecto proporcional: los variogramas tienen igual valor de alcance pero distintos valores de meseta (ver ayuda de variowin efecto proporcional; ventanas móviles).
- III- Anisotropía zonal: las características de los variogramas son diferentes entre sí. Puede deberse a la presencia de deriva regional en la distribución espacial de la variable, en este caso al menos una de las direcciones el variograma no tiene meseta.

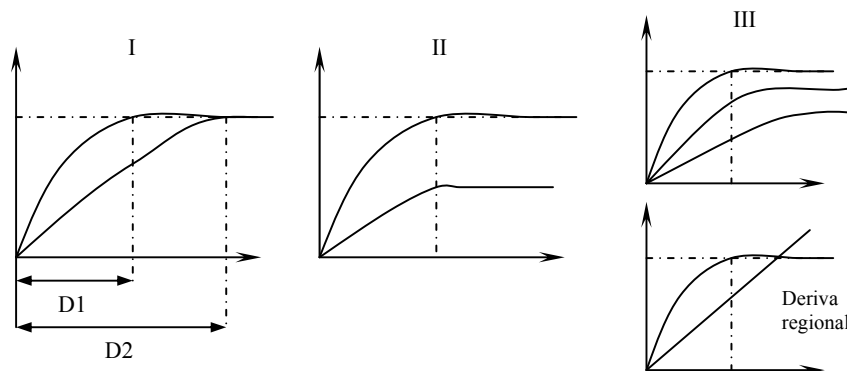


Figura 2.6: diferentes tipos de anisotropía:

- I. Geométrica.
- II. Efecto proporcional.
- III. Zonal.

d) *Comportamientos particulares del variograma.*

- I- Estructuras imbricadas: el origen de este comportamiento está relacionado con la superposición de variaciones diferentes a escalas distintas del mismo fenómeno estudiado.
- II- Estructuras de periodicidad: tanto el variograma como la covarianza pueden presentar periodos en los que se ponen de manifiesto correlaciones locales positivas y negativas.
- III- Efecto de pozo: ocurre cuando el variograma tiene un crecimiento no monótono, con uno o más saltos debido a una componente pseudo-periódica de la variable.

2.3.2.2 Modelos teóricos.

Para los propósitos de estimación o simulación de variables no es posible utilizar directamente el variograma experimental, por lo que previamente deberá ajustarse a un modelo teórico de variograma, lo mismo sucede con la covarianza.

En la práctica los modelos más utilizados son los siguientes:

- Modelos sin meseta:
 - Modelos logarítmicos.
 - Modelo en H^λ .
- Modelos con meseta:
 - Modelo esférico.
 - Modelo exponencial.
 - Modelo gaussiano.
 - Modelo cúbico.

El variograma se calcula con muchos objetivos, fundamentalmente en vista a realizar el análisis estructural y determinar los parámetros necesarios para la estimación y la simulación utilizando las diferentes técnicas de kriging; además se emplea con objetivos más particulares entre los que se destacan: el cálculo de la varianza de extensión y la de dispersión, empleadas en análisis del comportamiento de las VR con el cambio de soporte, etc. La comprensión del comportamiento de la variable con el cambio de soporte es imprescindible para realizar el modelado por lo que se recomienda profundizar más sobre este tema en la literatura especializada.

Generalmente junto al variograma se emplea para fines semejantes las siguientes funciones:

- Función de covarianza C_0
- Función de autocorrelación o de correlación $\rho_{(h)}$
- Variogramas estandarizados (utilizando la media local $\bar{y}$ / o la varianza local o *lag variance*)
- Función de semi-madograma, o semi-desviación media absoluta

Además de estas funciones también son muy empleadas las funciones cruzadas:

- Función cruzada de covarianza C_0
- Función cruzada de autocorrelación o de correlación $\rho_{(h)}$
- Variogramas cruzados o co -variogramas estandarizados
- Función de semivariograma cruzado.

En la literatura se le agrega el prefijo co para especificar que algunas de las funciones mencionadas son cruzadas; cuando se dice cruzada significa que la función se calcula entre dos variables por ejemplo:

*El co- variograma es el momento de inercia a lo largo de la diagonal del diagrama scatterplot entre las variables **a** y **b**(diagrama de dispersión entre **a**(x) y **b**(x)).*

Las funciones cruzadas son una herramienta poderosa para el análisis estructural, pues permiten conocer la variabilidad espacial en función de más de una variable, esto facilita el conocimiento de la existencia o no de una relación funcional entre las variables involucradas, con cierto carácter aleatorio y estructural. Estas funciones son la base para la estimación cruzada (Co-Kriging y sus variantes).

2.3.3 Otros aspectos a tener en cuenta.

El variograma para ser utilizado en la estimación debe tener un error de ajuste al modelo teórico menor de un 10 % (M. David, 1984). La determinación del error se realizará a través de la determinación del índice de bondad de ajuste (Indicative Goodness of fit IGF), que no es más que la validación cruzada del variograma.

Otro punto a tener en cuenta es el radio de búsqueda durante la estimación en relación con el variograma, por ejemplo, si el radio de búsqueda es de 30 m la parte ajustada del variograma que afecta la estimación es solo los primeros 30 m, por esto se debe tener especial cuidado en este tramo, sin embargo, de los 30 m en adelante un mal ajuste del variograma teórico no afecta en lo absoluto el resultado de la estimación.

Se deben emplear muestras que representen la mineralización, en caso de ser muestras de diferentes tipos, métodos de análisis, de obtención, etc., estas deben ser tratadas por separado.

Si la red no es regular la data debe ser *declusterizada*, de no ser así, la presencia de áreas con muchos pozos provoca artificialmente un incremento de la meseta de los variogramas.

Si existe efecto proporcional en la data es preferible utilizar variogramas lognormales y/o relativos, pero siempre teniendo en cuenta:

- que los variogramas relativos subvaloran la varianza
- en caso de mala estacionaridad el variograma lognormal resulta inadecuado por los errores que introduce.

- el variograma relativo alcanza la meseta en la varianza relativa y el lognormal en la varianza logarítmica.

Cuando se realizan variogramas verticales, de yacimientos en forma de mantos, pero situados en superficies inclinadas (por ejemplo, los yacimientos de lateritas) es necesario Utilizar el nivel y no la altura topográfica para hacer referencia a la posición vertical del punto. Si es posible tener en cuenta esta recomendación para la estimación los resultados serán mejores. La causa de error al no cumplirse lo antes expuesto es fácil de comprender: *“Si se tiene un pozo de 20 m de profundidad en la $Z = 0$ y otro de la misma potencia pero en la $Z = 20$ (siendo Z la altura topográfica de la boca del pozo, “Collar”), entonces la continuidad entre las menas de un mismo estrato quedan enmascaradas, esto no ocurre si se toma como referencia una superficie plana con $Z = H$ para todos los pozos”.*

Otro problema serio que comúnmente afecta el análisis variográfico en tres dimensiones del yacimiento es la diferencia que existe entre las escalas de mediciones horizontales y verticales, que disminuye la representatividad del variograma experimental.

La cantidad de pares para cada *lag* del variograma experimental debe ser homogéneo y en número suficiente, poca cantidad de pares en un *lag* aumenta la varianza y la variación entre la cantidad de pares de cada uno de los *lags* provoca formas de sierra, estructuras de periodicidad y otras irregularidades.

Para evadir de una forma u otra estos problemas generalmente se aplican tratamientos especiales para el cálculo de los variogramas (ver manual de usuario del TIERRA[®])

2.4 La teoría de las VR y su relación con la modelación geológica.

Las partes del modelo geológico por su esencia se relacionan a través de la teoría de las variables regionalizadas, estos se resume de forma esquemática en la (Fig. 2.7):

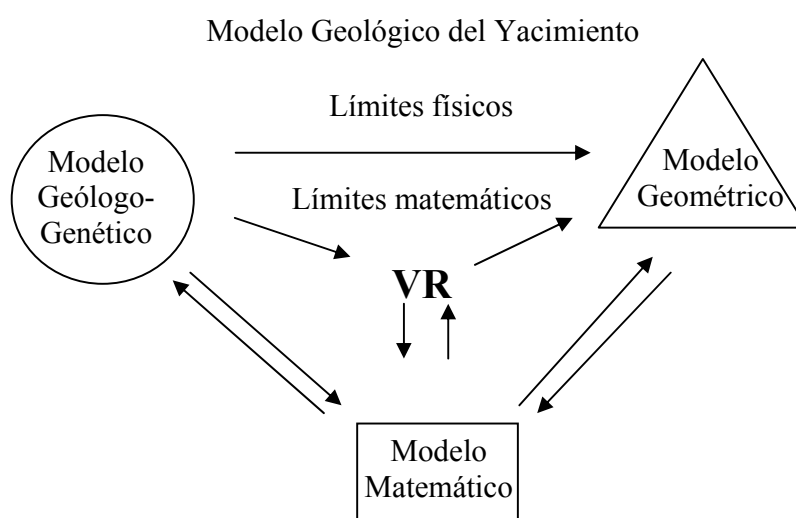


Figura 2.7: Relación entre las VR, y las partes integrantes del modelo geológico del yacimiento.

Como puede observarse existe una interrelación directa entre el concepto de variable regionalizada y las partes constituyentes del modelo geológico, esta interrelación se explica de la siguiente manera:

La parte descriptiva del modelo Geólogo- Genético define cuales son las variables regionalizadas disponibles para realizar la modelación (por ejemplo, contenido de Fe, Ni, Co, etc.) define el posible número y las características de los campos geométricos donde se pueden describir estas variables como poblaciones estadísticas determinadas, es decir, define las características del modelo geométrico ya sea de forma directa a través de los límites físicos previamente descritos o a través de variables que no cumplen las condiciones necesarias para incluirse dentro de las VR (tipos litológicos, límites físicos de diferentes tipos {Fig. 2.8} etc.) o de forma indirecta a través del estudio de las VR con diferentes herramientas matemáticas (estadística multivariada, análisis estructurales utilizando el variograma, error y varianza de Kriging, entre otros).

La parte que define el modelo genético permite predecir y en algunos casos definir las características que tendrá la VR y restantes partes del modelo geológico; en muchas veces es posible definir la ubicación en el espacio de los límites independientemente de sus tipos, permite determinar la cantidad de campos geométricos donde se desarrollan cada una de las poblaciones estadísticas existentes, también es posible determinar las características que tendrá el modelo matemático, predecir la variabilidad de la espacial de los valores reales de las diferentes variables en el espacio, posibles zonas de máximo error de estimación. En caso del proyecto minero encontrarse en la fase de exploración, es posible definir la morfología del yacimiento, diferentes tipos de menas y el resto de las características anteriormente mencionadas.

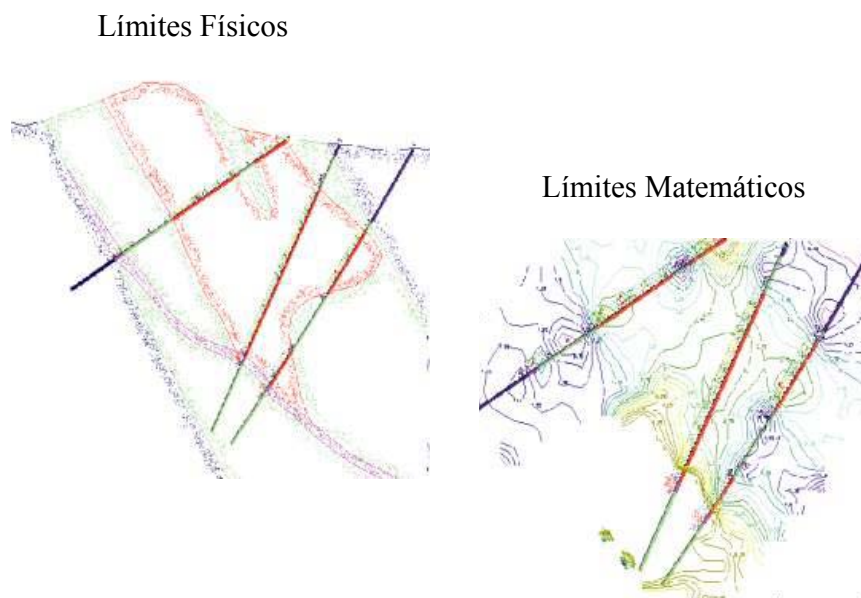


Figura 2.8: Diferentes tipos de límites utilizados en el modelo geométrico.

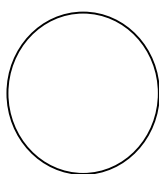
Como puede apreciarse claramente en la mayoría de los casos es importante la utilización de la VR para definir los diferentes campos geométricos donde estas se desarrollan en el espacio, esto es en esencia la determinación o mejoramiento del modelo geométrico a través de un estudio minucioso de la VR.

La VR permite a su vez determinar las características que tendrá el modelo matemático, es decir, el tamaño y forma de los bloques, la anisotropía de los datos, tiene gran influencia en la determinación de los valores de cada uno de los bloques del modelo matemático independientemente de su naturaleza, determinados estos por estimación, modelación o cualquier otro útil matemático, o simplemente por asignación.

Es importante destacar que para realizar esto es necesario tener muy en cuenta las otras partes del modelo geológico, pues la VR por sí sola no permite determinar las características de cualquiera de los submodelos de forma correcta, sino, que la determinación de los componentes del modelo geológico se realiza de forma interactiva entre las VR y el resto de los submodelos (Geólogo-genético, geométrico y matemático) Otro punto a tener en cuenta es el carácter dialéctico que rige la modelación, pues la determinación de un modelo permite mejorar el resto tomando este proceso un carácter cíclico que va de lo simple a lo complejo y de lo general a lo particular.

Para explicar la relación existente entre las distintas partes del modelo geológico y la VR, pero utilizando un lenguaje matemático soportado en la teoría de las VR, se puede utilizar el siguiente gráfico, que no es más que un resumen de la teoría de las variables regionalizadas aplicado a la modelación⁴.

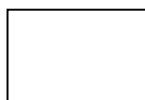
VR: caracteriza (*cualitativa y cuantitativamente*)
un
fenómeno con *estructura de autocorrelación*.



Contiene *n fenómenos* con *m estructuras de autocorrelación* separadas en $\tilde{n}$ componentes o sub-espacios (*$\tilde{n}$ campos geométricos*) del modelo geométrico y caracterizado por un modelo matemático a partir de su *estructura de autocorrelación*.



Representa *$\tilde{n}$ campos geométricos* con *m estructuras de autocorrelación*, donde se distribuyen *diferentes poblaciones estadísticas* homogéneas descritas eficientemente a través de *la teoría de las VR*.



Caracterización *cualitativa y cuantitativa* de *un fenómeno* en el espacio a través de la **VR**, para esto se utiliza *la estimación y la simulación*, de las VR en puntos o volúmenes no conocidos a través del valor de las VR medido en determinados *soportes*.

⁴ Los símbolos tienen el mismo significado que los de la figura 2.7, la circunferencia es el modelo geólogo-genético, el triángulo el geométrico y el cuadrado el matemático.

Para definir mejor la relación que existe entre la **VR** y el modelo geométrico es necesario tener en cuenta el concepto de soporte y campo geométrico. Como puede verse el campo geométrico o la suma de ellos no es más que el modelo geométrico, pero en la práctica solo se conoce el valor de la **VR** en un pequeño espacio R^n , donde n toma valores entre 1 y 3. Por esto para determinar el valor de la **VR** en todo el volumen definido por cada uno de los campos geométricos se utilizan técnicas de simulación y estimación, cuando se utilizan métodos estadísticos para la realización de esta tarea el campo geométrico permite definir cuales son los valores que están realmente correlacionados, por lo que se alcanza mayor precisión. El concepto de campo geométrico y soporte se puede explicar a través de la Fig. 2.9.

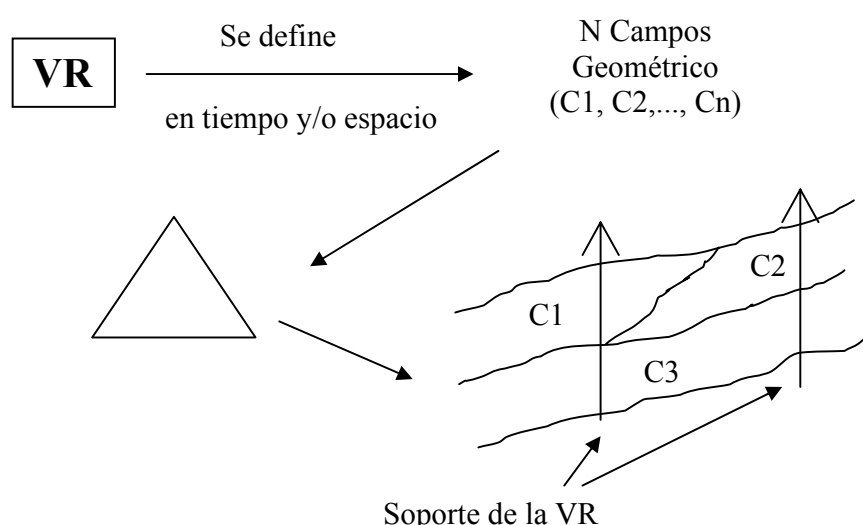


Figura 2.9. Forma esquemática de conceptualizar el campo geométrico y el soporte de la VR.

Como habíamos dicho anteriormente, en la práctica de la modelación de yacimientos el modelo geométrico puede ser representado a partir de sólidos sencillos (modelo de polígonos), utilizando las áreas de influencia (modelo poligonal), o a partir de sólidos complejos (modelos de sólidos o wireframe) como se muestra en la Fig. 2.10.

Estos límites se utilizan para subdividir el modelo matemático en diferentes partes, donde los valores de las VR se distribuyen de forma homogénea en el espacio; muchas veces los fabricantes de software incluyen el sub-espacio (campo geométrico) como una variable más del modelo matemático sin determinar estos límites de forma explícita pero están implícitos en el modelo matemático, un ejemplo de este tipo de software es el "TIERRA[®]" (ISMM Moa© Aristides Legrá, 1999), esta es la diferencia fundamental con otros software mineros como el GENCOM[®], VULCAN[®], etc.

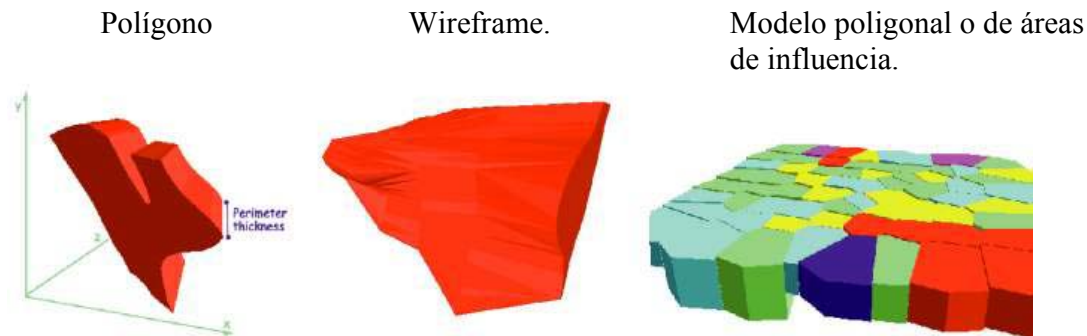


Figura 2.10: Diferentes forma de automatización de los límites que conforman el modelo geométrico.

Existen varias maneras de realizar la modelación matemática de un yacimiento, en dependencia de su tipo; las formas más comunes son:

- La simulación de un fenómeno a través de fórmulas matemáticas con enfoques determinísticos, por ejemplo: la simulación del flujo de agua subterráneo, de la velocidad de deposición de un determinado formación sedimentaria, etc.
- La estimación y la simulación del valor de las VR en puntos o espacios no conocidos a través de valores conocidos.
- Otros tipos de estimación y simulación que depende de casos particulares y de factores humanos y naturales. Por ejemplo, la modelación económica, la simulación de la explotación y muchas otras.

Para alcanzar mayor precisión en la modelación es necesario utilizar soportes con determinados tamaños y formas, en dependencia de factores como son los siguientes:

- a) Aspectos técnicos de la explotación, como son las características geométricas de las cámaras de extracción, la altura del banco de explotación, etc.
- b) Aspectos de índole geoestadístico: la malla de información experimental, el alcance del variograma, la anisotropía, etc.
- c) El tipo de cálculo.
- d) Aspectos puramente geológicos. Estos son los más importantes pues determinan las características que influyen en el resto de los aspectos antes mencionados; entre los aspectos más relevantes se encuentra la morfología del yacimiento, su complejidad geológica, etc.
- e) Otros factores como son: la fase en que se encuentre el proyecto minero, los objetivos de la modelación, la cantidad de información disponible, la tecnología a utilizar en este proceso, etc.

Es importante resaltar *la influencia de la geología en la forma y tamaño del bloque*, por ejemplo las dimensiones en determinada dirección dependen de la variabilidad de los datos en el espacio, estos generalmente coinciden con los ejes del elipsoide de la anisotropía y las dimensiones de los mismos. Los bloques pueden ser de forma regulares Fig. 2.11 a) o

irregulares; los primeros se utilizan en casos de yacimientos complejos con límites mal definidos, los segundos se utilizan fundamentalmente en yacimientos sedimentarios sencillos con límites físicos bien definidos que constituyen el techo y el piso de estos bloques Fig. 2.11 b).

En un mismo yacimiento se pueden utilizar diferentes tamaños del soporte en función de la variabilidad de los datos en el espacio y del interés técnico económico de la variable modelada, también se utilizan disminuciones del tamaño de los bloques en los límites para rellenar espacios vacíos entre bloques de mayor tamaño Fig. 2.11 c).

El modelo matemático en la mayor parte de los yacimientos es un conjunto de pequeños bloques cada uno con una posición en el espacio, donde la referencia de posición se realiza en función de su centro, dimensiones y orientación Fig. 2.11 a).

En la practica se emplean dos tipos de modelos matemáticos en dependencia de las formas de sus unidades o bloques elementales:

Modelo de rejillas[▲](GRD Model) Fig. 2.11 b).

Se refiere al modelo con bloques irregulares, es similar al modelo de bloques, no es más que una serie de celdas, las cuales tiene forma regular en dos dimensiones, agrupándose una al lado de la otra a lo largo de esta dimensión. La tercera dimensión es variable y en posición y extensión, permite que las celdas describan un volumen en el espacio. Cada celda contiene los atributos que describen las propiedades del yacimiento en el dominio donde está definida.

Es aplicable fundamentalmente en depósitos tabulares, fundamentalmente aquellos de poca potencia, es utilizado fundamentalmente utilizado en yacimientos estratificados, filonianos, lateríticos y aluviales.

El modelo de bloques (block model) Fig. 2.11 a)

Es una serie de celdas cuboidales, regulares en tres dimensiones acopladas en el espacio definido por un volumen determinado. Cada celda contiene una serie de atributos descriptivos del yacimiento, en el volumen ocupado por esta celda.

Generalmente el modelo se almacena en forma de tabla o base de datos donde cada campo define las propiedades de cada celda y estas a su vez está definidas por cada record^{▲▲}.

[▲] Aquí se incluyen los modelo del tipo LAMINAR (© MineMap Pty Ltd,1996) y otros similares, donde no se utiliza el bloque isométrico como forma de representar el modelo matemático.

Se le llama record a la fila de una base de datos, generalmente cada fila representa los valores de cada bloque en el modelo, las variables están definidas por las columnas de la base de datos y se conocen como campo.

^{▲▲} Se le llama record a la fila de una base de datos, generalmente cada fila representa los valores de cada bloque en el modelo, las variables están definidas por las columnas de la base de datos y se conocen como campo.

La modelación de las variables permite realizar la planificación minera a corto y largo plazo, determinar los cortes óptimos (Fig. 2.11) y a partir de esto realizar la modelación económica: determinar las variables económicas tanto en el soporte como en todo el yacimiento, realizar simulación económica para diferentes planes mineros de explotación, para diferentes cut-off, también permite realizar análisis de riesgo económico, etc.

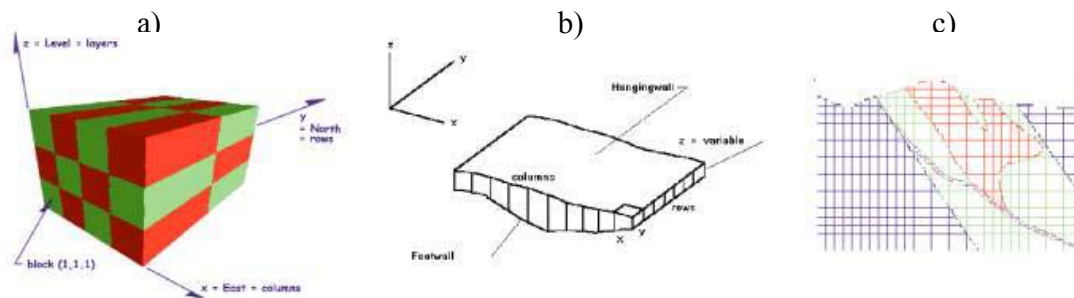


Figura 2.11: Esquema donde se muestra algunas variantes de soportes o tamaño y tipo de bloque:
a) bloques regulares en función de la anisotropía y otros factores(modelo de bloques); b) bloques irregulares delimitados en el techo y en el fondo por límites físicos(modelo de rejilla); c) yacimiento con diferentes tamaños de bloques en función de la variabilidad de los datos y el tipo de mena.

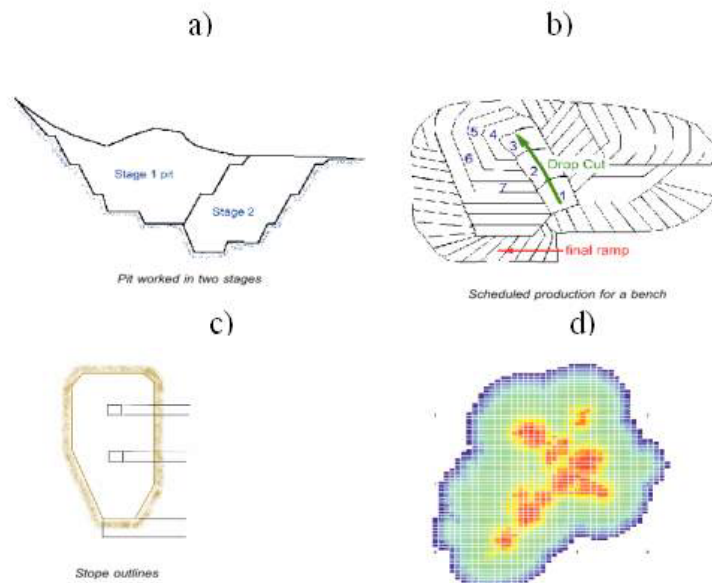


Figura # 2.12: Aplicación del modelo matemático: a) optimización del corte; b) y c) planificación minera; d) determinación de la columna mineralizada y zona con poco mineral (para la planificación minera a corto plazo: mezclas de mineral, posición del corte, etc), cálculo de reservas, y otros.

2.5 La estimación y la simulación del fenómeno geológico, como herramienta imprescindible para la modelación matemática.

La simulación y estimación del fenómeno geológico se realiza fundamentalmente a través de enfoques determinísticos y probabilísticos con diferentes objetivos, como son el cálculo de reserva, planificación minera y otros.

La estimación no es más que la determinación del valor de una variable en un soporte R^n y la simulación es una combinación de técnicas matemáticas en las que se incluye la estimación, condiciones de diferentes índoles representadas a través de funciones de distribución de la variable, entre otras; También se utiliza otros tipos de fórmulas matemáticas con significado físico y/o empíricas que describen el comportamiento de las variables en el espacio en función de otras variables que caracterizan un soporte geométrico determinado (por ej. la fórmula de la infiltración lineal de Darcy).

2.5.1 La estimación.

Las técnicas de estimación más populares utilizando métodos determinísticos son:

2.5.1.1 Inverso de la distancia.

Este método aplica un factor de ponderación a cada muestra que rodea un punto o un bloque. El factor de ponderación es el inverso de la distancia entre cada muestra y el centro del bloque elevado a una potencia n ($3 > n > 1$, en la mayoría de los casos). Por ser un método que generalmente suaviza debe aplicarse solamente en yacimiento con tránsitos mineralización- estéril graduales.

Es importante destacar que cuando mayor es el exponente más fuerza a la ponderación se le da a las muestras más cercanas en detrimento de la más lejana, un exponente 5 provoca que el método funcione similar a la estimación utilizando el vecino más cercano, en este caso el método funciona como un interpolador exacto. Si el exponente toma valor cero entonces el punto estimado será la media aritmética de los puntos conocidos que intervienen en el cálculo.

2.5.1.2 El vecino más cercano.

Este método asigna el valor del punto más cercano al punto a estimar, por lo que solo es utilizado en casos muy particulares.

2.5.1.3 Funciones radiales básicas.

Son un grupo diverso de métodos de interpolación, a través de ella se puede adecuar la data a una superficie suavizada introduciendo un factor de suavizado. El método multicuadrático es considerado el mejor entre estos interpoladores. Todas estas funciones son interpoladores exactos a través de los cuales se respetan las características de la data.

Las funciones son análogas a los variogramas utilizados en Kriging y definen los valores óptimos de ponderación a aplicar cuando se realiza la interpolación, estas funciones son:

- a) Inverso multicuadrático.
- b) Multilogarítmico.
- c) Multicuadrático.
- d) Spline cúbico natural.
- e) Spline en bandas delgadas.
- f) Otros

2.5.1.4 Triangulación o interpolación lineal.

Es un interpolador exacto, posiblemente uno de los más utilizados, fundamentalmente por los topógrafos; es eficiente cuando los datos están espaciados de forma irregular, es útil para generar redes regulares de puntos estimados. Este método funciona creando triángulos entre los datos experimentales, cada triángulo define un plano sobre el que se puede estimar el valor de un punto que pertenezca al mismo usando como referencia un plano horizontal. Generalmente las superficies generadas de esta manera son muy próximas a la realidad.

Esta técnica de interpolación es la fundamentalmente utilizada para interpolar los límites de los sólidos que conforman el modelo geométrico, a estos sólidos se le llama modelos de “Wireframe”.

2.5.1.5 Otros.

Método de Shepard: Es similar al método del inverso de la distancia, sólo que usa los mínimos cuadrados de forma local para mejorar la interpolación.

Mínima curvatura: Genera superficies con la curvatura mínima posible por lo que la interpolación es lo más suavizada posible, preservando las características de la data inicial. No es un interpolador exacto, por lo que los valores interpolados no siempre coinciden con la data experimental en un punto conocido.

Regresión polinómica: se utiliza para determinar tendencias regionales de la data, no es realmente un interpolador pues no tiende a predecir el valor de una variable en un punto desconocido. La regresión polinómica puede ser:

- a) Simple planar.
- b) Bilineal.
- c) Superficie cuadrática
- d) Superficie cúbica.

Existe un grupo de métodos dirigidos al cálculo de reservas que no son realmente interpoladores pero genera o se asignan valores a puntos conocidos o no en función de puntos conocidos, estos son: *método de los polígonos, método de las matrices de bloques, método de los contornos en sus dos variantes* (método de la sobre-imposición de una malla, de la ventana móvil y del reticulado).

2.5.2 Las técnicas de estimación utilizando métodos probabilísticos y el Kriging.

Estos métodos son conocidos como métodos geoestadísticos o métodos de krigeage, fueron desarrollado por Matheron a partir de los años sesenta. Desde entonces se han desarrollado un gran número de variantes del Kriging, pero en su esencia consisten en estimar el valor de una variable regionalizada en un punto o volumen a partir de unos factores de ponderación que funcionan de forma semejante a como lo hace en el inverso de la distancia. Este valor se caracteriza por ser el mejor estimador lineal insesgado; se dice el mejor porque los factores de ponderación se determinan de forma tal que la varianza de estimación es mínima; lineal porque es una combinación lineal de la información; insesgado porque la esperanza matemática del error es nulo (considerando como error la diferencia entre el error real y el estimado).

Los factores de ponderación se calculan a partir de un sistema de ecuaciones conocidas como ecuaciones de krigeage, donde las incógnitas para resolver el sistema se obtiene a partir del variograma modelado.

Para mejor comprensión mostramos un ejemplo simplificado de Kriging Simple, con soporte puntual donde se estima el valor de un punto a partir de tres puntos conocidos:

$$Z^* = \sum K_i Z_i$$

Los ponderadores K_i se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$\sum K_i \gamma_{(i,j)} = \gamma_{(i,z)} - \mu$$

Entonces para los tres puntos

$$K_1 \gamma_{1,1} + K_2 \gamma_{1,2} + K_3 \gamma_{1,3} = \gamma_{1,0} - \mu$$

$$K_1 \gamma_{2,1} + K_2 \gamma_{2,2} + K_3 \gamma_{2,3} = \gamma_{2,0} - \mu$$

$$K_1 \gamma_{3,1} + K_2 \gamma_{3,2} + K_3 \gamma_{3,3} = \gamma_{3,0} - \mu$$

De esta forma se generan 3 valores de K_i que cumplen con la condición:

$$\sum K_i = 1$$

Donde los K_i son los factores de ponderación (coeficientes de krigage) para la determinación del valor del punto desconocido Z^* a partir de los valores Z_i conocidos y los $\gamma_{i,j}$ son los valores de los variogramas obtenidos a partir de la ecuación de los modelos correspondientes para una distancia i a j , μ es un valor único para cada punto estimado conocido como multiplicador de Lagrange, su valor es resultado de la solución de los n sistemas de ecuaciones y la condición de no sesgo ($\sum K_i = 1$), la notación $\gamma_{(i,z)}$ es el valor del variograma entre el punto a estimar y el punto conocido a una distancia de i a z .

El error de la estimación se expresa a través de la varianza de krigage:

$$\sigma_k^2(z) = \mu + \sum K_i \gamma_{(i,z)}$$

Esta es una varianza como otra cualquiera, que caracteriza el error en función de los coeficientes de krigage, está en función de la posición del punto a estimar con respecto a los puntos experimentales y el variograma teórico.

La varianza de estimación permite hacer un estudio de la bondad de estimación, análisis de redes óptimas, clasificar las reservas por la varianza de estimación, etc.

La raíz cuadrada de la varianza de estimación (desviación estándar de la estimación) se puede comprender como la posible desviación del valor real del bloque o punto estimado con respecto a la media real del mismo, más adelante se abundará más sobre el tema.

Una propiedad importante es el efecto de suavizado de la estimación con Kriging, sobretodo en el caso de Kriging de bloque:

$$\sigma_z^2 = \sigma_k^2(z) + \sigma_{(z^*)}^2 + 2\mu$$

Esto se puede escribir de forma simplificada como:

$$\sigma_z^2 \approx \sigma_k^2(z) + \sigma_{(z^*)}^2$$

donde σ_z^2 es la varianza real del bloque[▲]

$\sigma_{(z^*)}^2$ es la varianza estimada del bloque.

[▲]La varianza real del bloque es muy difícil de determinar, pues la mayoría de las veces no tiene datos disponibles dentro. Este efecto es muy informativo cuando se estudia para todo el yacimiento, por esto se recomienda comparar el histograma de todos los valores reales y de los valores estimados.

El conocimiento de este efecto es de suma importancia para la planificación y el cálculo de reservas, su estudio se puede realizar a través de las curvas de recuperación global tonelaje-ley o *Grade-Tonnage* (M. David, 1977), o a través del coeficiente de suavizado (Maréchal, 1975) a través de la siguiente relación:

$$S = \sigma_{z^*}^2 / \sigma_z^2 \text{ esta relación cumple que } S < 1 \text{ en todos los casos.}$$

Un ejemplo de este efecto se muestra en la Fig. 2.13; Este ejemplo muestra el estudio del efecto soporte y el efecto de suavizado de Kriging en el yacimiento de Ni de San Felipe, para ello se realizó la estimación para bloques 2D del promedio de los tres primeros metros, es efecto de suavizado se hace evidente cuando se comparan los histogramas de los datos estimados y los valores reales; la disminución de la varianza con la disminución del soporte y el aumento de la frecuencia de aparición de los valores próximos a la media pueden provocar serios errores en el cálculo de reserva y en la planificación minera.

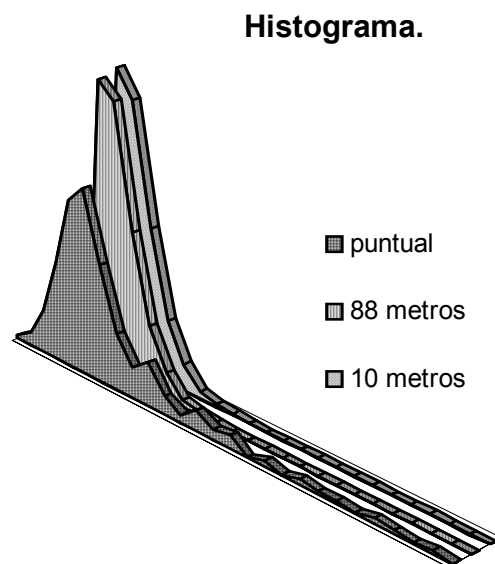


Figura 2.13: Este ejemplo muestra el estudio del efecto soporte y el efecto de suavizado de Kriging en el yacimiento de lateritas ferroniquelíferas de la meseta de San Felipe, Camagüey.

2.5.2.1 Otras propiedades del Kriging.

- Es un método condicionalmente insesgado, esto se traduce de la siguiente manera:
Supongamos que se tiene un bloque Z_v , con n valores reales Z ; la esperanza condicional de que todos los valores Z de ese bloque dado el valor estimado del bloque $Z^* = Z_0$ es igual al valor medio estimado Z_0 para ese bloque, esto se muestra en la siguiente figura:

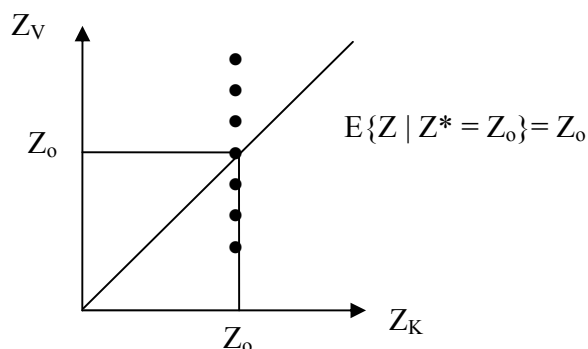


Figura 2.14: Ejemplo donde se cumple la condición de no sesgo en el valor estimado por Kriging para un bloque.

Esto se cumple solo en caso de que los valores Z , al igual que los valores estimados, estén distribuidos normalmente y el promedio se conoce. Esta propiedad es característica del kriging.

- Aditividad, se pueden sumar los valores de cada bloque, ponderando su volumen, pero no se puede realizar el mismo procedimiento con la varianza.
- Es un interpolador exacto, en un punto conocido $Z^* = Z$
- Efecto de pantalla, los datos más próximos generalmente tienen el mayor peso en la ponderación a consecuencia de que $\sum K_i = 1$; el estudio de este efecto permite agilizar el cálculo, tomando solo los valores más próximos al punto, sin excluir los valores conocidos con efecto importante en el cálculo.

2.5.2.2 Algo más del error de estimación del Kriging.

El error se emplea para determinar la efectividad de la estimación, pero existe un punto en que su valor no se puede disminuir, entonces se utiliza este como el mejor criterio de clasificación de las reservas y para el estudio de redes.

A continuación se muestra la clasificación de las reservas en función del error de estimación según Annels, 1991.

Varianza del Kriging	Categoría
0 – 0.0075	Probables
0.0075 – 0.0135	Posibles
>0.0135	Inferidas / Indicadas

Diehel y David (1982) proponen una clasificación basada en los límites de precisión entre las reservas probadas -probables según la varianza de estimación, este límite es la desviación estándar relativa del Kriging:

$$\text{Precisión} = 10 = (\sigma_K \times 100 \times \mu_{0,8})$$

Donde $\mu_{0,8} = 1,1282$

Por lo que

$$\sigma_K / Z^*_K = 0.078$$

Otra clasificación según la precisión se muestra a continuación, esta fue realizada para un yacimiento de Cu:

Precisión

<0.20	Probadas
0.20 – 0.60	Probables
>0.60	Posibles

Como puede verse existen ciertas contradicciones entre una clasificación y otra, la causa de esto es simple, las condiciones de un yacimiento y otro varían considerablemente, tanto respecto al tamaño del bloque que se modela, como a las exigencias del proceso metalúrgico; por esto, para el caso de los yacimientos de Ni es necesario validar estas clasificaciones o simplemente transformarlas.

El empleo del valor del error en función de su probabilidad de ocurrencia resulta más fácil de interpretar, desde el punto de vista de la planificación, ya que en la mayoría de las clasificaciones de reservas el error permisible está expresado de esta manera.

2.5.2.3 Variantes de Kriging más conocidas.

Las variantes de Kriging más conocidas son:

Krigeage Puntual: éste se explicó en el ejemplo anterior, pero en la práctica es necesario tener en cuenta otros factores como es la anisotropía, el área de búsqueda de los datos estrechamente relacionada con el rango del variograma, etc.

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

Las variedades más populares de uno y otro tipo son:

Krigeage Indicador (simple[▲]): se utiliza fundamentalmente en yacimientos de Au donde la variación de los valores es muy brusca, y la introducción de valores extremadamente altos o muy bajos provoca errores importantes. Es un método no paramétrico donde los valores son transformados a 0 y 1, dependiendo de su relación con una determinada ley de corte (contenido mínimo o cut-off), estos valores se ajustan a un variograma teórico y por último se realiza la estimación de manera similar a las variantes de kriging antes mencionadas. Además, permite estimar la proporción de un bloque bajo estudio que tiene un determinado porcentaje de probabilidad de encontrarse por encima de la citada ley de corte. La función que permite realizar este reordenamiento de los valores se conoce como función indicatriz y es la base de muchas de las otras variantes del Kriging.

Krigeage Indicador(múltiple): es similar al anterior, con la única diferencia de que se utilizan varias leyes de corte.

Las ecuaciones para la realización de uno u otro tipo pueden tratarse como Kriging Universal y como Kriging Simple, este último con variaciones en dependencia de que si la media del bloque es o no conocida.

Existen otras variantes menos conocidas dentro de las que se encuentran: Krigeage Factorial, Kriging disyuntivo (diseñado para cálculos de reservas, tiene poco efecto de suavizado), Kriging cruzado o cokriging y su variante análisis Krigeante, Kriging lognormal, Kriging aleatorio, Kriging probabilístico, y otros, además existe la simulación condicional, que también se utiliza para simular matemáticamente algunos procesos mineros y económicos^{▲▲} relacionados con estos.

2.5.3 Simulación condicional.

Aunque menos popular el alcance de la simulación condicional permite resolver una gran cantidad de problemas, teóricamente insolubles con técnicas tradicionales de estimación y con Kriging.

Como pudimos darnos cuenta el Kriging es un método bastante eficiente para determinar el contenido medio de un bloque a partir de puntos de muestreo con valores de contenido conocido, su principal dificultad radica en que se desconoce la distribución de los datos y la varianza del bloque. La simulación condicional además de determinar el valor del bloque, permite simular las fluctuaciones del valor medio dentro del mismo.

Para realizar la simulación de los valores a través de la distribución de los contenidos, como la simulación se realiza para soportes pequeños a partir de puntos experimentales aislados,

[▲] En este caso se dice simple porque solo se tiene en cuenta un cut-off.

^{▲▲} En muchos casos las variables económicas, al igual que otras de carácter técnico tienen cierta estructura de la variación por lo que pueden ser tratadas como VR.

es necesario determinar la distribución de los datos a pequeña escala, por lo que se requiere de redes de observaciones densas (proporcionales al soporte con que se simulará) generalmente de carácter local, también se utilizan los datos de los pozos criollos, trochas, etc.

Si la varianza de estimación es pequeña los valores simulados serán aproximadamente iguales a los estimados.

La simulación condicional es un modelo real en la cual se fuerzan algunas características, para ver las consecuencias de esas características (M. David, 1977). Para su ejecución se parte de la información de los contenidos de una serie de puntos $Y_{(X\alpha)}$

Del modelo se espera que:

- $Z_{S(X)}$ tenga la misma distribución que las Z reales.
- Que la correlación espacial de Z real sea igual que $Z_{S(X)}$
- En los puntos conocidos $Z \text{ real} = Z_{S(X)}$

En este caso $Z_{S(X)}$ es el valor condicionalmente simulado.

El uso del modelo simulado se resume en la siguiente figura:

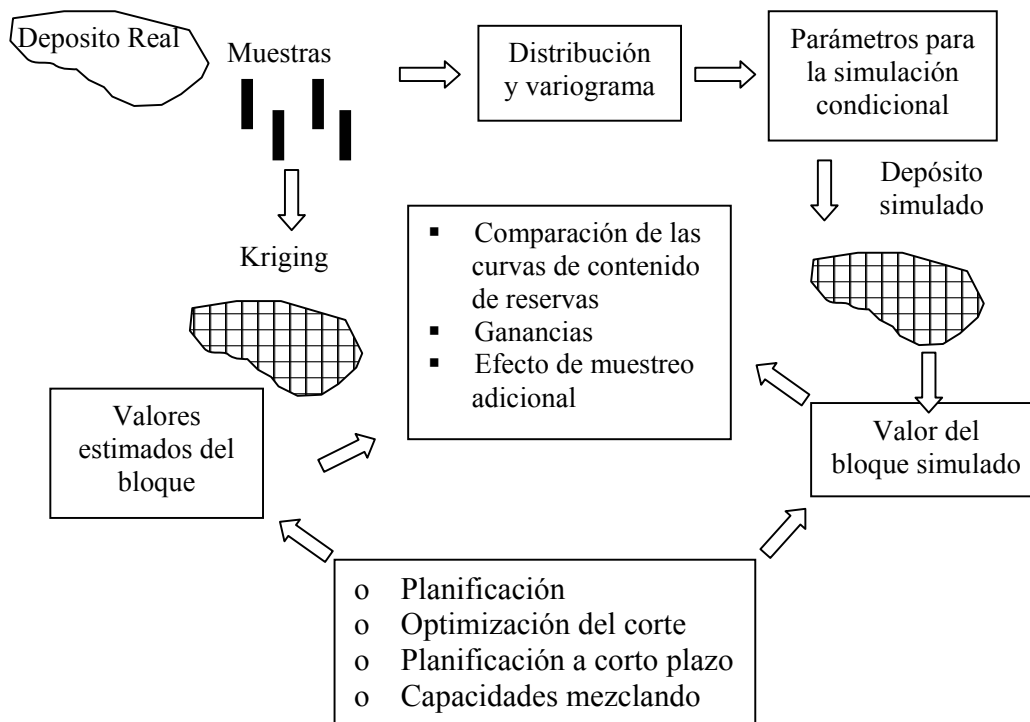


Figura 2.15: Empleo de la simulación Condicional en la ejecución de un proyecto minero (M. David 1977)

2.5.3.1 Ejecución de la simulación condicional.

Aquí se muestra de forma simplificada el proceso, pero para su ejecución se requiere de un amplio conocimiento de la teoría de la simulación condicional.

Los pasos a seguir para hacer la simulación condicional:

- 1) Se tienen los valores de $Z_{(X)}$ en cada punto del depósito obtenido de valores reales conocidos $Y_{(X\alpha)}$ en cada muestra $X\alpha$ y $E[Y_{(X\alpha)}] = m$.
- 2) Utilizando los $Y_{(X\alpha)}$ en el punto $X\alpha$ se puede determinar el valor Krigeado $Y^*_{(X)}$, para cada punto $X\alpha$ se cumplirá que $Y_{(X\alpha)} = Y^*_{(X\alpha)}$ por la propiedad de interpolador exacto del Kriging.
- 3) De los valores $Z_{(X\alpha)}$ en los puntos $X\alpha$ se calcula $Z^*_{(X\alpha)}$ para todos los puntos X del yacimiento.

Entonces:

$$Z^*_{(X)} = Z_{(X)} \quad \text{y} \quad Y_{(X)} = Y^*_{(X)}$$

El valor Condicionalmente simulado será:

$$Z_{S(X)} = Y^*_{(X)} + [Z_{(X)} - Z^*_{(X)}]$$

Las propiedades de esta función serán:

$$Z_{S(X\alpha)} = Y_{(X\alpha)} \quad E[Y^*_{(X)}] = m$$

$$E[Z_{(X)}] = m \quad E[Z_{(X)} - Z^*_{(X)}] = 0$$

Y y Z no tienen correlación.

$Z_{(X)}$ es el valor simulado para todos los puntos del yacimiento.

$Z_{(X)}$ es el valor simulado para todos los puntos del yacimiento.

$Z_{S(X\alpha)}$ es el valor condicionalmente simulado para los puntos experimentales.

$Z^*_{(X)}$ es el valor estimado a partir de los $Z_{S(X\alpha)}$ para todos los puntos del yacimiento.

$Y^*_{(X)}$ se estima a partir de cada $Y_{(X\alpha)}$

Para simular cada $Z_{(X)}$ y cada $Z_{S(X\alpha)}$ se emplean varios métodos, entre ellos el método de las bandas rotantes.

2.5.3.2 Método de las bandas rotantes (Matheron, 1973).

Se supone que se conoce como simular una realización unidireccional de una función con una distribución determinada con $m = 0$ y covarianza $C(h)$. Esto significa una línea equidistantemente segmentada, donde cada segmento tiene un valor dado.

La banda está formada por el espacio entre planos perpendiculares a la línea, el valor del segmento entre los dos planos se le asigna al espacio definido por la banda.

Todas las bandas se rotan uniformemente en el espacio en todas direcciones, se emplean para ello aproximadamente 15 bandas (M. David, 1997), entonces cada punto en el espacio pertenece a las 15 bandas. Las bandas están definidas para cada una de las direcciones por un objeto isométrico, considerando los lados de este objeto con similar orientación como uno solo, por ejemplo un cubo define tres bandas.

De esta manera:

El valor simulado en el punto será.

$$Z(X_i) = \sum_{j=i-n}^{i+n} |X_j - X_i| y_{X_i}$$

La varianza de dicho valor estimado en el punto será.

$$C_1(h) = \frac{\sigma^2}{2\pi} \begin{cases} 1 - \frac{3h}{a} + \frac{2h^3}{a^3} & 0 \leq h \leq a \\ 0 & h \geq a \end{cases}$$

$$C_1(h) = 0$$

Este es el caso particular de un variograma esférico con varianza σ^2 y rango a , h es al ancho de cada banda.

$y(X_i)$ es un valor asignado al segmento X_i a partir de la distribución uniforme.

La distribución de los datos debe tener las siguientes características:

- Para la línea:
 - a) El valor de la distribución varía entre 0 y 1.
 - b) La media es $\frac{1}{2}$.
 - c) La media del promedio ponderado es $\frac{1}{2}$.
 - d) La varianza es $a^3/144$.
- Para el espacio R^3 :
 - a) Si el proceso se realiza con 15 líneas la media será $15/2$
 - b) La varianza $a^3(15/144)$

Por esto los datos se transforman a una distribución normal con estas características, para ello se emplean dos métodos, uno gráfico y otro numérico creado por Journel (1975).

Las técnicas de simulación condicional han dado buenos resultados, en muchas ocasiones mejores que cuando se emplea algunas de las variantes de Kriging; un ejemplo claro puede encontrarse en *"Applied advanced geostatistical ore reserve estimation, Michel David 1984"* en el que se muestra un ejemplo donde se simula un yacimiento de Ni en Nueva Caledonia del tipo garnierítico con alta variabilidad y alto control tectónico de la mineralización; el resultado muestra que con esta técnica es posible explotar el yacimiento con un modelo matemático con soporte de 6 m x 6 m x 5 m generado a partir de la red de 70 m x 70 m, sin embargo cuando se genera el modelo matemático empleando la estimación con Kriging, el efecto de suavizado, y los altos errores impiden su aceptación y muestran que se requiere una red más densa para hacer más confiable el cálculo.

2.5.4 Otros aspectos a tener en cuenta.

Es importante tener en cuenta la influencia del variograma en la modelación, esta es:

- a) Influencia de la escala o meseta: con el aumento de la escala generalmente aumenta la varianza de krigeage.
- b) Influencia de la forma: la forma en que se alcanza la meseta afecta fundamentalmente el valor estimado a partir de una distancia menor que el rango.
- c) Influencia del efecto de pepita: con su aumento la varianza de estimación tiende a aumentar.
- d) Efecto del rango: tiene una relación inversa con la varianza de estimación, cuando el alcance es corto el variograma en la estimación tiene el mismo comportamiento que el efecto de pepita puro.
- e) Anisotropía: influye en el peso que se le otorga a cada muestra en la estimación en dependencia de la dirección de los ejes de máxima y mínima variabilidad.

Es imprescindible tener en cuenta la existencia de varias poblaciones estadísticas, la explicación geológica de su existencia y el carácter de sus límites.

La simulación condicional es muy sensible a la existencia de varias poblaciones estadísticas, por lo que requiere un estudio exhaustivo de la data y la ejecución a partir de un modelo geométrico preparado especialmente para este fin.

2.5.5 La estadística multivariada y estadística clásica en función del desarrollo del modelo geológico.

La estadística multivariada recoge un gran número de herramientas que en ocasiones pueden ser imprescindibles para la modelación; generalmente se utilizan para la determinación de anomalías geológicas, la descripción del fenómeno con un número

mínimo de variables, la separación de diferentes poblaciones estadísticas, determinación de la correlación y comportamiento de las variables en el espacio. Para su aplicación es importante utilizar y conocer que la estadística multivariada y la geoestadística tiene como base la estadística clásica.

De estas técnicas las más utilizadas como herramientas para la construcción del modelo son:

- Estudio de secuencias de datos.
- Análisis de componentes principales y técnicas de relacionadas.
- Regresión multivariada.
- Técnicas estadísticas de clasificación.

2.5.5.1 Estudio de secuencias de datos.

Consiste en la realización de mediciones secuenciales que se caracterizan por un ordenamiento en el tiempo y en el espacio; algunos autores la han utilizado para modelar el almacenamiento y recogida de las menas explotadas (Mario Chica Olmo, 1989). Es importante aclarar que estas técnicas se conocen como series temporales (se refiere tanto a mediciones temporales como espaciales) y en ellas se incluyen las funciones de autocovarianza, de autocorrelación, así como, las funciones de covarianza y correlación cruzada. También se incluye la teoría de las variables regionalizadas y las técnicas utilizadas dentro del campo de la geoestadística. Es frecuente el empleo de técnicas determinísticas como es las series temporales de Fourier, el spline, etc.

2.5.5.2 Análisis de componentes principales y técnicas de relacionadas.

El objetivo fundamental es lograr la descripción del objeto u objetos de estudio con otros sistemas nuevos de atributos, calculados a partir de los ya existentes y que satisfagan las siguientes propiedades:

- Sean independientes entre sí.
- El número de atributos originales es mayor o igual que el número de atributos calculados.
- El nuevo sistema de atributo debe conseguirse a partir de una relación lineal homogénea de los atributos originales.

Las técnicas que cumplen estas tareas se denominan componentes principales, en términos matemáticos son las variables medidas a lo largo de direcciones principales definidas por los vectores propios de la matriz de varianza – covarianza de los valores originales. Generalmente se emplea para la detección de anomalías geofísicas y geoquímicas a través de la determinación del comportamiento regional y local del sistema, es conveniente emplearlo para realizar o emplear técnicas de clasificación que permiten obtener la distribución en el espacio y las fronteras de diferentes fenómenos geológicos por lo que es una herramienta imprescindible para obtener el modelo geométrico del yacimiento. Su

efectividad decrece con la disminución del número de datos y la cantidad de variables medidas.

Una técnica relacionada es el análisis de factores, que se utiliza para investigar la estructura de correlación del sistema y atributos originales, y a partir de estos tratar de encontrar grupos de factores que controlen aspectos del sistema, expresado como combinaciones lineales que operan sobre los atributos estudiados, la mayoría de las veces estos factores están asociados a un determinado suceso geológico. Al igual que las técnicas de componentes principales, resulta imprescindible para la determinación del modelo geométrico pero a su vez es una herramienta poderosa para confeccionar el modelo geólogo–genético, pues permite comprender el comportamiento de los elementos y las VR medidas en el yacimiento.

2.5.5.3 Regresión multivariada.

Permite estimar el comportamiento de variables dependientes a partir de un subconjunto de variables predictoras, dentro de este grupo de herramientas se encuentra la determinación de modelos de regresión, que permiten determinar el valor de la variable independiente a través de un polinomio que caracteriza el modelo de regresión, donde sus coeficientes se calculan a partir del comportamiento en el espacio de las variables predictoras.

En ocasiones se emplean los residuos o errores de estimación a través de esta técnica para realizar la caracterización geológica del fenómeno estudiado. También se emplean los intervalos de confianza para conocer y caracterizar las variables dependientes.

Otras herramientas relacionadas son el coeficiente de determinación o correlación múltiple, el coeficiente de correlación parcial, ajuste cuadrático mínimo de curvas, etc., todas ellas ampliamente aplicables en las ciencias de la tierra.

2.5.5.4 Técnicas estadísticas de clasificación.

Estas técnicas son fundamentales para la confección del modelo geométrico y perfectamente utilizables para confección del modelo geólogo–genético y el matemático, pues permiten separar los datos disponibles según las poblaciones estadísticas presentes en el yacimiento a modelar, así como, es posible determinar en el espacio diferentes tipos de menas y las variaciones a consecuencias de fenómenos geológicos, Ej. redeposición, erosión, mineralización asociada a fallas, cambios o presencia de otros tipos de menas, alteraciones, etc.

Estas se dividen en dos grupos principales:

- Técnicas de clasificación supervisada, para la cual se requiere información sobre las clases o categorías de objetos geológicos que pueden aparecer y sobre el comportamiento de un conjunto de atributos o índices en cada uno de ellos, empleando algunas técnicas estadísticas viejas; un procedimiento ligado a esta técnica es la determinación de las muestras o patrones que se emplean para realizar la clasificación.

En este caso la muestra de aprendizaje se emplea en algún paso del proceso para establecer la regla de decisión que posteriormente se empleará sobre una muestra a clasificar, esto garantiza un significado geológico gracias a la muestra de aprendizaje.

- Técnicas de clasificación no supervisadas, se emplean cuando no existen información a priori del objeto geológico o esta información es muy reducida. En esta técnica la muestra a clasificar se subdivide en grupos sólo a partir del grado de parecido mutuo de los elementos que la integran; las muestras a clasificar es la propia muestra de aprendizaje y el resultado no posee un significado geológico directo por lo que requiere de una corroboración de los mismos.

Entre las técnicas de clasificación supervisada está el uso de teorema de Bayes con las distribuciones de probabilidad empírica, funciones discriminantes cuadráticas, método del vecino más cercano, etc.

Las técnicas de clasificación no supervisadas, también conocidas como técnicas de análisis de agrupaciones (Cluster Analysis) se encuentran las jerárquicas y no jerárquicas. Las primeras no asumen la existencia de grupos discretos con estructuras independientes, sino que parten de la existencia de niveles de jerarquía de similitud, su funcionamiento es sencillo y parten de que en cada nivel de jerarquía se presentan grupos que pueden considerarse pertenecientes a otros conjuntos menores de grupos con nivel de jerarquía superior, este esquema se repite hasta que la muestra se incluye en un grupo único.

Las técnicas no jerárquicas parten de la existencia de grupos discretos independientes que no se solapan; estos grupos pueden concebirse como aquellas regiones del espacio R^n , definido por los n atributos utilizados para describir los elementos de la muestra en que existe una mayor concentración o densidad de puntos.

En las técnicas jerárquicas se utiliza el vecino más lejano y el promedio de grupo en caso de estrategias combinatorias, la representación de las relaciones jerárquicas se realizan a través de los demogramas. Entre las técnicas no jerárquicas se encuentra el análisis euclidiano de ecuaciones.

Existen otras técnicas de clasificación entre las que se encuentra el análisis del discriminante; además de estas técnicas en la práctica se utilizan scatterplot, histogramas y otros tipos de gráficos y técnicas de la estadística clásica para determinar las poblaciones existentes e incluso como técnicas de clasificación improvisadas.

Existen un gran número de técnicas estadísticas y determinísticas utilizadas en las geociencias, pero por lo extenso que es este tema nosotros solo relacionamos las principales. Para mayor información remítase a la literatura especializada sobre el tema y a los software STATGRAPHICS® y STATISTICA® que contiene bastante información y la automatización de algunas de las técnicas mencionadas.

Por último es conveniente hacer referencia a las técnicas de las ventanas móviles, que consiste en desplazar una ventana sobre toda el área estudiada y realizar operaciones matemáticas entre los valores de las mediciones realizadas dentro de los límites de la ventana para cada posición; los resultados de estas operaciones se asignan al centro de la ventana.

Esta técnica permite utilizar herramientas de la estadística clásica para realizar análisis estructural de la data; de esta manera es más fácil determinar la presencia de efecto proporcional, es posible discernir la presencia de diferentes poblaciones estadísticas en dependencia del comportamiento de los datos, la relación existente entre los distintos estadígrafos, suavizar una determinada data etc.

Con esta técnica se utilizan las funciones geoestadísticas antes mencionadas, siendo posible realizar el análisis estructural de la data en el espacio limitado por la ventana, esto permite: realizar un análisis en el espacio del cambio de la estructura de las VR, definir cambios locales de la anisotropía, de la correlación, etc. Aproximadamente esta es la forma en que se construyen las superficies variográficas, las de correlograma y de covarianza, etc.

Para el análisis de la data y su efectividad para realizar todos los procedimientos planteados también son necesarias algunas de las técnicas de reagrupación de los datos (*Declustering Methods*), solo cuando la distribución de los datos sea irregular, esto permite ponderar o reagrupar la data de forma tal que sea posible asumir que todos los puntos de medición encierran la misma cantidad de información, o caracterizan una misma área o volumen en el espacio. Pueden ser empleados los dos *Declustering Methods* más populares: el método de los polígonos de influencia y el de las celdas; el primero proporciona una ponderación de la información en función del área de influencia que representa cada polígono, y en el segundo se divide toda el área en celdas regulares a las que se la asigna, en el punto central de cada una, el valor calculado, empleando el inverso de la distancia u otro método como ponderador de los puntos que se encuentran en el interior de la celda.

Capítulo 3 La modelación en yacimientos residuales de Níquel.

Los yacimientos residuales de níquel, tienen una gran cantidad de rasgos específicos, los nuestros también tienen grandes diferencias y semejanzas con otros yacimientos lateríticos del mundo. Esto marca una gran especificidad en los pasos y características de la modelación desarrollada.

Estas especificidades se recogen de forma detallada a lo largo de este capítulo.

3.1 Generalidades de los yacimientos residuales de níquel y cobalto.

Los yacimientos residuales de níquel y cobalto se desarrollan exclusivamente sobre rocas ultrabásicas en condiciones de clima tropical húmedo, éstos también son conocidos como yacimientos lateríticos de níquel. Generalmente tienen una zonación vertical y en muchos casos horizontal, en la mayoría de los casos forman grandes mantos de meteorización aunque en ocasiones tienen carácter lineal, es decir, se encuentran formando cuerpos pseudo-filonianos asociados a los sistemas de grietas de las rocas primarias.

La formación de este tipo de yacimiento está condicionada por el reagrupamiento de la masa mineral de las rocas ultrabásicas químicamente inestables en condiciones termodinámicas de la superficie terrestre. El límite inferior de la corteza de meteorización lo forma (según V. Vernadski) la superficie hasta la cual es capaz de penetrar el oxígeno en las profundidades de la corteza, estando esta superficie cerca del nivel de las aguas subterráneas, comúnmente se encuentra situada a una profundidad de 60 a 100 m, llegando en algunos casos hasta los 1500 m y más a través de las fisuras con una circulación profunda de las aguas.

Los yacimientos de meteorización pueden ser:

- I. No alterados: cuando el yacimiento ha tenido un desarrollo normal.
- II. Redepositados: cuando ha ocurrido un desplazamiento de los productos de la meteorización bajo la influencia de la fuerza de la gravedad o la energía del agua.
- III. Transformados: cuando ocurre un aporte adicional por infiltración de compuestos que no integran los productos de la descomposición primaria, por ejemplo ferruginización, manganización, silicificación, carbonatización, yesificación, etc.

La potencia de estas cortezas lateríticas varía entre 10 y 100 metros, pero es más común encontrar potencias entre 20 y 40 metros (P. A. Burger, 1966). Las características del perfil laterítico varían en relación con los siguientes factores:

- Composición de la roca madre.
- Intensidad de fracturación de la roca madre.
- Relieve topográfico y su posición en el paisaje circundante.

- Geomorfología local y la historia de la meteorización.
- Factores físico – geográficos y climáticos.
- Hidrogeología y paleo-hidrogeología del yacimiento.
- Otros.

La zonalidad vertical es propia de la mayoría de las cortezas de meteorización de cualquier yacimiento, también es frecuente la existencia de zonalidad lateral. Generalmente hacia la mitad del perfil se encuentra la parte comercial por los contenidos de níquel que alcanzan, sin embargo este patrón puede cambiar por erosión parcial y re-meteorización subsecuente. Este hecho está dado por la movilidad diferenciada que presentan los elementos químicos correspondientes a la zona de meteorización determinada por las variaciones en la acidez – alcalinidad del medio; su migración puede ocurrir en forma de suspensiones, soluciones coloidales y soluciones verdaderas. En forma de soluciones coloidales pueden migrar de la corteza de meteorización la sílice, la alúmina, los compuestos de hierro, manganeso y de otros metales.

En el mundo la mayor parte de los depósitos se encuentran en zonas tropicales y subtropicales en rangos que se extienden desde 53° Norte a los 41° Sur, cubriendo alrededor de $\frac{1}{3}$ de las tierras emergidas; se destacan dos tipos contrastantes de yacimientos, los formados en zonas permanentemente húmedas y los formados en zonas donde se alternan estaciones húmedas y secas.

Los depósitos lateríticos de níquel se forman por oxidación progresiva de los minerales de la roca madre, siendo lixiviados los componentes solubles por las aguas subterráneas y acumulación de los componentes relativamente insolubles junto con algunos de los minerales refractarios. La secuencia de minerales metaestables es remplazada por minerales estables en condiciones superficiales. El grado en que los minerales transicionales se desarrollan depende de la roca madre y de las condiciones de meteorización.

En las rocas ultrabásicas la mayor parte del níquel se encuentra en la estructura cristalina del olivino, mientras que el cobalto se encuentra preferentemente en la estructura cristalina de los piroxenos; esta es la consecuencia de que la relación níquel – cobalto sea mayor en dunitas que en piroxenitas, e aquí una razón más para el estudio de la composición de la roca madre, sobretodo si el proyecto minero a ejecutarse encuentra en la etapa de exploración preliminar.

En zonas someras de la corteza terrestre, a temperaturas menores de 450°C y abundante agua, el olivino y el piroxeno se alteran a las diferentes variedades de serpentinas, parte de la sílice y el magnesio se pierde y ocurre un incremento de un 20 a 70 % del volumen de vacío y como resultado de esto un incremento de la porosidad; éstas condiciones ocurren fundamentalmente en *zonas de rift centro- oceánico y en zonas de fallas transformantes*; además, otros autores (entre ellos Wicks), plantean que la serpentización puede tener lugar como consecuencia de procesos tectónicos que conducen *al emplazamiento cortical de complejos ofiolíticos y de lherzolitas orogénicas*, así como de los procesos de *deformación dúctil en zonas de cizalla y fracturación frágil posterior al emplazamiento*.

La mayor parte de las rocas ultramáficas están serpentinizadas y el grado de alteración varía en rangos menores que ocupan solo las grietas, hasta un completo metasomatismo.

El pH de la mayoría de estas rocas es alcalino y los contenidos típicos son los siguientes: $\text{SiO}_2 = 35 - 45 \%$, $\text{MgO} = 25 - 45 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2 - 7 \%$, $\text{FeO} = 0,4 - 6 \%$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0,3 - 1 \%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 2\%$, $\text{NiO} = 0,2 - 0,4 \%$, $\text{CoO} = 0,01\%$ y $\text{H}_2\text{O} = 11 - 13 \%$.

3.2 Características de un perfil laterítico.

Las características particulares de cada uno de los yacimientos lateríticos del mundo, están condicionadas por una serie de factores geológicos, físico – geográficos y climáticos que interactuando entre sí dan como resultado variaciones en la corteza de meteorización resultante.

En la literatura especializada se utilizan diversas nomenclaturas para referirse a los diferentes horizontes constituyentes de las cortezas de meteorización lateríticas, algunas basadas en términos tecnológicos o económicos y otras teniendo en cuenta las características generales del material laterítico. En este capítulo se hará énfasis en las nomenclaturas que tienen en cuenta las particularidades físicas, químicas y mineralógicas las cuales son de suma importancia a la hora de realizar la modelación del yacimiento, el empleo de nomenclatura de tipo tecnológico y económico depende de las especificidades del esquema tecnológico y los valores parámetros técnicos fijados por esta.

En este sentido, la nomenclatura más generalizada internacionalmente es la que supone los horizontes de: **saprolita**, **arcilla**, **ferralita** y **coraza**. Cabe señalar que para la mayor parte de los casos los contactos entre horizontes son transicionales y el grado en que se desarrollan depende de las condiciones locales; la determinación de estas condiciones es indispensable para la confección del modelo geólogo–genético del yacimiento y para determinar las características que tendrá el modelo geométrico y el matemático.

3.2.1 Horizonte saprolítico.

“**Saprolita**” es una palabra proveniente del griego “sapro”, roca alterada (rotten rock) y es denominado así al horizonte formado bajo condiciones de meteorización, en el cual se puede apreciar tanto macro como microscópicamente la conservación de la textura y estructura preexistente de la roca madre y sin cambio significativo de su volumen.

Las características de la saprolita varían con el grado de serpentización de las rocas ultrabásicas; cuando la serpentización es limitada la saprolitización ocurre en las grietas y se mantiene un núcleo de rocas relicticas en una matriz terrosa, sin embargo con el aumento de la serpentización aumenta la permeabilidad y el incremento de la meteorización por lo que la saprolita adquiere un aspecto terroso uniforme. Las fracturas de premineralización mantienen un control sustancial de la meteorización. El níquel sustituye al magnesio cuando este se lixivia de la estructura cristalina de la serpentina, excediendo un 25 % de

contenido original; Su color típico es verde manzana y es conocida mundialmente como garnierita (en honor a Jules Garnier).

De forma general en los horizontes saprolíticos, el progreso de la meteorización se expresa petrográficamente por:

1. Cambio de coloración que va desde amarilla a roja.
2. La disolución parcial o completa de los principales componentes mineralógicos de la roca madre.
3. Decrecimiento de la dureza y la compactación de la roca madre asociado con el fuerte incremento de la porosidad.
4. Predominio de caolinita bien cristalizada y con presencia de hierro, asociado esencialmente a goethita amorfa o no bien cristalizada pseudomórfica con los minerales primarios a partir de los cuales esta se formó.
5. Presencia de minerales primarios relictos.

En la parte alta del horizonte saprolítico, la fracción arcillosa generada por la meteorización rápidamente se vuelve abundante. El incremento de la fracción arcillosa se debe fundamentalmente a la acumulación de caolinita desde la parte alta del perfil, por la presencia de diminutas partículas de posible origen detrítico o por la infiltración de soluciones y su posterior precipitación en las oquedades formadas durante la disolución de los minerales primarios en el horizonte saprolítico.

Cuando la acumulación de las láminas de caolinita se asocian con la goethita da una coloración naranja a la matriz arcillosa. Las tensiones internas debido a la expansión de los minerales arcillosos (al adquirir gran cantidad de agua), reactivan la meteorización de la matriz; al mismo tiempo los minerales de la matriz de meteorización son modificados, por ejemplo: las cadenas de caolinita se transforman en pequeños cristales laminados; los óxidos e hidróxidos de Fe amorfos y no bien cristalizados se transforman en goethita bien cristalizada con presencia de Al; los relictos de minerales primarios disminuyen más su tamaño producto a la disolución que tiene lugar en la reactivación de la meteorización.

Dos sistemas geoquímicos de meteorización funcionan juntos para dar lugar a la formación de dos tipos de horizontes saprolíticos diferentes:

- I. Horizonte de saprolita porosa: el contenido de arcilla es mínimo y se forma junto con los óxidos e hidróxidos de hierro a partir de la meteorización primaria de la roca madre.
- II. Horizonte de saprolita masiva: hay un aumento considerable de la fracción arcillosa. Los minerales arcillosos presentes en este horizonte se forman a partir de la meteorización de los relictos de la roca madre y de la alteración de los cristales de caolinita existente, conjuntamente con los óxidos e hidróxidos de hierro de la primera generación.

Dependiendo de la zona climática donde se desarrollan los perfiles lateríticos, pueden haber diferencias en la parte superior del horizonte saprolítico, de este modo se pueden distinguir dos variantes fundamentales:

- a) Horizontes saprolíticos formados en un ambiente permanente húmedo y de buena infiltración (caso ejemplo yac. Moa).
- b) Horizontes saprolíticos formados en un ambiente de alternancia de clima húmedo y seco y / o mal intercambio hídrico (caso ejemplo yac. San Felipe).

En las saprolitas donde el drenaje es bueno la serpentina es remplazada por arcilla esmectítica y nontronita ($\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$). La estructura cristalina de la nontronita tiene una capacidad sustancial para intercambio de cationes por lo que puede contener hasta un 2 % de níquel. En la estructura cristalina de la goethita el níquel sustituye al Fe.

Los horizontes saprolíticos pueden exceder hasta un 3 % de níquel con potencia de varios metros de saprolitas ricas en garnieritas, sin embargo en la nontronita raramente los contenidos exceden el 1,5 %. El cobalto es usualmente insignificante en el horizonte de saprolita.

La mayor parte de la saprolita contienen pequeñas cantidades de sílice en forma de calcedonia formando vetas o masas acrecionadas, sin embargo la calcedonia se encuentra en forma de depósitos extensos, en algunos yacimientos saprolíticos, ésta es formada a través de procesos de remplazamiento y es resultado de:

- Sobresaturación de las soluciones en sílice a consecuencia de la evaporación.
- Erosión parcial de los horizontes superiores y aceleración del grado de liberación de la sílice de la estructura cristalina de los minerales silicatados metaestables.

La magnesita es rara en las saprolitas de las regiones húmedas, sin embargo es común encontrarla formando vetas y acreciones en algunos depósitos lo cual se considera como evidencia de la formación de la laterita bajo condiciones comparativamente áridas, aunque no necesariamente esta es la causa de su presencia en todos los yacimientos.

3.2.2 Horizonte arcilloso.

En áreas donde el drenaje es bueno el desarrollo de la nontronita debe ser por lo tanto insignificante y restringido a una zona de menos de un metro de potencia próxima a la parte alta del horizonte saprolítico, en caso de perfiles donde el drenaje es malo y en condiciones semiáridas, el horizonte nontronítico alcanza más de 20 metros de potencia. La estructura y textura de la roca madre es destruida por el hábito hidrocópico de la nontronita. Los colores son típicamente verdes claro a verde oscuro con partes negras y regulares formadas por acreciones de óxidos de manganeso. La goethita está presente en forma de masas terrosas o como relleno en las grietas, la coloración es fundamentalmente marrón.

Parte del níquel sustituye al Fe en la estructura cristalina de la goethita pero el mayor volumen de Ni está asociado con la nontronita. Los óxidos de manganeso absorben los iones metálicos, en los análisis a los óxidos de Mn es común encontrar un 5 % de Ni y Co.

La calcedonia en forma de nódulos y acreciones es común y muestra la textura del horizonte de arcilla, por lo que su formación ocurre durante el proceso de lateritización.

Los contenidos de Ni comúnmente son de 1 a 1,5 % y los de Co de 0,1 a 0,2 %.

3.2.3 Horizonte ferralítico.

Los horizontes de ferralitas bien desarrollados son comunes en las regiones húmedas donde el drenaje es bueno. La goethita es el mineral dominante y contiene trazas de cromitas y óxidos de Mn. El color es marrón con pequeñas cantidades de manchas blancas; la goethita forma cristales aciculares del orden de un micrón y existe gran proporción entre estos cristales y el espacio de los poros, esto es reflejado por la humedad de alrededor de un 40 %, su densidad bajo estas condiciones es de 4,3 g/cm³ y seca menor que 1 g/cm³. La ferralita es típicamente terrosa y la estructura y textura de la roca de caja no aparece.

Los contenidos de Ni son menores que los de la saprolitas, pero puede sustituir al Fe en la estructura cristalina desordenada de la goethita nuevamente formada. Con la continuación de la oxidación la estructura cristalina se vuelve más ordenada y los contenidos de Ni decrecen; el contenido de Co es mayor que en las saprolitas y existe una estrecha relación del Co con los óxidos de Mn. Los contenidos típicos de Ni están entre 1,2 y 1,6 % y los de Co entre 0,09 y 0,13 %.

Hacia el tope de este horizonte la goethita es reemplazada por la hematita y los óxidos de Mn son lixiviados. La estructura cristalina de la hematita es menos apta para incorporar Ni que la goethita por lo que los contenidos son típicamente sub-comerciales.

3.2.4 Horizonte de corazas.

Los perfiles lateríticos maduros, típicamente presentan una cubierta de coraza u horizonte denso de ferricreta. La hematita en forma de concreciones y acreciones es dominante con cromita accesoria. Algunos yacimientos fundamentalmente de regiones semiáridas se caracterizan por la presencia de caolín subordinado y un moteado de color marrón / blanco de la arcilla libre.

El Ni y el Co se encuentran muy por debajo de los contenidos comerciales y la densidad seca comúnmente excede 2,5. Las estructuras colapsadas son comunes y una disminución sustancial del volumen y una disminución de la superficie se evidencia con el desarrollo de la meteorización. La topografía en forma de “soup plate” con rocas resistentes a la oxidación ubicada por encima de las lateritas es típica en las lateritas de muchas regiones

3.3 Características de los perfiles lateríticos cubanos.

Los exponentes principales de perfiles lateríticos en Cuba son:

- I. Yacimiento Moa (Moa, Holguín).
- II. Yacimiento Nicaro (Nicaro, Holguín).
- III. Yacimiento Pinares de Mayarí (Mayarí, Holguín).
- IV. Yacimiento San Felipe (Meseta de San Felipe, Camagüey).

El yacimiento Moa está formado por la unión de varios yacimientos pero en conjunto se pueden clasificar como cortezas de meteorización lateríticas formadas en zonas permanentemente húmedas con buen intercambio hídrico, donde predomina el horizonte ferralítico sobre el arcilloso y existe un desarrollo incipiente de la garnierita en el horizonte saprolítico. Las diferencias entre los yacimientos que conforman el yacimiento Moa son considerables, estas diferencias son provocadas fundamentalmente por variaciones en la morfología, tectónica, régimen hidrodinámico y las características de la roca madre, aunque se puede asumir como tipo litológico generalizado a las rocas ultrabásicas serpentinizadas en mayor o menor cuantía.

El yacimiento Nicaro se caracteriza por ser complicado con importantes cambios internos, aunque éste también se puede considerar del tipo de zonas permanentemente húmedas con buen intercambio hídrico, se destaca el predominio del horizonte ferralítico sobre el arcilloso y desarrollo incipiente de garnierita. El perfil laterítico de este yacimiento es uno de los más variables en cuanto a los parámetros técnicos y geológicos que los caracterizan; hay sectores donde la corteza de meteorización se desarrolló exclusivamente sobre rocas ultrabásicas serpentinizadas, en otros (Ej. cuerpos I, IV y V de la mina Martí) la corteza se desarrolló sobre un conglomerado de cantos rodados de composición gabro–diabásica encajados en una pasta serpentinitica; Al ser los cantos rodados de composición química y mineralógica diferente a la de la matriz y a su vez ser más resistentes a la meteorización química trajo como resultado la formación de una corteza terrosa con numerosos bloques dentro de esta.

El yacimiento Pinares de Mayarí se diferencia del yacimiento Moa por la presencia de un perfil menos potente, con un intercambio hídrico extremadamente bueno lo que provoca un carácter dominante del horizonte ferralítico y un desarrollo incipiente de la parte superior del horizonte garnierítico, al igual que el yacimiento Pinares es muy variable a consecuencia de cambios importantes en las características de la roca madre, la dinámica tectónica y otras que en su conjunto le han dado características muy específicas y atípicas.

Por su parte el yacimiento San Felipe se diferencia de forma considerable del resto de los yacimientos cubanos, la existencia de mal intercambio hídrico ha modelado el yacimiento con características intermedias a las de los yacimientos formados en zonas permanentemente húmedas y con alternancia de temporadas húmedas y secas. La zonación horizontal destaca dos características extremas del perfil de meteorización:

- I. Horizonte con gran desarrollo de la parte oxidada sobre la arcillosa y horizonte saprolítico sin o poca presencia de garnierita.
- II. Horizonte con gran desarrollo de minerales silicatados resultantes de la meteorización química, esta zona coincide con la parte del yacimiento donde el intercambio hídrico es más pobre y el nivel freático está más próximo a la superficie.

Este yacimiento aparentemente joven tiene un desarrollo complicado de la tectónica que rige de forma importante la mineralización y ha provocado características muy específicas para este yacimiento; resulta interesante la distribución de los redepósitos, formación local de un potente horizonte de coraza, gran cantidad de sílice y valores elevados de alúmina para todo el yacimiento.

3.3.1 Nomenclaturas utilizadas en los yacimientos lateríticos cubanos.

En los yacimientos lateríticos cubanos los perfiles de meteorización han sido descritos según seis zonas u horizontes, cada una de los cuales refleja una etapa del desarrollo geológico de la corteza de intemperismo (ver Fig. 3.3):

- I. Concreciones ferruginosas (zonas de concreciones u ocre inestructurales con concreciones ferruginosas)
- II. Ocre superiores (ocres inestructurales sin perdigones)
- III. Ocre medios (ocres estructurales sin perdigones)
- IV. Ocre inferiores (ocres estructurales inicial)
- V. Serpentina alterada (zona de lixiviación)
- VI. Serpentina dura.

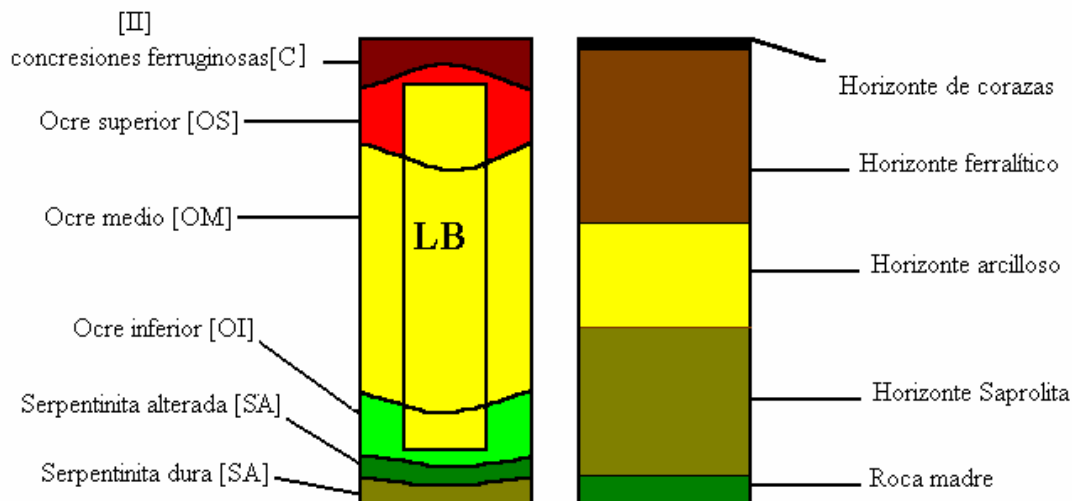


Figura 3.1: Esquema de distribución de los diferentes horizontes presentes en las cortezas de meteorización lateríticas. Comparación de la nomenclatura utilizada en Cuba con la utilizada en la literatura extranjera.

3.3.1.1 Zona u horizonte de concreciones ferruginosas.

Este es el equivalente al horizonte de corazas y la parte superior del horizonte ferralítico; presenta una coloración parda oscura con abundantes concreciones de óxidos e hidróxidos de hierro, frecuentemente están cementadas entre sí por material ferruginoso. La potencia de esta zona es muy variable, alcanzando desde algunos centímetros hasta varios metros. Es una zona sujeta al movimiento ascendente de las aguas mineralizadas que originan óxidos muy estables de hierro y aluminio, formando las concreciones en bloques cementados; hacia la parte inferior las concreciones van siendo más pequeñas, predominando el material terroso de composición similar, el contacto con las zonas subyacentes es gradual aumentando progresivamente hacia abajo el material ocreo (ocres).

3.3.1.2 Zona u horizonte de ocres superiores.

Se corresponde con la parte superior y media del horizonte de ferralita y es el horizonte contiguo subyacente a las concreciones ferruginosas formado por materiales terrosos con alta humedad, con color pardo – amarillo. Su potencia es variable (desde algunos metros hasta algunas decenas de metros).

Esta zona constituye el límite superior de la zona industrial (laterita de balance), colindante con la zona de escombro. Su material ocreo se caracteriza por presentar una granulometría medianamente gruesa (0.83 a 0.417 mm) significativa, con buen contenido de componente hematítico y espinelas, además de poseer una mayor densidad que el material ocreo subyacente.

3.3.1.3 Zona u horizonte de ocres medios.

La parte superior de este horizonte se corresponde con la parte inferior del horizonte de ferralita, su parte media con el horizonte de arcillas y la parte inferior con la parte superior del horizonte saprolítico. La zona de ocres estructurales sin perdigones pertenece esencialmente al material laterítico de balance (LB), constituyendo el material ocreo el principal componente, con una coloración típica amarilla pardusca de fina granulometría (menor de 45 μ). La fase mineral principal en este horizonte es la goethita.

3.3.1.4 Zona u horizonte de ocres inferiores.

Se corresponde con el horizonte de saprolita y es la zona que colinda inmediatamente con las serpentinitas alteradas o lixiviadas. El carácter ocreo de este material depende en gran medida del grado de alteración que hallan sufrido las rocas serpentiniticas. Presenta potencia variable, aunque en general de poco espesor (no mayor de 3 a 5 m).

3.3.1.5 Zona u horizonte de serpentinitas alteradas y/o lixiviadas.

Algunos investigadores la designan como zona de saprolitas. Está constituida fundamentalmente por serpentinitas alteradas y descompuestas, su coloración y consistencia varía en relación con el grado de alteración; en ocasiones presentan grietas y bolsones de material laterítico. Su potencia es muy irregular, variando desde algunos centímetros hasta algunos metros, transicionando en profundidad con las serpentinitas duras y compactas de las que se derivaron, presenta numerosas grietas rellenas de silicatos de magnesio de color blanco verdoso: esmicritas probablemente.

3.3.1.6 Zona u horizonte de serpentinitas duras.

Es el horizonte inferior y se puede considerar como la roca de caja, está constituido por rocas máficas y ultramáficas (principalmente serpentinitas, peridotitas, piroxenitas serpentinizadas) con un grado de alteración mínimo. Es un material rocoso de coloración verdosa – grisáceo, compacta, agrietada, con un predominante contenido de minerales del grupo de las serpentininas, ocasionalmente piroxenos y olivino.

El desarrollo de cada una de estas zonas u horizontes depende del grado de elaboración que halla tenido la corteza de un yacimiento determinado, como resultado de esto es conveniente utilizar el término grado de madurez de la corteza de intemperismo.

3.3.2 Grado de madurez de la corteza de meteorización.

El grado de madurez de la corteza de meteorización puede concebirse como un término mineralógico – geoquímico que permite expresar el nivel evolutivo en que se encuentra un perfil laterítico determinado. Está íntimamente asociado a los procesos de intemperismo que dan lugar a la formación y desarrollo de la corteza de meteorización.

El conocimiento del grado de madurez es muy importante, pues determina las características físicas, químicas y mineralógicas del perfil. El estudio de perfiles lateríticos con diferente grado de madurez permite relacionar materiales ocrosos de distintas zonas del yacimiento con diferencias químicas y mineralógicas bien definidas, pudiéndose valorar perfiles de alteración:

- 1- Con buena elaboración intempérica o perfiles maduros.
- 2- Perfiles poco maduros o inmaduros.

Los perfiles con buena elaboración intempérica: poseen un elevado grado de elaboración, los procesos de intemperismo se han desarrollado plenamente, produciéndose a consecuencia una potente capa laterítica; han existido condiciones propicias para que la sílice y el magnesio migren hacia los horizontes inferiores y los elementos menos móviles (Fe, Cr, Al y Mn) se concentren residualmente. En estas condiciones es característico el bajo contenido de magnesio y silicio y alto contenido de hierro, donde ha existido incluso la

posibilidad de que el hierro se presente en dos clases granulométricas: una fina electromagnética rica en goethita y otra medianamente gruesa magnética, rica en magnetita, acorde con las formas mineralógicas que existen en estas cortezas.

Es característico también en estos perfiles el buen desarrollo de las zonas de concreciones ferruginosas, pudiendo alcanzar hasta 3 m de potencia. La granulometría del material laterítico tiende a aumentar hacia esta parte del perfil, donde la fracción gruesa (> de 0.83 mm) puede alcanzar alrededor de un 20% en peso.

El material laterítico obtenido de los horizontes superiores de un perfil de alteración maduro se diferencia nítidamente de un perfil maduro, tanto en las características físicas, químicas como en las mineralógicas.

Los perfiles poco maduros o inmaduros: se caracterizan por poseer un material laterítico con contenidos de magnesio y sílice más altos y contenidos de hierro relativamente bajos. El grado de elaboración incompleto de las lateritas se manifiesta por un desarrollo pobre de los horizontes de ocre y concreciones ferruginosas, siendo frecuente la existencia de fragmentos de material serpentinitico dentro del material ocreo. La granulometría del material laterítico de estos perfiles es predominantemente fina.

Para valorar el grado de madurez de un perfil de alteración intempérica es posible utilizar algunos parámetros que pueden indicarnos orientativamente el nivel evolutivo en que se encuentra la corteza de intemperismo de un sector determinado de un yacimiento. Entre estos parámetros podemos incluir los siguientes:

- a) Potencia del material laterítico.
- b) Densidad del material laterítico.
- c) Contenido de Fe_2O_3 , SiO_2 y MgO en la laterita de balance.
- d) Presencia y contenido de minerales de Fe (goethita y espinelas) y silicatos (serpentina y cloritas) en el material ocreo.

En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las características de los perfiles según su madurez.

Como puede verse los criterios de madurez avanzada se ajustan bien a las cortezas de meteorización que tienen las características comunes de un perfil desarrollado en condiciones de clima permanentemente húmedo, bajo condiciones ideales de alteración intempérica; cualquier variación de las condiciones de meteorización provoca una atipicidad del perfil que es necesario valorar cuidadosamente a la hora de caracterizar la corteza de meteorización, el desarrollo en climas de alternancia de estaciones húmedas y secas, una precaria infiltración de las aguas subterráneas, ocurrencia de redeposición y eventos tectónicos complicados son algunos de los factores que pueden complicar la interpretación según los parámetros que se emplean para clasificar el perfil según su madurez. Por esto la clasificación se realizará cuando el desarrollo del conocimiento geológico esté suficientemente avanzado y se tendrán en cuenta todos los criterios a la vez. De esta manera la aplicación de estos criterios en yacimientos como Pinares de Mayarí y San Felipe tendrá serias limitaciones por el comportamiento atípico de los mismos,

entonces es necesario entrar a valorar la influencia de los fenómenos geológicos que controlan la mineralización y le dan el carácter atípico antes de valorar el comportamiento de los parámetros antes mencionados. La evaluación de la madurez en estos yacimientos se realizará con criterios transformados, para la correcta clasificación.

Tabla 3.1: Resumen de las características de un perfil laterítico maduro e inmaduro (según Rojas Purón, 1994)

Perfil maduro	Perfil inmaduro
Buena potencia de ocre (>10 m como promedio).	Poca potencia de ocre (< 10 m como promedio).
Densidad del material laterítico > 3.4 g/cm ³ .	Densidad del material laterítico < 3.4 g/cm ³ .
Fase de goethita en buena cantidad ($>65\%$), con buena cristalinidad.	Fase de goethita en buena cantidad (58 a 62 %), con baja cristalinidad.
Buena cantidad de minerales de óxidos de Fe (espinelas, hematites), Mn (Asbolanas) y de Al (gibbsita).	Los minerales de Fe, Al y Mn no son significativos.
Horizonte de concreciones ferruginosas bien definidos (3 – 5 m de potencia)	Horizonte de concreciones ferruginosas mal definidos (1 – 2 m de potencia).
Poca cantidad de filosilicatos (serpentina, nepouita, clorita) en el material laterítico.	Es significativa la presencia de los filosilicatos.
Presencia normal de cuarzo, serpentina y poca clorita.	Presencia normal de cuarzo, son significativas las fases de serpentina y clorita.

El comportamiento espacial de los criterios de madurez es una herramienta poderosa para la confección del modelo geólogo-genético, se debe tener muy en cuenta durante la confección del modelo geométrico y controla de forma indirecta los resultados obtenidos en la ejecución del modelo matemático.

3.3.3 Características físicas del material laterítico.

Las propiedades físicas del material laterítico constituyen uno de los aspectos más significativos que caracterizan esta materia prima, su estudio y determinación es de suma importancia ya que:

- I. Caracterizan el material laterítico.
- II. Influye en el comportamiento del material laterítico durante el proceso de sedimentación en la metalurgia y la extracción del níquel.
- III. Permite definir determinados parámetros (color, densidad y granulometría) que propicia la ejecución de una minería más racional y óptima.

Dentro de las características físicas del material laterítico las que más repercuten en el proceso minero metalúrgico son:

3.3.3.1 Granulometría.

Al valorar las características granulométricas de perfiles de alteración con distinto grado de madurez se observan determinadas diferencias, las cuales pueden estar en correspondencia con el *grado de alteración intempérica* que poseen dichas cortezas.

Los perfiles maduros se caracterizan por poseer un material laterítico con una fracción granulométrica fina en alta proporción, sobre todo en los horizontes de ocre medios y superior donde llega a alcanzar hasta un 63 % en peso, no ocurriendo así en los perfiles poco maduros, donde la fracción más fina (<0.045 mm) está alrededor de un 45 % en peso. Además es característico en estos perfiles el buen desarrollo del horizonte de concreciones ferruginosas, donde la fracción gruesa está bien representada; sin embargo, en los perfiles inmaduros, el material laterítico, incluso las concreciones ferruginosas, posee poca cantidad de granos gruesos.

En la medida que el perfil de alteración es más maduro, los horizontes de ocre y concreciones ferruginosas están mejor desarrollados. En el material laterítico de estos horizontes es predominante la fracción fina, menor de 45 micrones, alcanzando de un 52 a un 63 % en peso. En la zona de concreciones ferruginosa, de los perfiles maduros, el porcentaje en peso de la fracción gruesa alcanza valores alrededor del 20 %.

3.3.3.2 Densidad.

La densidad es otro factor muy importante que se debe tener en cuenta para llevar a cabo el proceso metalúrgico del material laterítico que es procesado en las plantas niquelíferas, dado que influye en su comportamiento durante el proceso de sedimentación.

La densidad de los materiales que componen los distintos horizontes muestran una tendencia bien definida a aumentar hacia la parte superior del perfil, existiendo una diferencia bien marcada entre la densidad que presentan los materiales componentes de las zonas serpentiniticas con respecto a las lateritas. En los horizontes serpentiniticos, donde predominan los silicatos de Mg (densidad entre 2.5 a 3.3 g/cm³), es lógico que la densidad de estos materiales no supere los 3.4 g/cm³, en tanto en las lateritas, donde son abundantes los minerales de Fe con densidades entre 4.0 a 5.2 g/cm³, la densidad del material debe ser más elevada (alrededor de 3.7 g/cm³). En la medida que el material laterítico posea una mayor cantidad de componente serpentinitico (típico de la LB de los perfiles de alteración poco maduros), su densidad será menor, pues el incremento en su composición de los minerales silicatados y la sílice provoca la disminución de su densidad. De esto se desprende, que la densidad del material laterítico de balance es una magnitud variable y dependerá del grado de elaboración intempérica que posea el perfil de alteración laterítica al cual pertenece.

3.3.3.3 Coloración.

Se utiliza fundamentalmente para el control del tipo natural de mena durante el proceso de extracción, generalmente se realiza una generalización arbitraria de la relación entre el tipo natural e industrial de mena auxiliándose de la información de los pozos más cercanos.

El empleo de este índice ha permitido durante la explotación salvar deficiencias importantes en el conocimiento geológico y modelación del yacimiento, pero cuando los tipos industriales adquieren comportamientos atípicos se cometen errores de importancia económica considerable.

3.3.4 Características químicas de los horizontes de la corteza de intemperismo.

En los horizontes inferiores de rocas poco alteradas a alteradas existe una buena cantidad de sílice y magnesio, representados por los minerales serpentiniticos, olivinos y cloritas, los cuales tienden a disminuir hacia los horizontes superiores, donde en condiciones oxidantes y de un pH más ácido se concentran los minerales de Fe, Al y Cr.

Los horizontes lateríticos son fundamentalmente ferrosos, con casi un 70 % de Fe_2O_3 , de 5 a 8 % de Al_2O_3 , alrededor de un 4 % de Cr_2O_3 y con un contenido de NiO de 0.95 a 1.51%, donde la tendencia del aluminio, al igual que la del cromo, es de concentrarse en las zonas superiores, en la zona de concreciones ferruginosas para el primero y los ocreos superiores para el segundo.

Por otra parte, las características químicas de un perfil laterítico que se encuentre en un nivel evolutivo maduro, se distingue bien de un perfil poco maduro.

El material laterítico de un perfil evolutivo maduro se caracteriza por presentar más altos los contenidos de cromo y alúmina que son concentrados residualmente durante el intemperismo y un menor contenido de los elementos más móviles (Mg y el Si).

Las lateritas de un perfil inmaduro poseen contenidos de magnesio y sílice más elevado y consecuentemente menos contenido de hierro, además de poseer contenidos de aluminio y cromo inferiores a este último.

3.3.5 Características mineralógicas de la corteza de intemperismo de níquel.

Los horizontes lateríticos están compuestos básicamente por óxidos e hidróxidos de Fe (goethita, espinela, maghemita y hematites), los cuales representan de un 75 a un 85 % en estos horizontes. Esto es válido para el caso del yacimiento Moa, Nicaro, Pinares de Mayarí, pero se desconoce para el yacimiento San Felipe. Es posible que excepto el yacimiento San Felipe tengan aproximadamente la siguiente composición mineralógica.

Tabla 3.2: Composición mineralógica de las cortezas lateríticas de los yacimientos cubanos (según Rojas Purón, 1994).

Fases minerales	Contenido por horizonte (%)			
	C	O	SA	S
Goethita	60	69	18	5
Espinelas	8	10	2	3
Hematites	7	5	-	-
Minerales de Mn	2.5	3	-	-
Gibbsita	15	8	2	-
Cuarzo	2.5	2.5	2	-
Esmectitas	-	-	3	-
Nepouita	-	-	8	3
Enstatita	-	-	2	5
Cloritas	2.5	2.5	5	3
Serpentina	-	2.5	62	85

Horizontes:

C: Concreciones ferruginosas.

SA: Serpentininitas alteradas.

O: Ogres.

S: Serpentininitas duras.

En el corte laterítico pueden estar presentes fases minerales de hidróxidos de Al (gibbsita) y en menor cantidad minerales de Mn (asbolanas), sílice (en forma amorfa) y minerales del grupo de las serpentinas (antigorita y lizardita). En la tabla 3.2, se puede apreciar un resumen de las principales fases minerales por horizonte en el perfil laterítico en los yacimientos de Moa (según Rojas Purón, 1994), pudiéndose extrapolar esta composición mineralógica para los yacimientos Nicaro y Pinares de Mayarí. En esta tabla se nota claramente que la goethita constituye la fase mineral predominante en el material laterítico, sobre todo en el horizonte de ocre medio.

Es característico en los depósitos ferroniquelíferos la presencia de la paragénesis magnetita - maghemita, hecho que indica la transformación de los minerales de Fe en el ambiente intempérico; la maghemita es una fase metaestable en transición a las fases de la hematites (Sobol, 1968); la hematite (Fe_2O_3), es propia de un ambiente netamente oxidante, se localiza principalmente en la zona superior del perfil laterítico, detectándose por el aspecto oolítico y la coloración pardo - rojiza.

Las asbolanas constituyen las principales fases representantes de los minerales de Mn en estos perfiles lateríticos. Ellas se encuentran en muy poca cantidad y tienden a concentrarse en la zona de ocre medio y superior (ocre estructural e inestructural sin perdigones). En estos perfiles también se ha detectado la presencia de elisabentinskita (aunque en poca cantidad), como una de las fases minerales de Mn presentes en el material laterítico (Quintana Puchol, 1985 y Cordiero, 1981).

En el material laterítico se destaca con frecuencia el cuarzo y probablemente sílice amorfa en pequeñas cantidades (alrededor de un 3 a un 5 %).

Los minerales del grupo de la serpentina (antigorita, lizardita y crisotilo) constituyen las principales fases minerales de los horizontes serpentiniticos, además de las cloritas

(clinochloro, schuchardita), esmectitas (principalmente nontronita), así como la presencia de la fase nepouita, observable en el material serpentinitico lixiviado, de color verde claro presente particularmente en las grietas y fisuras de las serpentinitas.

Dentro de los minerales serpentiniticos el más abundante en los perfiles lateríticos es la lizardita, que suele presentarse con una coloración verde a verde grisáceo, asociado a fibras de crisotilo asbesto y antigorita, difíciles de diferenciar unos de otros por rayos- x (Bientz, 1990).

De lo visto respecto a la composición mineralógica de los perfiles lateríticos se puede concluir que muchos de los componentes principales pueden presentarse en más de una forma mineralógica, detectándose los compuestos ferrosos (Fe_2O_3 y FeO), óxidos de Mg y sílice (SiO_2), por las numerosas fases minerales en que pueden aparecer. Vale señalar que el Fe puede presentarse en varias formas mineralógicas, desde goethita y hematites, hasta espinelas (magnetita y cromoespinelas), cada una de ellas con sus características cristalquímicas específicas, lo que influye en la diferenciada forma de retención y afinidad que tienen cada una de estas fases minerales respecto al níquel. Algo parecido se observa con el magnesio y la sílice, los cuales se pueden presentar según varias formas minerales.

Es necesario resaltar además, que no existen formas mineralógicas propiamente de Ni en las menas oxidadas de estos yacimientos, lo que le confiere una enorme importancia a las fases minerales portadoras de este elemento. La nepouita constituye la fase mineral de Ni presente en estas cortezas, pero es un filosilicato que predomina en la zona de serpentinita lixiviada o alterada, estando en muy poca cantidad en el material laterítico (de un 5 % o menos), ésta es relativamente abundante en el yacimiento San Felipe, fundamentalmente en la parte donde el intercambio hídrico es malo o por debajo del nivel freático, no siendo así en el resto de los yacimientos.

3.3.6 Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos.

El conocimiento de la forma en que se presenta el níquel en las condiciones naturales determina la posibilidad de realizar trabajos geológicos más efectivos, pues las condiciones que propician su acumulación o dispersión deben ser conocidas para lograr un minado más racional. Además, en estos tipos de depósitos el Ni está contenido en los productos finales del proceso de intemperismo donde no existe una forma mineralógica propia de este metal, por lo que resulta una tarea muy difícil la de establecer las fases minerales que portan este valioso elemento.

Resulta clave el hecho que en las fracciones granulométricas más finas ($< 0.045\text{mm}$) electromagnéticas del material laterítico tienden a concentrarse el Fe y el Ni y dicha fracción está constituida básicamente por la goethita (esto se cumple para el yacimiento Moa, Nicaro y Pinares de Mayarí). Además de la fracción Goethítica, la fracción rica en espinelas (magnetita y cromoespinelas), constituye una fracción importante en el estudio de las fases minerales portadoras de Ni, con contenido promedio de 1,3 % de Ni.

Nota:

Hasta el más mínimo detalle de lo planteado anteriormente tiene gran importancia en la modelación del yacimiento, cada uno de estos parámetros será valorado de forma experimental para cada uno de los yacimientos modelados. Esta es la razón de lo detallada que es la caracterización que se debe hacer para un perfil laterítico.

Advertencia:

Lo planteado anteriormente no es más que una generalización, donde ha influido de forma importante la caracterización de las cortezas lateríticas de Moa, *por esto se realizará un análisis particular para cada sector modelado del yacimiento en cuestión.*

3.4 Principales factores que afectan la minería y la metalurgia de las menas níquelíferas.

Por sus características los factores que relacionaremos más adelante pueden afectar o controlar las particularidades de la mineralización, el desarrollo de la minería y la extracción de los metales de interés dentro de la materia prima mineral.

3.4.1 Factores que regulan la mineralización (Geológicos).

El conocimiento de los factores que regulan la mineralización de los yacimientos cubanos es de gran importancia para la ejecución de la modelación y la determinación en muchos casos de parámetros, que en ocasiones ni siquiera pueden ser tratados numéricamente, estimados, etc. y sin embargo tienen gran incidencia en la calidad de la materia prima mineral.

El conocimiento de la forma de migración del Ni a través de perfiles de alteración posibilita prever la dirección de empobrecimiento del Ni hacia las zonas superiores del perfil y su enriquecimiento en el horizonte de serpentinitas lixiviadas. Además, debe tenerse en cuenta el aumento o disminución de otros elementos (Mg y Si) en las distintas zonas del perfil, pues se necesita obtener un material laterítico con una adecuada proporción de componente ferroso y silicatado asimilable por la industria.

De forma general los factores que regulan la mineralización y su **calidad** son:

3.4.1.1 Composición de la roca madre.

La composición de la roca madre es un factor que influye de forma importante en la mineralización y calidad del material laterítico, de este modo las características mineralógicas y su contenido en níquel y cobalto variarán de un lugar a otro en

dependencia de la composición sustancial de la roca madre que le dio origen. Por ejemplo, las características mineralógicas y químicas no serán las mismas en zonas donde halla un desarrollo de gabros que en una con un desarrollo de las rocas ultrabásicas en mayor o en menor medida serpentinizadas, del mismo modo las rocas ultrabásicas con alto contenido en olivino son mucho más ricas en níquel que aquellas donde los piroxenos juegan el papel predominante.

Conociendo la distribución y características de las rocas constituyentes del substrato rocoso se puede realizar una zonación de los distintos tipos de cortezas que se deben encontrar en el yacimiento, es posible conocer las zonas donde hay ocurrencia de intercalaciones estériles y por consiguiente un adelanto importante en la confección del modelo geológico del yacimiento.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la influencia del tipo y el grado de serpentización (composición mineralógica) de la roca madre:

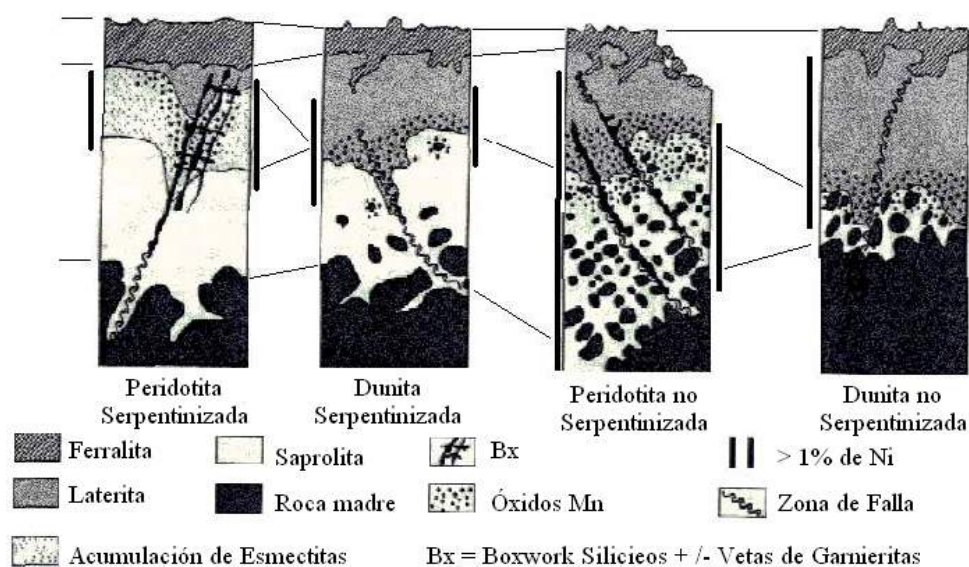


Figura 3.2: Influencia de la roca madre en las características de la corteza de meteorización resultante.

3.4.1.2 Estructuro – tectónico.

Las dislocaciones y deformaciones tectónicas son significativas tanto para la formación de los yacimientos residuales de níquel como para su existencia posterior. La influencia de este factor se reduce al aumento de la permeabilidad secundaria de las rocas, mediante la creación de vías propicias para la infiltración de las aguas. Los elementos fundamentales del control tectónico durante la formación de los yacimientos son las fisuras individuales y sus sistemas, especialmente las que se disponen adyacentemente formando zonas de fisuración, fragmentación o de esquistosidad. Los sistemas de fisuras y dislocaciones tectónicas determinan plenamente la posición y las particularidades de la morfología de los yacimientos de tipo lineal. En los yacimientos de meteorización areales, los productos friables también se adaptan a la orientación de

los sistemas de grietas en las rocas primarias que han condicionado la forma alargada, tanto de los contornos generales como de los locales de la corteza, a lo largo de las direcciones predominantes de las fisuras tectónicas.

Para el tratamiento del control de la tectónica en la mineralización, se puede hablar de un componente lineal, en cortezas de tipo areal y viceversa. Esta relación puede estar dada tanto por la forma de la corteza de meteorización como por la distribución de los elementos dentro de la misma (Fig. 3.2 y Fig. 3.3).

Como ya se explicó arriba, cuando la mineralización es controlada por el factor estructuro - tectónico tiene una componente predominantemente lineal, la cual se desarrolla sobre las rocas ultrabásicas muy fracturadas y agrietadas, localizadas en zonas marginales y entre bloques. La determinación de las zonas dentro del yacimiento donde existe este tipo de comportamiento de la mineralización es de gran importancia, pues tendría mucha incidencia en la explotación del mineral en el sentido de la tecnología a utilizar, metodología a implementar durante la explotación, etc.

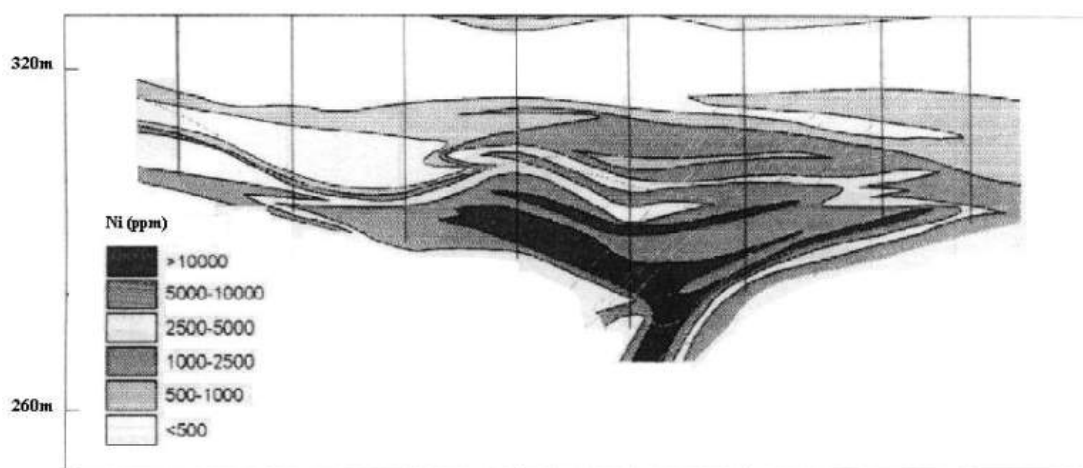


Figura 3.3: Control tectónico de la distribución del níquel en un perfil de meteorización, Yacimiento Bulong, Australia.

3.4.1.3 La evolución de la meteorización.

Es un factor que determina de forma notable la mineralización. Durante la evolución de la meteorización va ocurriendo la disolución congruente de la roca madre, dando lugar a nuevos minerales a partir de los minerales preexistentes como resultado de procesos físico - químicos que se llevan a cabo. Un parámetro que caracteriza este factor es la madurez del perfil laterítico.

Todos los agentes que controlan la mineralización juegan un papel preponderante en el yacimiento resultante, cambios ocurridos durante la historia geológica modelan el

yacimiento y complican sus características finales dando como resultados perfiles atípicos; estas atipicidades pueden estar dadas por:

- Ocurrencia de eventos y cambios en la dinámica de la tectónica del yacimiento: controlan prácticamente el resto de los factores más influyentes en la mineralización.
- Ocurrencia de erosión y redeposición: en ocasiones es difícil de determinar, pero tiene una gran importancia pues las menas de cortezas redepositadas tienen un comportamiento mineralógico diferente, y por ende necesita variaciones en el esquema tecnológico de la metalurgia, para poder aumentar la recuperación. Entre los cambios mineralógicos más representativo está: el aumento de la cristalinidad. La correlación de los elementos cambia en las cortezas redepositadas, por esto para la simulación y la estimación debe ser considerada dentro de un campo geométrico que la caracterice por sí sola.
- Cambios en la dinámica y forma de ocurrencia de las aguas subterráneas: como ya vimos uno de los parámetros que lleva la cabecera en el control de la mineralización es el régimen hidrogeológico, este preserva las menas silicatadas de la oxidación, siendo el yacimiento más rico en minerales garnieríticos. El cambio en el tiempo de las características hidrogeológicas en relación con la evolución y desarrollo de la meteorización, puede dar una gran gama de perfiles de meteorización, con diferencias considerables entre ellos.
- Cambios climáticos: su influencia se ejerce de forma secundaria, pues afecta directamente el intercambio hídrico del yacimiento, tanto en la zona de saturación, como en la de aereación.

Existen otros factores menos comunes entre los que se encuentran la ocurrencia de regresiones y transgresiones marinas, alteración por procesos endógenos o ajenos a la alteración a causa de la meteorización de la roca madre que dio lugar al yacimiento, etc.

3.4.1.4 Hidrogeología.

El desarrollo del intemperismo químico, depende de la cantidad de agua que llega a las estructuras y de la intensidad de transferencia de éstas.

A veces con las condiciones estructuro – tectónicas favorables, se limita el desarrollo del intemperismo por insuficiencia en la cantidad de agua que entra en las rocas. De este modo, se presenta una zonalidad en los perfiles al variar el régimen hidrodinámico, lo que provoca que hallan diferencias notables en el desarrollo del perfil laterítico sobre la base de la intensidad de la transferencia de agua.

La intensidad de la transferencia de agua tiene repercusión importante en la mineralización del material laterítico que se forma, generalmente se pueden diferenciar cuatro casos principales:

- 1) Zonas donde hay difícil transferencia de agua: Se desarrolla generalmente en los límites de las llanuras costeras suavemente onduladas. Aquí se dificulta la extracción y el transporte de la sílice y el óxido de magnesio, limitándose el proceso de intemperismo químico. El corte estará compuesto por: serpentinita compacta, desintegradas de color gris oscuro hasta carmelita, serpentinitas

débilmente lixiviadas con ocre en las grietas, y en la parte superior el horizonte de ocre con concreciones de Fe.

- 2) Zona de transferencia de agua de intensidad media: Se desarrolla generalmente, con cotas absolutas de nivel desde 500 hasta 100 m y un promedio anual de lluvia de 1500 ml. La transferencia de agua con intensidad media permite una prolongada acción de las reacciones químicas y como consecuencia, se aumenta la efectividad de los procesos de intemperismo.

En estas regiones, prácticamente todas las superficies de las rocas ultrabásicas están cubiertas por el manto de la corteza de intemperismo y el perfil que se observa es típicamente el más potente y completo.

En un corte esquemático generalizado se observa: serpentinitas compactas desintegradas, débilmente lixiviadas de color gris claro a gris oscuro; serpentinitas lixiviadas deleznales de color gris verdoso; vetas nontroníticas compactas de color verde sucio; ocre estructural deleznales, terroso de color amarillo pardo; ocre inestructural rellenos con concreciones de Fe.

- 3) Zona de transferencia de agua intensa: Se desarrolla generalmente, dentro de los límites de una superficie de nivelación de cotas absolutas entre 500 a 800 m, un promedio anual de 2000 ml de precipitaciones atmosféricas y notables diferencias relativas entre las divisorias de las aguas y las bases locales de erosión (mesetas). La alternancia de periodos secos y húmedos junto a la intensa circulación de las aguas, permite el desplazamiento de la sílice y el óxido de magnesio y el consiguiente desarrollo de la corteza de intemperismo, aunque de menor potencia que para el caso anterior se extiende por la superficie de las mesetas generalmente onduladas.

En un corte esquemático generalizado se observan de abajo hacia arriba: serpentinitas desintegradas, serpentinitas lixiviadas deleznales de color amarillo anaranjado, ocre inestructural con concreciones de Fe.

- 4) Zona de transferencia de agua muy intensa: Se desarrolla generalmente dentro de los límites de las partes más elevadas de los macizos montañosos de la región Mayarí – Baracoa con cotas absolutas de 1800 – 1200 m, un promedio de lluvia anual de hasta 3088 mm y temperaturas relativamente bajas (cimas El Toldo, alto de Calinga). Este sistema de condiciones imperantes permite el predominio del desagüe superficial sobre el subterráneo, lo cual limita la infiltración y por ende el desarrollo de la corteza de intemperismo. Estas regiones están compuestas por rocas ultrabásicas frescas desintegradas. En las divisorias de las aguas aparecen a veces restos de rocas ultrabásicas del tipo diente de perro.

Un ejemplo de la influencia de la posición del nivel freático y el régimen hidrogeológico se muestra en la siguiente figura 3.4, nótese que la existencia de los diferentes tipos naturales de menas, dependen en gran medida de la posición del nivel de las aguas subterráneas y el cambio de las propiedades de la filtración en las zonas afectadas por fallas (esta influencia también es evidente en las figuras 3.2 y 3.3).

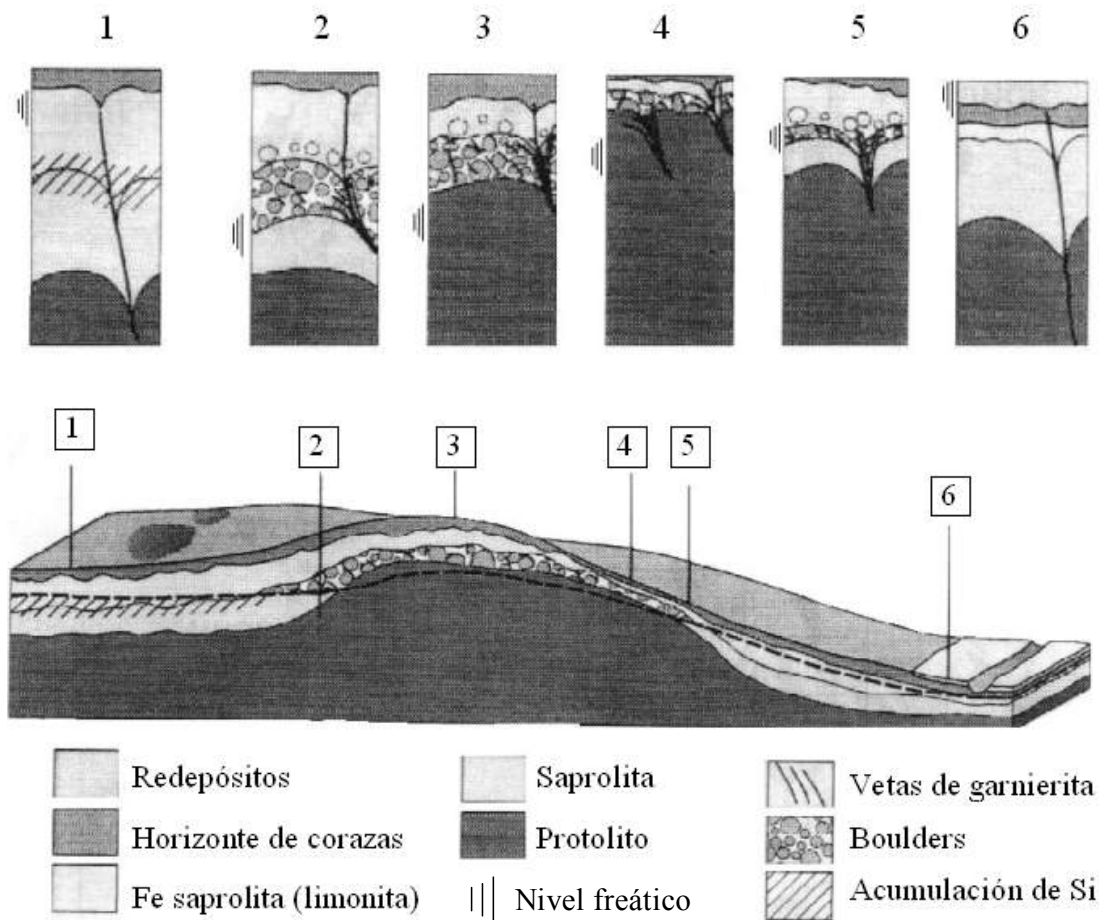


Figura 3.4: Control hidrogeológico de un perfil de meteorización, Yacimiento Bulong, Australia.

3.4.2 Factores que influyen en la minería.

En la minería existe un gran número de factores que favorecen o dificultan su ejecución, estos pueden ser de diversa índole y de diferentes trascendencias en dependencia de su efecto económico y práctico.

A continuación brindamos un resumen de los factores más importantes:

- La variabilidad de las menas in situ y el grado de conocimiento de esta variabilidad. Para mantener la calidad de la materia prima minera es necesario realizar una homogenización de la misma en una planta beneficiadora a partir de los flujos de carga existentes en la mina (independientes o no). Para esto es necesario mantener un determinado número de excavadoras, garantizando de esta manera la estabilidad de la calidad del mineral. La cantidad de frentes de explotación (suponiendo que existe una excavadora por cada uno de ellos) es inversamente proporcional a los gastos mineros y provoca problemas operacionales por la cantidad de equipos en uso, subutilización de los mismos (hasta un 50% menos), etc.

Otro problema relacionado a esto es el cálculo de la masa volumétrica, este generalmente se realiza extrapolando arbitrariamente y abusando de los valores medios, sin tener en cuenta las variaciones espaciales, a pesar de que se han propuesto métodos adecuados para el cálculo.

- b) La no-existencia de una zonación geólogo–tecnológica complica la planificación de la explotación.
- c) Complejidad en la forma de yacencia de los límites escombro–laterita de balance y laterita de balance–roca dura: en muchos casos, esto trae como consecuencia pérdidas de material laterítico, pues las excavadoras no son capaces de contornear el límite del mineral de balance; es otros casos provoca empobrecimiento de la masa mineral extraída como resultado de la unión de material estéril con la laterita de balance.
- d) Presencia de zonas con elevada humedad provocada por la acción de las aguas subterráneas: esto trae como consecuencia problemas con el movimiento del mineral, extracción, transportación, etc. lo cual incide negativamente en los índices técnicos – productivos.
El factor hidrogeológico directamente afecta la designación de la cantera, a través del impacto en la estabilidad de los taludes y en los costos operacionales. La solución para muchos de estos problemas es la creación del modelo geológico y geométrico que caractericen los parámetros de los que depende el flujo de agua y a partir de ello realizar la modelación del flujo(esta es una variante de modelo matemático). Este modelo se utiliza para planificar de forma más económica y rentable posible los trabajos para solucionar los efectos del agua en el yacimiento.
El desarrollo del modelo está precedido por la definición de las unidades hidroestratigráficas, el tipo de flujo subterráneo, la potencia activa y la zona de distribución de los acuíferos confinados o no, la velocidad del agua subterránea, el movimiento del drenaje en las rocas y las propiedades de filtración del medio geológico, etc.
- e) La presencia en determinadas zonas de material con características geotécnicas no favorables para la minería: esto implica muchas veces atrasos considerables en el proceso productivo de las minas, pues condiciona la posibilidad de ocurrencia de determinados procesos naturales tales como deslizamientos, derrumbes, procesos erosivos intensos, etc., los cuales se deben tener en cuenta para llevar a cabo esta actividad. El cambio de las propiedades geotécnicas del material laterítico puede estar dado por el aumento de la humedad, por el cambio de sus condiciones primarias de existencia, al sometimiento de cargas superiores a la que normalmente están confinados los mismos, etc.
- f) Otros que puedan influir, como por ejemplo: el número de frentes de explotación y de flujos de carga, etc.

3.4.3 Factores que influyen en el beneficio del mineral.

La mayor parte de la masa mineral extraída del subsuelo requiere de un beneficio previo, la efectividad de este proceso depende de las particularidades de la textura, estructura y mineralogía de la mena. La modelación de los yacimientos juega un gran papel en este sentido, pues permite realizar una subdivisión del yacimiento teniendo en cuenta estas particularidades.

En cada una de las plantas beneficiadoras existe un esquema tecnológico, diseñado para una materia prima mineral con características físicas, químicas y mineralógicas determinadas (granulometría, composición química y mineralógica, contenido de nocivos, humedad, etc.) que en este caso sería el que tendría las propiedades óptimas (alta calidad).

Las variaciones en la calidad del mineral provocan una disminución de la recuperación, un aumento del costo de producción, disminución de la vida útil de los equipos, de la calidad del producto final, etc. La disminución de la calidad puede tener causas diferentes, corregibles en dependencia de la naturaleza de la misma y del estadio de proceso tecnológico que afecte, pero se debe conocer de antemano las cualidades de la materia prima que entra en el proceso tecnológico de forma continua, variaciones bruscas o con ciclos en un periodo de tiempo muy corto imposibilita la ejecución de medidas alternativas para aumentar la recuperación.

De forma general para el caso de los yacimientos de la parte oriental los factores que más inciden en la recuperación son:

- a) Características físicas del material portador del níquel o fases minerales útiles de este metal.

Las variaciones en las propiedades físicas del material laterítico que llega a las plantas beneficiadoras inciden notablemente en el comportamiento de la pulpa limonítica durante el proceso de sedimentación en la industria niquelífera y por tanto en el proceso de beneficio de este material. Por ejemplo la granulometría determina en gran medida la concentración de uno u otro elemento en una clase granulométrica determinada (Rojas Purón, 1996). De este modo el níquel tiende a concentrarse hacia clases granulométricas menores de 0.045 mm donde hay además otros elementos como el Fe, que tienen un comportamiento parecido. Esta regularidad presente en las lateritas de la región oriental sienta las bases para dirigir el proceso de enriquecimiento de este metal hacia la fracción menor de 45 micrones y aislar otros elementos no deseados, esto, considerando además que la presencia de minerales arcillosos puede traer problemas a la hora de llevar a cabo este proceso.

La poca densidad de los minerales y en menor medida la forma de los minerales presentes en el material que llega a las plantas beneficiadoras también influye de forma importante en el proceso de sedimentación en los tanques espesadores. La poca densidad del material que alimenta a las plantas se debe fundamentalmente a la presencia de minerales ligeros, esto a su vez relacionado con el grado de madurez de la corteza de meteorización. La forma tabular de los granos de goethita (en ocasiones

aciculares) y su típico Intercrecimiento estrellado y la típica forma laminar de los minerales arcillosos, pueden traer consecuencias funestas al proceso tecnológico, pues esto da la posibilidad de que se aglomeren las partículas (esto favorecido por la presencia de partículas finas) que trae consigo problemas serios en la sedimentación del material (Beyris y otros, 1989; Montero, 1989).

b) Composición mineralógica del material que llega a las plantas beneficiadoras.

Otro factor que influye en el proceso de beneficio es la composición mineralógica del material laterítico que llega a las plantas beneficiadoras. El conocimiento de las formas mineralógicas en que pueden presentarse los elementos principales es de gran interés, pues muchos de estos elementos pueden presentarse en más de una forma mineralógica, cada una de la cual implica una forma distinta de estructurarse, con una cohesión y fortaleza cristaloquímica propia (hecho que influye notablemente en la realización del proceso tecnológico de extracción del níquel). Todo esto es de gran importancia por la incidencia que tiene la asociación del Ni con las fases minerales que lo portan, evidenciándose este aspecto durante la metalurgia del Ni, en la cual se necesita realizar un proceso de reducción térmica de la materia mineral en un rango de temperatura determinada, por encima o por debajo de la cual no es recomendable realizar dicho proceso, pues harían poco eficiente la extracción de este metal, al formarse determinadas fases minerales con buena cristalinidad y generalmente colectoras de níquel.

Es significativo destacar que los materiales que presentan buena sedimentación están compuestos por fases de óxidos e hidróxidos de Fe (goethita, hematita y magnetita) con cierta cantidad de gibbsita, estando presentes tanto en la fracción fina como en la gruesa, mientras que en los minerales con mala sedimentación existe una marcada diferencia entre la fracción fina (<0.074 mm) constituida por: goethita, hematita y magnetita y la gruesa (>0.074 mm), constituida por silicatos de magnesio y sílice (clorita, olivino y cuarzo). En este sentido se puede apreciar que la composición mineralógica de los materiales de mala y buena sedimentación se diferencian exclusivamente en la clase granulométrica gruesa (>0.074 mm).

El hecho de que la fracción gibbsítica sea una fracción no portadora de Ni, que predomine en los horizontes superiores del perfil laterítico (ocre superior y concreciones ferruginosas) y que se encuentre en paragénesis con los minerales de Fe, es imprescindible tenerlo en cuenta a la hora de la homogenización del material que será enviado a las plantas beneficiadoras, puesto que esto traería como consecuencia un empobrecimiento en Ni del material y por ende una baja recuperación de este. De este modo resulta conveniente relacionar las principales características químicas de las fracciones goethíticas con las gibbsíticas presentes en el material laterítico en los distintos frentes de explotación, para lograr que el material homogenizado cumpla con los índices de calidad requeridos.

c) Composición química reflejada en la presencia y proporción de los elementos pesados y ligeros.

Las propiedades físicas, mineralógicas y químicas del material laterítico están determinadas por el grado de madurez que éste presente y estos a su vez están íntimamente relacionados. Mientras menos maduro es un perfil posee contenidos menores de hierro y contenidos más elevados los de silicio y magnesio, detectándose mayor abundancia de minerales silicatados que provocan la disminución de la densidad del material y por consiguiente problemas con la sedimentación del mismo.

- d) Grado de retención del níquel en la red cristalina de los principales portadores de níquel.

En dependencia de la fase mineral portadora en un sector del yacimiento dado, el níquel estará en la estructura cristalina de los mismos, sometido bajo una fortaleza y cohesión cristaloquímica diferente, además, en la medida que el perfil de meteorización presenta un grado de elaboración, mayor cristalinidad presentan los minerales y más difícil es su extracción de su estructura cristalina. De este modo la extracción de los componentes útiles será más difícil en la medida que la estructura retenga al Ni con mayor fortaleza y cohesión. En estudios mineralógicos realizados a la pulpa laterítica en periodos de mala recuperación se ha observado la presencia de minerales de Mn, al parecer estos han sido la causa de la baja recuperación del níquel y el cobalto, pues estos minerales poseen una mayor fortaleza cristaloquímica en comparación con los otros minerales portadores.

- e) Transformaciones que sufren los minerales iniciales al someterse a las nuevas condiciones físico- químicas que imperan durante este proceso.

Durante el proceso tecnológico de extracción del níquel, los minerales constituyentes del material laterítico son sometidos a nuevas condiciones físico – químicas, lo que provoca también que se lleven a cabo en el sistema reacciones químicas que conllevan a la formación de minerales con alta cristalinidad con presencia de Ni y Co, lo que trae como resultado la baja recuperación de los componentes industriales.

3.5 Solución a algunos problemas utilizando la modelación del yacimiento.

La utilización del modelo del yacimiento es una herramienta poderosa para solucionar una gran cantidad de problemas particulares que se presentan en los yacimientos minerales, estas soluciones también tienen carácter particular. A continuación mostramos a modo de ejemplo algunas de estas soluciones particulares:

Nota: Se supone que durante las etapas iniciales de la modelación se resolvieron los problemas generales de la modelación, ej. Problemas de la estimación, zonación del yacimiento en diferentes dominios, etc.

3.5.1 Solución de los problemas relacionados con la cantidad de información geológica, estudio de redes y alternativas.

De forma general ya se trató este asunto de forma implícita en el capítulo anterior, aquí mostraremos detalles relacionados con los yacimientos de lateritas y daremos una metodología que integra el estudio de redes óptimas y la modelación matemática del yacimiento en dependencia de una gran cantidad de parámetros y con varias soluciones alternativas.

3.5.1.1 Fundamento teórico del método.

La optimización de redes o mayas de exploración se basa en el estudio de las características geológicas del yacimiento y en función de esto se planifica una red que esté en proporción con su valor económico de ejecución y el grado de información necesario para ejecutar la explotación del yacimiento. En dependencia del método empleado aparecerá un sistema de variables de las que dependen las formas y dimensiones de la maya; el estudio de las relaciones de estas variables es entonces el camino idóneo para la ejecución eficiente de la tarea planteada.

La solución de este problema puede realizarse utilizando los métodos tradicionales, métodos geoestadísticos, económicos y mixtos.

Los métodos tradicionales abusan de patrones y generalizaciones, además, el número de parámetros que entran en el cálculo es limitado; sin más preámbulo, por su naturaleza, es preferible el empleo de métodos geoestadísticos y económicos, así como su combinación.

La metodología que proponemos se basa en el estudio de la variabilidad del yacimiento y en las características de la estimación, incluyendo también ciertas variables económicas en el análisis.

Métodos de optimización de mayas:

Existe una gran cantidad de métodos, pero solo relacionamos algunos de los más empleados en el mundo:

- ✓ Coeficiente de variación: se basa en el estudio del coeficiente de variación de los elementos de interés, el espaciado en este caso estaría acorde con la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Intervalo de muestreo según Coeficiente de variación (Kusvart y Bohmer)

Distribución de las menas	Coeficiente de variación	Espaciado del muestreo
Regular	5 – 40	50 – 60
Irregular	40 – 100	6 – 4
Muy Irregular	100 – 150	4 – 2.5
Extremadamente Irregular	>150	2.5 – 2

- ✓ Método geoestadístico (solo variograma): se basa en la utilización del variograma, se toma la anisotropía como criterio de orientación y como distancia entre pozos $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$ de la distancia de correlación geológica (rango).

- ✓ Método del correlograma: similar a la utilización del variograma, pero en este caso la distancia de correlación geológica es $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$ donde la correlación se hace o tiende a cero.
- ✓ Método de las distancias sucesivas de Wijs (1972): para ello se emplea la siguiente formula (muy parecida al variograma).

$$S_D = [\sum (x_{i+1} - x_i)^2] / 2(n-1)$$

La relación espacial de los datos se mide a través del coeficiente de correlación f:

$$f = (S - S_D) / S$$

Donde: S es la desviación estándar de los datos.

Cuando $f \approx 0$ se toma la distancia con que se calculó S_D como distancia óptima de muestreo, en este caso $S \approx S_D$.

- ✓ Optimización del número de muestras: se basa en el ajuste de los datos a una población muestral para un nivel de confianza máximo.

Se determina el error que se comete al asumir que la media poblacional es igual a la media muestral:

$$\mu = x \pm \text{Error} \quad \text{donde Error} = \sigma / \sqrt{n}$$

μ : es la media poblacional.

X : es la media muestral

σ : es la desviación estándar poblacional.

N : número de datos

si $n > 30$ se asume que σ es igual a la desviación estándar muestral.

Para un nivel de confianza de $K\%$ con coeficiente λ (1.95 para un nivel de confianza de 95%) la media estaría comprendida entre la media muestral y λ veces el error. Cuando es imposible realizar este ajuste es necesario introducir más datos (o pozos). En este caso es necesario que la data pertenezca a la misma población estadística, por lo que el análisis se realizará luego de construir el modelo geométrico del yacimiento; una solución alternativa para reducir el error es utilizar áreas o regiones (3D) móviles.

Es evidente la gran cantidad de dificultades en la elección entre uno y otro método de los anteriormente mencionado por las desventajas que traen aparejada, por esto nos dimos a la tarea de crear un mecanismo para el estudio de las redes más realista y fundamentado. Para ello se revisó la literatura disponible y se realizó una adaptación de los métodos, basados en el estudio de la varianza de estimación, a las particularidades de estos yacimientos.

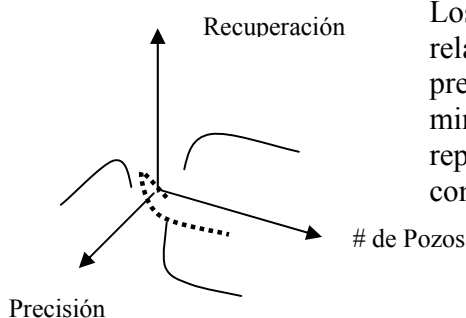
3.5.1.2 Relación entre el número de muestras y la precisión.



Figura 3.5: Relación entre el número de pozos y la precisión.

Existe una relación directa entre el número de muestras y la precisión de la estimación, lamentablemente no es lineal por lo que llega el momento que el aumento de la densidad de muestreo no influye de manera importante en el aumento de la precisión (Annaels, 1991).

Relación entre el costo de la perforación, la precisión y la recuperación de la materia prima mineral:



Los gráfico de la figuras 3.5 y 3.6 muestran la relación entre el costo de la perforación, la precisión y la recuperación de la materia prima mineral, en la figura 3.6 la línea de puntos es la representación 3D de esta relación y las líneas continuas son sus proyecciones.

Figura 3.6: Relación entre el número de pozos, la recuperación del metal y la precisión.

Como puede verse en la figura anterior llega el momento que el aumento de la cantidad de pozos por unidad de área (suponiendo que están regularmente distribuidos) no contribuye al aumento de la precisión; a su vez el aumento de la precisión contribuye al aumento de la recuperación de materia prima hasta un límite en que no tiene trascendencia alguna en la productividad de la metalurgia, es en este momento que el costo de la perforación no se justifica, por lo que constituye un gasto innecesario.

La relación entre el número de muestras y precisión de la estimación puede ser representada a través de gráficos de varianza de estimación vs. el costo de la red de exploración, siendo esta función directa del numero de pozos, el análisis en este caso debe realizarse teniendo en cuenta la dispersión de los valores estimados en función del número de sondeos.

3.5.1.3 Relación entre la precisión, la data y el método de estimación.

Los métodos probabilísticos son los únicos que permiten determinar el error de estimación en cada bloque estimado, por esto se recomiendan para el estudio de la relación en cuestión; la data cumple un papel importante en el control de la estimación, en el caso de los métodos

probabilísticos de estimación, la influencia de la continuidad y la estacionaridad es determinante en el resultado; esto se soluciona con el empleo del modelo geométrico y la elección del método más realista, sobre todo el que mejor represente la variabilidad de la data (se recomienda simulación condicional).

3.5.1.4 Determinación del error.

El error de la estimación no es más que la diferencia entre el valor estimado y el valor real:

$$e(v) = Z(v) - Z^*(v)$$

La variabilidad del error de la estimación en este caso será:

$$\begin{aligned} \text{VAR}[e(v)] &= \sigma_k^2 & \text{donde } \sigma_k^2 \text{ es la varianza de Kriging} \\ \text{y} \\ E[e(v)] &= 0 & \text{cuando no existe sesgo.} \end{aligned}$$

La varianza de krigeage disminuye en dependencia de los siguientes factores:

- Cuando aumenta el volumen del bloque. En este caso se debe fijar el tamaño del bloque lo más grande posible, pero teniendo en cuenta que sus dimensiones deben ser proporcionales a las necesidades de la planificación minera.
- Cuando aumenta el número de puntos experimentales en el interior y alrededor del bloque. Los puntos experimentales estarían representados por las mediciones de las perforaciones, además, es necesario tener en cuenta su representatividad.
- Cuando la media y la moda de la distancia de las muestras que intervienen en el cálculo con el centro del pozo disminuye.
- Cuando las muestras están bien distribuidas. Note que σ_k^2 depende del variograma, covariograma y del peso dado a la muestra en la estimación.
- Cuando se elige el estimador apropiado.

La distribución del error se puede ajustar a una distribución Gausiana con media en cero.

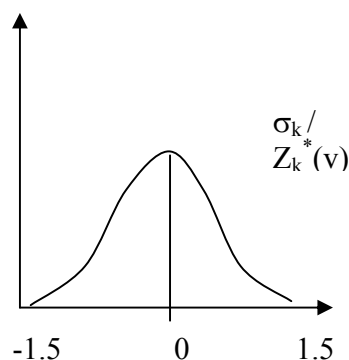


Figura 3.7: Función de distribución de la precisión de estimación.

El ajuste se debe realizar para un intervalo de confianza del 95 %; si se usa una menor se sobrestima el error o riesgo (M. David et al, 1984). También es factible trabajar con la desviación estándar relativa, conocida como precisión:

$$\text{Precisión} = \sigma_k / Z_k^*(v)$$

Según M. David el error se desprecia para un valor de precisión inferior 0.5, esto significa que la varianza es $\frac{1}{2}$ del valor estimado de $Z_k^*(v)$. Este planteamiento es absurdo para algunos tipos de yacimientos entre ellos

los de lateritas, además trae serios problemas de aplicación para valores de $Z_k^*(v) \approx \text{cut-off}$, por esto se propone transformar la relación de la siguiente manera:

$$\text{Presición} = \sigma_k / (Z_k^*(v) - \text{cut-off}) \quad \text{para } (Z_k^*(v) - \text{cut-off}) \neq 0$$

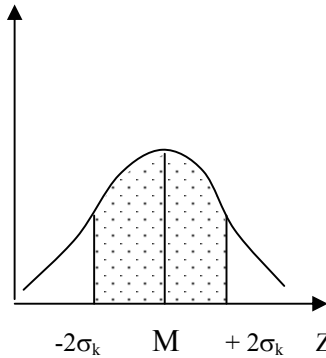


Figura 3.8: Determinación del error de estimación.

De esta manera si $Z_k^*(v) = 1.2$ y el cut-off es 1 entonces σ_k debe ser inferior a 0.1. Para garantizar la no-ocurrencia de errores, que traigan problemas en la explotación o procesamiento del mineral, este procedimiento solo se empleará para las reservas marginales, para garantizar el nivel de confianza necesario para la explotación cuando las menas tienen valores superiores de contenido se utilizará un error máximo, fijado a partir de las necesidades reales de la industria.

Para el estudio y clasificación de las reservas se emplean categorías "A, B, etc." Con un error permisible determinado "10 %, 20%, ..." Para determinar este por métodos geoestadísticos es necesario simular la varianza

de la población (ver 2.5.3 Simulación Condicional) y estimar la media del bloque (se asume que $M = Z_k^*$), bajo ciertas condiciones se puede asumir que la distribución de Z es normal con media Z_k^* y varianza S^2 , de esta manera el error que se comete al asumir que $E[Z(v)] = Z_k^*$, para un intervalo de confianza del 95 % sería el área bajo la curva limitada por el intervalo $M \pm 2\sigma_k$, como se muestra en la figura 3.8.

De esta forma el error será $P\{E[Z(v)] = Z_k^*\}$, es decir el área debajo de la curva la cual se estimará a partir de la siguiente expresión:

$$P = \int_{-2\sigma_k}^{+2\sigma_k} F_{(Z)} dZ$$

En la práctica se puede asumir que los errores están distribuidos normalmente, aunque esto no ocurre cuando los valores son demasiado altos. Además se ha demostrado que la diferencia de cálculo entre las distribuciones lognormal y la normal, que son las más frecuentes en yacimientos de este tipo, es despreciable cuando los valores del error no son demasiado altos (David, 1984).

Para determinar error global de la estimación se recomienda seguir uno de estos dos caminos:

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

- b) Cálculo empleando el valor medio de la varianza de estimación. Se determina la distribución de los valores estimados y la media de S para todo el yacimiento, el error se determina de forma similar al error del bloque estimado.

La influencia del volumen del bloque:

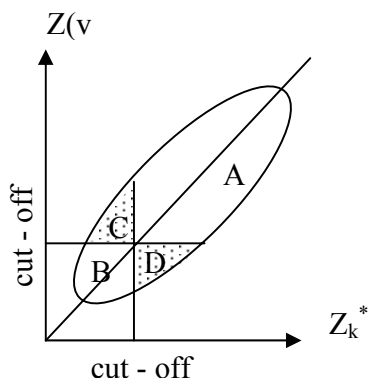


Figura 3.9: Validación cruzada.

Como se dijo anteriormente, con el aumento del volumen del bloque disminuye la varianza del error, por esto el tamaño del bloque para reservas probadas debe ser representativo para la explotación de meses, y probables para explotación de años.

Es recomendable emplear la validación cruzada para determinar la efectividad de la estimación.

Influencia del estimador:

Se ha demostrado que las variantes de kriging y la simulación condicional son más efectivas en dependencia del caso en cuestión, aún así, se recomienda el kriging disyuntivo, pues no suaviza tanto como las otras variantes de krigeage (no sobrevalora las reservas), y la simulación condicional por la capacidad de simulación de la forma en que varían los datos estimados.

De esta manera en la figura 3.9 se puede discernir que los bloques que se encuentran en la región "A" fueron estimados correctamente como reserva, en "B" escombro, sin embargo en "C" los bloques fueron estimados erróneamente como escombro y en "D" como reserva.

Para realizar la optimización primeramente se fijarán la relación entre los parámetros económicos y la estimación, esto se resume en la clasificación de las reservas de cada uno de los bloques.

3.5.1.5 Relación entre los parámetros económicos y la estimación.

La relación entre el grado de conocimiento geológico y el grado de factibilidad técnica económica viene dada por el siguiente gráfico:

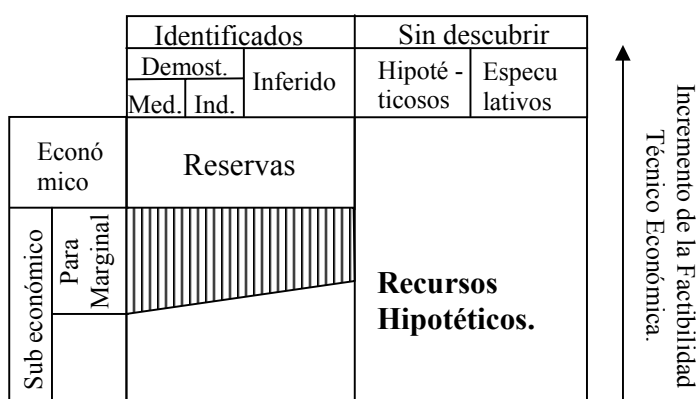


Figura 3.10: Influencia de la precisión y la factibilidad técnico-económica en la clasificación de las reservas.

Es de suponer que la factibilidad económica varía en función de los precios de mercado y otros y con ello el grado de precisión mínimo requerido.

Otro punto importante es el tratamiento que se dará a las reservas o recursos paramarginales, en dependencia del grado de conocimiento geológico, en nuestro caso medido a través de la modelación del yacimiento y expresado numéricamente en función del error de estimación. Con el aumento del conocimiento geológico – disminución del error – disminuye el riesgo económico (que depende en gran medida de este parámetro); las fluctuaciones del valor medio estimado para el bloque unidas a las fluctuaciones de los precios de mercado y otros parámetros relacionados, provocan un alto riesgo económico cuando $Z_k^* \approx \text{cut-off}$, esto es fácil de demostrar a través de la siguiente figura:

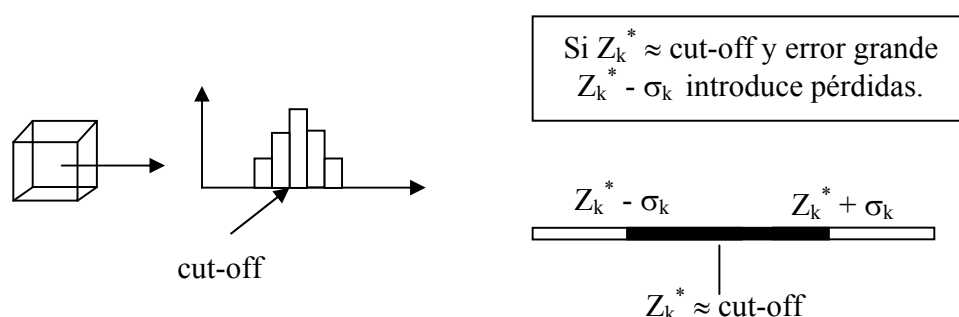


Figura 3.11: Influencia del error cuando el valor estimado del bloque está próximo al cut-off.

Por esto se puede afirmar que el riesgo económico tiene una relación directa y posiblemente lineal con σ_k , por lo que planteamos una vez más que el valor crítico de σ_k debe ser función de Z_k^* y el cut-off.

De esta manera la zona de incertidumbre aumenta cuando el conocimiento geológico es alto, en caso contrario la magnitud depende de dos parámetros desconocidos en el tiempo y espacio (precisión y valor de $Z_{(v)}$), por esto la región crítica debe ser menor en este caso, es

decir se desechan los bloques que tengan el valor medio más próximos al valor de cut-off y un error demasiado alto ($Z_k^* - \sigma_k < \text{cut-off}$).

3.5.1.6 Metodología propuesta para optimizar la red de exploración:

Aunque poco convencional la metodología propuesta es más realista; se incrementará la cantidad de pozos en dependencia de la variabilidad geológica y de las necesidades de la industria, utilizando como criterios parámetros geológicos, técnicos y económicos, además, incluye la ejecución de planes estratégicos para la utilización de las reservas marginales, así como para reducir el grado de marginalidad de los mismos (área de incertidumbre).

Existen dos formas de realizar la optimización:

- I. Optimización Global: se realiza determinando los criterios para todo el yacimiento, fundamentalmente cuando este es bastante homogéneo y las variaciones locales son despreciables. La introducción de más información se realizara densificando de forma regular toda la red de exploración.
- II. Optimización local: se realiza determinando los criterios para cada bloque estimado, cuando existen diferencias laterales importantes, pudiéndose subdividir el yacimiento en regiones de diferente continuidad geológica y con diferente comportamiento de los criterios de optimización analizados.

El análisis se realizará de forma horizontal y para la toma de decisiones se tendrá en cuenta la variación vertical de cada una de las regiones, tipo de explotación que se realizara, así como, los equipos empleados, etc.

Suponiendo que el espaciamiento entre pozos es insuficiente:

- 1) Se realiza la modelación del yacimiento, poniendo extremo cuidado en la determinación espacial de las poblaciones estadísticas, factores que controlan la mineralización y la construcción del modelo geométrico. En esta etapa se creará un patrón de forma y orientación de la red de exploración para cada uno de los campos geométricos determinados.
- 2) Determinación por varias variantes del modelo, matemático, específicamente, modelos de bloques, con las variables que afectan la minería y la recuperación.
- 3) Determinación de las zonas económicamente rentable a explotar a través de la optimización del corte a cielo abierto para realizar el estudio de redes donde económicamente esté fundamentada la densificación (ver manuales de la Whittle programming Pty. Ltd.).
- 4) Luego de un estudio económico riguroso, establecer el valor mínimo e intervalos de marginalidad de la reserva en dependencia de la relación $\sigma_k / (Z_k^*(v) - \text{cut-off})$, $\sigma_k / (Z_k^*(v))$; así como la magnitud y signo del intervalo $(Z_k^* - \sigma_k) - (\text{Cut-off})$. Estas relaciones se fijaran de forma específica para cada bloque estimado en dependencia de criterios económicos entre los que se encuentra:
 - Costo de extracción del bloque.
 - Valor del mineral contenido.

- Beneficio económico de la extracción de ese bloque.
- Relación escombros / mineral.
- Etc.

Es decir, se emplearán relaciones de Grado de conocimiento geológico- factibilidad económica (ej. $(Z_k^* - \sigma_k)/\text{costo de extracción y otras}$).

Indicadores económicos más complejos para cada bloque se pueden determinar utilizando algunos de los algoritmos de optimización existentes en el mundo (se recomienda Four -X por la cantidad de parámetros que tiene en cuenta)

- 5) Estudio de la variabilidad de la continuidad geológica, de los indicadores antes mencionados, comportamiento del contenido de los elementos químicos más importantes, potencia y cualquier otro parámetro técnico económico que afecte el proceso de minería y beneficio del mineral, así como la precisión de la estimación.
- 6) Determinación de las zonas con comportamiento similar.
- 7) Se fijará el valor máximo del error de estimación para cada zona en dependencia de las necesidades de la industria, teniendo especial cuidado en la relación existente entre calidad requerida del mineral, el contenido medio de los bloques, la variabilidad de los mismos y la homogenización.
- 8) En dependencia de los resultados se elegirá cantidad y posición de los pozos a agregar, ya sea en todo el yacimiento, en puntos aislados de interés o en las zonas de comportamiento similar de las menas.

En cuanto al tratamiento de las reservas marginales recomendamos: separar las zonas donde estas se encuentran del resto del yacimiento y valorar de forma detallada la factibilidad de su extracción y en dependencia de esto se agregan más pozos o no.

3.5.2 Solución de problemas Mineros.

A continuación mostramos a modo de ejemplo dos de los muchos problemas relacionados con la minería que se pueden resolver de forma eficiente utilizando el modelo del yacimiento.

3.5.2.1 Solución al problema de la calidad de las menas y la cantidad de frentes de explotación.

Como es de suponer el conocimiento geológico es el factor fundamental para la solución de este problema, analizado éste de forma práctica a través de la modelación del yacimiento y utilizando para este fin el modelo matemático del yacimiento. En este caso se debe partir de

que existe el modelo económico del yacimiento, lo que permitirá determinar las áreas que serán minadas (vea manuales de la Whittle Programming).

La relación existente entre la cantidad de frentes y la calidad de la materia prima se expresa de la forma siguiente:

$P=P(N)$ donde $P \geq P_0$, P es la productividad de la cantera y $P(N)$ la productividad de cada uno de los N frentes; como la productividad de cada excavadora es un parámetro constante la productividad de la cantera es función de la cantidad de frentes con un valor límite igual a $N=N_0'$. De igual manera $\sigma = \sigma(N)$, donde $\sigma(N)$ es la desviación media - cuadrática del contenido del componente homogenizado, el campo de optimización se determina a partir de $\sigma \geq \sigma_0$, estableciendo el valor mínimo de la función $\sigma = \sigma(N)$ y el valor correspondiente $N=N_0''$. Esto se resume en las siguientes figuras:

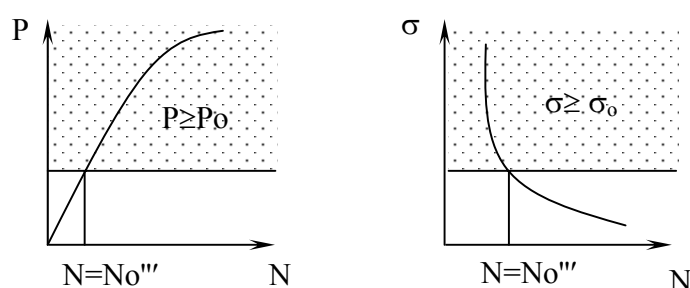


Figura 3.12: Relación de la productividad de la cantera y la variabilidad del contenido del componente útil extraído en relación con la cantidad de frentes de explotación.

Es evidente que la productividad de la cantera y la homogeneidad de la materia prima mineral actúan como criterios de optimización y la cantidad de frentes como parámetros de optimización.

De esta manera utilizando el modelo matemático es posible establecer (modelar) antes de la ejecución de la minería los valores de $\sigma(N)$ atendiendo a que la productividad es un valor que se puede fijar fácilmente según las necesidades reales de la industria, de forma similar el resultado de la homogenización está predeterminado por el diseño del esquema tecnológico de la planta procesadora; entonces, se pueden establecer varias variantes de la minería.

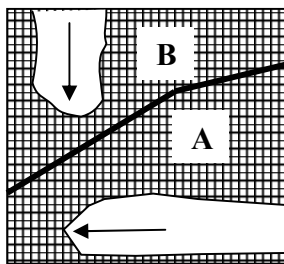
La modelación también requiere de la subdivisión previa del yacimiento en áreas homogéneas atendiendo a parámetros técnicos y los geológicos que influyan en la minería y beneficio de las menas.

Es posible realizar una modelación de la explotación del yacimiento a largo, mediano y corto plazo, realizándose una optimización de esta operación; en el mundo existen programas que realizan partes de estas operaciones de ellos el más famoso es el algoritmo Milawa de la Whittle Programming (para determina la secuencia de explotación, con objetivos puramente económicos); generalmente estos requieren de un modelo de bloques(modelo matemático) para su utilización y en la mayoría de los casos no tienen en

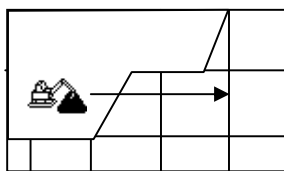
cuenta ciertas especificidades. Para poder modelar la explotación de los yacimientos de Ni Orientales se propone la siguiente metodología:

1. Realizar la Modelación geológica, hasta la construcción del modelo matemático teniendo en cuenta los parámetros que más afectan a la minería y a la metalurgia de las menas níquelíferas.
2. Luego de tener el modelo matemático, con un soporte (tamaño de los bloques) adecuado para la planificación y con un grado de error permisible (definido para cada bloque), generar un programa adaptado a las particularidades de ese yacimiento, el algoritmo tendría los siguientes componentes:
 - a) Dirección del corte, forma en que se realiza y expansión. En este caso la dirección y la cantidad de excavadoras la fija el planificador, la expansión o ancho del corte depende de las cualidades de la o las excavadoras.

Proceso de explotación de la mina



Los cuadrados pequeños representan cada uno de los bloques que conforman el modelo matemático, los espacios en blanco son los bloques minados y las flechas indican la posición y dirección del corte. La línea Gruesa divide el yacimiento en dos zonas con parámetros geólogo- técnicos diferentes



La excavadora en este caso minará una n cantidad de pozos con x cantidad de variables que los caracterizan, determinadas con un error e en un tiempo t .

Figura 3.13: Simulación de la calidad de la materia prima mineral, en dependencia del plan de minería.

- b) Cantidad de bloques que se extraerán por unidad de tiempo. Este parámetro depende de la productividad de cada una de las excavadoras.
- c) Características de la masa mineral que representa cada bloque y la mezcla de los bloques extraídos por cada excavadora. Para esto también es necesario tener en cuenta la varianza de las mezclas de los bloques, esta depende de la varianza de kriging del bloque, la estructura de la variabilidad y otras.
- d) La cantidad de bloques que se mezclan en cada camión y los bloques (con sus parámetros específicos) que se mezclarán en el depósito y las otras plantas encargadas de homogeneizar la materia prima mineral.

De esta manera es posible crear un algoritmo, con modificaciones particulares para cada yacimiento, el algoritmo simplificado sería:

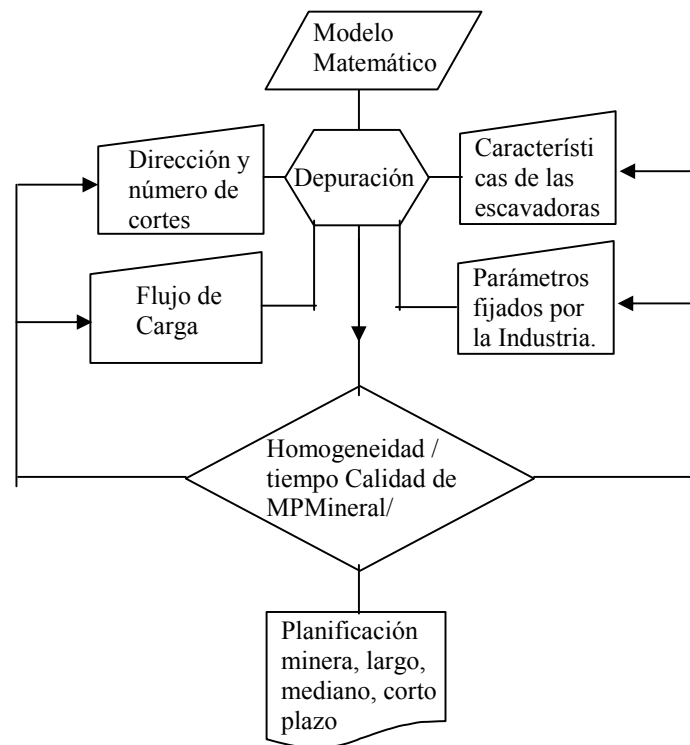


Figura 3.14: Diagrama de flujo simplificado del proceso simulación de los resultados de la explotación para cada variante de planificación minera.

En la resolución de las ecuaciones matemáticas relacionadas con este algoritmo también es posible utilizar la teoría de las VR, sobretodo, para determinar la variabilidad de las menas que se extraen de los almacenes (estos también pueden tener estructura de la variabilidad); para profundizar más en este tema remítase a la tesis de doctorado de Mario Chica Olmo[21], donde se muestra la modelación de la variabilidad de la materia prima mineral, resuelta de varias formas, pero en yacimientos con características diferentes.

3.5.2.2 Solución a los problemas relacionados con el cálculo de la masa volumétrica de los yacimientos lateríticos.

Las soluciones para este problema en el caso de los yacimientos de Cuba Oriental, está bien explicada por A. A. Legrá, 1999; el mismo plantea cuatro mecanismos, en todos los casos dirigidos a determinar y/o estimar este valor con un soporte proporcional al necesario para realizar ciertas actividades mineras, como el cálculo de reserva etc., en este caso no sería más que agregar una variable más al modelo matemático.

En el mundo y en los yacimientos cubanos este problema se resuelve utilizando los valores medios para cada tipo de mena y un área “representativa”; el abuso de los valores medios introduce errores importantes, por esto se plantean las siguientes soluciones:

- 1) Determinar la masa volumétrica como función de los contenidos de los elementos en el yacimiento, para cada tipo geológico de mena. Tiene como desventaja la no-utilización de la estructura de la variabilidad de esta variable(se ha demostrado que es una de las que menos varía espacialmente).
- 2) Utilizando el método de los mínimos cuadrados, esto es posible por la alta estabilidad del comportamiento de este parámetro espacialmente, pero limitado por el tipo de mena, esta es una solución particular de la primera variante.
- 3) Estimación por Kriging. Tiene la desventaja de que no tiene en cuenta los valores de los elementos espacialmente.
- 4) Determinación por triangulación, combinada con los mínimos cuadrados. Esta es la mejor pues tiene en cuenta una gran cantidad de parámetros y su efectividad (precisión) es alta. Para profundizar[43].

3.5.3 Solución de problemas de la metalurgia.

Los problemas relacionados con la metalurgia están fundamentalmente relacionados con las características y la calidad del mineral procesado, por esto la solución ideal es partir de una planificación minera basada en el empleo del modelo del yacimiento; algunas de las particularidades de esta operación ya han sido tratadas anteriormente.

Capítulo 4 Partes del modelo en un yacimiento de Níquel.

Por todo lo visto anteriormente los yacimientos residuales de níquel y cobalto son muy particulares, entre un depósito y otro existen grandes diferencias, por esto la modelación de los mismos tiene características propias y diferencias que es necesario tener en cuenta durante su ejecución.

Lo que mostramos a continuación es un intento de generalización de la ejecución de la modelación en este tipo de yacimiento, puntualizando en algunos de los detalles que los diferencian y juegan un papel importante en el desarrollo de la minería y beneficio de las menas.

4.1 Modelo geólogo-genético.

La adquisición e interpretación de la información para la construcción del modelo geológico – genético del yacimiento es el punto de partida de la modelación, para ello se empleará un gran número de herramientas y métodos de análisis de diversa índole los cuales no serán discutidos aquí, pero es importante aclarar que en dependencia de las características de los mismos, todos deben brindar, con un grado de detalle lo suficientemente preciso, las características geológicas del yacimiento a través de los parámetros que le mostramos a continuación[▲].

4.1.1 Parámetros a determinar en el modelo geólogo - genético. Su importancia en la industria minera y la modelación.

Como se vio en el capítulo 2, para la confección del modelo geólogo – genético, se deben definir los submodelos descriptivos y genético. El submodelo descriptivo recoge una serie de parámetros que son de particular importancia e interés para un depósito; estos parámetros resumen en sí las características objetivas de cada yacimiento. Estas características crean las bases para la confección de distintas hipótesis relacionadas con la formación y evolución del yacimiento, con los distintos procesos que tuvieron y tienen lugar en el depósito mineral, etc., y de este modo llegar a la confección del submodelo genético.

Con la confección del submodelo descriptivo, para el caso de los yacimientos ferroniquelíferos de meteorización se debe lograr:

- 1. La delimitación en el área de estudio de las zonas donde se distribuyen las cortezas**, teniendo en cuenta que estas se desarrollan exclusivamente sobre rocas ultrabásicas.

[▲] Estos no deben faltar en el modelo geólogo –genético resultante.

2. **La determinación, esclarecimiento y caracterización geólogo –matemática, e incluso económica de la zonación vertical y horizontal de estos yacimientos.**
3. **El estudio detallado de la tectónica del yacimiento y de las áreas circundantes.** Generalmente estos yacimientos forman grandes mantos de meteorización, pero de forma local pueden existir zonas con carácter lineal de la mineralización controlada por las fallas y grietas. Las fisuras y sistemas de grietas presentes en las rocas ultrabásicas y la tectónica controlan la hidrogeología del yacimiento en la mayoría de los casos, la presencia de redepósitos, historia geológica, estabilidad de los taludes, etc., por esto el amplio conocimiento de la distribución de las fallas y grietas, así como la forma en que influye en la distribución y comportamiento espacial de la mineralización es de carácter obligatorio para la ejecución de la modelación.
4. **Determinación de régimen hidrogeológico del yacimiento.** La dirección del movimiento de las aguas subterráneas, la posición y forma de los acuíferos presentes en el yacimiento, el quimismo del agua, fluctuaciones del nivel freático y su influencia en la estabilidad de los taludes de la mina, en la formación y distribución de los tipos litológicos y las menas, etc., son factores de gran importancia pues si se obvian puede traer como consecuencia errores considerables en la modelación.
5. **La descripción del ambiente geológico donde se desarrolla el yacimiento;** aparejado con esto se debe realizar una caracterización del material laterítico teniendo en cuenta las características estructurales y texturales, determinación de la edad de formación del yacimiento, la reconstrucción del encuadre tectónico en el que se formó el yacimiento y la determinación de las posibles zonas dentro o en áreas adyacentes donde pudo haber ocurrido la redeposición del material erosionado de zonas más levantadas como consecuencia de la dinámica de los procesos tectónicos, hecho que determina la posibilidad de ocurrencia dentro del yacimiento de zonas donde hay redeposición; de este modo se puede determinar la posibilidad de existencia en la región donde está enclavado el yacimiento de otros tipos de acumulaciones minerales asociadas (Ej. yacimientos de placer, sedimentarios, etc.).

Es de suma importancia el esclarecimiento de la ocurrencia e influencia que ha tenido sobre la mineralización procesos capaces de transformar y controlar la evolución del yacimiento; para el caso de los yacimientos cubanos, es imprescindible determinar la ocurrencia de transgresiones y regresiones marinas, procesos de alteración anterior y posterior a la mineralización, cambios climáticos de importancia en el tiempo geológico, cambios en la morfología, composición de los diferentes tipos litológicos que dieron origen a la corteza de meteorización o tienen alguna influencia sobre estos.

6. **La realización de la caracterización mineralógica del yacimiento,** determinando de este modo las fases minerales principales presentes en el material laterítico y cuales de estas son las portadoras del Ni y Co; esto permite un mejor conocimiento de las posibles formas en que se encuentra el componente útil y por consiguiente la determinación del proceso tecnológico que sería más eficaz utilizar para su extracción. La determinación de la principal fase mineral portadora del Ni es de suma importancia, pues su conocimiento da la posibilidad de dirigir los mayores esfuerzos en extraer un material con el mayor contenido de las fases portadoras y con menos cantidad de fases minerales pobres o con carencia de Ni. Por otro lado se debe puntualizar cuales son los factores más importantes que controlan en última instancia la mineralización del yacimiento,

pues estos son los que determinan el carácter y forma de la mineralización; determinar si en la zona donde se encuentra el yacimiento o dentro de éste han ocurrido alteraciones relacionadas o no con la mineralización, dado a que la presencia de estas zonas podrían constituir sectores del yacimiento en los que el material resultante no cumple con las exigencias de la industria o simplemente constituye una zona estéril dentro de yacimiento.

Otro aspecto importante es que la mineralogía determina el comportamiento espacial de los contenidos de los elementos químicos, de aquí que su conocimiento posibilite realizar la estimación, simulación y en esencia la modelación matemática de forma más precisa. El problema está en el grado de detalle con que generalmente se estudia la mineralogía en el yacimiento. Lo planteado anteriormente es de suma importancia, pues da la posibilidad de encontrar patrones que permitan relacionar los contenidos de los elementos químicos con las diferentes fases dominantes y a partir de esto simular la mineralogía del yacimiento, realizar la zonación del mismo y por último la modelación matemática final; es muy útil en este caso el empleo de técnicas de estadística multivariada.

7. **La determinación de las características físicas más importantes.** Dentro de las características físicas que se le deben prestar atención son: granulometría, densidad, forma de los granos y color. Su determinación es de gran importancia pues estas dan al material laterítico características distintivas en diferentes sectores del yacimiento e influyen de forma importante en la eficacia del proceso metalúrgico y la extracción del Ni. De lo planteado anteriormente se ve la importancia primordial de realizar un estudio completo de la corteza de meteorización, teniendo en cuenta sus características físicas, es decir, se deben obtener las distintas clases granulométricas existentes en el yacimiento para cada uno de los horizontes y el porcentaje que cada una de estas clases representan en el material laterítico, de este modo se logra cuantificar qué fracción granulométrica es la que predomina por horizonte y sobre esta base realizar las investigaciones posteriores. En este sentido se deben realizar mapas y / o esquemas donde se reflejen las diferencias de los materiales lateríticos de zonas diferentes, teniendo en cuenta que en el perfil existen diferencias de un lugar a otro determinadas por las desigualdades en el grado de elaboración intempérica que halla experimentado la corteza de meteorización.
8. **La determinación de las características químicas del material laterítico,** está íntimamente relacionadas con la formación y evolución de estos yacimientos en los cuales se evidencia una marcada zonalidad química vertical muy bien definida. Las características químicas del material laterítico se pueden representar a través de mapas de isocontenido para los elementos mayoritarios (SiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , CoO , MgO , MnO , Al_2O_3 y Cr_2O_3) en los cuales se puede determinar el carácter de la zonación tanto horizontal como vertical[▲], a través del estudio de los cambios de correlación en el

[▲] La utilización del Fe, Ni y el Co no es suficiente para lograr esclarecer la ocurrencia de fenómenos que cambien las características normales del yacimiento (p.ej. presencia de redepósitos, cambios en la composición de la roca madre, etc.), ya que, el comportamiento de estos tres elementos es similar para cualquiera de estos cambios.

espacio de estos elementos, en la distribución de los elementos, se pueden definir determinadas alineaciones que pueden ser a consecuencia de la acción de procesos tectónicos dentro del yacimiento, etc.

9. **La obtención de las características cuantitativas de los parámetros geólogo – tecnológicos y geotécnicos del yacimiento**, es decir determinar la potencia, calidad de la mena, masa volumétrica, plasticidad, humedad, ángulo de fricción interna, etc. de cada uno de los horizontes constituyentes. Conociendo estos parámetros es posible realizar con más calidad el modelo geométrico y el matemático, además permite desarrollar con mayor cantidad de criterios la conceptualización y planificación minera.
10. **La determinación de los distintos dominios del yacimiento**; es decir, lograr establecer las zonas dentro del yacimiento donde los principales parámetros que los caracterizan se comportan de forma similar, estos dominios podrían ser: cortezas que han tenido un desarrollo normal sobre las rocas ultrabásicas (cortezas in situ), zonas donde hay presencia de corteza de meteorización redepositada o zonas donde ha ocurrido un aporte adicional por infiltración de compuestos que no forman parte de los compuestos provenientes de la lixiviación de la roca primaria, aquí pueden incluirse los procesos de ferruginización, carbonatización, silicificación, etc.

Los dominios también pueden ser establecidos a partir de parámetros técnicos y económicos, por ejemplo: zonas de alta potencia de escombros, zonas poco rentables, etc.

Recuérdese que la determinación y la caracterización de los dominios es el umbral entre el modelo geólogo – genético y el geométrico.

11. **La determinación de las características de los horizontes pertenecientes al perfil de alteración intempérica** donde influye entre otras cosas el grado de serpentización de las ofiolitas, el clima y la hidrogeología. La intensidad del proceso de saprolitización y el carácter dominante o no de algunos de los horizontes, la presencia de relictos de la roca madre dentro de una matriz terrosa o carácter completamente terroso, etc. son algunas de las características que se deben tener en cuenta para la clasificación del tipo de perfil. Todos estos parámetros se emplearán para clasificar el yacimiento según el horizonte predominante, por ejemplo, un yacimiento puede ser fundamentalmente saprolítico y/ o garnierítico, laterítico; también puede tenerse en cuenta otras clasificaciones según el tipo de clima bajo el cual se ha desarrollado el yacimiento (zonas permanentemente húmedas y zonas donde se alternan temporadas secas y húmedas). La determinación de estas particularidades es de gran importancia pues estos aspectos influyen notablemente en la adecuada elaboración del modelo geológico del yacimiento y la elección o ajuste del esquema tecnológico del beneficio de las menas.

Para el caso de los yacimientos cubanos, los cuales son fundamentalmente lateríticos es importante la definición en el corte de las distintas zonas u horizontes de la corteza de meteorización. De este modo queda definida la presencia de perfiles estructurales completos con un desarrollo de todos los horizontes litológicos.

12. **La obtención de un modelo preliminar del yacimiento** teniendo en cuenta todas las características puntualizadas durante las etapas de prospección preliminar y detallada.

13. **Otras que se estimen convenientes** en dependencia de las particularidades del yacimiento que se modela.

Luego de haber realizado toda esta descripción del yacimiento y haber obtenido con el mayor detalle posible sus características principales se pasa a la confección del submodelo genético. La realización del submodelo genético se basa en los resultados alcanzados con la confección del submodelo descriptivo, estos resultados se toman como base para el planteamiento de diferentes hipótesis relacionadas con la formación y evolución del yacimiento, la descripción de los distintos procesos que se llevaron y se llevan en la actualidad dentro del yacimiento, darle explicación a determinados fenómenos ocurridos en la región y de esta forma dar conclusiones sobre la viabilidad de explotación del yacimiento. Luego de haber confeccionado este submodelo se debe ser capaz de definir cuales son las variables fundamentales del sistema que se deben tomar para la realización de los modelos geométrico y matemático respectivamente.

4.2 Modelo geométrico.

Como hemos dicho anteriormente el modelo geométrico está formado por un conjunto de límites diversa índole:

1. Económicos.
2. Geólogo - técnicos.
3. Geológicos.
4. Legales.
5. Otros

Los límites en estos yacimientos tienen las siguientes características generales:

4.2.1 Límites geólogo – técnicos.

Los límites de carácter técnico simplemente separan zonas de igual comportamientos de las características técnicas, geológicas y otras de un yacimiento lo que facilita la planificación de la explotación. Generalmente la subdivisión se realiza teniendo en cuenta los parámetros que más afectan a la minería ellos son:

- a) La potencia del mineral.
- b) Relación escombro mena.
- c) Cantidad y tipo de intercalaciones estériles.
- d) Calidad de la mena in situ.
- e) Piso y techo de las menas.
- f) Etc.

4.2.2 Límites económicos.

Los límites económicos tienen características muy peculiares para este tipo de yacimiento que lo diferencia enormemente de la mayoría de los yacimientos que se explotan a cielo abierto.

Generalmente los límites económicos son verticales, los límites horizontales coinciden con límites geólogo - técnicos y geológicos, por ejemplo: el piso y techo de las menas, límite entre las serpentinitas blandas y las lateritas, etc.

4.2.3 Límites geológicos.

Lamentablemente la tradición ha hecho que el formato simplificado de estos límites sea el que prevalezca, donde los límites son horizontales y sub-horizontales y separan litologías propias del corte laterítico.

Los límites geológicos para realizar la modelación necesariamente deben considerar otros tipos de variaciones de carácter geológico, entre las que se destacan:

- a) Zonas de redepósitos, con límites tanto verticales como horizontales.
- b) Límites relacionados con el tipo y control de la mineralización.
- c) Límites de fenómenos geológicos relacionados al fenómeno de meteorización, zonas con cambio de la secuencia normal de la meteorización, límites de madures de las cortezas, etc.
- d) Límites hidrogeológicos.
- e) Granulométricos.
- f) Densimétricos.
- g) Etc.

Los *límites legales* están fundamentalmente relacionados con el límite de la concesión tanto en la horizontal como en dirección vertical.

También existen *límites ecológicos, estratégicos, etc.*

Cada uno de estos tipos de límites o conjunto de límites **serán empleados de forma específica en la modelación**; de esta manera surge una nueva generación o tipo de límite como resultado una subdivisión aplicable a cada uno de los procesos de la modelación.

4.2.4 Límites relacionados con la estimación y la simulación condicional.

Como vimos anteriormente se asumirán métodos geoestadísticos para realizar la estimación y en parte la simulación, es por ello que recordamos que:

La estimación con métodos geoestadísticos depende fundamentalmente de la correlación existente entre los datos expresada a través del variograma, que depende de:

1. Los datos.
2. La forma en que varían en el espacio.
3. La continuidad espacial de los mismos y su estacionaridad.
4. La anisotropía.
5. De la presencia o no de tendencias de nivel local y general.
6. La correlación entre los valores y la estructura de la correlación.
7. La geológica del yacimiento.

Entonces para la estimación del modelo geológico se empleará un modelo geométrico que responda a estos parámetros, los cuales se comportan de forma similar en una población estadística o conjunto de ellas con carácter homólogo.

Las poblaciones son caracterizadas cuantitativamente a través de la data, pero recuerde que la mayoría de las veces el número de datos no es suficiente, por lo que es imprescindible emplear un modelo geológico y su geometrización que respondan de forma eficiente y precisa al comportamiento real de los contenidos de los elementos a estimar, a través del conocimiento geológico del espacio ocupado por el yacimiento.

Volviendo al variograma, recordaremos que su ajuste se realiza de forma **global**, es decir para toda la data, mientras que la estimación se realiza con carácter **puntual** y solo se involucra una pequeña cantidad de puntos, “cuando se estima un punto el variograma teórico generalizado no siempre responde a la estructura de los datos involucrados en la estimación” cuando esto ocurre el error de estimación aumenta; este fenómeno está asociado a:

- a) El variograma se realizó para una mezcla de poblaciones estadísticas[▲] con características diferentes.
- b) Existe una variación muy local del comportamiento de los datos.

De esta forma el modelo geométrico final para la estimación caracterizará zonas con variogramas verdaderamente representativos para esa región en el espacio R^2 o R^3 , según el caso.

4.2.5 Algunos aspectos a tener en cuenta en el modelo geométrico destinado a la estimación, en un yacimiento residual de Ni.

Generalmente en una cortaza de intemperismo, normal o transformada, in situ o redepositada existen varios horizontes con características contrastantes, los cuales pueden ser considerados como poblaciones estadísticas diferentes; de esta manera el modelo geométrico, tendrá el aspecto de varios mantos, de potencia variable, uno sobre el otro.

[▲] El comportamiento del variograma cuando existen varias poblaciones estadísticas mezcladas es difícil de detectar por su forma, por lo que los parámetros que los caracterizan son erróneamente utilizados en la estimación

Toda la parte *oxidada* se comporta como una población única, al igual que la parte *silicatada* (Michel David, 1984); este comportamiento se cumple casi siempre para una corteza normal, pero cambios en el perfil pueden hacer que esta regularidad no se cumpla, por ejemplo la presencia de zonas de redepósito, ocurrencia de perfiles atípicos por una u otra razón, etc.

Otro problema que presenta el establecimiento de límites en la vertical, es el carácter transicional del paso de un horizonte a otro, por lo que cada límite tiene una zona o región de incertidumbre, donde se unen de forma compleja litologías de comportamiento distinto. Entonces a diferencia de los modelos de otros tipos de yacimientos los límites verticales deben tener información de las dimensiones de las zonas de incertidumbre y si es posible se debe tratar esta zona como una región más del modelo geométrico definida por un límite superior e inferior.

La complejidad y la precisión con que se establece el límite, disminuye a medida que éste se aproxima a la base del perfil de alteración al aumentar la complejidad con la presencia de fragmentos sin alterar, por esto la zona de incertidumbre es mayor en este caso. Para los límites inferiores es prácticamente imposible determinar su forma, por suerte este tipo de límite es físico, fácilmente identificable a simple vista y es posible corregirlo durante la explotación.

Los límites relacionados con zonas de redepósitos son sub-horizontales, aunque este patrón no siempre se cumple. Otro detalle importante es la utilización de límites hidrogeológicos que controlan la distribución de las menas, tanto en profundidad como lateralmente, en este caso para su determinación se requiere simplemente de una pequeña cantidad de información que permita simularlo con un grado de detalle determinado.

A continuación mostramos un perfil esquemático que reúne las principales situaciones a tener en cuenta durante la ejecución del modelo geométrico, destinado a la estimación y a la simulación condicional de los contenidos medios de los bloques:

Ejemplo Hipotético: Yacimiento laterítico, en una zona con buen intercambio hídrico y clima permanentemente húmedo, con presencia de corteza redepositada y una gran influencia de la tectónica en la mineralización. Como puede apreciarse claramente el límite entre la parte silicatada y la oxidada del yacimiento tiene una zona de incertidumbre en dependencia de la variabilidad de las menas.

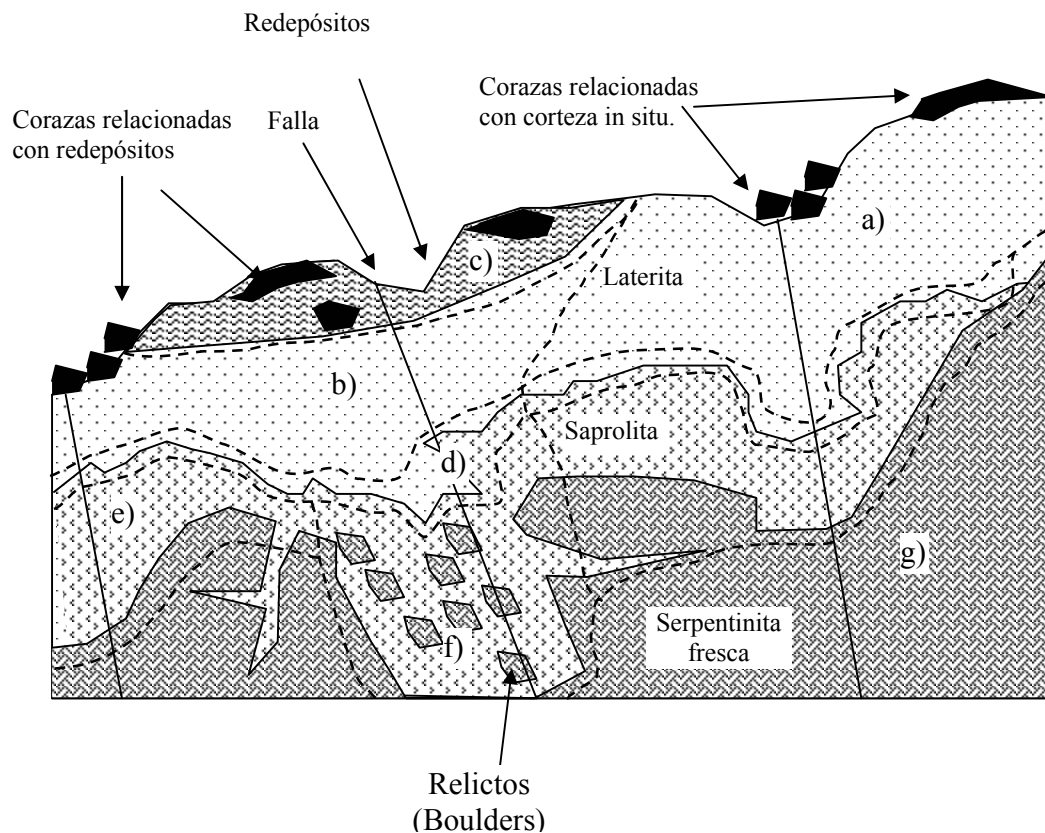


Figura 4.1: Modelo geométrico hipotético, visto en perfil.

El modelo geométrico, con límites del tipo físico y zona de incertidumbre, en algunos casos está representado por líneas discontinuas. La modelación matemática se hará por separado para cada uno de los campos geométricos, en este caso se distinguen:

- Zona de laterita in situ, no afectada por la redeposición. Generalmente se encuentran en las zonas más elevadas del yacimiento y tienen un desarrollo normal.
- Zona de laterita in situ, afectada por la redeposición. En este caso se encuentran justo bajo los redepósitos, suponiendo que los redepósitos sean lateríticos, estas cortezas tendrán un comportamiento diferente pues reciben aporte importante de las soluciones enriquecidas en los redepósitos; estadísticamente estas pueden o no ser similares a las lateritas normales en dependencia de un gran número de condiciones geológicas, entre las que se destaca su posición con respecto al nivel freático entre otras.
- Corteza redepositada, su comportamiento estadístico, mineralógico, geoquímico generalmente y posiblemente físico-mecánico es diferente a las de las lateritas antes mencionadas.

- d) Zona de incertidumbre, generalmente se presenta en mayor o menor grado para todos los límites de carácter geólogo-estadístico a consecuencia del carácter transicional del contacto.
- e) Saprolita, o serpentina descompuesta con poca cantidad de relictos de roca fresca desarrolla da en una cortaza de tipo areal, con componente lineal despreciable.
- f) Saprolita, o serpentina descompuesta con gran cantidad de relictos de roca fresca desarrolla da en una cortaza de tipo lineal.
- g) Roca madre.

De la misma forma se podríamos mostrar de forma gráfica parte de la gran gama de tipos y morfologías posibles de perfiles de cortazas de meteorización, con el modelo geométrico destinado a la estimación – simulación más probable, pero sale del marco de los objetivos de nuestro trabajo.

De la misma manera, en un caso real se analizarán de forma preliminar los posibles campos geométricos para realizar la modelación matemática, a partir de estos y de forma interactiva se realizara un estudio geólogo-estadístico detallado de la data que pertenece a cada uno de los campos geométricos y se realizara, simulación y estimación experimental para pedazos representativos de estos campos, según los resultados alcanzado se incorporarán al modelo límites matemáticos, se eliminarán límites innecesarios y por ultimo se ejecutara la modelación matemática (en este caso simulación y estimación de los contenidos de los elementos).

De forma similar se reajustarán los límites de otra índole antes mencionados (económicos, técnicos, etc.) según otras operaciones a realizar en el proyecto minero; entre estas se destaca la planificación minera donde los criterios fundamentales tienen carácter geológico, técnicos y económico.

4.3 Modelo matemático.

El modelo matemático, como ya se ha planteado es el resultado de la estimación y / o simulación de las variables regionalizadas definidas en un soporte determinado. Su confección requiere de la utilización de numerosas herramientas probabilísticas y determinísticas.

También se incluirá en los modelos matemáticos resultantes variables que son imposibles de estimar y simular a partir de puntos conocidos, estas serán extrapoladas utilizando como base la información brindadas por el modelo geólogo – genético y los distintos tipos de modelos geométricos.

Asumimos que el modelo matemático será representado por un modelo de bloques, que contienen información de las variables de interés en el yacimiento, tanto estimadas como asignadas. En este modelo se representarán la información a través de bases de datos que caracterizan cada una de las unidades elementales del mismo, además se propone utilizar varios modelos, cada uno con un tamaño de soporte (bloque) diferente, con unidad mínima

proporcional al volumen de mineral o el estéril mínimo que puede afectarse, según las restricciones puesta por la industria, es este caso la dimensión vertical sería aproximadamente 1 m, al igual que en la dirección de X y Y.

Por las ventajas que encierra la utilización de técnicas probabilísticas en la ejecución del modelo matemático se tomará como punto de partida para su confección un modelo geométrico preparado espacialmente para la estimación y la ejecución de la misma a través de los métodos geostatísticos, siempre que sea posible.

Trataremos varios tipos de modelos, que son parte de los más utilizados:

- I. Modelo de los contenidos de los elementos (modelo de leyes)
- II. Modelos de parámetros técnicos, con información de hidrogeología, masa volumétrica, etc.
- III. Modelos económicos.
- IV. Modelos recursos y reservas, empleando técnicas de estimación de recursos recuperables, o como se conoce en la literatura occidental (modelos RRE).

Existe una secuencia inviolable para la ejecución de la modelación matemática, parte de ella se supone que ya ha sido ejecutada durante la realización del modelo geométrico, pero en ocasiones es necesario retomarla para hacer ajustes.

Las etapas de la construcción del modelo matemático entonces sería:

1. Construcción del modelo geológico.
2. Construcción del o los modelos geométricos.
3. Elección del conjunto de soportes que caracterizarán el modelo.
4. Asignación a cada una de las unidades de las variables que por su naturaleza no pueden ser tratadas matemáticamente, o simplemente no existe información suficiente para un análisis de este tipo, por ejemplo la litología, la masa volumétrica, granulometría.
5. A partir de esta información y la adquirida durante la modelación geológica realizar la modelación de variables más simples, que por su naturaleza generalmente se trata de forma muy específica, tal es el caso de la humedad, y todo el resto de la información hidrogeológica, propiedades mecánicas, etc.
6. Realizar la estimación y simulación de los contenidos de los elementos disponibles en las bases de datos de los pozos de perforación muestreo y otras.
7. Incorporando información disponible relacionada con el yacimiento y de carácter externo, por ejemplo precios de mercado, demanda, etc. se realizara la modelación económica.
8. También se realizara la modelación, simulación, planificación y diseño de la explotación, teniendo muy en cuenta la información disponible y la compatibilidad con las características del yacimiento.

Estas operaciones no se realizan siempre en la secuencia que se muestran, generalmente se reajustan, se rehacen y se cambian una gran parte de ellas para hacerlas compatibles con la

tarea ejecutada en ese momento, o simplemente se mejoran al introducirse o cambiar la información que les dio origen.

4.3.1 Breve descripción de algunas de las etapas de la modelación.

4.3.1.1 Asignación de valores de las variables que no se estiman ni se simulan.

Generalmente se la asigna a las unidades que se encuentran dentro del campo geométrico que caracteriza la variable en cuestión, estas variables son fundamentalmente de tipo discreto (litología, clasificaciones, etc.), o simplemente es imposible realizar la estimación por la poca información existente o falta de un procedimiento matemático efectivo para su estimación, por ejemplo la masa volumétrica y los parámetros físico-mecánicos de la corteza se encuentran en este caso.

4.3.1.2 Modelación de variables más simples, que por su naturaleza generalmente se trata de forma muy específica.

El ejemplo típico es la simulación del flujo de las aguas subterráneas, partiendo de trabajos experimentales y de la información relacionada con la constitución litológica del yacimiento, de su ejecución dependen operaciones como la planificación minera, cálculo de reservas, modelación económica, etc. Para la determinación de este tipo de variables se emplea gran variedad de técnicas de estimación o simplemente formulas empíricas aceptadas en el ámbito mundial o local.

4.3.2 La estimación y simulación de los contenidos de los elementos.

Se parte de un análisis minucioso de la información experimental disponible, para ello:

1. Se realiza una revisión de la confiabilidad de la base de datos, se separan los datos anómalos o aberrantes y si es preciso se realizara una verificación en el campo en caso de que sea posible y realmente necesario. En este caso se asume que se ha determinado previamente durante la ejecución del modelo geológico y el geométrico la relación existente entre la geología y los valores de las variables estudiadas.
2. Descripción de la data, aunque se supone que ya se ha ejecutado previo a esta etapa, es importante determinar algunos detalles con la distribución a la que se ajustan los datos y con qué precisión esto ocurre, la varianza, media y otros estadígrafos, coeficiente de variación, todo ello de forma espacial.
3. Se efectuará un estudio de la estructura de los datos (análisis estructural), teniendo mucho cuidado con la presencia de fenómenos que puedan afectar sensiblemente el resultado de la estimación o la simulación, entre los más relevantes están:
 - a. Presencia de tendencias regionales y locales.

- b. Mala continuidad de la data relacionada con el efecto pepita.
 - c. Presencia de micro-regionalización.
 - d. Etc.
4. Estudio de la ley de distribución de las funciones aleatorias a través del estudio variográfico. En este caso nos referimos a presencia de estacionaridad, cuasi-estacionaridad y aleatoriedad.
5. Estudio de la anisotropía y su interpretación geológica, es necesario establecer el tipo (geométrica zonal) y la ocurrencia de comportamientos particulares, como el efecto pozo, aleatoriedad pura, estructuras imbricadas. Este estudio está dirigido al empleo del variograma en la estimación y la simulación por lo que tendrá ciertas diferencias al efectuado para la modelación geométrica.
6. Estudio del efecto soporte, para ello se realizara de forma experimental la simulación, estimación de carácter local, con el objetivo de determinar y conocer a priori los soportes del modelo matemáticos y los problemas de precisión y operatividad que traen aparejados.
7. Estudio exhaustivo de la varianza de dispersión y extensión, esto tiene estrecha relación con el punto anterior, su empleo también tiene como objetivo realizar análisis del error que se comete durante la estimación, la fiabilidad muestreo, la cálculo del error en el caso de la planificación, utilización de las áreas de influencia, etc.
8. Realización del ajuste a un modelo teórico, de forma global para cada dominio del modelo geométrico preparado para la estimación y la simulación. Este procedimiento incluye el estudio de los errores locales y globales de ajuste, elección de la mejor variante de ajuste, interpretación de errores de estimación, determinación de su relación con el variograma empleado, búsqueda de anomalías, etc.
9. Estudio detallado del error de estimación y solución de los mismos.
10. Ejecución de la simulación y la estimación final.

Como puede verse se requiere de una gran cantidad de parámetros para realizar estos dos procedimientos de forma eficiente, recuerde que se realizará esta operación varias veces para poder ejecutar los estudios relacionados con la misma, de los que requieren de estimación preliminar es el error, pues brinda información de los desajustes de los parámetros que afectan el proceso de determinación del valor de las variables y su ley de distribución.

Además este tipo de yacimiento requieren de un tratamiento especial, durante el estudio variográfico del mismo, entre ellos:

- Se trasladan las mediciones a un plano de referencia horizontal; téngase en cuenta que los horizontes de la cortaza laterítica tienen forma de manto y propiedades contrastantes, este procedimiento garantiza que los pares de mediciones para el cálculo del variograma experimental sean de un mismo nivel en el perfil, a pasar de estar en una posición distinta en el espacio, con respecto a la dirección vertical.
- El tamaño del *lag* se variará por dos razones fundamentales: la primera es la diferencia de escala entre las mediciones verticales y horizontales y la segunda es la existencia de una estructura diferente de la variabilidad a medida que se varia la escala de la

medición. De esta manera se garantizará que el número de puntos en cada *lag* sea relativamente homogéneo.

- El empleo de variogramas con estructuras imbricadas para garantizar la representatividad de la variabilidad de la data a diferentes escalas, cosa que es típica de este tipo de yacimientos.
- Etc.

4.3.2.1 Estimación por Kriging de un yacimiento de Ni.

Todas las variantes de esta forma de estimación pueden ser utilizadas, pero teniendo en cuenta sus restricciones, generalmente relacionadas con las particularidades geológicas y de la infraestructura minera, por ejemplo es casi imposible la utilización del Random Kriging pues no existen posos de voladura ni observaciones densas del fenómeno geológico, otras como el Kriging indicador deben emplearse con mucho cuidado pues fueron creadas para otras condiciones geológicas.

Es importante tener en cuenta antes de la ejecución de la estimación por Kriging, los parámetros antes mencionados, las restricciones geométricas de explotación, el efecto soporte y el efecto información.

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

$$L = |Z_{(x)} - Z_{K(x)}| \quad \text{si} \quad L > K \sigma_K$$

K se elige en función del nivel de probabilidad seleccionado ej. $K = 2 \sim 95 \%$

En el caso de la estimación de las reservas se realizará tanto de forma global como local.

Para el caso de la estimación local se realizará un kriging de bloques, teniendo extremo cuidado en que el sesgo sea nulo y el error de estimación mínimo, en la existencia de zonas no homogéneas, y la existencia de posibles zonaciones.

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

Otro punto a tener en cuenta es la función de recuperación (función de distribución), esta es de suma importancia para la planificación minera, una de las variantes más sencillas utilizando el Kriging se muestra a continuación:

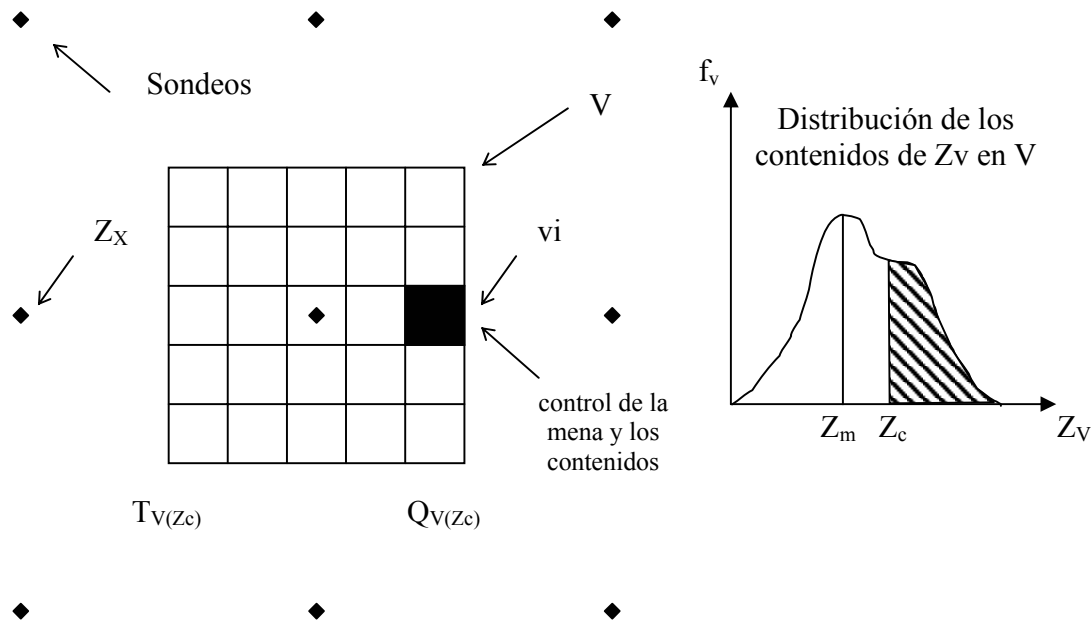


Figura 4.2: Determinación de la función de distribución, utilizando el valor de Z_v estimado con Kriging.

Esta distribución se utilizará para realizar el modelo RRE, del cual hablaremos más adelante.

4.3.3 Modelación económica.

La confección del modelo con datos económicos se realizara preferentemente empleando la simulación de los procesos, empleando las técnicas desarrolladas por la Whittle Programming u otras similares; se seguirán dos variantes principales, indisociables una de otra:

- A. Determinación de parámetros técnico-económicos generalizados para todo el yacimiento.
- B. Determinación de los parámetros técnico-económicos para cada unidad elemental de tamaño determinado.

Ambas técnicas se emplean de forma simultanea por razones de operatividad y para facilitar la planificación. Cuando estos parámetros se simulan, se requiere de un modelo de contenidos de los elementos y gran cantidad de información de carácter técnico-económico, por lo que su ejecución se realizará en las etapas finales de la modelación matemática del yacimiento. La forma elemental de la simulación se basa en la utilización del algoritmo de Lerchs and Grossmann, con este se relaciona el esquema de la minería, donde resalta por su relación con nuestro trabajo la minería por bancos.

Modelos financieros: se ejecutan atendiendo una gran de parámetros internos y externos y no es más que la fase generalizada del análisis económico del yacimiento que el modelo económico del yacimiento.

4.3.3.1 Determinación de parámetros técnico-económicos generalizados para todo el yacimiento.

Se realiza para todo el yacimiento empleando la simulación u otras técnicas más convencionales, como análisis de flujos de caja, de riesgo etc. este modelo debe contener datos del cut-off o contenido mínimo industrial generalizado para todo el yacimiento para cada uno de los tipos industriales y naturales de menas, costo de extracción de las menas y el escombro, costo de procesamiento, precio de venta óptimo, capacidad minera y de procesamiento, planificación de la producción y de las estrategias a seguir, riesgos, sensibilidad y error permisible atendiendo a estos parámetros, etc.

Determinación del cut-off o contenido mínimo industrial:

La teoría de las oportunidades de costos, brinda una gran posibilidad para la definición de este valor, cuando la optimización del VAN es el único de los objetivos de la compañía minera, siempre teniendo en cuenta variables como parámetros técnicos, escenario económico, y otras.

El proceso de designación y planificación de la explotación minera están relacionados con valores como precio previsto de comercialización, estimación de los costos de minería y de procesamiento, recuperación metalúrgica, gastos generales, etc. En muchos de los casos la determinación del Cut-off óptimo consiste en el análisis de la marginalidad de la eficiencia.

Algunos especialistas consideran que el uso de variables estratégicas es más eficiente para este objetivo, estas variables son:

- Capacidad minera
- Volumen de estéril a destapar
- Relación de descuento

Los pasos para determinar estos parámetros de forma más eficiente se requiere de un equipo multidisciplinario y las mayoría de las veces lo ejecutan empresas especializadas en esta materia, los detalles del proceso salen del marco de los objetivos del trabajo, para más información remítase a la literatura especializada.

4.3.3.2 Determinación de los parámetros técnico-económicos para cada unidad elemental de tamaño determinado.

Para ellos se realiza la modelación o simulación de los principales parámetros técnico y específicamente económicos, el resultado final será una base de datos que caracterice en

cada bloque, costo de extracción de la mena, costo de extracción del escombro contenido en el bloque, costo minero total, costo de procesamiento, retorno por venta del Ni y el Co o del concentrado, valor del bloque.

Este modelo ofrece ventajas importantes, entre ellas:

- Permite realizar la planificación minera, a corto y mediano plazo en función de términos técnico-económicos, asumiendo que existe una planificación minera a largo plazo precedente a la modelación que permite determinar estos parámetros.
- Permite trabajar con valores de variables de cut-off, esto en términos de planificación minera resulta una gran ventaja, especialmente en zonas del yacimientos donde la extracción de la mena resulta dudosa por presencia de alta potencia de escombro, bajos contenidos, etc. entonces es posible establecer planes estratégicos variando la ley de corte.
- Permite realizar un estudio de la ley de corte e incluso zonaciones del yacimiento atendiendo al valor óptimo de este parámetro.
- Etc.

Como puede verse es posible trabajar con valores variables de cut-off, esta técnica es de origen reciente y ha dado muy buenos resultados en yacimientos de oro, aunque es perfectamente aplicable, una forma más eficiente de modelación económica es la utilización de los RRE, que se caracterizan por el empleo de proporciones en dependencia de una cantidad determinada de valores de cut-off y la ley de distribución de las menas.

4.3.4 Modelos recursos y reservas, empleando técnicas de estimación de recursos recuperables (modelos RRE).

Este tipo de modelo surge a consecuencia de las limitaciones del concepto clásico de modelo (en este caso modelo de contenidos o de leyes):

1. Generalmente se asigna un valor único a toda la masa que caracteriza el bloque, pero esto no es real por lo que generalmente existen problemas de conciliación entre lo real y lo estimado.
2. La relación mena escombro entre bloques vecinos, fundamentalmente en yacimientos irregulares es complicado y abigarrado.
3. Es difícil realizar la planificación minera con la información encerrada en un valor único e irreal, que realmente representa un valor medio para el bloque y no una proporción escombro mena, que influye de forma considerable en el beneficio.

4.3.4.1 Las razones para el cambio.

La razón para el cambio es simple: el contenido esperado en el estudio de factibilidad, nunca es el mismo que el valor real de producción M. David (1988), por las siguientes razones:

1. Relación entre el efecto tamaño del bloque (Size Effect) y la selectividad alcanzada durante las operaciones mineras.
2. El efecto de información (Information Effect) y el grado de muestreo.
3. La continuidad de las menas.
4. Posición relativa del Cut-Off en lo que respecta la media.

Otra razón es que el modelo puede ser creado para dos objetivos totalmente opuestos:

Obtener un error local mínimo, con lo que se realiza una estimación global errónea o un error global de estimación mínimo pero con error local importante.

4.3.4.2 Particularidades del modelo RRE.

1. No tiende a especificar donde la mena será encontrada en el bloque, esta será determinada cuando se realice el control de la mena y los contenidos.
2. Mas de un contenido por bloque es suministrado.
3. A primera instancia no se puede dibujar la distribución (desde el punto de vista geométrico) de las menas.
4. Es para un número y tipos de equipos específico, si se cambian, este pierde validez.
5. La selección del equipamiento es realizada antes de la creación del modelo.
6. No puede ser creado de forma individual por el geólogo, pues varias consultas colaterales deben ser realizadas.
7. Su utilización por otros usuarios requiere de instrucción previa, por lo complicado de su formato.
8. Requiere de mayor interpretación del papel de otras disciplinas en el proceso de extracción.

4.3.4.3 El formato del modelo RRE.

El modelo esta formado por dos variables independientes que son:

- a) Proporción de mena.
- b) Contenido en la mena para esa proporción.

De esta manera la base de datos tendrá el siguiente formato:

Tabla 4.1: Formato de la base de datos del modelo RRE.

Pozo	Cut-Off	Proporción de mena	Contenido de la proporción de mena
100	0	1	1.01
100	0.8	0.7	1.1
100	$n_{(Z_c)}$	$p_{(Z_c)}$	$c_{(Z_c)}$

Los valores de cut – off, se eligen de manera tal que están acordes con las necesidades de la industria, pero nótese que se introduce un valor cero, con el cual el modelo RRE se comporta como un modelo de contenidos clásico.

Las proporciones y sus contenidos se obtienen de la función de distribución de los bloques compuestos por n unidades elementales de menor tamaño, de acuerdo con las especificidades del método y equipos de explotación, estas unidades elementales conforman el control de la mena y los contenidos (Fig. 4.2) ; a los bloques compuestos le llamaremos de aquí en lo adelante *bloque RRE*.

Estos valores dependen de varios cut-off (más de 3), de esta manera para cada cut-off en el bloque existirá una proporción determinada de mena (0 a 100 %) con un contenido determinado.

A partir de esta información se puede determinar la cantidad de mineral en cada bloque, la cantidad de metal que contiene, cantidad de escombros, cantidad del metal en el escombros, contenido en la mena. Entonces se podrán crear bases de datos secundarias para cada uno de los bloques RRE, que pueden tener el siguiente formato:

Tabla 4.2: Resultado del análisis de la base de datos del modelo RRE.

Cut-Off	Proporción de mena (PM)	Contenido en % de PM	Reservas del bloque RRE (T)	Contenido en la mena (%)	Escombros (T)	Contenido en el escombros (T)	Contenido en la mena (%)
---------	-------------------------	----------------------	-----------------------------	--------------------------	---------------	-------------------------------	--------------------------

A partir de esta se puede construir una tercera base de datos conociendo la masa del bloque, el costo de minería de la mena y el escombros, costo de procesamiento y precio en el mercado.

Tabla 4.3: Determinación del cut-off óptimo para cada bloque a partir del análisis de la base de datos del modelo RRE.

Cut-Off	Costo de minería de la mena	Costo de minería del escombros	Costo minero total	Costo de procesamiento	Costo total	Retorno por venta	Valor del bloque RRE
0							A
...							B
							C
							D
$n(Z_c)$							$V(Z_c)$

Generalmente con la variación del valor del cut-off cambia el valor del bloque de la siguiente manera:

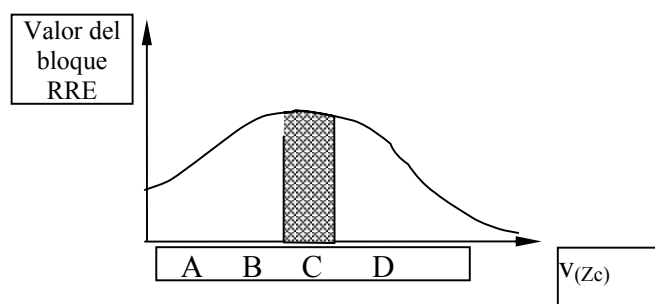


Figura 4.3: Determinación del cut-off óptimo para un bloque RRE, en dependencia del comportamiento del valor del bloque con el cambio de cut-off.

Entonces será posible minar o no cada bloque RRE en dependencia de cut-off C, siempre y cuando el valor de C no entre en contradicción con las particularidades de la industria.

Cada bloque RRE también contendrá información importante para planificar la minería teniendo en cuenta la función de distribución, esto es de suma importancia para simular la homogenización, secuencia de explotación, creación de planes estratégicos de explotación para sectores complicados del yacimiento, etc.

4.4 Compatibilidad con proyectos mineros, en yacimientos lateríticos cubanos.

Para la implementación de la modelación es fundamental tener en cuenta la etapa y la infraestructura del proyecto minero que se ejecuta. La modelación puede ser incorporada desde el reconocimiento, búsqueda y exploración preliminar del yacimiento, por lo que todas las tareas ejecutadas durante el proyecto pueden ser diseñadas en función de la modelación, es decir que las diferentes partes del modelo son comprendidas como un producto final al cual se quiere llegar y el resto de las tareas no son más que operaciones destinadas a obtener dichas partes del modelo. Un ejemplo de implementación con estas características es el yacimiento Pinares y la Meseta de San Felipe, aunque no se trabaja con una concepción integral de modelo como la que exponemos en dicho trabajo.

El caso opuesto de la implementación de la modelación es cuando el yacimiento se encuentra en una fase de explotación y un estadio avanzado de la exploración de explotación, por ejemplo en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara; en este caso la ejecución de la modelación generalmente se realiza adaptándose a la infraestructura existente, se efectúa sobre la base de los resultados obtenidos hasta la fase donde se encuentre el proyecto y no iniciando todo el proceso. Generalmente en esta situación la modelación del yacimiento se realiza a través del análisis y procesamiento de la información existente, a diferencia de la otra situación donde la adquisición de información primaria juega un papel importante en el desarrollo de la modelación.

Conclusiones.

De todo lo anteriormente planteado se deduce que la modelación de un yacimiento es en extremo compleja y está formada una gran cantidad de tareas a cumplir estrechamente relacionadas unas con las otras; Por esto la metodología de ejecución de la modelación no es una simple lista de operaciones a seguir, sino un conjunto de herramientas lógicas que resuelve cada uno de los problemas y metas en la ejecución de la construcción del modelo geólogo genético, el geométrico y el matemático.

Además de esto durante la investigación se arribó a las siguientes conclusiones:

- 1) A pesar de existir una gran cantidad de conceptos de modelos y/o modelación de los yacimientos, la utilización de una concepción integradora que los recoja en su mayoría y los acople a cada una de las etapas de ejecución de un proyecto minero es la vía idónea de realizar el análisis detallado de la información existente, encaminándola a cualquiera de los objetivos planteados de forma previa a su ejecución.
- 2) La modelación es la mejor forma de realizar la explotación de un yacimiento, permite aumentar la rentabilidad y hace más sostenible la explotación, puesto que la planificación se basa en el máximo conocimiento físico, químico, técnico, y económico del yacimiento.
- 3) El principio básico para la modelación y/o interpretación de la información relacionada con un yacimiento laterítico, es hacer uso máximo del conocimiento geológico disponible, y la adquisición de información primaria. La ejecución precisa, eficiente y detallada del modelo geólogo-genético es la clave del éxito de la modelación, pues la dependencia del resto de los modelos con esta es tan alta que resultaría imposible la ejecución de la modelación.
- 4) La subdivisión del modelo en tres partes (geólogo-genético, geométrico y matemático) permite realizar la modelación con una secuencia lógica.
- 5) El empleo de la teoría de las variables regionalizadas como enlace y herramienta teórica para la interrelación entre cada una de las partes del modelo del yacimiento puede ser considerada como la vía más apropiada para lograr cuantificar y expresar de forma científicamente fundamentada la esencia de esta interrelación, lamentablemente su uso es limitado.
- 6) El modelo geométrico es realmente una tarea difícil de realizar, si se tiene en cuenta que de sus características dependen los resultados de la ejecución de la modelación matemática del yacimiento, independientemente de su tipo y la amplia gama de soluciones y formas que puede tener.
- 7) La creación de un modelo matemático complejo, con datos hidrogeológicos, económicos, de contenidos, geológicos, etc. permite realizar una minería

- científicamente fundamentada, fácil de modelar y simular, con un rango de error mínimo, aumentando su selectividad y facilidad de elección de la mejor variante de explotación.
- 8) El estudio del soporte y el campo geométrico de la variable regionalizada es de suma importancia, pues determina la utilidad y la precisión del modelo matemático creado empleando técnicas geoestadísticas.
 - 9) El estudio de la anisotropía es un punto decisivo en la forma de la red de exploración, pero sus dimensiones dependen de una gran cantidad de factores, entre los que se destacan: factores geoestadísticos (varianza de estimación, soporte, etc.) económicos (relación del costo de la red / precisión, recuperación / precisión, etc).
 - 10) El variograma es de suma importancia para la interpretación del comportamiento estructural de los datos en el espacio y de él depende en gran medida los resultados de la estimación y la simulación, pero no es suficiente y debe combinarse su empleo con el análisis riguroso de la geología y con otras técnicas estadísticas como las técnicas de clasificación, regresión, etc.
 - 11) Para el estudio variográfico de la data es imprescindible tener una red de apoyo local, más densa para el estudio de la continuidad de las VR a menor escala.
 - 12) En la mayoría de los casos, sin el empleo de estimadores probabilísticos resulta prácticamente imposible la ejecución eficiente de la modelación, el estudio de redes, la planificación minera, etc. pues es el único método que brinda información del error cometido en los puntos estimados, donde no se conoce información a priori.
 - 13) La utilización de las técnicas de estadística multivariada y clasificación es de carácter casi obligatorio para la determinación y separación de las diferentes poblaciones estadísticas, es decir, para la confección del modelo geométrico del yacimiento.
 - 14) La composición de la roca madre, su fracturación, así como el relieve topográfico, hidrogeología, geomorfología local y la historia de la meteorización y formación del yacimiento, entre otros son los principales factores que influyen en las características de los yacimientos ferroniquelíferos cubanos.
 - 15) El estudio de la madurez de los perfiles de alteración es una herramienta importante para la ejecución de la modelación del yacimiento, pero su aplicación se complica en casos de yacimientos atípicos con presencia de redepósitos o alteraciones posteriores de la mineralización.
 - 16) Las propiedades físicas del material laterítico, sobre todo la granulometría, la densidad, al igual que las propiedades químicas y mineralógicas están estrechamente regidas por los procesos y fenómenos geológicos que controlan el yacimiento, factores como: la redeposición, posición con respecto al nivel freático, control tectónico, etc. el cambio de estas propiedades afectan de forma importante la

recuperación del Ni y el Co, por esto se hace tanto énfasis en el conocimiento geológico del yacimiento.

- 17) El empleo de criterios especiales para la determinación de la efectividad del modelo matemático para la explotación incorpora nuevas posibilidades de ejecución de planes estratégicos de minería, tal es el caso de la relación $\sigma_k / (Z_k^*(v) - \text{cut-off})$, para el caso de encontrarse el valor de contenido próximo al valor del cut-off.
- 18) Para el estudio de redes es imprescindible el conocimiento de la relación entre el número de muestras, la precisión y la recuperación del metal, así como las características de la data, el método de estimación, el tamaño del bloque y el equipamiento minero.
- 19) Como criterio de efectividad de la red es insustituible el error de la estimación, teniendo en cuenta que las particularidades de la estimación y los valores permisibles del error estarán en dependencia de las relaciones anteriormente citadas.
- 20) La creación de bloques complejos o bloques RRE, permiten determinar de forma preliminar la función de distribución de la variable en el bloque empleando técnicas de Kriging, venciendo de esta manera la dificultad fundamental del método, aunque de forma imprecisa (ver efecto de suavizado, y efecto soporte)
- 21) El empleo de modelos económicos del tipo RRE permite realizar una planificación de la minería más efectiva, basándose en el beneficio económico del bloque y en criterios técnicos y geológicos asociados a cada uno de ellos. Además, permite romper el esquema de un cut-off único para el yacimiento, empleando el valor óptimo de este parámetro para cada bloque en específico.

Recomendaciones.

- 1) Para realizar la modelación de cualquier yacimiento laterítico se recomienda la ejecución del modelo geólogo- genético por un equipo multidisciplinario, especializado en esta materia, para garantizar la confiabilidad y calidad de la información con que se realizarán el resto de las etapas de la modelación.
- 2) Realizar un enfoque probabilístico de la modelación, hasta donde sea posible.
- 3) Un estudio detallado del efecto de soporte y del error, antes de elegir el soporte del bloque.
- 4) El empleo del error de estimación y criterios técnico-económicos para el estudio de redes óptimas.
- 5) El empleo de modelos del tipo RRE por las ventajas que encierra.
- 6) El empleo de tecnología de punta, esta aunque costosa generalmente se justifica por la calidad de los resultados obtenidos.
- 7) Compatibilizar al máximo posible la modelación con el proyecto minero que se ejecute.
- 8) Profundizar más en la modelación económica de los yacimientos, para ello contactar especialistas en optimización de canteras, leer manuales y bibliografía de la Whittle Programming y para ejecutar la modelación económica, si es posible, adquirir sus productos.
- 9) Profundizar más en la metodología propuesta pues tiene un carácter preliminar, sería conveniente ejecutar la modelación de pequeños sectores de las minas de lateritas ferruginosas existentes en el país, creando de esta manera una metodología más específica para cada una de ellas.

Referencias.

1. Alfonso Roche José R. Estadísticas en las ciencias geológicas, Ciudad de la Habana Cuba: Editorial ISPJAE, 1986.
2. Alfredo L. Cuello. Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos. Revista Minería y Geología Vol 1 (Nº 1, 1999).
3. Almaguer Furnaguera Aida y Cerpa Naranjo A. Composición de las pulpas limoníticas de la planta Pedro Sotto Alba, parte I. Revista Minería y Geología (No 3, 1995).
4. Almaguer Furnaguera Aida. Composición de las pulpas limoníticas de la planta Pedro Sotto Alba, parte II- Periodo de crisis de sedimentación. Revista Minería y Geología (No 2, 1995).
5. Almaguer Furnaguera y Zamarzry V. Estudio de la distribución del Ni, Fe y Co en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. Revista Minería y Geología Vol 2 (Nº2, 1993).
6. Autor desconocido. Paper for Presentation at Acads conference Kalgoorlie: Aspects of pit optimization, pit design, planning and scheduling, 28 November 1991. D H Stewart Bsc FAusIMM Mining consultant Snowden Associates, Director Gemcom Australia.
7. Balasubramanian N & R. K. Gupta. Whittle solution for lignite mining. Conference Proceedings -SRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
8. Bell T.M., Whateley M. K. G. Evaluation of grade estimation techniques, methods and case histories. Geological Society (special publication), 1994.
9. Brand N. W., Butt C. R. M., Elias M. Nickel laterites. Classification and features. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics Vol 17 (Nº4, 1998, 81- 88p).
10. Bruce Van Brunt & Mario Rossi. Mine planning Under Uncertainty Constraints. Conference Proceedings -SRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
11. Burger P. A. Origin and characteristic of lateritic Ni deposits. Nickel '96 (congreso), Kalgoorlier, 27 – 29 nov –1996.
12. Bustillo Revuelta M. y Jimeno C. L. Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras, Madrid: Entorno Gráfico S.L, 1997.
13. Bustillo Revuelta M. y Jimeno C. L. Recursos minerales – tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia e impacto ambiental-, Madrid: Graficas Arias Montero S.A Mosteles, 1995.
14. Calzadilla Velásquez Carlos. Estudio de la variabilidad de los elementos Fe y Ni de las capas industriales LB y SB en 15 bloques del sector central del yacimiento Punta Gorda [Trabajo de Diploma] 1985. ISMM Moa, Moa Holguín.
15. Capote Flores Neicis, Fiffe Muguercia y Acosta Chávez. Aspectos de la termodinámica de la precipitación – oxidación de sulfuros de Ni y Co. Revista Minería y Geología (No 1, 1998).
16. Capote Flores Neicis, Rojas Purón, Bascas Pedro Rafael. Determinación de la distribución del níquel en las macrofases del mineral laterítico. Revista Minería y Geología Vol 1 (Nº 1, 1993).

17. Clark Ward. Strategic mine planning, and exploration Tool?. Conference Proceedings -SRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
18. Colectivo de autores. The quantitative prediction and evaluation of mineral resources. Episodes Vol 18 March June 1995.
19. Colin F., Nahon D. y Trescases J.J. Lateritic weathering of pyroxenites at Niquelandia, Goias, Brazil. Economic Geology Vol? (1990) The supergene behavior of nickel, Texas USA 1990
20. Chang Cardona Antonio R. Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato amoniaco. Revista Minería y Geología Vol 16 (Nº 1, 1999).
21. Chica Olmo Mario. Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales [Tesis doctoral] 1989. Universidad de Granada, Granada.
22. Chica Olmo Mario. Simulación de explotación en planificación minera. Año y revista desconocida? (Curren).
23. Chris Farrelly & Roussos Dimitrakopoulos. Support effect when optimizing with Whittle Four D Wirralie Deposit, North Queensland. Conference Proceedings - SRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
24. David Michel. Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation, Ansterdan Oxford New York: copyright Michel David, 1984.
25. David Michel. Geostatistical Ore Reserve Estimation, Ansterdan Oxford New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
26. Díaz M. Roberto. (capítulo I). En: Cálculo de los recursos y reservas minerales, ISMM Moa: Inédito, Cap. I y II. 2000
27. Díaz M. Roberto. (capítulo II). En: Cálculo de los recursos y reservas minerales, ISMM Moa: Inédito, Cap. I y II. 2000
28. Falcón Hernández José (et al). Sedimentación de la pulpa cruda en la empresa Moa Nikel S.A. Revista Minería y Geología Vol 14 (Nº 1, 1997).
29. Gabeva Deliana. The hidrogeological factor in open pit designs. Conference Proceedings -SRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
30. García Magariño M. Tendencias de la modelación en bloques para la evaluación de yacimientos. Boletín Geológico – Minero Vol 107 (1996, 5 - 6 p) España.
31. Gemcom© User's Manual: Gemcom Software International Inc. , 901 – 580 Hornby Street, Vancouver, British Columbia, V6C 3B6, Canada, 1999.
32. Goldie R., Tredjer R. Models and their use in the exploration evaluation and exploltation of polymetallic deposits. Geoscience Vol? (# ?, año ?)
33. Graybill Franklin A. An Introduction to Statistical Models in Geology, New York: MecGraw – Hill Book Company, 1965.
34. Ham S., Goering C.E. A robust method for estimating soil properties in unsampled cells, transactions of the assay, 1993.
35. Idrisi for Windows version 2.00, User Manual: Clark Labs, The Idrisi Project, Clark University Graduate School Of Geography 950 Main St. Worcester, MA 01610-1477 USA, 1997.

36. Jimenez- Espinos R. Identification of geochemical anomalies using principal component analysis and factorial kriging analysis. *Journal of Chemical Exploration*, 1993.
37. John C. Davis. *Statistics and Data Analysis in Geology*, Kansas geological survey John Wiley & Sons INC, 1973.
38. Journel G. and Huijbregts Ch.: Estimation of lateritic-type orebodies, Publication unknown?
39. Ken Lane. Optimization: is it the best?. Conference Proceedings -SRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
40. Kielland P. The use of spatial stadistic in hydrography. *International Hydrographic Review*, 1992.
41. La O Vargas Mayda. Controles de calidad al desarrollo geológico de reserva en yacimientos lateríticos [Trabajo de Diploma] 1995. ISMM Moa, Moa Holguín.
42. Legrá Lobaina A.A., Oris R, Silva D. y Belete F. O. Modelación de una superficie topográfica a partir de la relación entre el Kriging y la interpolación lineal en Rⁿ. *Revista Minería y Geología Vol 16 (Nº 1, 1999)*.
43. Legrá A.A, Polanco Almanza Ramón G., Miranda Domínguez Juan M. Propuesta para el establecimiento de la masa volumétrica en el yacimiento de lateritas de Cuba. *Revista Minería y Geología Vol 16 (Nº 2, 1999)*.
44. Legrá Lobaina A.A. Metodología para el pronóstico, planificación y control de la minería en yacimientos lateríticos [Tesis en opción al grado de doctor en ciencias técnicas] 1999. ISMM Moa, Moa Holguín.
45. Legrá Lobaina A.A., Guardiola Romero R. L. Contribución a la práctica del análisis variográfico y la estimación por Kriging. *Revista Minería y Geología Vol 16 (Nº 2, 1999)*.
46. López Jimeno Carlos (et al). *Manual de arranque y transporte en la minería a cielo abierto*, Instituto Tecnológico GeoMinero de España: Rios Rosas, 23, 28003 Madrid, 1995.
47. Malcell Valléc, Michel David, Michel Dagbert. *Guide to the evaluation of gold deposits*: Clement Desrochers centre de recherches minerales de Quebec, 1991.
48. Martínez Ramos Delvis. Análisis geólogo - mineral - litológico y tecnológico en el entorno del contacto escombros mineral en zona del yacimiento Moa respecto al muestreo en red auxiliar [Trabajo de Diploma] 1990. ISMM Moa, Moa Holguín.
49. MicroLYNX Reference Manual: Lynx Mining Systems; Lot 50 Sudbury Close Clifton Beach, North Queensland; Australia 1998
50. MineMap 5.01.00 User's Guide: ©MineMap Pty Ltd, November, 30/17 Ogilvie Road, MT PLEASANT. W. Australia, 1996.
51. Murray J. Mineral deposit models: nickel sulfide deposits of the kambalpa type. *Canadian Mineralogist*, 1990.
52. Myers. *Interpolation and estimation with spatially located data, chemometrics and intelligent laboratory systems*, 1991.
53. Nahon. Microgeochemical environments in lateritic weathering. En: *Proceedings "Geochemistry of the earth surface and processes of mineral formation"*, Granada (Spain): Consejo superior de investigaciones científicas Madrid (C. S. I. C.), 1987.

54. Nápoles Delgado Alegna. Particularidades del contacto del cuerpo mineral fondo y del horizonte de escombros en el yacimiento punta gorda [Trabajo de Diploma] 1998. ISMM Moa, Moa Holguín.
55. Palma Ricardo. Cut-Off Grade Sensitivity Using Opti-Cut. Conference Proceedings -STRATEGIC MINE PLANING Third biennial Conference-, 23 – 24 March 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
56. Polanco Almanza R. G. Dirección de los flujos de mineral en los yacimientos lateríticos [Tesis en opción al grado de doctor en ciencias técnicas] 1996. ISMM Moa, Moa Holguín.
57. Polanco Almanza Ramón. Curso de tecnología de explotación minera a cielo abierto, ISMM Moa: Inédito. 2000
58. Quesada García Ariel. Introducción al estudio de los yacimientos minerales de Cuba, Ciudad de la Habana: ISPJAE, 1981
59. Ricardo Palma G. Four-D una herramienta para la planificación de minas de rajo abierto. V simposio chileno de aplicación de la computación en la industria minera 1991, NCL ingeniería y Construcción S.A Santiago de Chile, Whittle Programming Pty. Ltd. Melbourne Australia.
60. Ritzi R.W. Analysis of temporal variability in hydrogeochemical data used for multivariate analysis. Ground Water, 1993.
61. Rossen Halatchev. Company Strategy – a Basis for Production Scheduling of and Open Pit Complex Conference Proceedings -STRATEGIC MINE PLANING Third biennial Conference-, 23 – 24 March 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.
62. Shurtz R.F. Optimal mine exploitation by geometric analysis. Revista desconocida (current 52.13.04), 1993.
63. Sinclair A.J., Valle M. Reviewing continuity: an essential element of quality. Exploration Mining Geology, 1994.
64. Smirnov V. I. Yacimientos de meteorización. En: Geología de yacimientos minerales, MIR Moscú, 1982, 385 – 433 p.
65. STATGRAPHICS Plus for Windows Version 3, User Manual: Statistical Graphics Corp. 1997.
66. Statistica for Windows Release 5.0, User Manual: StatSoft Inc. 2325 East 13th Street Tulsa USA, 1995.
67. Stratos'98 Stratigraphic data management and display, User Manual: RockWare Copyright © Inc. 2221 East Street, Suite 101 Golden, Colorado 80401 – USA, 1997.
68. Surfer® Version 7, User Manual: Copyright © 1999. Golden Software, Inc.
69. Ton Tulp. Application of Whittle Four-D to risk management in Pit Optimizations. 4th Large Open Pit Conference Whittle Programming Pty Ltd, 5 –9 September 1994, Melbourne Australia.
70. Trescases J. J., Dino R., Oliveira S. Un gisement de nickel supergene en zone semiaride, Sao Joao do Piaui (Brasil). En: Proceedings “Geochemistry of the earth surface and processes of mineral formation”, Granada (Spain): Consejo superior de investigaciones científicas Madrid (C. S. I. C.), 1987.
71. Variowin 2.1, User Manual: Copyright © 1994 Yvan Pannatier Institute of Mineralogy and Petrography- University of Lausanne – Switzerland

72. Vera Yeste Angel. Introducción a los yacimientos de níquel cubanos, Ciudad de la Habana: ORBE, 1979
73. Vladimirovich Lepin Oleg, Ariosa Iznaga José D. Búsqueda exploración y evaluación económica de yacimientos minerales sólidos, Ciudad de la Habana Cuba: Editorial Pueblo y educación, 1986.
74. Wharton C.L. GAT they don't teach you in mining school – tips and tricks with pit optimizers, Whittle Programming Pty Ltd, Melbourne Australia 1996.
75. Whittle Jeff and Rozman L. Open Pit Design in 90s. Mining Industry Optimization Conference, Sydney 5-6 June 1991.
76. Whittle Jeff. Open Pit Optimization extract from Surface mining 2nd edition. Mining Metallurgy and Exploration U.S.A, Whittle Programming Pty Ltd, Melbourne Australia 1990.
77. Willian C. Peters. Exploration and Mining Geology, New York, Department of Mining and Geological Engineering, University Of Arizona John Wiley & Sons. 1977.
78. Wooller Richard. Cut-off grades beyond the mine-optimizing Mill throughput. Conference Proceedings -STRATEGIC MINE PLANING Third bienal Conference-, 23 – 24 march 1999, Hyatt regency Perth Western Australia.