

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

“Estimación de Reservas Minerales y Propuesta de Diseño Preliminar de Explotación del Bloque 2 del sector “X7” Mina LAS PARALELAS utilizando herramientas informáticas”.

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA DE MINAS**

Presentada por:

Virginia Fernanda Velarde Vargas

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme salud y permitirme lograr todas mis metas.

A mi Madre, por enseñarme que el ser fuerte es cuestión de decisión, y por darme palabras de aliento en los momentos difíciles. Ella quien es mi motor y las palabras no me alcanzan para agradecerle.

A mi hermana, mi mejor amiga, quién está conmigo en todo momento.

A mi padre, del cual nunca me faltaron sus consejos para guiarme en mi formación profesional y desarrollo personal.

A mi familia, por su amor y cariño.

A la ESPOL, y a los profesores que contribuyeron a mi desarrollo profesional.

A mis amigos que hicieron de esta etapa la más gratificante de todas y en especial a Roberto N. por su apoyo incondicional.

Agradezco infinitamente al Ing. Yhonny Ruiz Dioses, por haberme brindado su tiempo para despejar todas mis dudas en cuanto al manejo del software RecMin, al Dr. César Castañón Fernández desarrollador del Software RecMin por su increíble aporte a la sociedad minera.

## **DEDICATORIA**

Dedico de manera especial este trabajo a mi madre, mujer luchadora y fuerte, a la que admiro mucho, y me enseñó que puedo lograr todo lo que me proponga.

# TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....  
**Ph.D. Richard Banda Gavilanes**

PROFESOR EVALUADOR

.....  
**MSc. Juan Carlos Pindo Macas**

PROFESOR EVALUADOR

.....  
**Ph.D. Paúl Carrión Mero**

PROFESOR EVALUADOR

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

---

Virginia Velarde Vargas

## RESUMEN

La estimación de los recursos constituye una de las etapas más importantes a la hora de evaluar un depósito mineral, es un proceso que determina en gran medida el valor industrial y la viabilidad del proyecto, el mismo que requiere alto grado de precisión y responsabilidad.

La compañía Agrícola Minera AGRIMROC S.A desarrolla las actividades de exploración, explotación y refinación de oro en la Mina LAS PARALELAS, sin realizar previamente una valoración de los bloques de explotación, generando incertidumbre sobre el depósito y la inadecuada planificación de las labores mineras.

Motivo por el cual, la presente investigación se enfoca en estimar las reservas mineras del bloque 2 del sector "X7" de la mina LAS PARALELAS de la compañía Agrícola Minera AGRIMROC S.A. ubicada en la provincia del Azuay, cantón Camilo Ponce Enríquez vía San Gerardo, y proponer un sistema de explotación en función de las características geométricas y geomecánicas del yacimiento empleando herramientas informáticas, con la finalidad de contar con una mejor organización de los trabajos.

Dicho estudio empezó con el levantamiento topográfico del sector y una campaña de muestreo, en la cual se recolectó un total de 36 muestras en el frontón derecho del sector "X7" en una galería de avance de 110 metros aproximadamente, se registraron los datos de la potencia de la veta que

oscilan entre 0.10 y 0.80 metros con un buzamiento promedio de 33° y azimut 197°.

La información obtenida en la campaña de muestreo fue validada mediante técnicas estadísticas que permitieron determinar la distribución de las leyes de Au y posteriormente analizar el comportamiento que estas presentan para obtener la capa o superficie de la veta que facilite la creación del modelo de bloques utilizando el método pentaédrico exclusivo del software RecMin ideal para cuerpos vetiformes, desarrollado por el Dr. César Castañón y como difusor del método el Ing. Yhonny Ruiz.

Este método permite no solo estimar las leyes de Au sino también la potencia de la veta, lo que facilita el obtener fácilmente las reservas del bloque de explotación mediante el método de inverso a la distancia, dicho tonelaje se estimó en 6,658 t de reservas totales, de las cuales 1,426.95 t corresponden a las reservas probadas, esta cantidad fue categorizada en función del alcance máximo del semivariograma que se basa en la certeza de continuidad del mineral en ese tramo.

Posteriormente se procedió a modelar las labores mineras de acceso con las que cuenta la empresa hasta el momento y desarrollar las labores finales del bloque en explotación.

Dicho estudio no sólo beneficia a la empresa en mención sino también intenta demostrar a las universidades y empresa públicas o privadas que existen herramientas informáticas que pueden contribuir significativamente a la

planificación y diseño de explotación de las labores mineras sin necesidad de comprar licencias que requieran de una alta inversión económica.

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL .....	VII
ABREVIATURAS .....	X
SIMBOLOGÍA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	XVIII
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1. Datos generales del Yacimiento. ....	1
1.1.1. Ubicación del Proyecto.....	1
1.2. Planteamiento y Definición del Problema .....	2
1.3. Justificación e Importancia.....	4
1.4. Hipótesis.....	5
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General .....	5
1.5.2. Objetivos Específicos .....	5
1.6. Metodología Empleada .....	6
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>9</b>
<b>2. MARCO GEOLÓGICO.....</b>	<b>9</b>
2.1. Geología Regional .....	9
2.1.1. Litoestratigrafía.....	9
2.2. Geología Local.....	13
2.2.1. Mineralización y Alteración.....	13
2.2.2. Paragénesis .....	14
2.2.3. Geología Estructural.....	15
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>17</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>

3.1.	Métodos para la estimación de reservas. ....	17
3.1.1.	Método de los perfiles o cortes .....	18
3.1.2.	Método de los triángulos .....	19
3.1.3.	Método de los polígonos .....	20
3.1.4.	Método de las Matrices de Bloques .....	22
3.1.5.	Método de los contornos .....	23
3.1.6.	Método del inverso a la distancia .....	24
3.2.	Técnica Geoestadística para la estimación de reservas mineras. ...	25
3.3.	Aplicaciones de la Informática a la Estimación de Recursos. ....	26
3.3.1.	Software Comerciales .....	26
3.3.2.	Softwares Libres.....	33
3.3.3.	Comparaciones entre los Software Comerciales y Libres. ....	36
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>39</b>
<b>4. ESTIMACIÓN DE RESERVAS MINERAS DEL BLOQUE 2 SECTOR</b>		
<b>“X7” .....</b>		<b>39</b>
4.1.	Recolección y Tratamiento de Datos Topográficos. ....	39
4.2.	Diseño de la campaña de muestreo. ....	39
4.2.1.	Densidad y Tamaño de la Muestra (Peso). ....	41
4.2.2.	Preparación de la muestra. ....	43
4.3.	Tipos de Modelamiento Geológicos.....	45
4.4.	Metodología para el Modelamiento del cuerpo mineral. ....	46
4.4.1.	Creación del Base de Datos para los sondeos. ....	47
4.4.2.	Despliegue de los sondeos. ....	50
4.4.3.	Creación de las secciones .....	50
4.4.4.	Triangulación del Cuerpo Mineral.....	52
4.4.5.	Verificación de los sondeos (datos de muestras). ....	53
4.5.	Análisis Exploratorio de los datos de muestras. ....	54
4.5.1.	Compósitos de los sondeos .....	54
4.5.2.	Método Estadístico para la Determinación de la Ley Media.....	55
4.6.	Análisis Variográfico de los datos .....	59
4.6.1.	Construcción del Semivariograma con SGeMS. ....	62

4.7.	Modelo de Bloques con RecMin. ....	66
4.7.1.	Generación de la tabla de bloques.....	66
4.7.2.	Creación del Modelo de Bloques del cuerpo mineral. ....	67
4.8.	Alternativa para el modelamiento de cuerpos vetiformes angostos. ....	71
4.8.1.	Método pentaédrico para cuerpos vetiformes angostos.....	72
4.9.	Modelamiento del Cuerpo Mineralizado del Bloque 2 del Sector “X7” de la Mina LAS PARALELAS. ....	76
4.10.	Categorización de las reservas del bloque de explotación.....	86
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>90</b>
<b>5. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL BLOQUE 2 DEL SECTOR X7 .....</b>		<b>90</b>
5.1.	Método de Explotación Subterráneo.....	90
5.1.1.	Metodología de selección del método de explotación .....	90
5.1.2.	Selección del Método de Explotación del Bloque 2 Sector “X7” Mina LAS PARALELAS.....	94
5.2.	Labores de destape en el Bloque 2 del Sector “X7”. ....	98
5.3.	Diseño Preliminar de las Labores del Bloque 2 Sector “X7”. ....	100
5.4.	Cálculo de la Productividad del Bloque 2 del Sector “X7” .....	101
5.5.	Estimación de los Costos del Proyecto (Presupuesto General).....	102
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>104</b>
	Conclusiones .....	104
	Recomendaciones .....	108

## **ABREVIATURAS**

Au

Oro

Bz

Buzamiento

MAPE

Minería Artesanal y de Pequeña Escala

3D

Tres Dimensiones

S.A.

Sociedad Anónima

PIB

Producto Interno Bruto

RQD

Rock Quality Designation

## SIMBOLOGÍA

g	Gramos
kg	Kilogramos
t	Toneladas
ha	Hectáreas
m	Metros
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
oz	Onzas
\$	Dólares Americanos
Moz	Millones de onzas
°	Grados Decimales
>	Mayor que

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Mapa de concesiones colindantes a la concesión LAS PARALELAS.....	2
Figura 1. 2: Esquema Metodológico para la Fase I, Fase II y Fase III. ....	8
Figura 2. 1: Mapa Geológico Regional del Campo Minero San Gerardo .....	12
Figura 3. 1: Determinación del volumen de depósito mineral por secciones	19
Figura 3. 2: Aplicación del Método de Triángulos para estimar las reservas.	20
Figura 3. 3: Influencia del diseño de los triángulos en el cálculo de la ley media para cada triángulo. ....	21
Figura 3. 4: Construcción de polígonos por (a) mediatrices de las interconexiones y (b) por la bisectriz de un ángulo. ....	22
Figura 3. 5: Método de las matrices de bloques. ....	23
Figura 3. 6: Aplicación del método del inverso a la distancia para estimar reservas minerales.....	25
Figura 3. 7: Modelo geológico con GEMS/GEOVIA.....	27
Figura 3. 8: Modelo Geológico con Vulcan 9 / Maptek. ....	28
Figura 3. 9: Modelo de Bloques con Vulcan 9.1.....	29
Figura 3. 10: Modelo de Bloques con MineSight.....	30
Figura 3. 11: Modelamiento Geológico con Datamine 3D.....	31
Figura 3. 12: Modelamiento Geológico en 3D con Leapfrog.....	33
Figura 3. 13: Modelamiento de cuerpos vetiformes utilizando el método pentaédrico exclusivo de RecMin. ....	34
Figura 3. 14: Estimación de las leyes con Kriging utilizando SGeMS .....	35
Figura 4. 1: Aspectos a considerar para el Muestreo de Minerales. ....	40
Figura 4. 2: Ejemplos de ranurado en el frente de una galería. ....	41
Figura 4. 3: Muestreo y Cuarteo de las muestras de mineral en campo.....	43
Figura 4. 4: Vista en el Plano ZN del despliegue de las muestras (sondeos). ....	50

Figura 4. 5: Creación de la sección 1 en el plano ZN. ....	51
Figura 4. 6: Profundidad de los sondeos y resultado final de la creación de la sección 1 en el plano ZN. ....	51
Figura 4. 7: Vista isométrica de la sección proyectada a una distancia de 60 metros con buzamiento de 33°. ....	52
Figura 4. 8: Vista en Planta (ZE) del sólido generado a partir de las dos secciones (muestreo original y sección proyectada a 50 metros).....	53
Figura 4. 9: Vista isométrica del cuerpo mineral generado a partir de las dos secciones (muestreo original y sección proyectada).....	53
Figura 4. 10: Informe de verificación de los sondeos.....	54
Figura 4. 11: Regularización de un sondaje a lo largo de una constante “a”. 54	
Figura 4. 12: Histograma de Frecuencias para los compósitos de leyes de Au (gr/t). ....	57
Figura 4. 13: Gráfica de Probabilidad (Método de la recta de Henri) para confirmar la distribución normal de los datos.....	58
Figura 4. 14: (a) Ejemplos de modelos de semivariogramas. (b) Componentes principales de un semivariograma. ....	61
Figura 4. 15: Interfaz de la herramienta “Data Analysis - Variogram” incluido en el software geoestadístico SGeMS. ....	62
Figura 4. 16: Parámetros a definir para el modelamiento del semivariograma. (a) Tolerancia del Desfase y Separación del Desfase. (b) Tolerancia angular en función del azimut y bandwidth.....	63
Figura 4. 17: Ajuste del semivariograma unidireccional con un modelo esférico a partir del programa SGeMS. ....	64
Figura 4. 18: Modelo Esférico en función de la distancia.....	65
Figura 4. 19: Opciones del modelado del semivariograma para el análisis geoestadístico de los valores de leyes de Au (g/t). ....	66
Figura 4. 20: Vista en 3D del paralelepípedo a partir de la creación del Bloque. ....	69

Figura 4. 21: Modelo de Bloques discretizado en función del cuerpo mineralizado.....	69
Figura 4. 22: Ejemplo del Modelo de Bloques de un Batolito.....	70
Figura 4. 23: Unidad de Cálculo del Método Pentaédrico.....	72
Figura 4. 24: Definir la superficie en el centro de la capa (Capa base).....	73
Figura 4. 25: Malla de puntos sobre la superficie base (a) T3 original con la malla de puntos (b) T3 creado a partir de la malla de puntos. ....	73
Figura 4. 26: Interfaz del software RecMin con la herramienta “Cálculo de Intersecciones y capas”. ....	74
Figura 4. 27: Estudio geoestadístico para interpolación de leyes y potencias. (a) Vista en Planta (NE) del elipsoide de búsqueda a través de la malla de puntos. (b) Vista isométrica del elipsoide.....	74
Figura 4. 28: Capa o Superficie Base que intercepta los sondeos mostrando la interpolación de las leyes.....	75
Figura 4. 29: Vista en Planta de los resultados de la interpolación de valores de Leyes y Potencia.....	75
Figura 4. 30: Vista ZN de la creación de secciones que intercepten el centro de los sondeos.....	76
Figura 4. 31: Vista isométrica de la capa base (T3 sólido) de la zona mineralizada de la veta del Bloque 2 del Frontón Derecho Sector “X7”.....	77
Figura 4. 32: Triangulación de la capa base de la zona mineralizada. ....	77
Figura 4. 33: Vista en Planta de la Triangulación de la capa base utilizando el método pentaédrico a partir de los parámetros definidos en la Tabla T3. ....	78
Figura 4. 34: Vista isométrica con cara sólida del cuerpo mineralizado en la que se pueden observar la generación de secciones paralelas cada 3 metros. ....	78
Figura 4. 35: Vista isométrica de la Triangulación con los sondeos realizados. ....	79
Figura 4. 36: Ejemplo del Parámetro de Dilución Lateral por Sobreexplotación. ....	81

Figura 4. 37: Ejemplo del Criterio de “Máxima Potencia de estéril” definido en el programa RecMin.....	82
Figura 4. 38: Modelamiento del cuerpo mineral por categoría Potencia Geológica.....	84
Figura 4. 39: Modelamiento del cuerpo mineral por categoría Potencia Minera. ....	84
Figura 4. 40: Categorización de las Reservas Mineras según el Código JORC. ....	86
Figura 4. 41: Recorte de la cama mineral a una distancia de 6 metros a partir de la galería principal.....	88
Figura 4. 42: Vista Isométrica de la capa de mineral de las reservas probadas del Bloque 2 del Sector “X7” . ....	89
Figura 5. 1: Características Geométricas del Cuerpo Mineralizado. ....	95
Figura 5. 2: Labores Subterráneas de la Mina LAS PARALELAS Sector “X7”. ....	98
Figura 5. 3: Vista Isométrica de la Labores Subterráneas Actuales de la Mina LAS PARALELAS Sector “X7” . ....	99
Figura 5. 4: Vista Isométrica de la Labores Finales de la Mina LAS PARALELAS Sector “X7” . ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Características de la mineralización en el campo minero San Gerardo - Sector LAS PARALELAS.....	13
Tabla II: Descripción detallada de los sistemas de vetas principales en el campo minero San Gerardo – Sector LAS PARALELAS.....	14
Tabla III: Paragénesis en base de los minerales de ganga en varios sectores del campo minero San Gerardo – LAS PARALELAS.....	15
Tabla IV: Comparaciones técnicas entre un software comercial y un software libre.....	37
Tabla V: Funcionalidad del Software Comercial vs Software Libre. ....	38
Tabla VI: Espaciado de las muestras en función del Tipo de Yacimiento y Distribución del Mineral.....	42
Tabla VII: Cantidad de muestra en función del coeficiente de variación.....	42
Tabla VIII: Asociaciones Mineralógicas identificadas en el Bloque 2, Frontón Derecho del sector “X7”.....	44
Tabla IX: Resultados de las muestras recolectados en campo. ....	44
Tabla X: Tabla collar de los Puntos de Muestreo.....	47
Tabla XI: Tabla Survey o Dirección de los Puntos de Muestreo.....	47
Tabla XII: Tabla de Asociación Mineralógica de los Puntos de Muestreo. ....	49
Tabla XIII: Tabla Assay de los Puntos de Muestreo.....	49
Tabla XIV: Tabla Zona de Intersección de los Puntos de Muestreo. ....	50
Tabla XV: Tabla Collar de los Puntos Propyectados.....	51
Tabla XVI: Estadística descriptiva del análisis exploratorio de leyes de Au (g/t). ....	56
Tabla XVII: Parámetros definidos para el modelamiento del semivariograma experimental. ....	62
Tabla XVIII: Parámetros del modelado de semivariograma teórico obtenidos con ArcGIS 10.1.....	66
Tabla XIX: Variables a definir para generación de la Tabla de Bloques. ....	67
Tabla XX: Características del Modelo de Bloques para la veta.....	68
Tabla XXI: Coordenadas del punto de origen del Bloque.....	69
Tabla XXII: Parámetros para la generación de los pentaedros. ....	79

Tabla XXIII: Reporte de las Reservas Totales del Bloque 2 del Sector “X7” mina LAS PARALELAS.....	85
Tabla XXIV: Reporte de las Reservas Probadas de la Capa Mineral. ....	89
Tabla XXV: Definición de la geometría y distribución de leyes del yacimiento. ....	92
Tabla XXVI: Clasificación de las características geomecánicas de las rocas. ....	92
Tabla XXVII: Valoración de la geometría y distribución de leyes para diferentes métodos de explotación. ....	93
Tabla XXVIII: Valoración de las propiedades geomecánicas para diferentes métodos de explotación. ....	93
Tabla XXIX: Características Geométricas del Cuerpo Mineralizado. ....	94
Tabla XXX: Características geomecánicas del macizo rocoso en el depósito. ....	95
Tabla XXXI: Estimación de la resistencia sustancial de las rocas. ....	96
Tabla XXXII: Clasificación del yacimiento para la selección del método de explotación según Nicholas, D. (1981). ....	97
Tabla XXXIII: Valoración de métodos de explotación según las condiciones propias del yacimiento. ....	97
Tabla XXXIV: Descripción del sistema de explotación de la Mina LAS PARALELAS Sector “X7”. ....	101
Tabla XXXV: Costos Generales para la estimación de reservas minerales del Bloque 2. ....	103

## INTRODUCCIÓN

La minería ha evolucionado con el pasar del tiempo y sobre todo en Ecuador se pueden evidenciar cambios significativos, empezando por una reestructuración de las leyes e instituciones reguladoras, lo que conlleva a que las empresas mineras adquieran mucho más responsabilidad social y ambiental a la hora de explotar los recursos.

Según un artículo de la Revista Líderes, apenas entre un 5% y 10% del territorio ecuatoriano se lleva explorado, convirtiéndolo en un país atractivo para los inversionistas mineros que se dedican a la exploración geológica.

La minería subterránea en el Ecuador se desarrolla artesanalmente y a pequeña escala. Actualmente, la minería en el Ecuador contribuye al cambio de la matriz productiva, este sector representa una fuente importante de recursos para el desarrollo de la nación, además de contribuir con la generación de empleo, factor por el desarrollo local y regional equilibrado, por lo que para las autoridades es un tema de alto interés.

La Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) juega un rol esencial en la mitigación de la pobreza en muchas regiones rurales en desarrollo, principalmente porque son viables en áreas con una infraestructura mínima en las que otras industrias no podrían funcionar. Estas organizaciones requieren el asesoramiento técnico en los procesos de extracción, transporte, beneficio mineral y comercialización del mineral. En Ecuador, si bien el aporte al PIB

nacional es bajo, es una de las actividades que más impacto tienen en la generación de empleo en comparación con la Minería a Gran Escala.

Si bien es cierto, estamos lejos de que la minería a Pequeña Escala en Ecuador se tecnifique porque conlleva altos costos de inversión, sin embargo, no se descarta que poco a poco se den cambios en beneficios del país como por ejemplo, la puesta en marcha de los Megaproyectos Mineros en el país, por lo que se necesitará de la mejor tecnología para ponerla a disposición de esta industria, por tanto que uno de los mayores retos de la minería es la estimación de los recursos mineros con razonable precisión tanto en la cantidad como en la calidad del mineral, para lo cual se requiere el modelamiento y simulación de los sistemas de explotación minera a gran escala a nivel subterráneo y cielo abierto, previo a las fuertes inversiones en las fases de desarrollo.

Dado el alto precio en el que se cotiza el oro y su alta demanda, las empresas grandes no escatiman recursos para implementar toda la tecnología posible, que a la hora de su uso les resulte rápido y eficiente para lograr los objetivos planteados con buenos resultados.

Las herramientas informáticas plantean una solución viable para disminuir la incertidumbre, además sintetizan en tiempo las actividades que se desarrollan en casi todas las etapas en una mina, desde la prospección geológica hasta el diseño, programación y explotación del yacimiento, asimismo facilita cálculos

muy complejos, permite la visualización en 3D de las gráficas, y fundamentalmente ayuda a la toma de decisiones, que para esta industria, es de elevado costo de inversión, periodo largos de retorno financiero y gran riesgo.

La adquisición por parte de las empresas pequeñas nacionales de software mineros resulta un problema debido al elevado costo de licencia (decenas de miles de dólares) que estos poseen, ya que las empresas cuentan con presupuestos limitados por sus bajos recursos financieros, lo que los obliga prácticamente a continuar aplicando técnicas básicas u ordinarias empleadas por años para seguir logrando las metas propuestas, tales como evaluación de reservas para la explotación de un depósito minera.

Sin embargo, en la actualidad existen softwares mineros de dominio público que se ajustan perfectamente a las necesidades de la industria minera de Pequeña Escala que se desarrolla en el país, para mejorar sus procesos de exploración y explotación de recursos. Por ello, resulta necesario manifestar que existen herramientas informáticas con las que se puede solucionar problemas como la estimación de recursos y diseño de explotación.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. Datos generales del Yacimiento.**

AGRIMROC S.A., es una empresa agrícola y minera que tiene como actividad principal la exploración y explotación aurífera; el propósito es generar ingresos y beneficios de forma responsable para los accionistas, trabajadores, comunidades y el país en general.

La gestión de la organización se orienta a marcar la diferencia positiva considerando el personal como el recurso más valioso, es por ello que su protección, seguridad y salud son prioridad dentro de la organización.

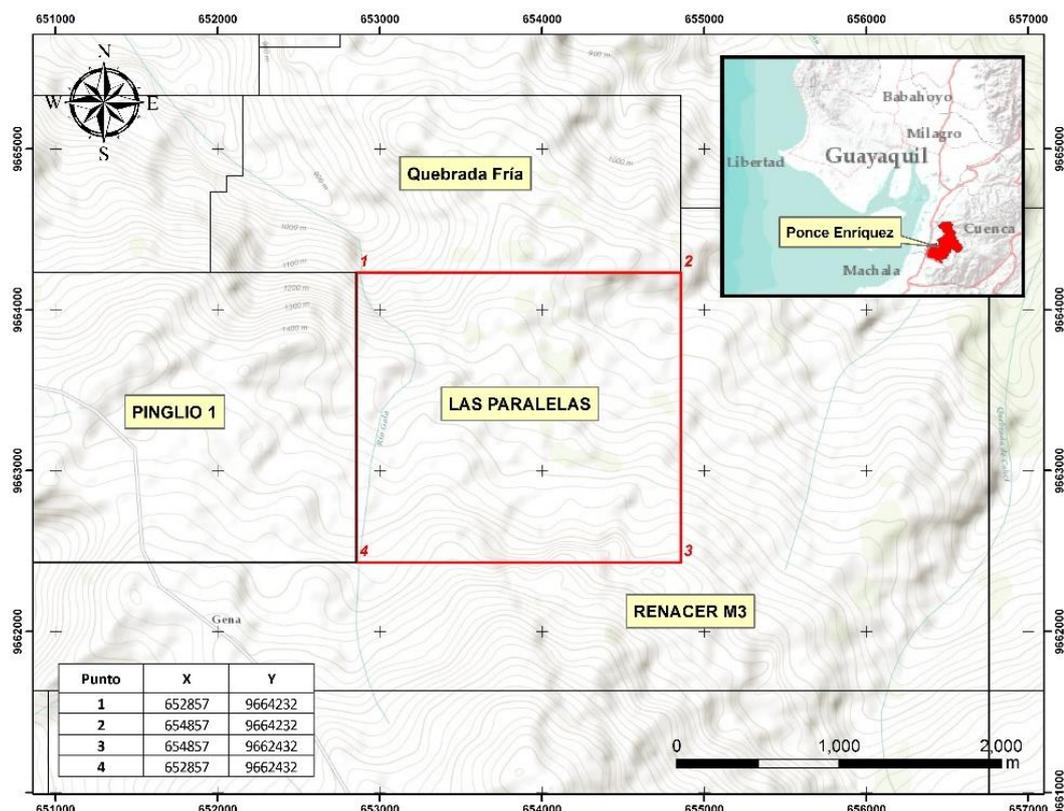
La concesión minera LAS PARALELAS tiene una superficie de 360 ha, y la superficie declarada en producción es de 127 ha mineras contiguas.

#### **1.1.1. Ubicación del Proyecto**

La concesión minera LAS PARALELAS Código: 462 se ubica al oriente de la Cordillera Occidental, en la parte Suroccidental de la Provincia

del Azuay, en el cantón Camilo Ponce Enríquez vía a San Gerardo Sitio San Antonio. El **Anexo A** presenta un Mapa Base de la Zona de Estudio.

Colinda al Norte con las concesiones Quebrada Fría y Papercorp, al Sur y al Este con la concesión Renacer M3, y al Oeste con la concesión Pinglio 1.



**Figura 1. 1:** Mapa de concesiones colindantes a la concesión LAS PARALELAS

(Fuente: ARCOM, 2012).

## 1.2. Planteamiento y Definición del Problema

El integrar herramientas informáticas al momento de estimar las reservas minerales mediante la modelización geológica y posteriormente el empleo de modelos numéricos es una tarea que la realizan, en la actualidad,

todas las empresas mineras, con la finalidad de obtener mayor precisión y certeza a la hora de evaluar un yacimiento, y determinar su viabilidad.

Por ello, las grandes empresas no escatiman recursos para poner a disposición los mejores softwares mineros y certificados de la industria, pero las pequeñas empresas que no cuentan con un capital fuerte de inversión, por lo que, se deben buscar alternativas viables como el empleo de softwares mineros de dominio público, que integran todas las herramientas necesarias capaces de realizar un buen modelamiento del área de estudio y obtener los mismos resultados que con un software comercial certificado.

Una de las falencias de la empresa minera AGRIMROC S.A es no efectuar una estimación de reservas probables previo a la extracción del mineral, es decir no realiza una valoración de los bloques de explotación, ya que en toda explotación de minerales es necesario construir galerías de acceso para acceder al depósito, que por lo general suele extenderse por la roca de caja (material estéril) para rodear a la veta o cuerpo mineralizado en el bloque de explotación, proceso que se denomina en la industria minera como “cerrar bloque”, lo que impide llevar un control del tonelaje de mineral útil, además de correr el riesgo de obtener bajas recuperaciones por no seleccionar un método de explotación acorde al yacimiento afectando significativamente los rendimientos financieros de la empresa. Dada esta problemática es necesario plantearse la siguiente pregunta:

¿El empleo de herramientas informáticas facilitará el modelamiento del cuerpo mineral en los bloques de explotación de tal manera que permita la estimación de reservas de la mina LAS PARALELAS proporcionando una adecuada planificación de las labores?

### **1.3. Justificación e Importancia**

La explotación de un yacimiento minero corresponde a un proyecto que demanda una fuerte inversión y costos operativos con la potencialidad de generar grandes ingresos, pero al mismo tiempo involucra un notable riesgo en la gran fluctuación y variabilidad del mercado de minerales.

El precio del oro presenta un comportamiento muy variable pero periódico, realizando un análisis a mediano y largo plazo muestra una tendencia baja. En lo que abarca del año 2016, el precio del oro se ha incrementado hasta llegar a un máximo 1340 \$/oz. Esta estabilidad a corto plazo reduce el riesgo de la variabilidad del precio para los modelos económicos de decisión a emplear en la evaluación de alternativas del proyecto y para el uso de técnicas aún más eficientes para el desarrollo de las actividades mineras.

El Área Minera LAS PARALELAS, cuenta con un yacimiento polimetálico en la que el mineral de interés es el oro, por su alto valor económico en comparación con el resto de minerales. Sin embargo, existen altas concentraciones de plata, cobre, entre otros, razón por la cual resulta necesario evaluar las reservas de Au del cuerpo mineralizado y efectuar un diseño preliminar del sistema de

explotación que cumpla con las normas técnicas, legales y ambientales vigentes.

Por este motivo, el presente trabajo pretende realizar el estudio técnico de la estimación de reservas probadas y probables del Bloque 2 del Sector "X7" de la mina LAS PARALELAS y el diseño de un sistema de explotación acorde a las características del yacimiento bajo condiciones que garanticen la seguridad de los trabajadores.

#### **1.4. Hipótesis**

El empleo de softwares mineros de dominio público permite una solución informática para la estimación de reservas minerales y la planificación de las labores mineras del Bloque 2 del sector "X7" de la mina LAS PARALELAS.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo General**

- Estimar las reservas mineras y proponer el diseño preliminar de explotación del Bloque 2 del Sector "X7" Mina LAS PARALELAS utilizando herramientas informáticas.

##### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar las reservas del bloque de explotación mediante un método geométrico con herramientas informáticas para la valoración del depósito mineral.

- Proponer el diseño preliminar del sistema de explotación del bloque que mejor se ajuste al modelo de yacimiento para la adecuada planificación de las labores mineras.
- Establecer las ventajas de la utilización de herramientas informáticas para la industria minera de Pequeña Escala.

### **1.6. Metodología Empleada**

La metodología de trabajo se compone de tres fases o etapas (Figura 1.1):

#### **Fase I: Caracterización y Levantamiento de la Línea Base del Proyecto.**

Conciernen a la recopilación y caracterización de factores asociados a la ubicación geográfica del proyecto: topografía, geología del yacimiento: geología regional y local, mineralización y campaña de muestreo en la zona de estudio.

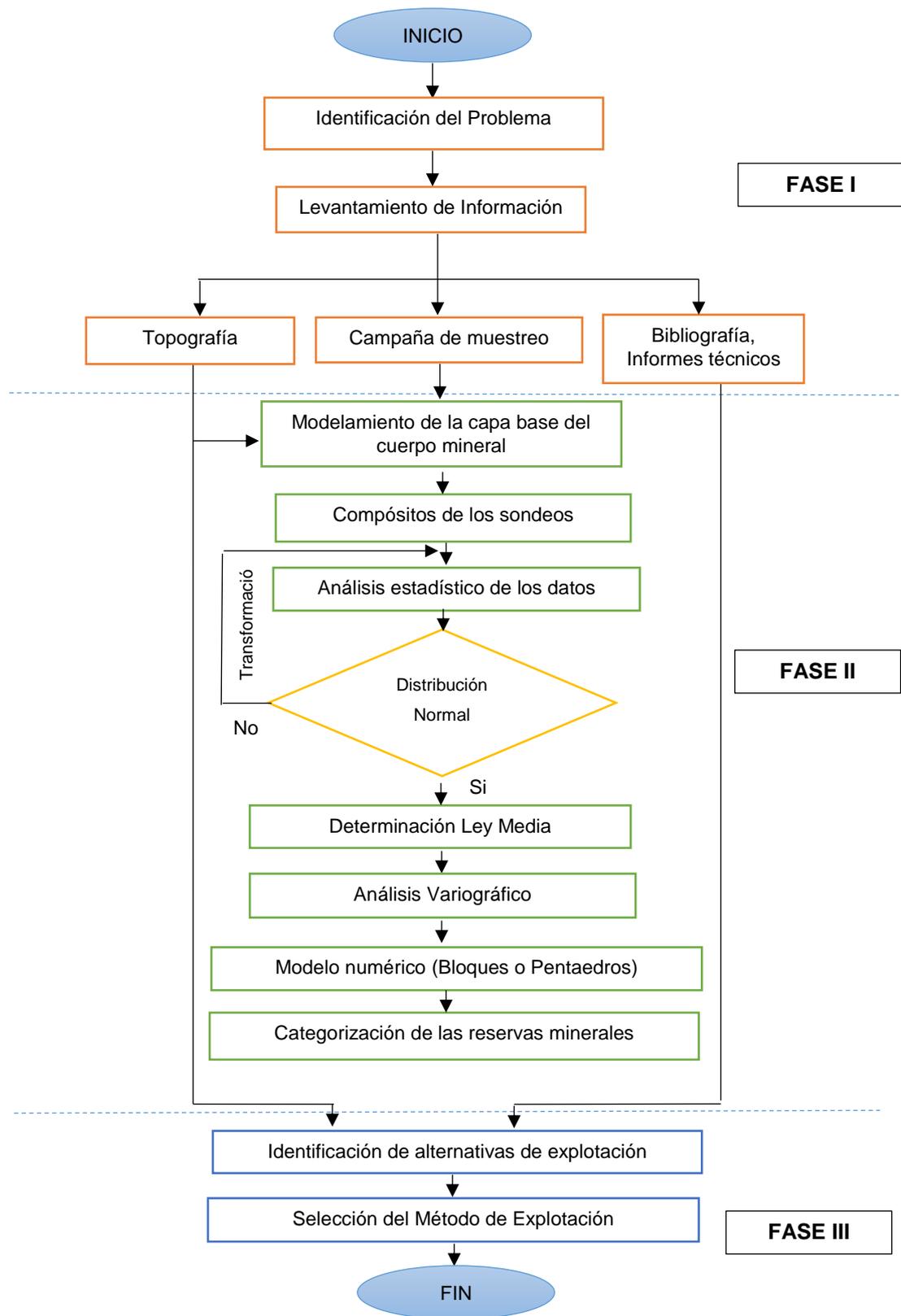
#### **Fase II: Modelamiento del cuerpo mineral y Categorización de las Reservas Minerales.**

Corresponde a la creación de las secciones del cuerpo mineral para el modelamiento, y posteriormente realizar un análisis de la distribución de los datos y determinación de la ley de Au en ese sector, luego se construye el semivariograma experimental para ajustarlo a un modelo teórico y se elabora el modelo numérico (pentaedros), estimación de las leyes y potencia de la veta,

por último, se realiza el análisis y revisión de la estimación, para categorizar las reservas mineras.

**Fase III: Identificación de alternativas de explotación.**

Consiste en la identificación de métodos para la explotación del Bloque 2 del sector "X7" de la mina LAS PARALELAS en base a criterios técnicos que se ajusten a los parámetros y condiciones del depósito. Se considera la geometría del depósito, la distribución de las leyes y las condiciones geomecánicas.



**Figura 1. 2:** Esquema Metodológico para la Fase I, Fase II y Fase III.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. MARCO GEOLÓGICO**

### **2.1. Geología Regional**

#### **2.1.1. Litoestratigrafía**

El área de estudio se encuentra ubicada en el campo minero San Gerardo en la parte central - septentrional del campo mineral Ponce Enríquez. Las características de las unidades litológicas que se encuentran en esta área y sus cercanías, se presentan continuación:

#### **Rocas del Cretácico**

##### **Unidad Pallatanga - Formación Piñón (KP)**

(Albiano - Cenomaniano) Consiste esencialmente de una serie volcánica, aunque pequeños afloramientos de esta unidad pueden ser confundidos con rocas ígneas básicas. Los afloramientos más intensos ocurren a lo largo de la Cordillera Chongón – Colonche, si bien es característica de la región costera del Ecuador (Duque, 2000).

La porción baja consiste principalmente en flujos de diabasa fuertemente amigdaloidales. La parte alta presenta colores verdes claro, que comúnmente se relacionan con una moderada meteorización esferoidal finamente cristalina de porfirita ígnea básica con lutitas tobáceas ínter estratificadas de color gris a crema rojiza, toba y limolita silicificada (Núñez del Arco, 1987).

También se han observado tobas, capas delgadas de argilita y complejos de diques, pillow lavas, hialoclastitas y metabasaltos en facies prehnita - pumpellyita. Subyace a la Formación Cayo con un contacto variable que va de gradual a discordante angular. Su base no ha sido encontrada, por lo que se estima un espesor de al menos 2000 m (Duque, 2000).

Esta formación tiene la característica de ser una unidad sin interés hidrogeológico por poseer comportamiento acuífugo, es decir no permite ni almacenar ni transmitir agua (ESPOL, 2012). No obstante, esta formación puede presentar cierta permeabilidad de carácter local asociada a zonas con diferentes orientaciones de vetas, fisuras extensionales lenticulares, vetas de rotura sellada y de brechas, desarrollo de “stocks - works” entre vetas. Las zonas más extensas de mineralización aparecen asociados a los complejos dacíticos - riodalíticos de Don Ernesto y San Gerardo (Estupiñán, 2002).

## **Rocas del Cretáceo**

### **Unidad Macuchi**

Compuesta de una enorme y potente secuencia de volcánicos (lavas y volcanoclastos). La formación comprende areniscas volcánicas, limolitas, tobas turbidíticas redepositadas y lavas andesíticas, volcanoclásticos gruesos (brechas) y sedimentos clásticos de grano fino (lutitas). Las lavas varían de porfiríticas de grano fino, masivas a vesiculares o almohadillas; muchas son principalmente de origen marino. Las rocas de esta unidad son típicamente de color gris-verdoso, duras y compactas, con estratos volcanoclásticos duros de gran volumen (Núñez del Arco, 1987).

### **Grupo Angamarca**

Grupo conformado por las siguientes formaciones: Saquisilí, Apagua y Rumi Cruz, cuyas asociaciones de minerales pesados en general son dominadas por minerales de corteza continental, aunque al tope de la Formación Saquisilí (Miembro Gallo Rumi) y la Formación Apagua la cantidad de minerales de origen volcánico aumenta, lo que indica que durante la deposición de estas rocas existió una importante actividad volcánica (Vallejo, Winkler, Spikings, & Luzieux).

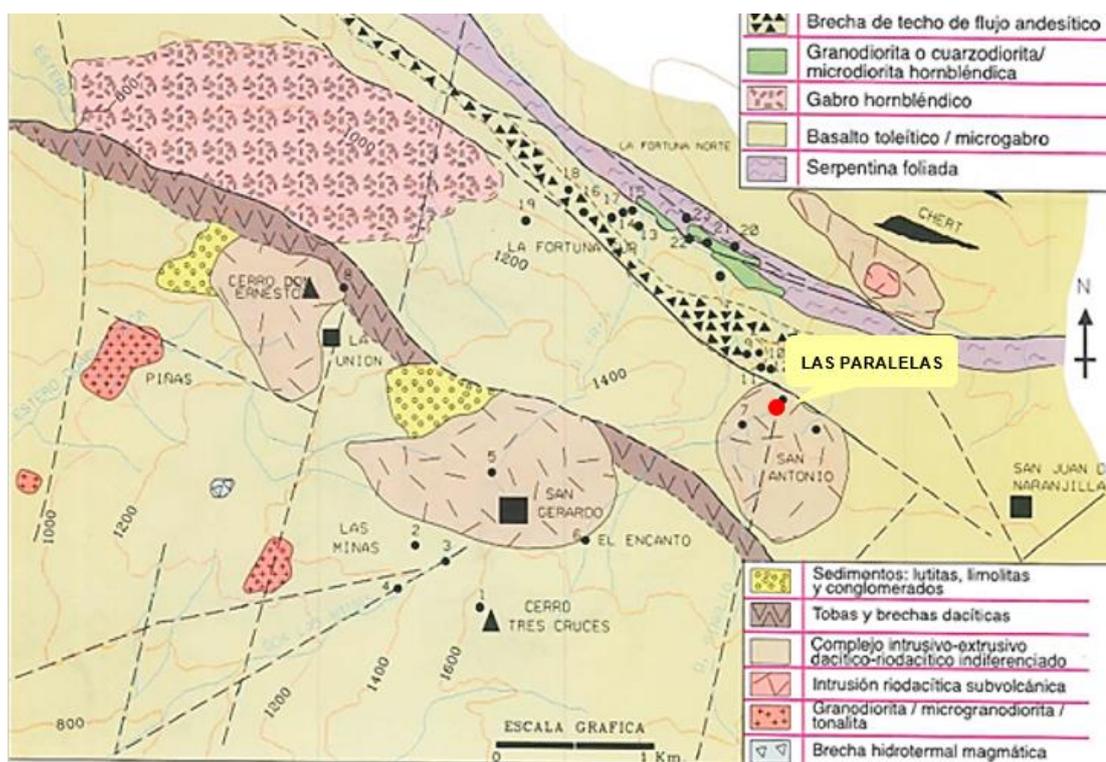
### **Rocas del Terciario**

#### **Grupo Saraguro**

Presenta una variada litología, formada por lavas y piroclastos de composición andesítica - dacítica e ignimbritas, siendo comunes los materiales riolíticos (Duque, 2000). Los piroclastos varían desde tobáceos de grano fino hasta

aglomerados. Este grupo cubre gran parte del sur de la Cordillera Occidental, por lo cual presenta una secuencia de rocas volcanoclásticas subaéreas, calc-alcalin, intermedias a ácidas, de edad Eoceno medio tardío a Mioceno temprano. El grupo descansa inconformemente sobre, o está fallado contra, la Unidad Pallatanga y rocas metamórficas.

Esta unidad presenta un comportamiento sin interés hidrogeológico ya que es considerada con baja permeabilidad, lo que significa que almacena muy poca agua o casi nada (ESPOL, 2012).



**Figura 2. 1:** Mapa Geológico Regional del Campo Minero San Gerardo

(Fuente: PRODEMİNCA, 2000).

## 2.2. Geología Local

### 2.2.1. Mineralización y Alteración

La mineralización aurífera del campo minero San Gerardo presenta zonas con diferentes orientaciones de vetas anastomosantes, fisuras extensionales lenticulares, vetas de rotura-sellado y brechas (Tabla 1). Se han desarrollado algunos “stockworks” entre las vetas y grupos de vetas poco espaciados.

Las vetas comprenden asociaciones de cuarzo – carbonato auríferas multifase de baja sulfuración. Los contenidos de sulfuros son típicamente menores que el 1% pero pueden llegar hasta el 15% y a formar vetillas semi - masivas (de escala mm - cm; <5cm) en todos los sectores de esta área minera (PRODEMINCA, 2000).

**Tabla I:** Características de la mineralización en el campo minero San Gerardo - Sector LAS PARALELAS

<b>Veta</b>	<b>Características de la mineralización</b>
LOUIS V	Vetas/vetillas subparalelas y anastomezados (zonas 1-2 m de espesor). Las vetas de cuarzo tienen la forma de ‘pinch & swell’ y en lentes (<50 cm de espesor). Localmente hay lentes y vetillas subhorizontales ligadas en la parte inferior de la veta. Textura mayormente laminada de rotura-sellada, aunque hay sectores de relleno de brecha y de espacios abiertos. Cuarzo primero y luego carbonato.
LOUIS V	
LOUIS V	
FLOR MARÍA	
GUAGUA INCA	
SOC DEL CISNE	

(Fuente: PRODEMINCA, 2000)

A continuación, en la Tabla II se detalla el sector de explotación LAS PARALELAS y del sistema de vetas.

**Tabla II:** Descripción detallada de los sistemas de vetas principales en el campo minero San Gerardo – Sector LAS PARALELAS.

Veta	Código	Ubicación	Elevación	Azimut	Buzamiento
LOUIS V	9 <sup>a</sup>	65334/966428	1168 m	NNW-SSE	40-57/229-297
LOUIS V	9b	65335/966430	1183 m	NNW-SSE	36-48/246-256
LOUIS V	9c	65343/966416	1228 m	NNW-SSE	52-60/232-260
FLOR MARÍA	10	65337/966425	1168 m	NNW-SSE	36-44/234-284
GUAGUA INCA	11	65339/966420	1220 m	N-S	32/273-298
SOC DEL CISNE	12	65352/966416	1236 m	NNW-SSE	30-44/234-260

(Fuente: PRODEMINCA, 2000)

El Sector Las Paralelas (o Pinglio) presenta una mineralización en la que las vetas-fallas tienen un rumbo NW-NNW expuestas a lo largo de la Quebrada Pinglio, sobre un rango vertical de 300 metros. La veta Louis V define el borde occidental del cinturón, y la veta Flor María junto con una rama más Norte (Guagua Inca), que curva al Oeste y corta oblicuamente la secuencia, forma el lado oriental. La veta Louis V está formada principalmente por dos vetas subparalelas (de ahí el nombre), compuesta por pantallas de roca encajante fuertemente silicificada con “stockwork” de vetillas de cuarzo, pirita y arsenopirita (PRODEMINCA, 2000).

### 2.2.2. Paragénesis

Según PRODEMINCA, 2000. En términos generales la paragénesis de la mineralización de San Gerardo fue dividida en tres estadios:

1. Carbonatización con deposición de pirita diseminada

2. Deposición de pirita, arsenopirita y oro durante el período de máxima actividad tectónica
3. Deposición post-deformación de pequeñas cantidades de pirita, esfalerita, calcopirita y galena.

Sin embargo, según estudios en el área revelan que el esquema anterior no es totalmente correcto, ya que demuestran que existen al menos tres estadios de deposición de minerales de ganga con un patrón general de cuarzo / sílice que se encuentra brechificado y seguido por cuarzo aurífero grueso y después de carbonatos, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla III:** Paragénesis en base de los minerales de ganga en varios sectores del campo minero San Gerardo – LAS PARALELAS.

<b>Sector del Campo Minero</b>	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>	<b>Fase 3</b>
<b>LAS PARALELAS</b>	<i>Cuarzo fino/ grueso +/- carbonato &amp; minerales opacos</i>	<i>Cuarzo grueso &amp; minerales opacos + Au</i>	<i>Vetas de carbonato</i>

*(Fuente: PRODEMINCA, 2000)*

Las Fases 2 y 3 son variables dependiendo de la deposición de una fase de carbonato grueso o la de cuarzo grueso. No obstante, en cada caso la mayoría del oro visible y los sulfuros de metales base están asociados con la fase deposicional de cuarzo grueso.(PRODEMINCA, 2000).

### **2.2.3. Geología Estructural**

De acuerdo a (PRODEMINCA, 2000), dentro del Campo Minero San Gerardo perteneciente al cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del

Azuay existen 4 orientaciones preferenciales de fallas, las cuales se describen a continuación:

- **Estructuras regionales de rumbo andino**

Representan los límites de terrenos litotectónicos mayores y constituyen el control principal de los patrones magmáticos, metalogénicos y sedimentarios. Las zonas de falla de rumbo andino o Cordillerano (NNE) de W son Pallatanga – Bulubulu, Girón y Baños.

- **Fallas transversales mayores de rumbo E-W y NW-SE**

Subdividen los terrenos en bloques caracterizados por diferentes niveles de erosión y en consecuencia determinan en gran medida la conservación de los sistemas de mineralización. Las fallas transversales importantes de dirección E-W incluyen los Sistemas de Fallas de Piñas - Portovelo y Jubones en el Terreno Chaucha y Río Margarita, Río Tenguel, Río Chico y Quebrada Peredones en el Terreno Pallatanga. Otras fracturas pasan a poca distancia al N del prospecto Boroen.

- **Estructuras subordinales**

Con dirección N-S, NE-SW Y NNE-SSE que frecuentemente controlan la mineralización. Sin embargo, después de un estudio realizado en la mina LAS PARALELAS se logran distinguir tres fallas principales: Roca de Oro, Apical y San Antonio, además de otras estructuras secundarias, que se detallan a continuación:

# CAPÍTULO 3

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1. Métodos para la estimación de reservas.

La estimación de las reservas de un yacimiento o de un bloque de explotación permite tener un mayor conocimiento de la zona de estudio, ya que define las toneladas de mineral útil presentes, así como también la morfología del yacimiento lo que posteriormente facilitará la elección de un método de explotación idóneo.

Existen dos métodos, de manera general, para estimar las reservas de un yacimiento los cuales son: métodos clásicos o geométricos y los métodos geoestadísticos.

Los primeros se basan en un proceso de cubicación, es decir, que se van a construir una o varias figuras geométricas en las que se va a estimar la cantidad de mineralización que existe dentro de ellas.

Los métodos clásicos más utilizados en la estimación de reservas de un yacimiento mineral son los siguientes:

- Método de perfiles o cortes
- Método de los polígonos
- Método de los triángulos
- Método de las matrices de bloques
- Método de los contornos
- Método del inverso a la distancia.

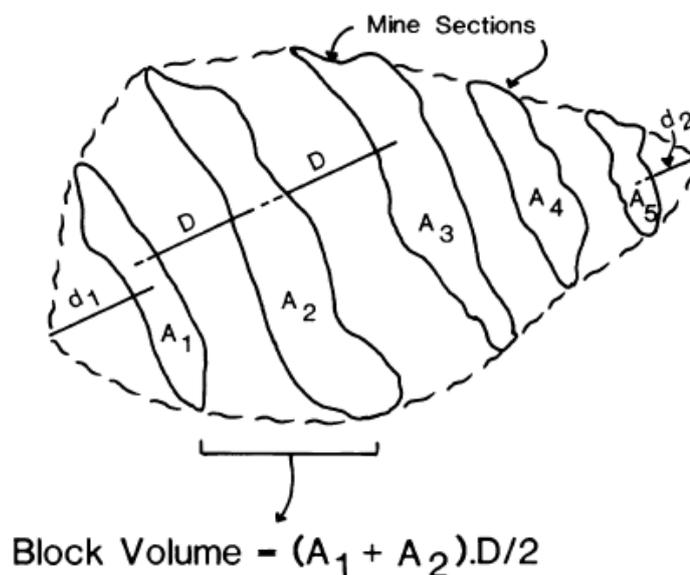
### **3.1.1. Método de los perfiles o cortes**

Según Bustillo & López, 1997, es el método más utilizado dentro del grupo de los métodos clásicos, junto con el de polígonos. Comúnmente se los emplea para cuerpos minerales irregulares evaluados a partir de campañas de sondeos, que facilitan la interpretación de los cuerpos geológicos estableciendo cortes, secciones o perfiles.

Básicamente, este método emplea la siguiente metodología:

- a) Cálculo del área mineralizada de cada sección
- b) Determinación de los volúmenes de los bloques
- c) Obtención de las reservas por bloques
- d) Determinación de las Reservas Totales

Sin embargo, una de las desventajas que presenta este método es que muchas veces los sondeos se encuentran en direcciones que no permiten establecer cortes, lo cual es un impedimento para realizar el cálculo del área mineralizada.



**Figura 3. 1:** Determinación del volumen de depósito mineral por secciones

(Fuente: Annels, 1991)

### 3.1.2. Método de los triángulos

Este método según Bustillo & López (1997), requiere de la proyección en un plano horizontal o vertical, de todas las intersecciones del cuerpo mineral, es por ello que debe tener una morfología más o menos tabular. Es un método útil para la fase de exploración, por su rapidez al ejecutarlo, además evita, en gran parte, los errores de sobreestimación que se pueden cometer en el método de los polígonos.

Consiste en unir geoméricamente los sondeos adyacentes para obtener el triángulo, de tal forma que el resultado final sea un conjunto de triángulos y que para cada uno se calculan los datos correspondientes de espesor y ley media, a la hora de formar los triángulos estos deben ser lo más cercano a  $60^\circ$  y evitar los ángulos agudos. El cálculo de reservas consiste en la determinación del área del triángulo, su espesor ponderado y su ley media.

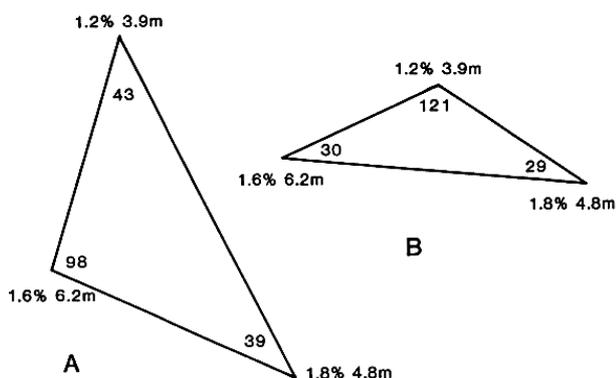


**Figura 3. 2:** Aplicación del Método de Triángulos para estimar las reservas.

*(Fuente: Annels, 1991)*

### 3.1.3. Método de los polígonos

Cuando la aplicación del método de los triángulos resulta inadecuada, ya que se obtienen triángulos con ángulos agudos, es decir, que no se obtiene una cuadrícula regular, como se puede observar en la siguiente figura, resulta mejor la aplicación del método del polígono ya que su base de cálculo es muy parecida (Annels, 1991).



**Figura 3. 3:** Influencia del diseño de los triángulos en el cálculo de la ley media para cada triángulo.

(Fuente: Annels, 1991)

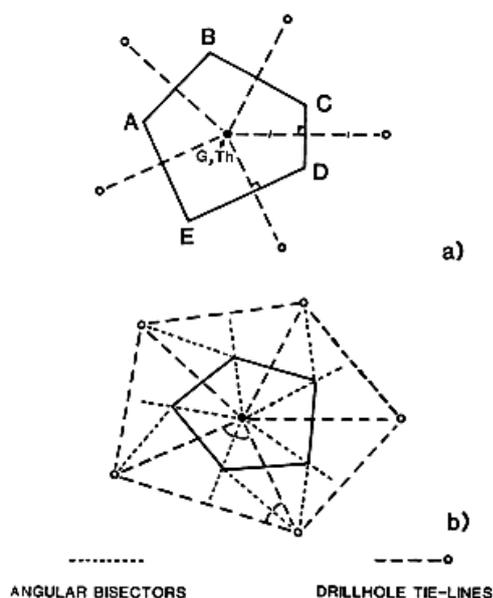
### Mediatrices Perpendiculares

Aquí mosaicos poligonales se establecen mediante la construcción de mediatrices en las interconexiones que une agujeros adyacentes al orificio bajo consideración.

El método se ilustra en la Figura 3.4 (a) en el que la ley del mineral,  $G$ , y el espesor,  $Th$ , se extrapolan al polígono ABCDE.

### Bisectriz de un ángulo

Aquí cada polígono se establece por perforaciones que se unen con las interconexiones y luego la construcción angular de las bisectrices entre estas líneas permite definir el centro del polígono, como se ilustra en la Figura 3.4 (b) (Annels, 1991).

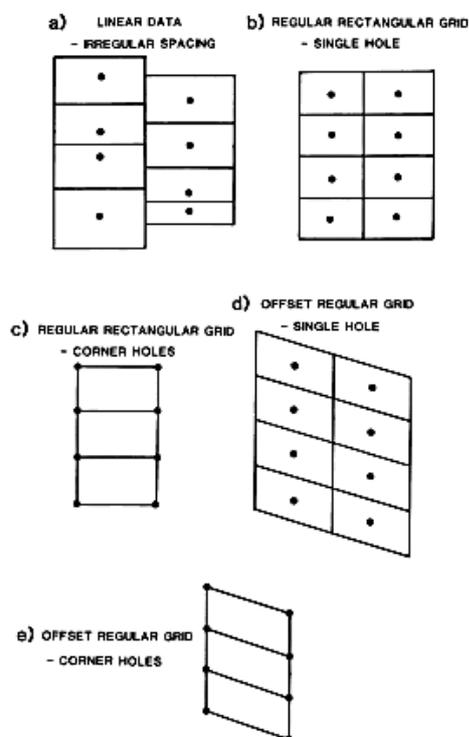


**Figura 3. 4:** Construcción de polígonos por (a) mediatrices de las interconexiones y (b) por la bisectriz de un ángulo.

(Fuente: Annels, 1991)

### 3.1.4. Método de las Matrices de Bloques

Cuando los datos están en línea, o en forma rectangular o bloques regulares pueden ser equipados a los agujeros de perforación. El método es básicamente similar al usado en el método del polígono y es particularmente adecuado para la fase exploratoria de un prospecto donde la rápida actualización de la reserva puede llevarse a cabo, ya que cada nuevo agujero se taladra y donde la precisión de la estimación no es tan crucial como en la fase de viabilidad o etapa de producción. En la Figura 3.5, los métodos (a), (b) y (d) permiten la extrapolación de la mineralización más allá de la perforación, pero sólo usar un agujero para evaluar cada bloque (Annels, 1991).



**Figura 3. 5:** Método de las matrices de bloques.

(Fuente: *Annels, 1991*)

### 3.1.5. Método de los contornos

Es muy útil cuando se pueden observar tendencias en la distribución de los datos, lo que permite realizar los contornos. Se puede aplicar con buenos resultados en mineralizaciones que tienen cambios suaves en la potencia y en la ley, de tal forma que resulta factible la obtención, con exactitud, de las citadas isolíneas de espesores y/o leyes (Bustillo & López, 1997).

Existen a su vez, tres submétodos:

- Método de la superposición de una malla

- b) Método de la ventana móvil
- c) Método del reticulado.

### 3.1.6. Método del inverso a la distancia

El método aplica un factor de ponderación a cada muestra que rodea el punto central de un bloque mineralizado. Dicho factor de ponderación es el inverso a la distancia entre cada muestra y el centro del bloque, elevado a una potencia  $n$ , que suele tomar un valor entre 1 y 3. Sólo las muestras que entran dentro de una determinada zona de búsqueda son ponderadas de la cita forma (Weaver, 1964).

Este método presenta la siguiente fórmula general, y la Figura 3.

$$\hat{Z}_s = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^\alpha}} \quad (\alpha > 0)$$

Los aspectos específicos a considerar son los siguientes:

1. Definición de los bloques de evaluación
2. Establecimiento de factor de ponderación
3. Definición del área de Búsqueda

El establecer el factor de ponderación al momento de realizar la interpolación de los datos es arbitraria, sin embargo, hay que considerar que un valor muy elevado hace que el método de evaluación se asemeje al de los polígonos. Barnes (1980) afirma que este efecto se consigue con  $n=5$ . Por otro lado, elegir

un valor muy bajo del exponente hace que el suavizado sea muy excesivo, dando quizás una importancia más elevada a las muestras que se encuentran muy alejadas. Por todo ello, parece ser, que 2 resulta un factor de ponderación correcto ya que genera un suavizado aceptable.

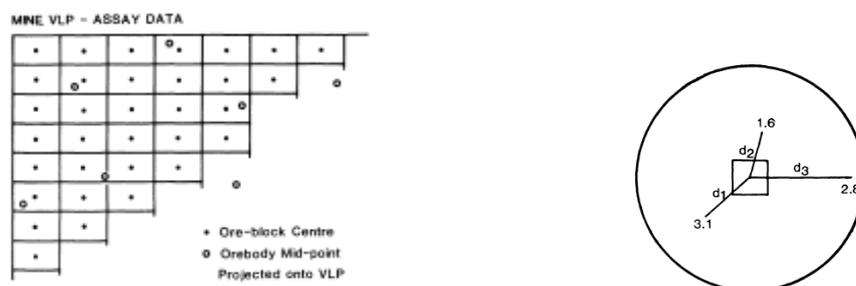


Fig. 3.35 Portion of an assay VLP showing drill-hole intersection points and part of the ore-block matrix.

**Figura 3. 6:** Aplicación del método del inverso a la distancia para estimar reservas minerales.

(Fuente: Annels, 1991)

### 3.2. Técnica Geoestadística para la estimación de reservas mineras.

El término Geoestadística surge de la combinación del carácter aleatorio de una variable con el carácter geológico que indudablemente poseen; establece que la distribución estadística de la diferencia de una variable (ley, potencia), entre muestras es similar y depende de la distancia que las separa y su distribución. La geoestadística, a diferencia de la estadística en cuanto al tratamiento de las muestras, toma en cuenta la ubicación de los datos en el espacio. La geoestadística asume que las muestras están correlacionadas y es esta correlación espacial la que debemos encontrar en un yacimiento.

La geoestadística como ciencia y herramienta tuvo su desarrollo con Danie Krige en la década de los 50 pero no fue hasta el año 1963 donde George Matheron publicara uno de los primeros tratados sobre los principios de la geoestadística, recogiendo las técnicas utilizadas hasta el momento y analizando el fundamento matemático (Matheron, 1963).

### **3.3. Aplicaciones de la Informática a la Estimación de Recursos.**

Existen dos tipos de herramientas informáticas que el mercado ofrece, los comerciales y los de libre acceso o gratuitos, ambos con soluciones integrales a las aplicaciones mineras, su diferencia radica más que todo en el alto costo de adquisición de los comerciales, y la certificación que presenta un software frente a otros. Sin embargo, muchas veces los de dominio público no tienen ningún tipo de soporte ni garantía y tienen limitaciones en cuanto a su capacidad de procesamiento de datos.

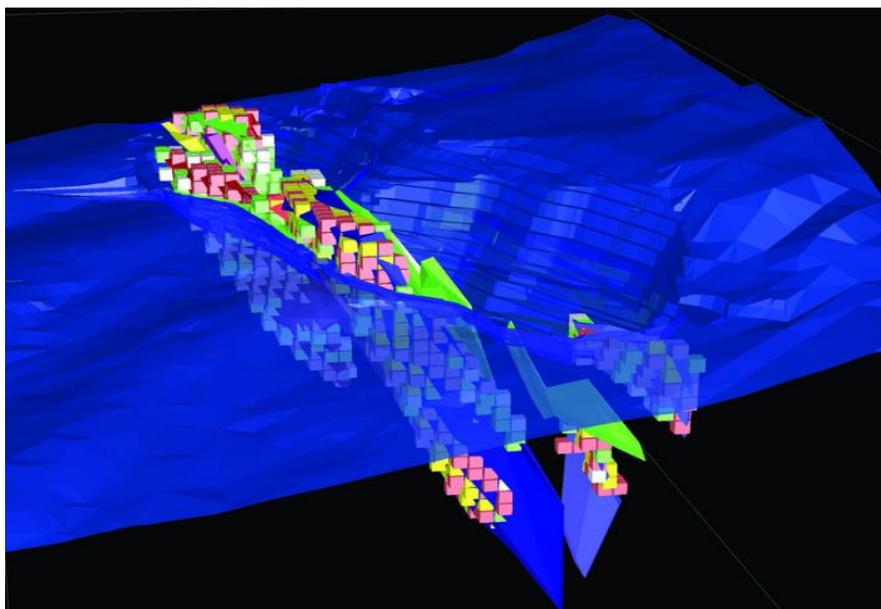
#### **3.3.1. Software Comerciales**

##### **GEOVIA/GEMS**

GEOVIA GEMS, antes conocido como GEMCOM Software, es un programa que proporciona las funciones adecuadas para los profesionales de la minería a cielo abierto y subterránea en las áreas de exploración, modelamiento, diseño de minas, planificación a largo plazo y monitoreo de la producción.

Utiliza como base de datos el programa Microsoft SQL Server de tal manera que le permite manejar gran cantidad de información. La seguridad y la

auditoría de datos de GEMS proporcionan las funciones que los profesionales necesitan para mejorar el cumplimiento con las regulaciones de la industria, tales como JORC, SAMREC y NI 43-101.



**Figura 3. 7:** Modelo geológico con GEMS/GEOVIA.

*(Fuente: GEOVIA GEMS, 2013)*

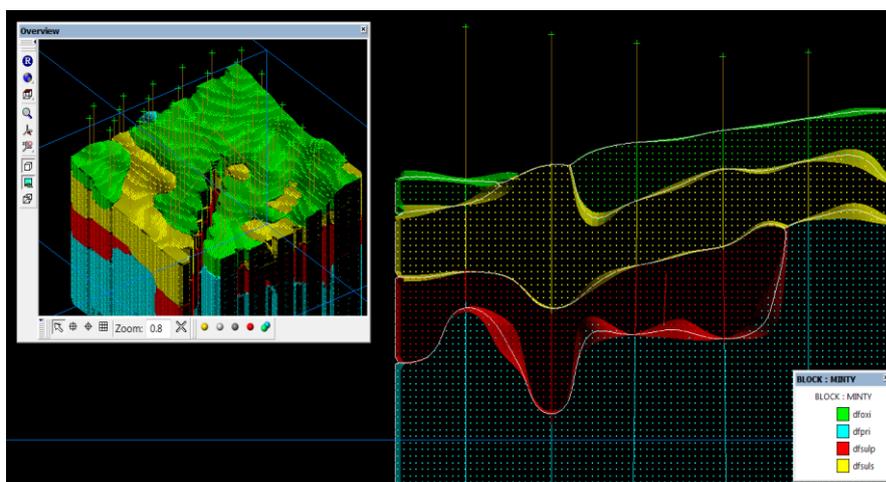
### **Maptek / Vulcan 3D**

Vulcan ofrece un entorno de visualización y modelado 3D interactivo para crear y probar modelos de exploración. Los usuarios pueden gestionar y validar sondaje, ensayo, geofísicos, litológica y los datos analíticos.

Herramientas de modelado implícitos proporcionan regímenes RBF y modelado para trabajar con la incertidumbre dominios geológicos complejos. Los usuarios pueden maximizar el uso de todo histórico, perforación y ensayo

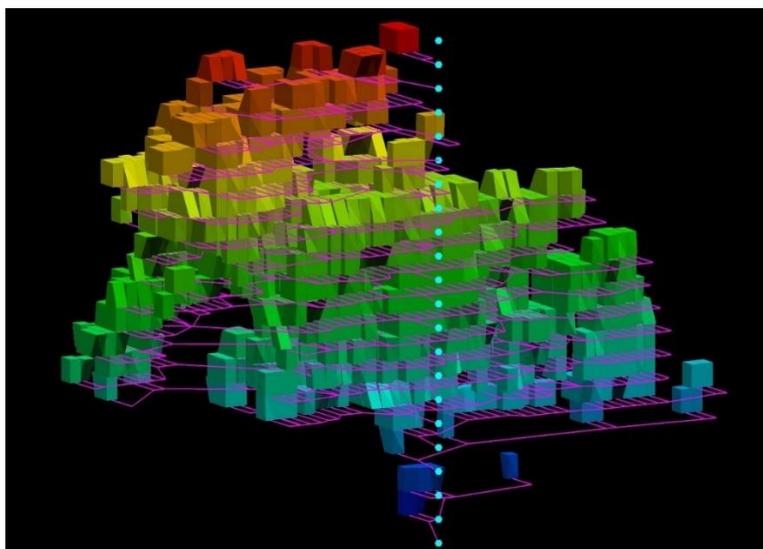
los datos para ejecutar diferentes escenarios para evaluar eficazmente el grado potencial y un tonelaje de recurso (Maptek, 2015).

Vulcan datos Analizador presenta una interfaz optimizada que integra el análisis con variograma, herramientas para el manejo de anisotropía estructural y grado basado. Los cálculos se configuran fácilmente y rápido para ejecutar, lo que permite a los usuarios obtener una comprensión clara de los datos geológicos. Gran variedad de modelos se puede visualizar simultáneamente para las comparaciones en tiempo real, además de análisis de estructuras estratigráficas, lo cual facilita el modelado e interpretación de proyectos de carbón.



**Figura 3. 8:** Modelo Geológico con Vulcan 9 / Maptek.

*(Fuente: Geodatapoint, 2014)*



**Figura 3. 9:** Modelo de Bloques con Vulcan 9.1.

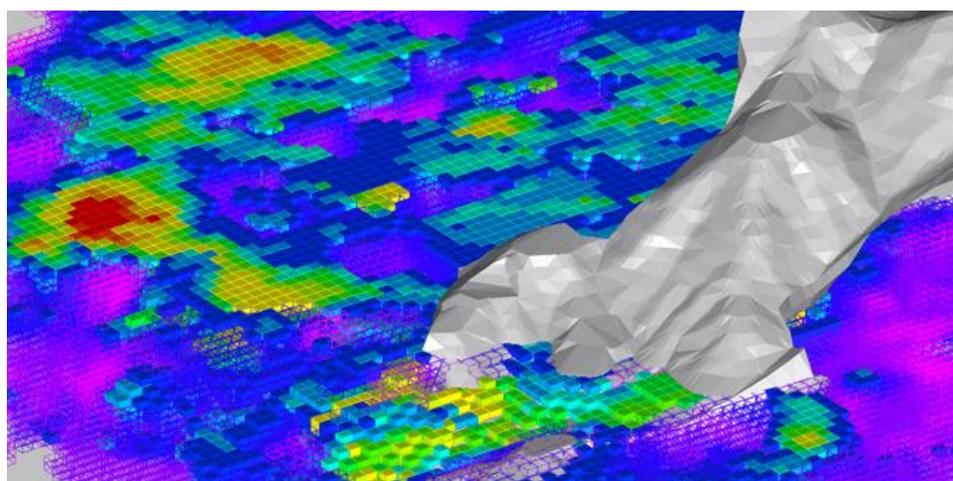
*(Fuente: Geodatapoint, 2014)*

### **Mintec / MineSight**

Mintec Inc es una empresa desarrolladora de software y proveedora de servicios para la industria minera. Fundada en 1970, se ha convertido en una red global de profesionales mineros que ofrecen su conocimiento y experiencia para desarrollar tecnología, suministrar servicios y apoyar los proyectos mineros más complejos del mundo. MineSight es una plataforma integral para las tareas de modelamiento y estimación de recursos geológicos, y la optimización y planificación minera. Incluye soluciones para las áreas de exploraciones, geología, ingeniería y manejo de la producción y operación, controlando procesos de perforación y voladura, como también en el área de supervisión y administración.

Las gráficas en 3D son un componente integral de dichas soluciones. MineSight 3D ofrece la capacidad de visualizar y editar interactivamente todo tipo de datos, incluyendo barrenos, modelos de bloques en 3D, interpretaciones geológicas, datos topográficos, superficies, etc.

MineSight es una completa plataforma de modelado y planificación de la mina de software, ofreciendo soluciones integradas para la exploración de minas, modelado geológico, programación y producción. MineSight ha sido desarrollado por Mintec, Inc., empresa que comenzó en 1970 por el actual presidente, Fred Banfield. Fue la primera compañía en introducir computadoras para ayudar a extraer recursos de cielo abierto y operaciones de minería subterránea. Mintec ha estado refinando sus programas y la interfaz de cliente durante más de cuatro décadas y ahora sirve a más de 5.000 usuarios en todo el mundo.

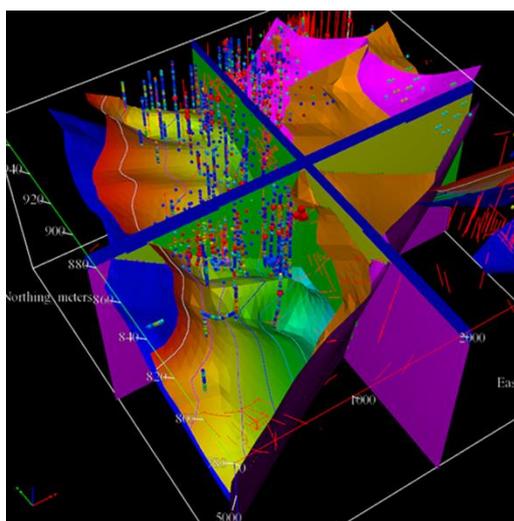


**Figura 3. 10:** Modelo de Bloques con MineSight.

*(Fuente: Collins, 2014)*

## DATAMINE SOFTWARE

Datamine es un proveedor de tecnología y servicios que son necesarios para planificar, gestionar y optimizar las operaciones de minería de software de minería. Se estableció en 1981 y revolucionó la industria minera ofreciendo soluciones informáticas que abarcan toda la cadena de valor a través de la exploración, geoestadística, modelado de recursos, planificación minera y gestión de operaciones. En 2010, CAE Inc compró el negocio Datamine y realizó importantes inversiones para crear una cartera de extremo a extremo de los productos, la adquisición de Century Systems Technologies y el desarrollo de varios nuevos productos, incluyendo la plataforma de minería técnica basada en la nube Cumbre innovadora. En julio de 2015, fue adquirida por Datamine Constelación Software Inc. (TSX: CSU), la compañía de software más grande de Canadá.



**Figura 3. 11:** Modelamiento Geológico con Datamine 3D.

(Fuente: DATAMINE, 2016)

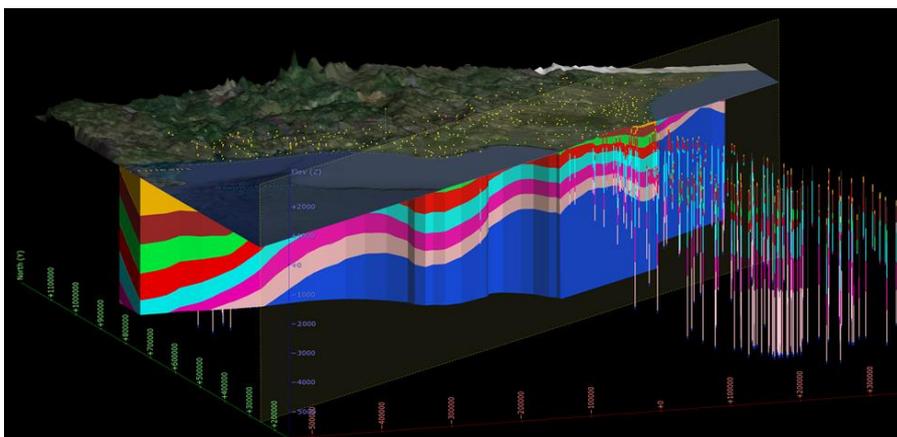
### **Aranz / LeapFrog**

Es un producto de modelado geológico desarrollado por ARANZ (Applied Research Associates NZ Limited) una organización de investigación formada en 1995 en Christchurch, Nueva Zelanda.

La reputación de Leapfrog como una poderosa herramienta de modelado geológico ha crecido rápidamente con una fuerte retroalimentación positiva por parte de los geólogos de alto nivel en todo el mundo. Tiene una reputación de ser fácil de usar y una herramienta de modelado potente para una amplia gama de escenarios de geología.

Leapfrog utiliza FastRBF (funciones de base radial) para crear una "superficie de energía mínima" a través de puntos de datos en 3D, lo que se traduce en el modelado de la geología potente y rápida para los datos "ruidoso" que se compone de muchos puntos con potencial para grandes distancias entre los puntos de datos a través del modelo. De acuerdo con Aranz, Leapfrog para la geología fue desarrollado en asociación con SRK y sus clientes, después de lo cual SRK también se asoció en la comercialización temprana y el apoyo del producto para la minería.

Leapfrog software es utilizado por la industria minera a nivel mundial con operaciones de ventas y soporte en América del Norte, América del Sur, Asia Pacífico, Europa y África.



**Figura 3. 12:** Modelamiento Geológico en 3D con Leapfrog.

*(Fuente: J. McIntosh)*

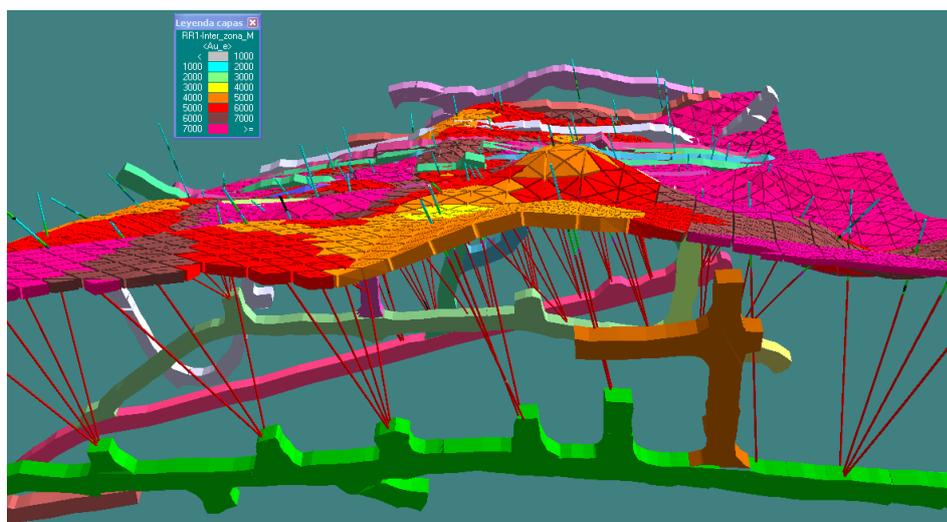
### 3.3.2. Softwares Libres

#### RecMin

Sus siglas indican “Recursos Mineros”, patentado en la Universidad de Oviedo, España y su autor es el Dr. César Castañón Fernández, profesor de Ingeniería de Minas de dicha universidad.

Este programa fue diseñado para demostrar el método pentaédrico, por lo que contiene opciones de modelamiento geológico, modelo de bloques y estimación de reservas por el método del inverso de la distancia (método geométrico) para un modelo numérico. Además, fue diseñado en un lenguaje de programación de Visual Basic.

Una de las desventajas del software es no contener herramientas geoestadísticas, que permiten realizar un análisis estadístico a los datos y estimar reservas mineras con el mejor estimador insesgado como lo es el Kriging.



**Figura 3. 13:** Modelamiento de cuerpos vetiformes utilizando el método pentaédrico exclusivo de RecMin.

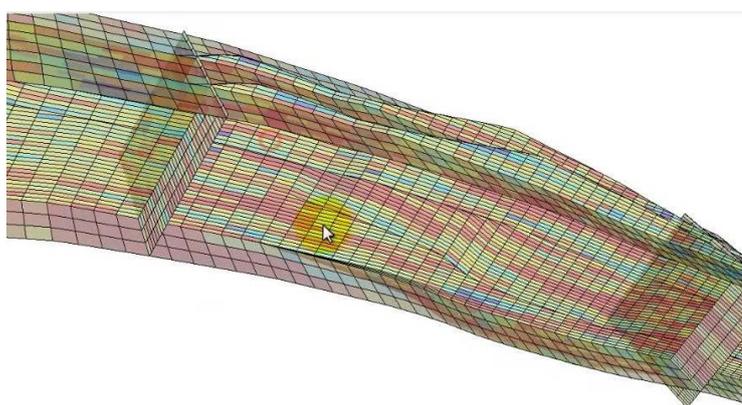
(Fuente: RecMin, 2016)

RecMin es un software de libre acceso, por ende, no tiene costo de licencia y las últimas innovaciones en cuanto al soporte y mantenimiento de esta herramienta informática se ofrecen en línea, el costo de entrenamiento para la utilización del programa se encuentra entre \$100 y \$1500, sin embargo, existen manuales de uso, que se ofrecen en el blog de RecMin, el cual lo administra el Dr. César Castañón, Ingeniero de Minas y desarrollador del software, para profesionales o público en general que no desee pagar cursos presenciales o en modalidad Online que al menos en Latinoamérica (Perú, Chile, Argentina, México, Ecuador, etc) es dictado por el Ingeniero de Minas Yhonny Ruiz Dioses de la empresa SolMine.

## SGems

El Stanford Geostatistical software de modelado (SGeMS) es un paquete informático de código abierto para la solución de problemas relacionados con las variables relacionadas espacialmente, está diseñado en un lenguaje de programación de libre acceso como lo es Python y además permite la adición de scripts (algoritmos) por parte del usuario, lo que pone en ventaja a este software frente a otros que también son de dominio público. Presenta una interfaz fácil de usar, una visualización interactiva en 3D y una amplia selección de algoritmos clásicos de geoestadística.

SGeMS se basa en la biblioteca de plantillas Geoestadística (GSTL) para ejecutar sus librerías, incluyendo: Kriging, Multivariable kriging (co - kriging), Simulación Secuencial Gaussiana, simulación indicadora secuencial, Multivariable secuencial de simulación de Gauss y el indicador Múltiples puntos de simulación estadística.



**Figura 3. 14:** Estimación de las leyes con Kriging utilizando SGeMS

*(Fuente: Remy, et al., 2004)*

## **GSLIB**

GSLIB es un acrónimo de Geostatistical Software LIBrary. Este nombre fue utilizado originalmente para una colección de programas geoestadísticos desarrollados en la Universidad de Stanford en los últimos 15 años.

Este software a diferencia de SGeMS está desarrollado en un lenguaje de programación FORTRAN 39, entre sus ventajas principales es un software libre, flexible y portátil, entre sus desventajas cuenta con una interfaz de usuario poco agradable.

## **Geoeas**

El Geoeas (Geostatistical Environmental Assesment Software) es un programa de dominio público, se centra en un estudio estadístico y geoestadístico (2-D). El hardware necesita mínimo un procesador de 2.86 GHz con 1Mb de RAM puede ser suficiente, por lo que su aplicabilidad es máxima utilizando un lenguaje de programa Fortran 77. Sin embargo, una de las mayores de limitaciones es que sólo trabaja con 16,384 pares de puntos, por lo que no es posible tratar más de 180 valores, siempre que se consideren todos los pares posibles.

### **3.3.3. Comparaciones entre los Software Comerciales y Libres.**

Es necesario establecer comparaciones entre los softwares comerciales y los de dominio público para conocer las limitaciones de cada uno de ellos y sus

posibles aplicaciones en la industria minera, a continuación, se muestra la Tabla 4 que resume las diferencias en cuanto a su funcionalidad.

**Tabla IV:** Comparaciones técnicas entre un software comercial y un software libre.

<b>Software Libre vs Software Comercial</b>		
<b>Ventajas y Desventajas técnicas</b>		
<b>Características</b>	<b>Software Comercial</b>	<b>Software Libre</b>
<b>Costo de Licencia</b>	Más de \$50000	Ninguno
<b>Soporte y Mantenimiento</b>	Constante	Escaso
<b>Aplicaciones en Minería</b>	Todo tipo de Proyectos (desde Pequeños hasta Gran Escala)	Limitado uso para proyectos pequeños y de mediana escala
<b>Funcionalidad</b>	Complejos	De fácil uso
<b>Costo de entrenamiento</b>	Desde \$800 hasta \$2500	Inversión máxima \$1000/persona

*(Fuente: Ruiz, Chero, & Castañón, 2008)*

De manera que, para el desarrollo de este proyecto de pequeña escala, resulta suficiente el empleo de un software libre ya que, cubre todas las necesidades en cuanto a funcionalidad y desempeño.

**Tabla V:** Funcionalidad del Software Comercial vs Software Libre.

Comparación de Funcionalidad			
Herramientas de Gestión de Recursos	Software Comercial	Software Libre – RecMin	Software Libre - SGeMS
Base de datos con información de la campaña de exploración del yacimiento	Si	Si	No
Importación de Topografía	Si	Si	No
Compositación	Si	Si	No
Importación de compósitos para análisis estadístico	Si	No	Si
Creación del Modelo Geológico	Si	Si	No
Creación del Modelo de Bloques	Si	Si	No
Análisis Variográfico de los datos	Si	No	Si
Estimación de cada bloque empleando una técnica de interpolación espacial	Si	No	Si
Herramientas geoestadísticas	Si	No	Si
Planificación de minado y diseño de mina superficial y subterráneo	Si	Si	No

(Fuente: Ruiz, Chero, & Castañón, 2008)

Dada las especificaciones definidas en la Tabla V, se decidió utilizar simultáneamente el software RecMin y SGeMS para la estimación de recursos y diseño preliminar del método de explotación.

# **CAPÍTULO 4**

## **4. ESTIMACIÓN DE RESERVAS MINERAS DEL BLOQUE 2 SECTOR “X7”**

### **4.1. Recolección y Tratamiento de Datos Topográficos.**

Se realizó un levantamiento de las labores subterráneas de avance del sector “X7” (Anexo B), para poder tener mayor conocimiento del bloque y de las labores, y definir los puntos de muestreo.

La galería principal presenta una sección de 2x3 m con una longitud de avance de 110 metros para el transporte de la maquinaria y extracción del mineral.

### **4.2. Diseño de la campaña de muestreo.**

La toma de muestras es uno de los procesos más complicados en la evaluación de un depósito mineral, ya que de ella depende esencialmente la valoración que se haga del mismo. El muestreo se realiza con el fin de poder

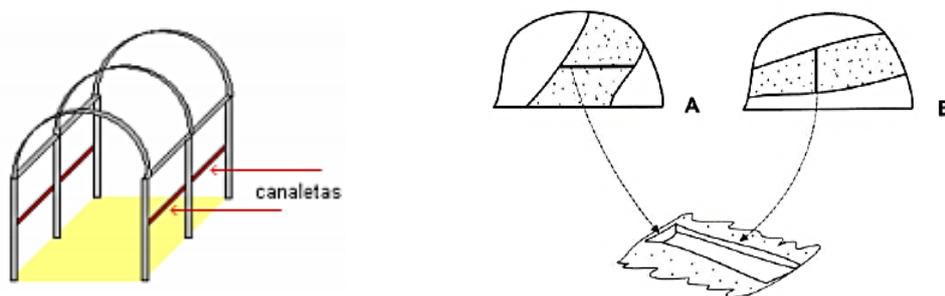
determinar la ley del mineral, la potencia de la veta y su dirección e inclinación. Es por ello, que se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos mostrados en la Figura 4.1:



**Figura 4. 1:** Aspectos a considerar para el Muestreo de Minerales.

El tipo de muestreo realizado fue sistemático, es decir que se toman muestras en intervalos regulares de espacio, empleando un método lineal de canaleta o ranurado, que consiste básicamente en la excavación de un canal perpendicular a lo largo de la potencia de la veta que presenta una sección rectangular, de tal manera que se pueda obtener una muestra significativa (Figura 4.2).

Para la recolección de muestras con un tamaño pequeño, el sistema mecánico para la extracción de las muestras debe ser mediante martillos de manos, para su fácil maniobrabilidad. Además, para se registraron datos estructurales del cuerpo mineral como son rumbo/azimut, buzamiento y potencia de la veta, que facilitarían el modelamiento.



**Figura 4. 2:** Ejemplos de ranurado en el frente de una galería.

El tipo de muestreo que realiza la empresa es el de “Control de leyes”, el cual se basa en la recolección de muestras de los diferentes frentes de avance para controlar la dilución, y que al ser enviados a la planta metalúrgica se mantenga la ley de corte (3 g/t), mezclando mineral de los diferentes bloques de explotación.

#### **4.2.1. Densidad y Tamaño de la Muestra (Peso).**

Definir la densidad del muestreo es una tarea ardua, ya que comúnmente se basa en parámetros estadísticos, recolectados a partir de muestreos anteriores, en este caso la empresa no define una malla de muestreo, ni tampoco lleva un registro de los valores de leyes, lo que en este caso impidió emplear la fórmula del coeficiente de variación.

Sin embargo, se utilizó la Tabla VI y Tabla VII para definir la densidad del muestreo en función del tipo de yacimiento y distribución del mineral, las cuales son aplicables a la mayoría de los yacimientos y se fundamenta en el conocimiento de un gran número de depósitos.

**Tabla VI:** Espaciado de las muestras en función del Tipo de Yacimiento y Distribución del Mineral.

Distribución del mineral	Coefficiente de Variación (%)	Tipo de yacimiento	Espaciado de las muestras (m)
Regular	5 – 40	Yacimientos sencillos de carbón	50 – 60
Irregular	40 – 100	Yacimientos Hidrotermales	6 – 4
Muy irregular	100 – 150	Mayor parte de Yacimientos de Au	4 – 2.5
Extremadamente irregular	>150	Yacimientos de tierras raras, Au y Platino	2.5 - 2

(Fuente: Bustillo & López, 1997)

**Tabla VII:** Cantidad de muestra en función del coeficiente de variación.

Distribución del mineral	Coefficiente de Variación (%)	Peso de la Muestra (kg)
Muy regular	Hasta 20	X= (0.6 – 0.8)
Regular	20 - 40	3. X
Irregular	40 – 80	6X
Muy irregular	80 – 150	9.X
Extremadamente irregular	> 150	12.X

(Fuente: Bustillo & López, 1997)

La Tabla VI, indica que el espaciado entre las muestras debe estar entre 4 y 2.5 metros, de tal manera que se escogió un promedio entre los dos valores y se determinó que la distancia óptima entre muestras debe ser 3 metros, por otra parte, la Tabla VII señala el peso de la muestra que, según el factor calculado, es de 5 kg aproximadamente, pero fue necesario realizar un cuarteo manual para enviar al laboratorio 2 kg de material.

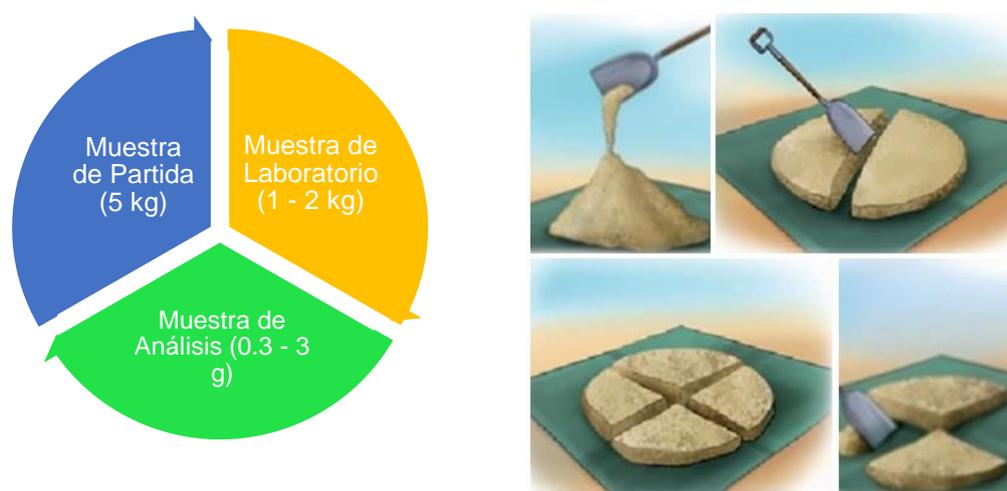
En definitiva, se recolectó un total de 36 muestras, cada una espaciadas 3 metros en la galería de avance de aproximadamente 110 metros de longitud en el Bloque 2 del Sector "X7".

#### 4.2.2. Preparación de la muestra.

Consiste en la reducción del tamaño de la muestra tomada en campo para posteriormente enviarla al laboratorio de muestras y determinar la ley total de Au mediante análisis químicos.

Para el cuarteo se procedió de la siguiente manera:

- Colocar la muestra de mineral sobre una superficie plana y en un saquillo extendido para impedir que se contamine o se pierda el material.
- Posteriormente, se empieza a homogenizar el material moviendo el saquillo de un lado a otro.
- Por último, se extiende nuevamente la muestra y se divide en 4 porciones de igual tamaño, en forma de pastel, para recoger las dos porciones que se encuentren opuestas (Figura 4.3)



**Figura 4. 3:** Muestreo y Cuarteo de las muestras de mineral en campo.

Una vez realizado este procedimiento se envían las muestras al laboratorio para el respectivo análisis mediante ensayos al fuego (copelación) y determinar la ley total de oro.

Al momento del procesamiento mineral en la planta, las asociaciones mineralógicas que presentan las menas puede llegar a ser un problema, ya que impiden elevar la recuperación del metal.

Las asociaciones mineralógicas se encuentran estrechamente relacionadas con las leyes del mineral, ya que de ellas depende valores altos o bajos, por tal motivo, es importante contar con la mayor información del depósito y para ello se identificó las asociaciones mineralógicas de cada muestra tomada en el cuerpo mineralizado del bloque 2, como se describe en la Tabla VIII que se muestra a continuación:

**Tabla VIII:** Asociaciones Mineralógicas identificadas en el Bloque 2, Frontón Derecho del sector "X7".

Código	Descripción
A1	Cuarzo (q) + Carbonato (cb) + Arsenopirita (asp) + Pirita (py)
A2	Cuarzo (q) + Estibina (sb) + Calcopirita (cp)
A3	Estibina (sb) + Esfalerita (spl) + Galenita (gn) + Calcopirita (cp) + Pirrotina (pirr) + Cuarzo (q) + Carbonato (cb)

(Fuente: Velarde V.,2016)

**Tabla IX:** Resultados de las muestras recolectados en campo.

Código Muestra	Potencia (m)	Ley de Au (g/t)	Azimut (°)	Bz (°)	Código Muestra	Potencia (m)	Ley de Au (g/t)	Azimut (°)	Bz (°)
M1	0.45	6.40	217	25	M19	0.30	5.40	185	38
M2	0.40	5.40			M20	0.15	7.50		
M3	0.47	4.70			M21	0.14	5.80		
M4	0.16	8.20	211	31	M22	0.25	2.80	185	42
M5	0.18	6.80			M23	0.20	5.90		
M6	0.20	6.20			M24	0.25	9.10		

<b>M7</b>	0.77	6.30	176	34	<b>M25</b>	0.10	7.30	215	35
<b>M8</b>	0.50	3.90			<b>M26</b>	0.25	3.30		
<b>M9</b>	0.65	6.20			<b>M27</b>	0.26	5.10		
<b>M10</b>	0.25	7.10	196	38	<b>M28</b>	0.20	5.90	200	30
<b>M11</b>	0.15	4.90			<b>M29</b>	0.20	5.80		
<b>M12</b>	0.25	5.70			<b>M30</b>	0.30	5.80		
<b>M13</b>	0.30	6.10	211	31	<b>M31</b>	0.15	4.60	188	32
<b>M14</b>	0.20	6.20			<b>M32</b>	0.35	4.90		
<b>M15</b>	0.73	7.40			<b>M33</b>	0.40	6.20		
<b>M16</b>	0.77	7.50	202	31	<b>M34</b>	0.34	5.80	180	34
<b>M17</b>	0.15	6.10			<b>M35</b>	0.38	5.60		
<b>M18</b>	0.10	5.60			<b>M36</b>	0.18	5.90		

El Anexo C muestra la malla de muestreo con los valores de leyes del Bloque 2 de sector "X7". Cabe recalcar que los valores de leyes para dicho estudio fueron alterados para proteger la confidencialidad de los resultados para la empresa.

#### 4.3. Tipos de Modelamiento Geológicos.

Los modelos geológicos están formados por elementos que pueden representar diversas características, condiciones o propiedades del depósito. Se los realiza con la finalidad de incrementar el conocimiento de la morfología del depósito, definir volúmenes de roca en donde una variable de interés se comporte de manera homogénea; y, constituye una herramienta clave para la toma de decisiones en cuanto al diseño de explotación, operaciones en planta, entre otras (Tituana, 2014). Existen diversos tipos de modelos geológicos, entre ellos se encuentran:

- Modelo Litológico
- Modelo de Alteración
- Modelo Estructural

- Modelo de Mineralización
- Modelo de Leyes

En este caso, se realizó el modelamiento de leyes para la planificación estratégica del bloque de explotación, y este tipo de modelo en particular, no es más que la estimación de las leyes minerales en todos los puntos del bloque.

#### **4.4. Metodología para el Modelamiento del cuerpo mineral.**

Para estimar las reservas del bloque mediante modelación numérica en un software minero, resulta necesario que los datos del muestreo sean simulados como pequeños sondeos.

De forma general, para el Modelamiento del cuerpo mineral (veta) en cualquier software minero se debe tener en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Crear una base de datos, en el que se incluyen datos como Coordenadas x, y, z, desviaciones o direcciones de los sondeos, Leyes de mineral Au (g/t), Asociación Mineralógica y Zona de mineralización, por último, cada tabla se exporta como un archivo con formato de texto.
2. Importar la base de datos en formato de texto al software RecMin.
3. Despliegue de las muestras (simuladas como sondeos) como se muestra en la Figura 4.4.
4. Creación de las secciones del cuerpo mineral.

5. Triangular las secciones y posteriormente proceder con la creación de un cuerpo sólido (modelo del cuerpo mineral o geológico) conforme a las secciones previamente creadas.

#### 4.4.1. Creación del Base de Datos para los sondeos.

Como primer paso es necesario ordenar y corregir los datos de los puntos de muestreo (valores de potencia y coordenadas) como se muestra en cada tabla, de tal manera que pueda ser detectada por el programa RecMin y en general para todo software minero.

**Tabla X:** Tabla collar de los Puntos de Muestreo.

Código Muestra	X	Y	Z	Código Muestra	X	Y	Z
M1	653456.01	9664248.87	1104.79	M19	653440.91	9664198.01	1104.71
M2	653454.38	9664246.35	1104.76	M20	653440.45	9664195.04	1104.64
M3	653452.76	9664243.83	1104.80	M21	653440.10	9664192.08	1104.63
M4	653451.54	9664241.10	1104.79	M22	653440.75	9664189.15	1104.69
M5	653450.50	9664238.29	1104.65	M23	653441.08	9664186.18	1104.66
M6	653450.07	9664235.38	1104.66	M24	653441.39	9664183.19	1104.69
M7	653450.25	9664232.39	1104.95	M25	653441.70	9664180.21	1104.61
M8	653450.19	9664229.40	1104.81	M26	653442.01	9664177.22	1104.69
M9	653449.88	9664226.41	1104.89	M27	653441.07	9664174.43	1104.69
M10	653449.58	9664223.43	1104.69	M28	653439.90	9664171.66	1104.66
M11	653448.87	9664220.54	1104.64	M29	653439.36	9664168.72	1104.66
M12	653447.87	9664217.71	1104.69	M30	653438.88	9664165.76	1104.71
M13	653446.87	9664214.88	1104.71	M31	653438.40	9664162.80	1104.64
M14	653445.88	9664212.05	1104.66	M32	653437.92	9664159.84	1104.74
M15	653444.75	9664209.27	1104.93	M33	653437.44	9664156.87	1104.76
M16	653443.55	9664206.52	1104.95	M34	653437.22	9664153.90	1104.73
M17	653442.35	9664203.77	1104.64	M35	653437.38	9664150.90	1104.75
M18	653441.37	9664200.97	1104.61	M36	653437.53	9664147.91	1104.47

**Tabla XI:** Tabla Survey o Dirección de los Puntos de Muestreo.

Código muestra	Profundidad	Dirección	Inclinación	Código muestra	Profundidad	Dirección	Inclinación
M1	2.45	0	-90	M19	2.30	0	-90
M2	2.40	0	-90	M20	2.15	0	-90
M3	2.47	0	-90	M21	2.14	0	-90
M4	2.46	0	-90	M22	2.25	0	-90
M5	2.18	0	-90	M23	2.20	0	-90
M6	2.20	0	-90	M24	2.25	0	-90

<b>M7</b>	2.77	0	-90	<b>M25</b>	2.10	0	-90
<b>M8</b>	2.50	0	-90	<b>M26</b>	2.25	0	-90
<b>M9</b>	2.65	0	-90	<b>M27</b>	2.26	0	-90
<b>M10</b>	2.25	0	-90	<b>M28</b>	2.20	0	-90
<b>M11</b>	2.15	0	-90	<b>M29</b>	2.20	0	-90
<b>M12</b>	2.25	0	-90	<b>M30</b>	2.30	0	-90
<b>M13</b>	2.30	0	-90	<b>M31</b>	2.15	0	-90
<b>M14</b>	2.20	0	-90	<b>M32</b>	2.35	0	-90
<b>M15</b>	2.73	0	-90	<b>M33</b>	2.40	0	-90
<b>M16</b>	2.77	0	-90	<b>M34</b>	2.34	0	-90
<b>M17</b>	2.15	0	-90	<b>M35</b>	2.38	0	-90
<b>M18</b>	2.10	0	-90	<b>M36</b>	2.18	0	-90

En la Tabla XI se define la dirección e inclinación de los sondeos a distintas profundidades con los campos:

- Distancia (Profundidad del Sondeo).
- Dirección, respecto al Norte y en sentido de las agujas del reloj.
- Inclinación, respecto a la horizontal, positivo hacia arriba y negativo hacia abajo.

De acuerdo a estos parámetros, se estableció una profundidad o distancia del sondeo de 2 metros para poder precisar la zona mineralizada en el centro del sondeo, de tal manera que por encima y por debajo de la zona mineralizada la distancia sea de 1 metro, además se definió una dirección de N0°E e inclinación -90° para simular sondeos completamente verticales, estas medidas se deben introducir tanto en la cabeza del sondeo como en el punto más profundo del mismo.

**Tabla XII:** Tabla de Asociación Mineralógica de los Puntos de Muestreo.

Código Muestra	Desde	Hasta	Asociación	Código Muestra	Desde	Hasta	Asociación
M1	1	1.45	A1	M19	1	1.30	A3
M2	1	1.40	A3	M20	1	1.15	A1
M3	1	1.47	A1	M21	1	1.14	A3
M4	1	1.46	A1	M22	1	1.25	A2
M5	1	1.18	A2	M23	1	1.20	A3
M6	1	1.20	A1	M24	1	1.25	A1
M7	1	1.77	A1	M25	1	1.10	A3
M8	1	1.50	A3	M26	1	1.25	A1
M9	1	1.65	A1	M27	1	1.26	A1
M10	1	1.25	A3	M28	1	1.20	A1
M11	1	1.15	A2	M29	1	1.20	A2
M12	1	1.25	A2	M30	1	1.30	A1
M13	1	1.30	A3	M31	1	1.15	A1
M14	1	1.20	A3	M32	1	1.35	A2
M15	1	1.73	A1	M33	1	1.40	A1
M16	1	1.77	A1	M34	1	1.34	A3
M17	1	1.15	A3	M35	1	1.38	A1
M18	1	1.10	A3	M36	1	1.18	A2

**Tabla XIII:** Tabla Assay de los Puntos de Muestreo.

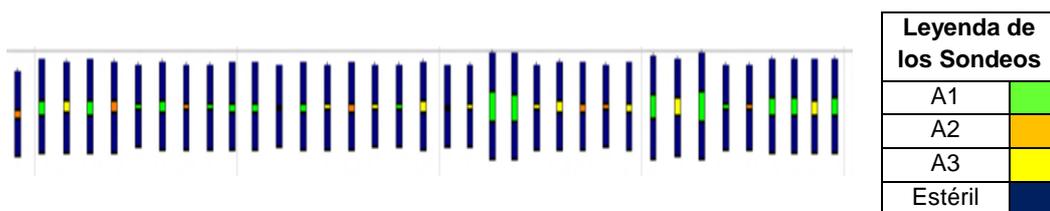
Código Muestra	Desde	Hasta	Ley Au (g/t)	Código Muestra	Desde	Hasta	Ley Au (g/t)
M1	1	1.45	6.4	M19	1	1.30	5.4
M2	1	1.40	5.4	M20	1	1.15	7.5
M3	1	1.47	4.7	M21	1	1.14	5.8
M4	1	1.46	8.2	M22	1	1.25	2.8
M5	1	1.18	6.8	M23	1	1.20	5.9
M6	1	1.20	6.2	M24	1	1.25	9.1
M7	1	1.77	6.3	M25	1	1.10	7.3
M8	1	1.50	3.9	M26	1	1.25	3.3
M9	1	1.65	6.2	M27	1	1.26	5.1
M10	1	1.25	7.1	M28	1	1.20	5.9
M11	1	1.15	4.9	M29	1	1.20	5.8
M12	1	1.25	5.7	M30	1	1.30	5.8
M13	1	1.30	6.1	M31	1	1.15	4.6
M14	1	1.20	6.2	M32	1	1.35	4.9
M15	1	1.73	7.4	M33	1	1.40	6.2
M16	1	1.77	7.5	M34	1	1.34	5.8
M17	1	1.15	6.1	M35	1	1.38	5.6
M18	1	1.10	5.6	M36	1	1.18	5.9

**Tabla XIV:** Tabla Zona de Intersección de los Puntos de Muestreo.

Código Muestra	Desde	Hasta	Zona Mineralización	Código Muestra	Desde	Hasta	Zona de Mineralización
M1	1	1.45	Zona M	M19	1	1.30	Zona M
M2	1	1.40	Zona M	M20	1	1.15	Zona M
M3	1	1.47	Zona M	M21	1	1.14	Zona M
M4	1	1.46	Zona M	M22	1	1.25	Zona M
M5	1	1.18	Zona M	M23	1	1.20	Zona M
M6	1	1.20	Zona M	M24	1	1.25	Zona M
M7	1	1.77	Zona M	M25	1	1.10	Zona M
M8	1	1.50	Zona M	M26	1	1.25	Zona M
M9	1	1.65	Zona M	M27	1	1.26	Zona M
M10	1	1.25	Zona M	M28	1	1.20	Zona M
M11	1	1.15	Zona M	M29	1	1.20	Zona M
M12	1	1.25	Zona M	M30	1	1.30	Zona M
M13	1	1.30	Zona M	M31	1	1.15	Zona M
M14	1	1.20	Zona M	M32	1	1.35	Zona M
M15	1	1.73	Zona M	M33	1	1.40	Zona M
M16	1	1.77	Zona M	M34	1	1.34	Zona M
M17	1	1.15	Zona M	M35	1	1.38	Zona M
M18	1	1.10	Zona M	M36	1	1.18	Zona M

#### 4.4.2. Despliegue de los sondeos.

Una vez importada las tablas correspondientes, se realiza el despliegue de las muestras para poder observar con un mayor grado de detalle la ubicación de los sondeos.

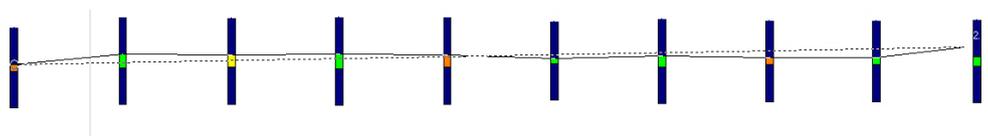


**Figura 4. 4:** Vista en el Plano ZN del despliegue de las muestras (sondeos).

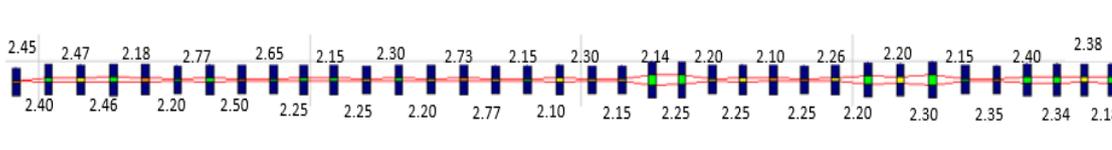
#### 4.4.3. Creación de las secciones

A partir de los sondeos desplegados en el plano se procede a crear las secciones en el plano ZN, que consiste básicamente en unir todos los puntos de muestreo para generar el ancho de la veta, tal como se muestra en la Figura 4.5.

Finalmente, el resultado de la creación de la sección 1 a partir de los puntos de muestreo tomados en la galería principal del Frontón derecho con sus respectivos valores de potencia, se indican en la Figura 4.6.



**Figura 4. 5:** Creación de la sección 1 en el plano ZN.



**Figura 4. 6:** Profundidad de los sondeos y resultado final de la creación de la sección 1 en el plano ZN.

Luego para generar el modelamiento del cuerpo mineral (sólido volumétrico) es necesario crear una segunda sección, la cual puede ser proyectada a una distancia inclinada de 60 metros con un buzamiento de aproximadamente 33°.

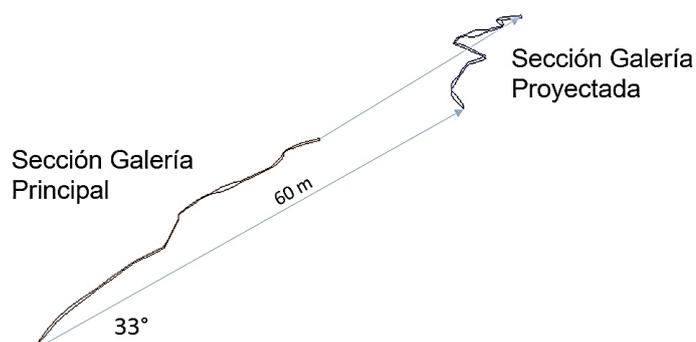
Para crear la segunda sección, se puede emplear la misma metodología, para ello es necesario generar nuevos sondeos sobre una base de datos exactamente igual, pero la Tabla Collar debe contener las coordenadas de los puntos proyectados a la distancia y dirección requerida, como se muestra en la Tabla XV.

**Tabla XV:** Tabla Collar de los Puntos Proyectados.

Código Muestra	X	Y	Z	Código Muestra	X	Y	Z
P1	653494.01	9664224.19	1131.32	P19	653478.91	9664173.33	1131.25
P2	653492.38	9664221.67	1131.30	P20	653478.45	9664170.36	1131.17
P3	653490.76	9664219.15	1131.33	P21	653478.10	9664167.40	1131.17
P4	653489.54	9664216.42	1131.33	P22	653478.75	9664164.47	1131.22
P5	653488.50	9664213.61	1131.19	P23	653479.08	9664161.50	1131.20

P6	653488.07	9664210.70	1131.20	P24	653479.39	9664158.51	1131.22
P7	653488.25	9664207.71	1131.48	P25	653479.70	9664155.53	1131.15
P8	653488.19	9664204.72	1131.35	P26	653480.01	9664152.54	1131.22
P9	653487.88	9664201.73	1131.42	P27	653479.07	9664149.75	1131.23
P10	653487.58	9664198.75	1131.22	P28	653477.90	9664146.98	1131.20
P11	653486.87	9664195.86	1131.17	P29	653477.36	9664144.04	1131.20
P12	653485.87	9664193.03	1131.22	P30	653476.88	9664141.08	1131.25
P13	653484.87	9664190.20	1131.25	P31	653476.40	9664138.12	1131.17
P14	653483.88	9664187.37	1131.20	P32	653475.92	9664135.16	1131.27
P15	653482.75	9664184.59	1131.46	P33	653475.44	9664132.19	1131.30
P16	653481.55	9664181.84	1131.48	P34	653475.22	9664129.22	1131.27
P17	653480.35	9664179.09	1131.17	P35	653475.38	9664126.22	1131.29
P18	653479.37	9664176.29	1131.15	P36	653475.53	9664123.23	1131.19

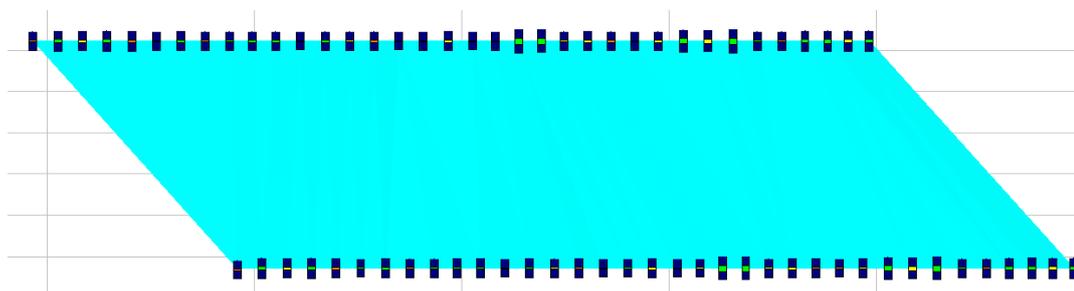
La Figura 4.7 muestra los resultados de la creación de dos secciones que posteriormente serán trianguladas para mostrar el cuerpo mineralizado.



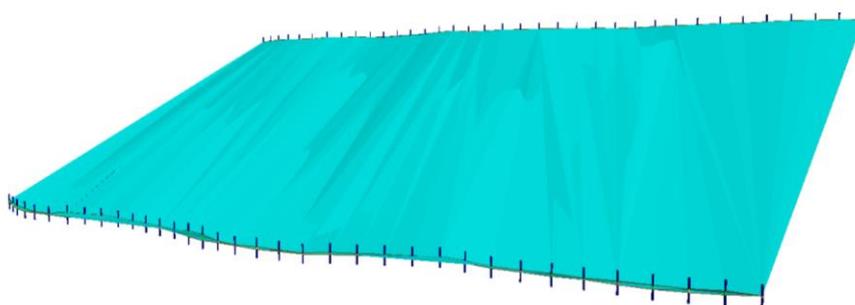
**Figura 4. 7:** Vista isométrica de la sección proyectada a una distancia de 60 metros con buzamiento de 33°.

#### 4.4.4. Triangulación del Cuerpo Mineral

Por último, se procede a la triangulación de las dos secciones para formar el cuerpo tal como se presenta en la Figura 4.8 y en la Figura 4.9 muestra la vista isométrica.



**Figura 4. 8:** Vista en Planta (ZE) del sólido generado a partir de las dos secciones (muestreo original y sección proyectada a 60 metros)



**Figura 4. 9:** Vista isométrica del cuerpo mineral generado a partir de las dos secciones (muestreo original y sección proyectada).

#### **4.4.5. Verificación de los sondeos (datos de muestras).**

Una etapa importante en la validación de los datos de muestreo, es la verificación de los sondeos ingresados al software RecMin, por lo que es imprescindible revisar si todas las muestras contienen valores certeros, de no ser así, se completa la tabla con valores que se requieran para el modelamiento.

El software RecMin contiene una opción en la que emite un Informe de los sondeos realizados (Figura 4.10) y permite exportarlos en un archivo con formato de texto para visualizar los errores que tiene cada sondeo y evitar inconvenientes al momento del análisis estadístico de los datos.

```

> Total sondeos = 36
> Sondeos repetidos en la lista =
  Ninguno
> Sondeos sin medidas de desviaciones =
  Ninguno
> Sondeos sin muestras =
  Ninguno
> Sondeos sin datos de litologías =
  Ninguno
> Medidas de desviaciones incompletas =
  Ninguna
> Información sobre muestras =

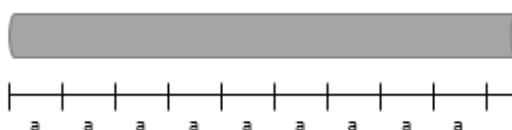
```

**Figura 4. 10:** Informe de verificación de los sondeos.

## 4.5. Análisis Exploratorio de los datos de muestras.

### 4.5.1. Compósitos de los sondeos

De manera general, para el estudio de una variable regionalizada no es conveniente mezclar tamaños diferentes de muestras, por lo que resulta necesario realizar una operación la cual consiste en regularizar o compositar el sondaje (Figura 4.11), es decir disponer de datos (compósitos) con longitudes constantes (Alfaro, 2007).



**Figura 4. 11:** Regularización de un sondaje a lo largo de una constante “a”.

Los valores de la potencia de la veta varían de 0.10 a 0.77 m, con una media aritmética de 0.32 m. El valor óptimo de la longitud del muestreo debe ser de 0.10 metros, de modo que se considere para el posterior análisis todos los puntos del muestreo.

Realizar el compósito de los valores del muestreo, resulta necesario para poder exportarlos como un archivo en formato DAT, que puede ser utilizado por un software geoestadístico como lo es SGeMS y posteriormente realizar el análisis exploratorio de los datos para determinar su distribución y ley media del mineral.

#### **4.5.2. Método Estadístico para la Determinación de la Ley Media.**

El conjunto de datos a partir del muestreo debe contener valores de leyes que presenten una distribución normal o Gaussiana, lo cual no es un inconveniente, ya que comúnmente los elementos químicos en la naturaleza suelen mostrar este tipo de comportamiento o a lo sumo, una distribución log-normal. Si este fuera el caso, al conjunto de datos se le calculan los logaritmos naturales de los diferentes valores, para que cambien su distribución y poder realizar el cálculo de la ley media.

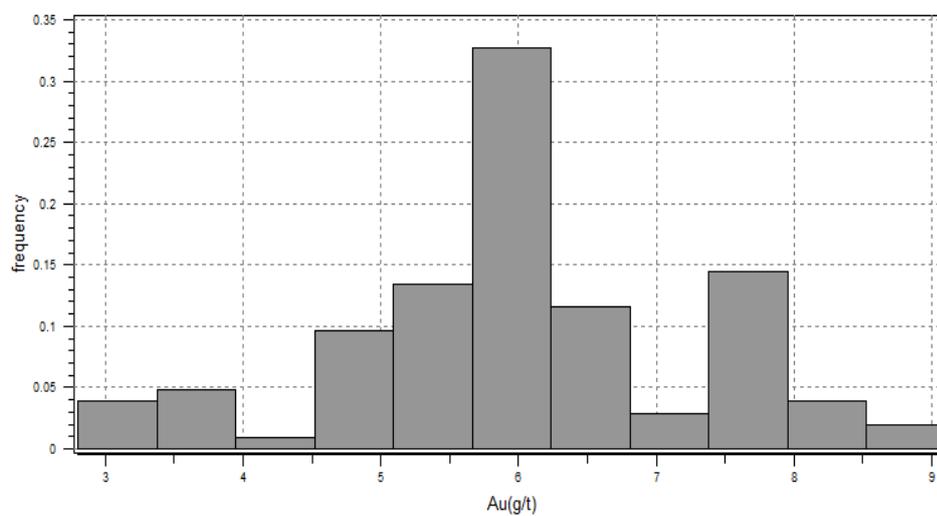
Según Bustillo & López (1997), existen tres métodos a la hora de establecer si una distribución es normal: Histogramas, recta de Henri y Ji-cuadrado. Los dos primeros son métodos visuales, es decir, no existe ningún criterio matemático que permita definir el carácter normal de la distribución. Mientras que el método Ji-cuadrado establece dicho carácter según un estudio estadístico y en función de un determinado nivel de significancia. Sin embargo, el método más común es el histograma de frecuencias, en el cual se puede observar un cierto sesgo de los datos.

Para determinar el tipo de distribución que presenta los datos a ser analizados, se empleó el programa SGeMS, que permite importar los compósitos en formato de texto creados por RecMin, y a partir de ellos realizar el gráfico estadístico.

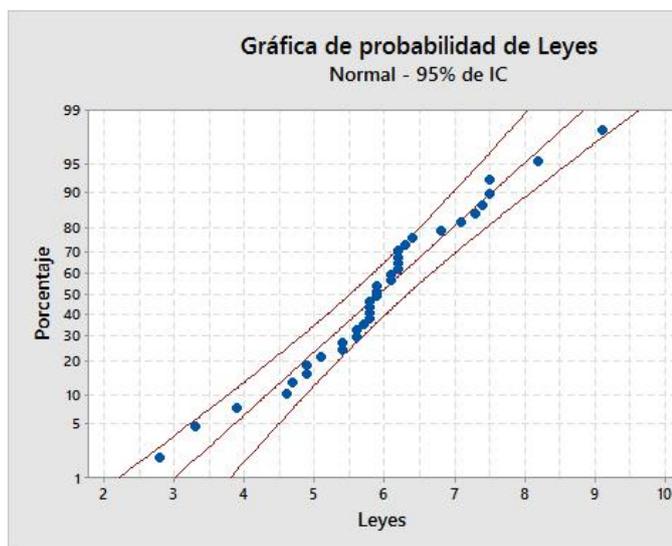
**Tabla XVI:** Estadística descriptiva del análisis exploratorio de leyes de Au (g/t).

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>No. de compósitos</b>	104
<b>No. de muestras</b>	36
<b>Media</b>	6.00789
<b>Varianza</b>	1.52674
<b>Desviación Estándar</b>	1.23561
<b>Asimetría o Sesgo</b>	-0.07
<b>Valor Máximo</b>	9.1
<b>Cuartil Superior</b>	6.4
<b>Mediana</b>	6.1
<b>Cuartil Inferior</b>	5.4
<b>Valor Mínimo</b>	2.8

En la Tabla 16 de la estadística descriptiva del conjunto de datos, se muestra que el sesgo o asimetría es igual a -0.07, indicativo de un posible carácter normal de la distribución. No obstante, se representó al conjunto de datos en un histograma de frecuencias, como se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4. 12:** Histograma de Frecuencias para los compósitos de leyes de Au (gr/t). Otra manera de determinar rápidamente si un conjunto de datos cumple con una distribución normal es mediante el criterio de verificación de la normalidad con respecto a la media y a la mediana, el cual se basa en que ambos valores estadísticos deben ser semejantes. Se puede evidenciar que los estadísticos del conjunto de datos cumplen con el criterio, ya que los valores entre la media y la mediana son muy cercanos, 6.00789 y 6.1 respectivamente



**Figura 4. 13:** Gráfica de Probabilidad (Método de la recta de Henri) para confirmar la distribución normal de los datos.

Mediante el programa Minitab, se representó al conjunto de valores (leyes de Au (gr/t)) en una escala probabilística y se puede observar en la Figura 4.13 que estos pueden ajustarse a una recta, por lo que puede considerarse a la población como una distribución normal. Sin embargo, debería comprobarse la normalidad de la distribución, mediante otros métodos como el de la Ji-cuadrado, que es la única técnica que puede testificar con una fiabilidad estadística el carácter normal de una distribución (Bustillo & López, 1997).

Este método se basa en establecer una serie de rebanadas para la distribución normal establecida estadísticamente y las mismas rebanadas para la distribución cuya testificación se quiere llevar a cabo, y posteriormente, comparar ambos grupos de rebanadas y comprobar su parecido. Pero, este estudio no es objetivo del trabajo.

Una vez comprobado el carácter normal de la distribución en estudio, el cálculo de la ley media no es más que la media aritmética de las leyes, es decir:

$$G_m = \sum (G_i/n)$$

Donde:

$G_m$  = Ley media

$G_i$  = Valores de las diferentes leyes

$n$  = Número de datos

#### 4.6. Análisis Variográfico de los datos

El variograma o semivariograma es una función que constituye la parte fundamental dentro del estudio de la geoestadística, permite modelar la continuidad espacial de las leyes, con su valor de discrepancia que toman con relación a su distribución espacial  $R^n$ , como su nombre mismo lo indica es un método para medir la varianza y proporciona los parámetros requeridos para la estimación de las leyes.

La función teórica de la función variograma  $\gamma(h)$  es la esperanza matemática siguiente:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2} E[(Z(x + \vec{h}) - Z(\vec{x}))^2]$$

Existen dos tipos de variogramas:

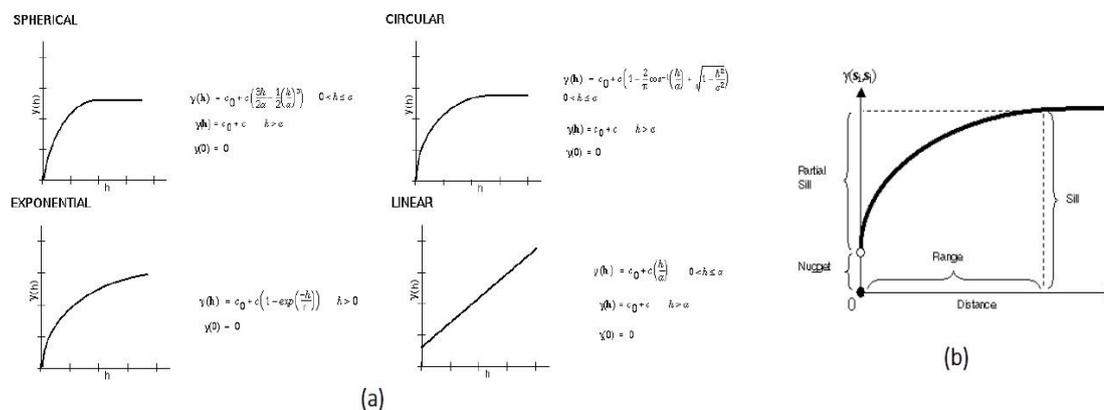
- ✓ El variograma experimental, calculado a partir de los datos
- ✓ El variograma teórico, que corresponde a una ecuación que se ajusta al variograma experimental.

El ajuste de variogramas representa un punto crucial al momento de un estudio geoestadístico porque todos los cálculos posteriores se harán utilizando exclusivamente el modelo teórico.

Para tener un buen ajuste, hay que considerar que uno de los objetivos finales es la estimación de leyes de bloques, dentro de una cierta vecindad restringida de manera de no considerar demasiadas muestras para estimar la ley del bloque.

A partir del semivariograma experimental, se deben definir los distintos modelos de semivariogramas (Figura 4.14 (a)) y sus principales características (Figura 4.14 (b)) que son los siguientes:

- **Efecto Pepita:** Intersección con el eje Y.
- **Rango:** Distancia a la cual la semivarianza de los datos empieza a tener tendencia constante.
- **Meseta:** Valor al cual la semivarianza (eje Y) de los datos empieza a tener tendencia constante. Meseta Parcial: La diferencia entre la meseta y el efecto pepita.



**Figura 4. 14:** (a) Ejemplos de modelos de semivariogramas. (b) Componentes principales de un semivariograma.

(Fuente: ArcGIS Resources, 2016)

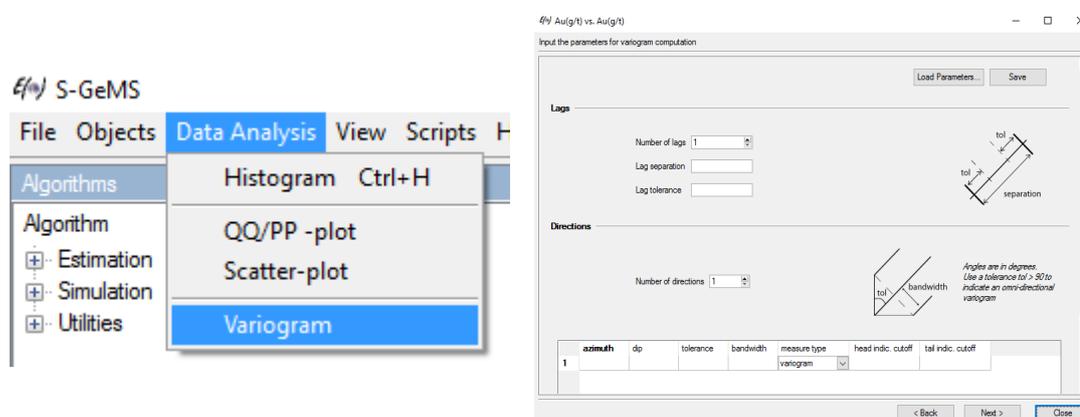
El primer paso en la construcción del variograma en una dirección particular es la selección del incremento para la distancia  $h$  y su respectivo valor de tolerancia.

Una vez definidos estos parámetros es importante recalcar que la selección de la distancia  $h$  y su respectivo valor de tolerancia constituyen el primer paso para la construcción del variograma en una dirección en particular. Mientras más pequeño el incremento, la posibilidad de obtener una mayor cantidad de puntos será más favorable para una mejor definición del semivariograma.

Un buen modelo de semivariograma depende en gran parte de un trabajo iterativo en el cual se intenta mantener un equilibrio entre la obtención de una curva suave a partir de un tamaño de muestra grande.

#### 4.6.1. Construcción del Semivariograma con SGeMS.

El programa SGeMS es un software geoestadístico de dominio público, permite modelar el semivariograma teórico mediante 3 tipos de gráficas, lo que facilita al usuario seleccionar un modelo geoestadístico acorde a las necesidades. A partir de los compósitos elaborados en el programa RecMin como Archivo DAT, se procede a utilizar la herramienta que se presenta en la Figura 4.15.



**Figura 4. 15:** Interfaz de la herramienta “Data Analysis - Variogram” incluido en el software geoestadístico SGeMS.

Posteriormente para el modelamiento del semivariograma fue necesario establecer algunos parámetros los cuales se resumen en la Tabla XVII.

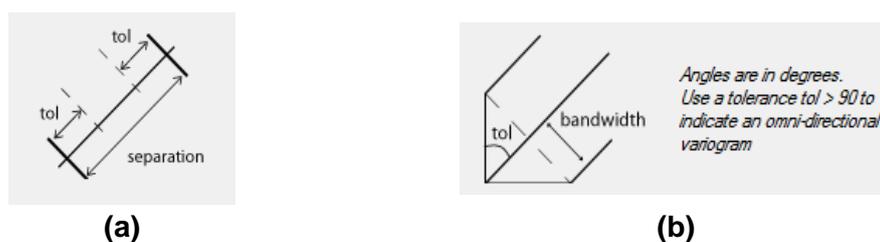
**Tabla XVII:** Parámetros definidos para el modelamiento del semivariograma experimental.

<b>Desfases (Lags)</b>	
Número de desfases (Number of lags)	36
Separación del desfase (Lag separation)	3 m
Tolerancia del desfase (Lag tolerance)	1.5 m
<b>Directions (Direcciones)</b>	
Número de direcciones (Number of directions)	1
Azimut	197°

Buzamiento (Dip)	0°
Tolerancia (Tolerance angular)	5°
Ancho de Banda (Bandwidth)	25 m
Tipo de Medida (Measure Type)	Variograma

En la Figura 4.16 se representa gráficamente los parámetros definidos en la

Tabla 17.



**Figura 4. 16:** Parámetros a definir para el modelamiento del semivariograma. (a) Tolerancia del Desfase y Separación del Desfase. (b) Tolerancia angular en función del azimut y bandwidth.

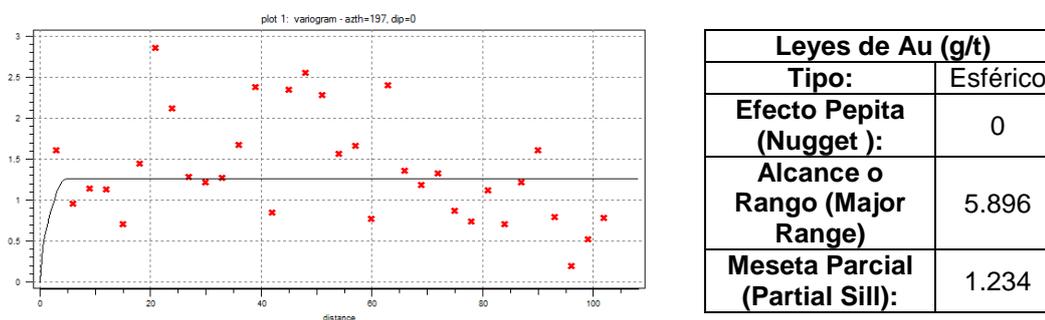
El número de lags (desfases) fue escogido en función de la cantidad de muestras recolectadas, por otra parte, la separación de lags se realizó en función de la distancia de separación de las muestras el cual fue de 3 metros, la tolerancia del desfase se definió en 1.5 metros, la mitad de la distancia entre muestras.

Un variograma omnidireccional permite analizar la continuidad espacial de las muestras, es decir que consta de todas las posibles direcciones combinadas en un solo variograma, de esta manera puede ser interpretado como el promedio de todos los variogramas experimentales y obtener un modelo teórico que mejor se ajuste, lo cual es ideal cuando la población de datos es bastante grande.

La anisotropía geoestadística constituye un estudio importante para definir parámetros como el sill y el alcance o rango máximo a medida que la dirección cambie, este tipo de anisotropía es conocida como anisotropía geométrica, mientras que la anisotropía zonal se define como el valor del sill que cambia en función de la distancia cuando el alcance del semivariograma permanece constante.

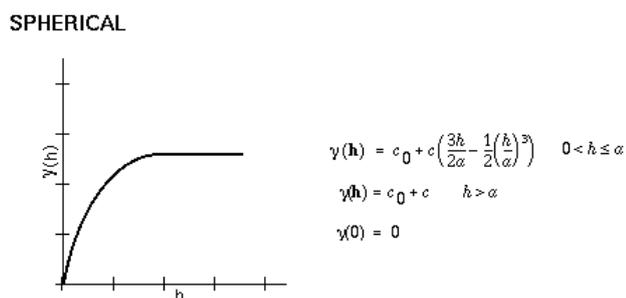
En este caso, la dirección seleccionada fue la dirección de anisotropía que presenta el cuerpo mineral. La tolerancia máxima es de 5° ya que los sondeos simulados son totalmente verticales y por ende la tolerancia establecida debería ser lo mínima posible, ya que este análisis es de tipo unidireccional y en cuanto al ancho de banda o bandwidth se colocó un valor máximo de 25 metros.

Posteriormente, se seleccionó un modelo de semivariograma de tipo esférico, debido a que su curva es la que mejor se ajusta a los datos. La Figura 4.17 presenta el modelo del semivariograma teórico.



**Figura 4. 17:** Ajuste del semivariograma unidireccional con un modelo esférico a partir del programa SGeMS.

Este modelo se comporta parabólicamente cerca al origen, esto se debe a que el espaciamiento del muestreo es muy pequeño y el grado de continuidad es alto (Figura 4.18), como en el caso del campo petrolero al momento de analizar datos sísmicos.



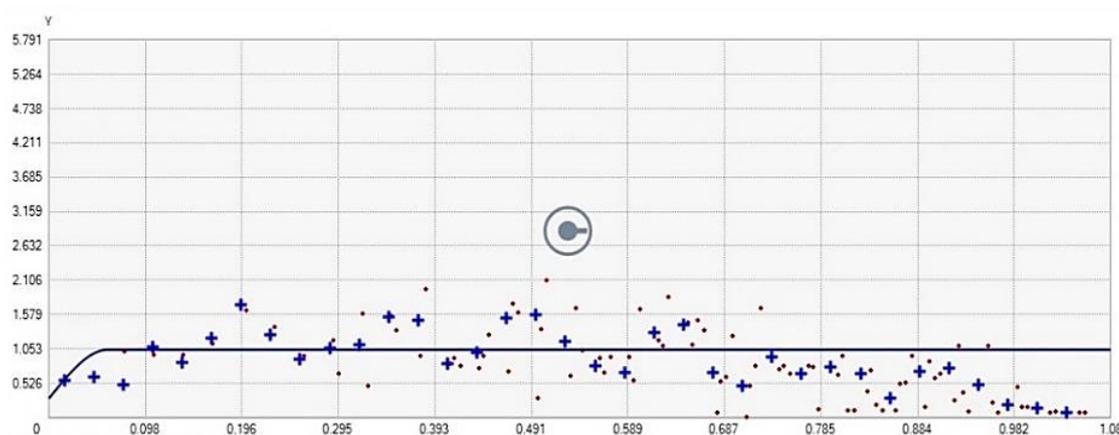
**Figura 4. 18:** Modelo Esférico en función de la distancia.

(Fuente: Hohn, 1999)

Debido a que la herramienta SGeMS presenta un semivariograma bastante simple en el que no permite observar claramente parámetros esenciales para establecer un modelo teórico, como lo son el efecto pepita y el rango máximo o alcance, se empleó el software ArcGIS que permite realizar un análisis geoestadístico a partir de una herramienta llamada “Geostatistical Wizard” del módulo “Geostatistical Analyst”.

Este software a diferencia de SGeMS, presenta al usuario distintos tipos de semivariogramas teóricos a partir del cual puede ajustarse el semivariograma experimental, además cuenta con una opción de optimización del modelo, el cual consiste en ajustar automáticamente el modelo teórico de manera iterativa para minimizar el error cuadrático medio, lo que lo convierte en un programa

más didáctico y sencillo de usar. En la Figura 4.19 se muestra la interfaz de la herramienta “Geostatistical Analyst” incluida en el software ArcGIS.



**Figura 4. 19:** Opciones del modelado del semivariograma para el análisis geostatístico de los valores de leyes de Au (g/t).

Utilizando esta herramienta se pudo determinar los parámetros principales del modelo de semivariograma, los cuales se muestra en la Tabla XVIII.

**Tabla XVIII:** Parámetros del modelado de semivariograma teórico obtenidos con ArcGIS 10.1.

Leyes de Au (g/t)	
<b>Tipo:</b>	Esférico
<b>Efecto Pepita (Nugget ):</b>	0.295
<b>Alcance o Rango (Major Range)</b>	5.985
<b>Meseta Parcial (Partial Sill):</b>	0.748

A partir de este modelo se define la superficie a ser interpolada ya sea por el método de inverso a la distancia o utilizando el estimador insesgado kriging.

#### 4.7. Modelo de Bloques con RecMin.

##### 4.7.1. Generación de la tabla de bloques

Para la creación de una tabla de bloques es necesario definir las variables que se muestran en la Tabla XIX.

**Tabla XIX:** Variables a definir para generación de la Tabla de Bloques.

<b>Variables</b>	<b>Tipo de Dato</b>
<b>Peso</b>	Numérico
<b>Au</b>	Numérico
<b>Cat_texto (SGeMS)</b>	Texto (10)
<b>Cat_numérico (RecMin)</b>	Entero Corto

(Fuente: Velarde V.,2016)

La variable Peso almacenará el tonelaje de cada sub-bloque el cual se definió de tipo Numérico para que pueda admitir decimales, el campo Au tendrá los valores de las leyes en cada bloque de estimación, por otro lado, la variable Cat\_texto contendrá el valor del bloque en sí, determinándolo como Probado o Probable, es por ello que tiene un campo máximo de 10 caracteres, y por último el campo Cat\_numérico tendrá los valores entre 1 y 0, al momento de estimar las reservas con el programa RecMin con el método de Inverso a la Distancia, donde 1 significará valores con alto contenido de ley y 0, representará los valores por debajo de la ley de corte.

#### **4.7.2. Creación del Modelo de Bloques del cuerpo mineral.**

La determinación del tamaño del bloque de estimación es un tema que no ha sido muy abordado y no se conocen resultados concretos que sean concluyentes a nivel internacional, por ello aún no se ha establecido una metodología para seleccionar el tamaño óptimo de los bloques de forma racional, y se desconoce la influencia que puede tener el tamaño del bloque

de estimación en la precisión y exactitud de la estimación de los recursos geológicos in situ (Gómez, Cuador Gil, & Estévez, 2011).

Para este caso, se seleccionó el tamaño del bloque en función de los límites del cuerpo geológico mineralizado, de tal manera que lo encierre totalmente, para posteriormente discretizarlos.

Para determinar las dimensiones del cuerpo geológico se deben establecer tanto los límites inferiores, superiores y de elevación, además de establecer las diferencias entre ellos para calcular la cantidad de bloques que serían generados, como se muestra en la Tabla XX.

**Tabla XX:** Características del Modelo de Bloques para la veta.

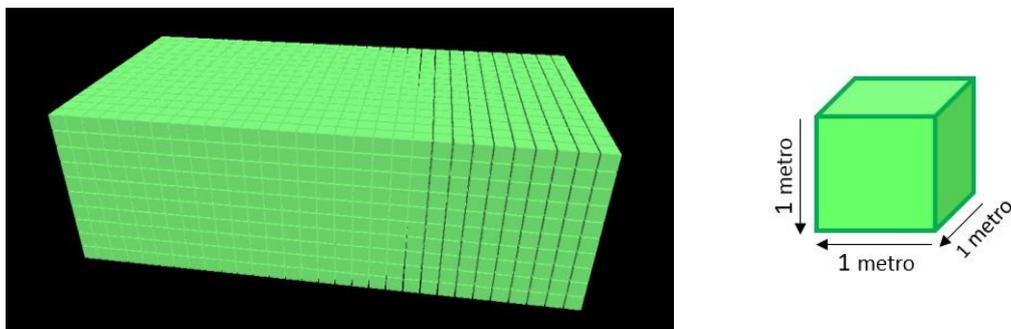
Coordenadas Cortas			Distancia (m)	Tamaño de los bloques	Cantidad de bloques
X (ESTE)	Límite superior	3500	75	1 metro	75
	Límite inferior	3425			
Y (NORTE)	Límite superior	4250	150	1 metro	150
	Límite inferior	4100			
Z (ELEVACIÓN)	Límite superior	1150	50	1 metro	50
	Límite inferior	1100			
<b>TOTAL DE BLOQUES GENERADOS</b>					<b>562,500</b>

En la Tabla XXI se muestran los datos de las coordenadas de origen del paralelepípedo generado.

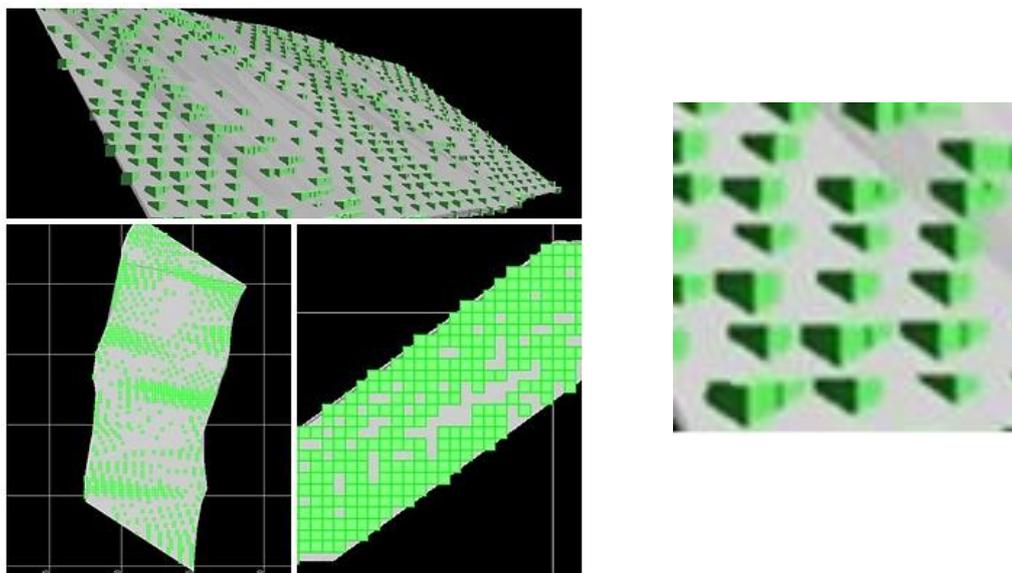
**Tabla XXI:** Coordenadas del punto de origen del Bloque.

Coordenadas de Origen del Bloque	
Coordenada Este (X)	653425
Coordenada Norte (Y)	9664100
Coordenada de Elevación (Z)	1100

Una vez determinado estos parámetros necesarios para la creación de la tabla de bloques, se procede a generar el paralelepípedo que se muestra en la Figura 4.20.



**Figura 4. 20:** Vista en 3D del paralelepípedo a partir de la creación del Bloque.



**Figura 4. 21:** Discretización del Modelo de Bloques en función del cuerpo mineralizado.

Al momento de realizar la discretización o regularización de los bloques, los bloques tratan de ajustarse o acoplarse al cuerpo mineralizado, generando un total de 562,500 bloques. Como era de esperarse, con un tamaño de sub-bloque de (1x1x1) m, es prácticamente imposible que se pueda modelar la veta (Figura 4.21), ya que la potencia máxima de la veta es de 0.70 metros y la mínima 0.10 metros. Por lo que, se descarta realizar un modelamiento de bloques para cuerpos tabulares de muy baja potencia como es el caso.

Sin embargo, para realizar el modelo de bloques de cualquier yacimiento de grandes dimensiones. Se debe tomar en cuenta que existen criterios establecidos para definir el tamaño óptimo de los sub-bloques o celdas, comúnmente se toma una distancia de  $\frac{1}{4}$  del promedio de la separación de sondajes. Y la altura de los bloques lo ideal es que coincida con el tamaño de los compósitos.

En la Figura 4.22 se observa un ejemplo del modelo de bloques de un depósito de tipo pórfido de grandes dimensiones.



**Figura 4. 22:** Ejemplo del Modelo de Bloques de un Batolito.

*(Fuente: GEOVIA SURPAC, 2013)*

#### **4.8. Alternativa para el modelamiento de cuerpos vetiformes angostos.**

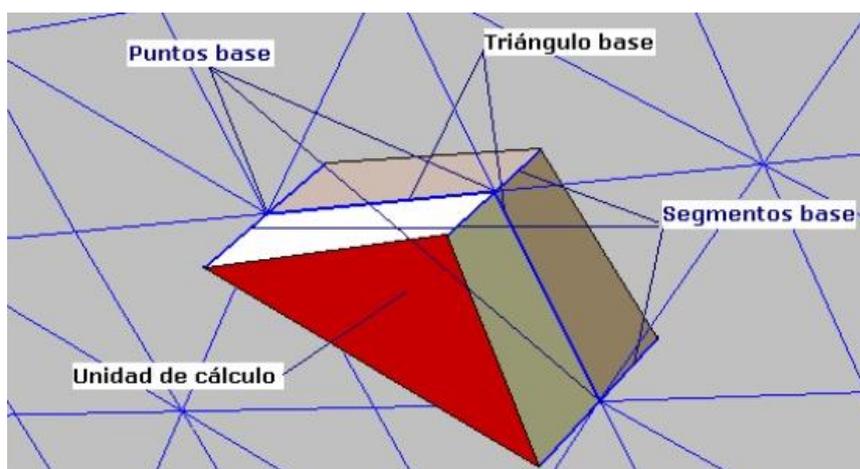
El método pentaédrico es una técnica empleada únicamente por el programa RecMin, creado con el afán de realizar un mejor modelamiento de los cuerpos tabulares, un método totalmente innovador el cual propone una variante al modelo de bloques tradicional que realizan los softwares comerciales, este método al igual que el modelo tradicional trabaja en tres dimensiones que permite realizar una interpolación de los datos incluyendo por métodos geoestadísticos o mediante el método del inverso a la distancia utilizando elipsoides de búsqueda.

Además, no sólo estima las leyes minerales sino también los valores de potencia lo que convierte a este método y al software mucho más novedoso, desarrollado por el Dr. César Castañón Fernández de la Universidad de Oviedo – España en su Tesis doctoral y como difusor del método el Ing. de Minas Yhonny Ruiz Dioses de la empresa SolMine (Soluciones Mineras Libres).

Este método es idóneo para proyectos mineros de Pequeña Escala que desean realizar estimaciones de leyes y potencia de las vetas o cuerpos mineralizados en los bloques de explotación.

El método trata de definir una base de datos de unidades de cálculo, de una forma parecida a los bloques, con la diferencia de que una unidad de cálculo está definida por un triángulo en el centro de la capa (Figura 4.23) de tal forma

que cada triángulo tendrá en cada vértice un segmento que medirá la potencia real en ese punto y con dirección la media de las perpendiculares a los planos formados por todos los triángulos que comparten ese vértice.



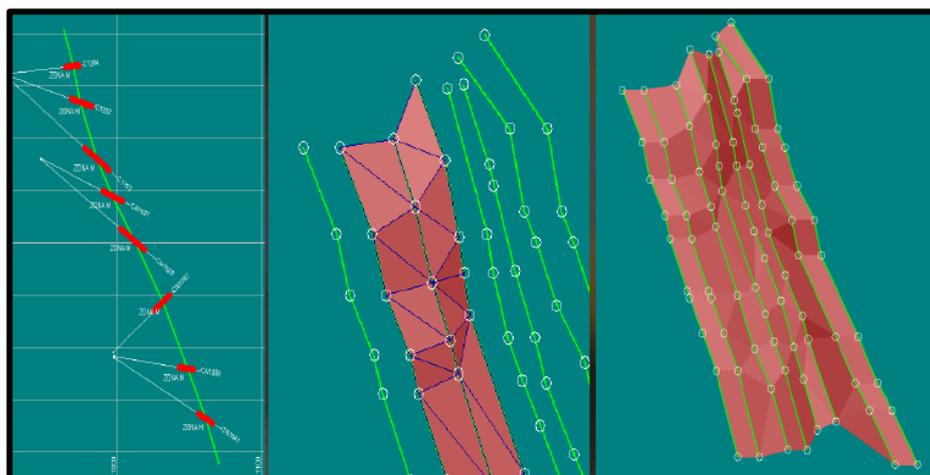
**Figura 4. 23:** Unidad de Cálculo del Método Pentaédrico.

(Fuente: Castañón Fernández, 2016)

De esta forma todos los triángulos que comparten un vértice, también comparten este segmento (arista), lo que permitirá que encajen perfectamente todas las unidades de cálculo en el espacio; los tres segmentos mencionados, junto a los dos triángulos que se forman uniendo sus extremos, nos definen el volumen de cada unidad de cálculo (Castañón Fernández, 2016).

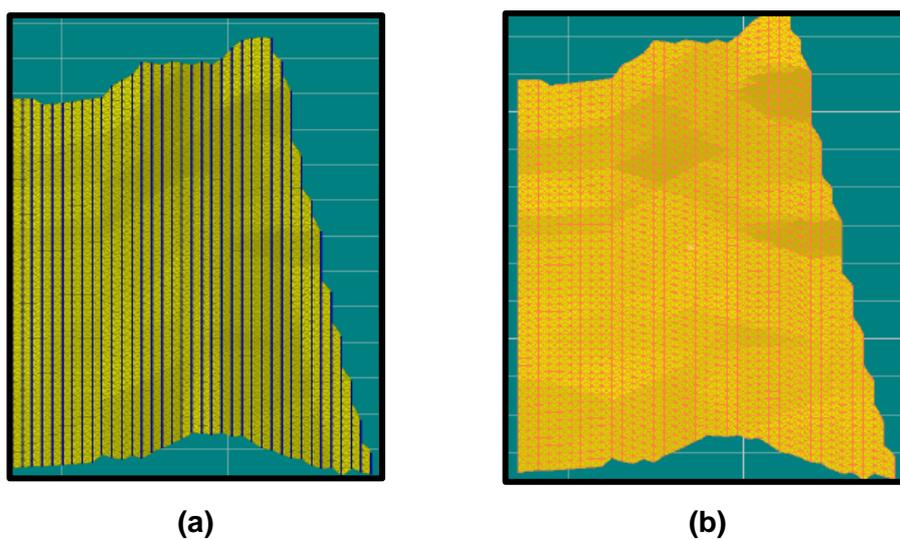
#### 4.8.1. Método pentaédrico para cuerpos vetiformes angostos.

- a) Definir la capa o zona mineralizada de los sondeos, para posteriormente delimitar una superficie base que intercepta en el centro espacial del cuerpo tridimensional mediante la triangulación (Figura 4.24).



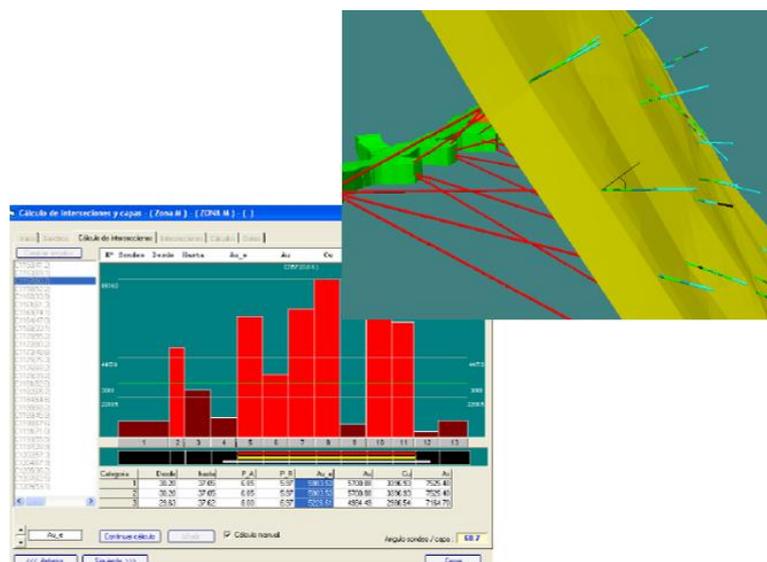
**Figura 4. 24:** Definir la superficie en el centro de la capa (Capa base).

- b) Definir la malla de puntos regularmente repartida sobre la superficie base para la formación de triángulos (Figura 4.25).



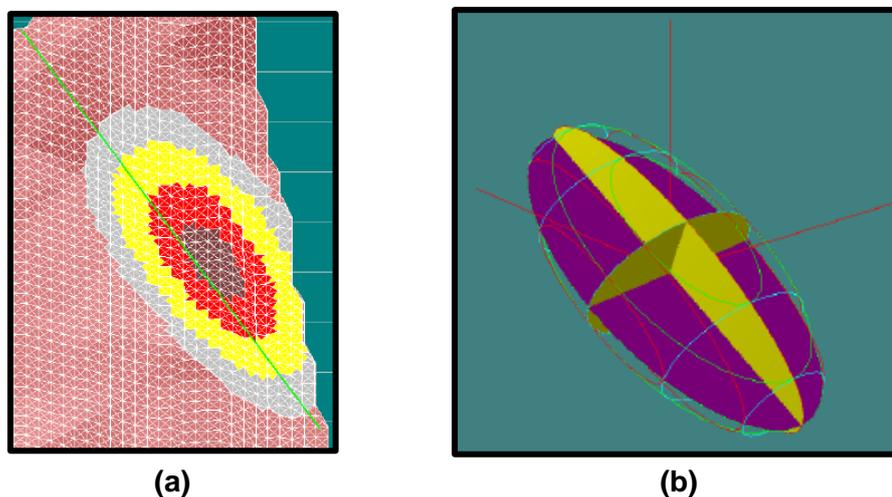
**Figura 4. 25:** Malla de puntos sobre la superficie base (a) T3 original con la malla de puntos (b) T3 creado a partir de la malla de puntos.

- c) Determinar las intersecciones entre los sondeos y la capa mineral para establecer los puntos que presentan una ley mayor a la ley de corte (Figura 4.26).



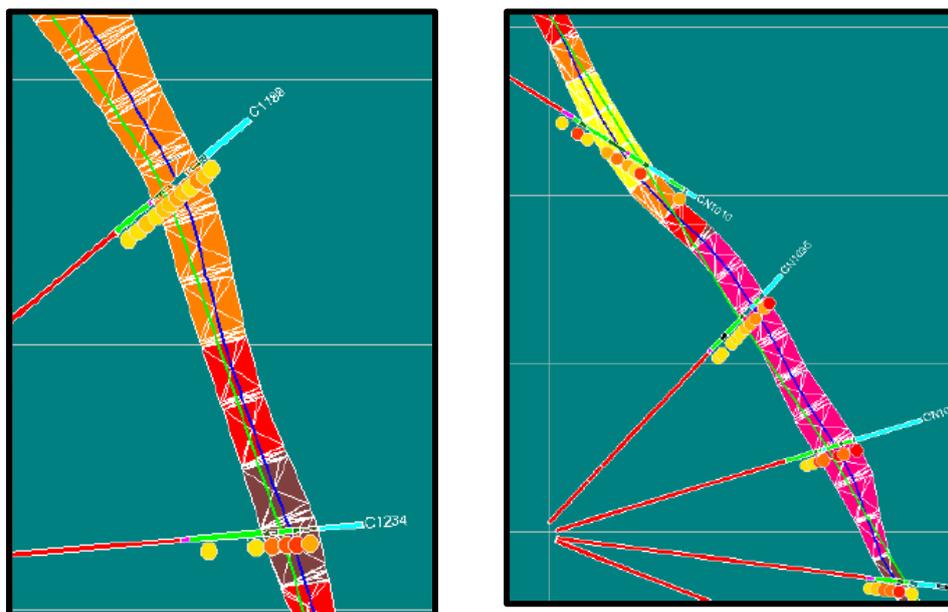
**Figura 4. 26:** Interfaz del software RecMin con la herramienta “Cálculo de Intersecciones y capas”.

- d) Interpolación de leyes y potencias definiendo elipsoides de búsqueda (Figura 4.27 (b)) a través de la malla de puntos establecida (Figura 4.27 (a)) y de las intersecciones de los sondeos.



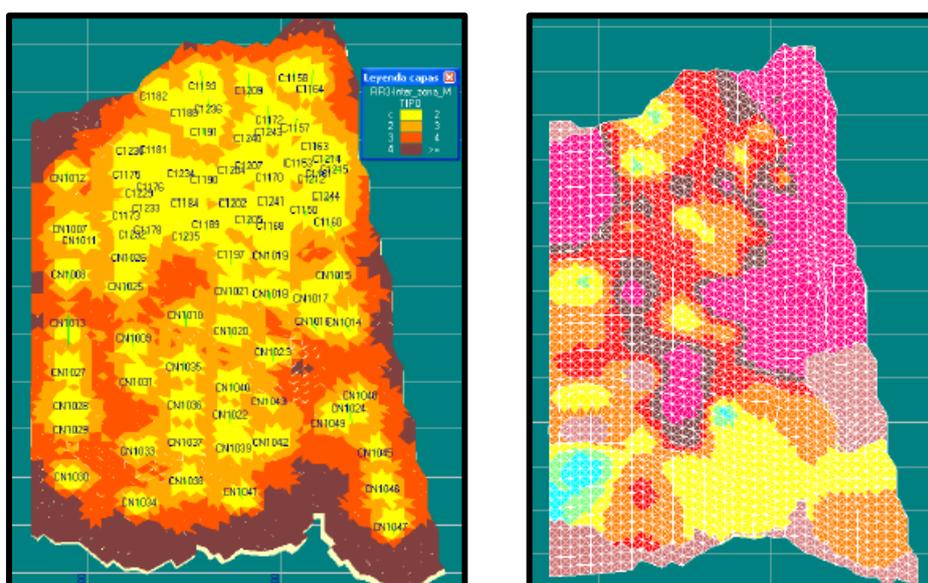
**Figura 4. 27:** Estudio geoestadístico para interpolación de leyes y potencias. (a) Vista en Planta (NE) del elipsoide de búsqueda a través de la malla de puntos. (b) Vista isométrica del elipsoide.

- e) Reposicionamiento de la superficie base



**Figura 4. 28:** Capa o Superficie Base que intercepta los sondeos mostrando la interpolación de las leyes.

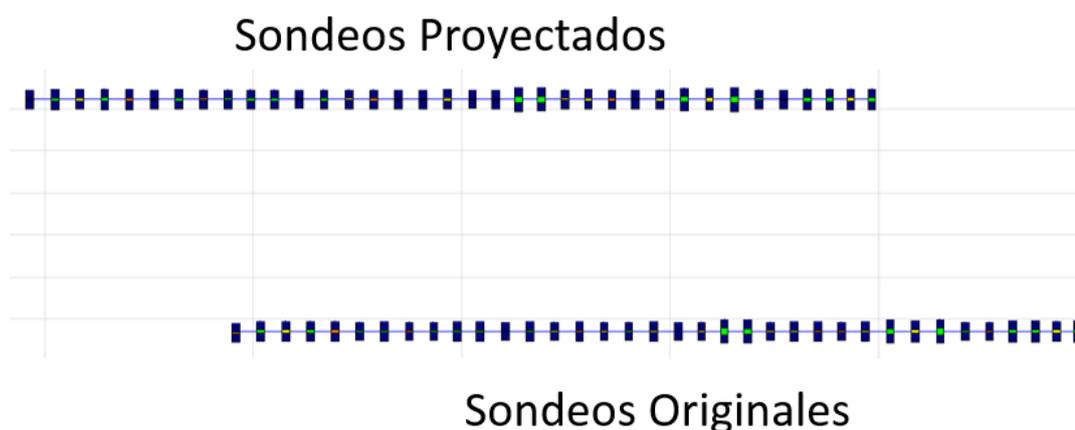
f) Gráfica y Visualización de los Resultados (Figura 4.29)



**Figura 4. 29:** Vista en Planta de los resultados de la interpolación de valores de Leyes y Potencia.

#### 4.9. Modelamiento del Cuerpo Mineralizado del Bloque 2 del Sector “X7” de la Mina LAS PARALELAS.

A partir de la metodología explicada, se empezó a crear la capa mineralizada a partir de la intercepción en el centro de los sondeos (Figura 4.30), para este caso como se tiene poca cantidad de muestras recolectadas en la zona de estudio, solo se cuenta con dos secciones (original y proyectada), la ubicación de los puntos proyectados tan solo facilita el modelamiento de la capa mineralizada, que será como base para la generación del T3 (Triangulación).



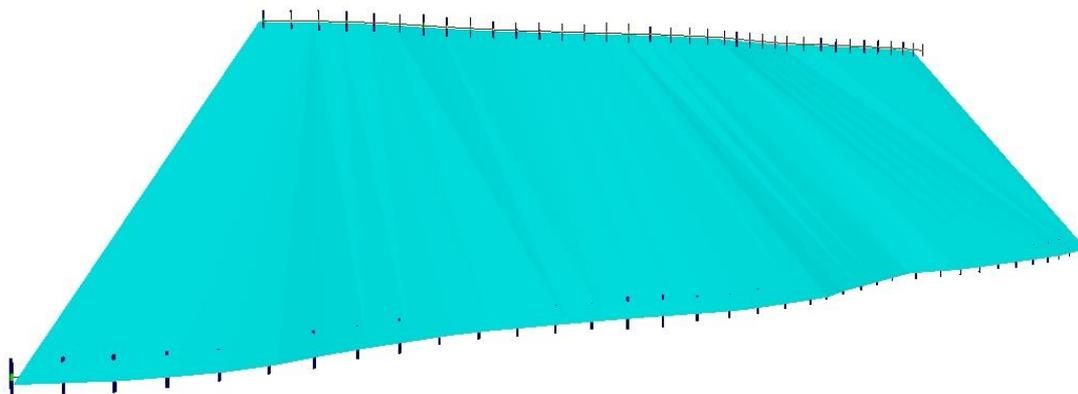
**Figura 4. 30:** Vista ZN de la creación de secciones que intercepten el centro de los sondeos.

**Donde:**

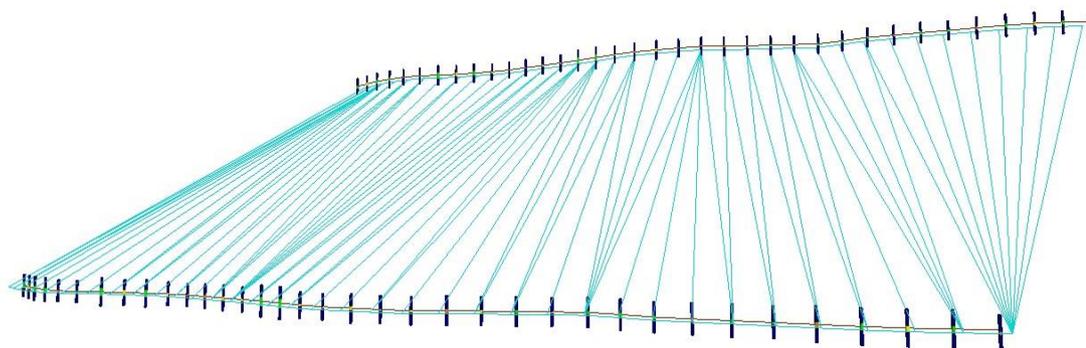
————— Línea de intersección en la mitad de la zona mineral de los sondeos.

Contando con estas dos secciones se procede a unir las dos secciones mediante la opción “Unir con T3 a otra línea” (Figura 4.31), lo que genera una

triangulación sencilla mediante líneas paralelas, como se muestra en la Figura 4.32.



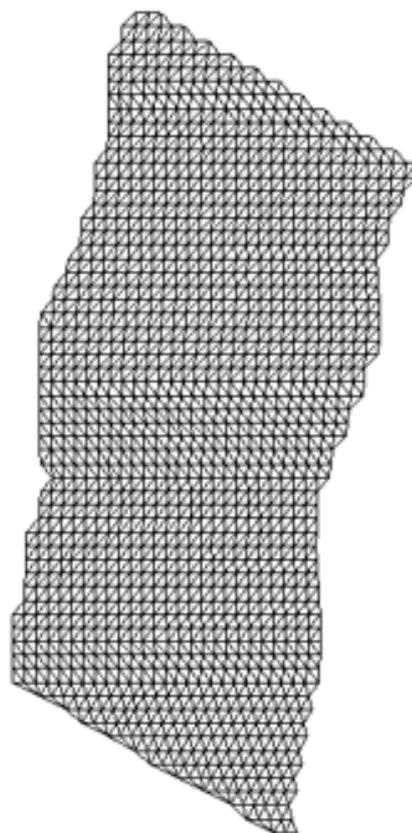
**Figura 4. 31:** Vista isométrica de la capa base (T3 sólido) de la zona mineralizada de la veta del Bloque 2 del Frontón Derecho Sector "X7".



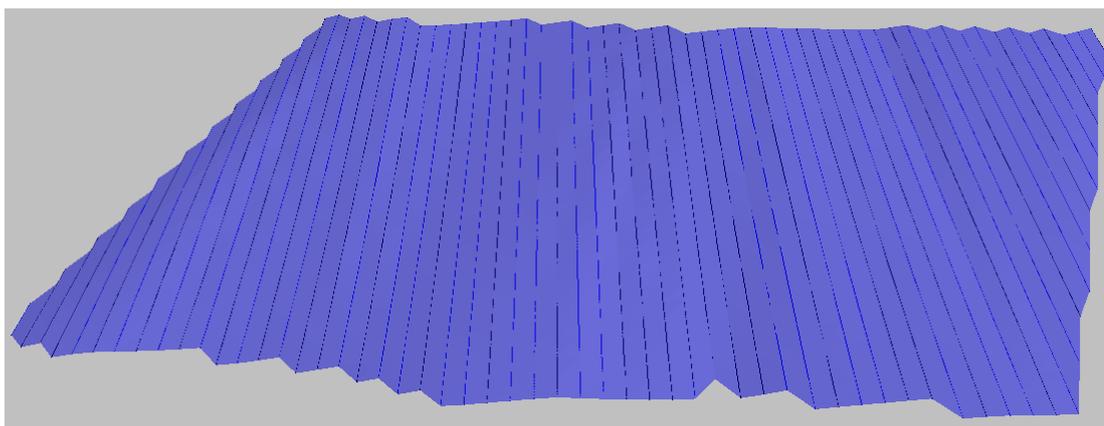
**Figura 4. 32:** Triangulación de la capa base de la zona mineralizada.

Posteriormente, mediante la opción "T3 para cálculos" del software RecMin, se procede al empleo del método pentaédrico que consiste en la generación de triángulos de igual tamaño sobre la capa base, como se puede observar en la Figura 4.33.

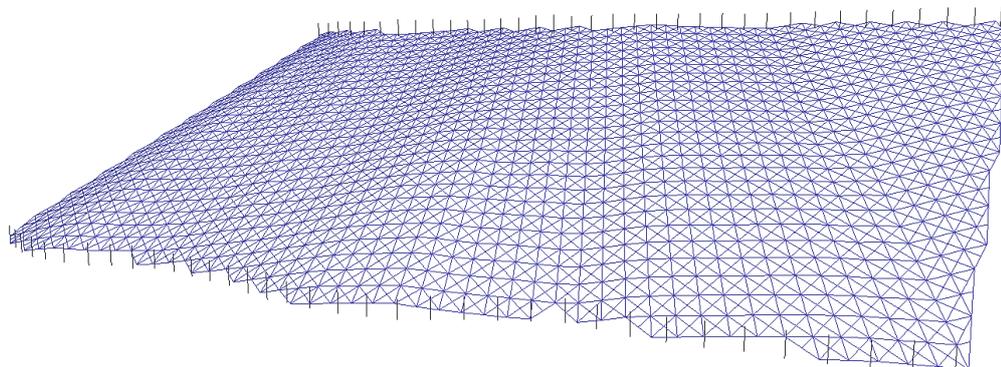
Parámetros de la Tabla T3	
Separación entre vértices en eje X	3 metros
Separación entre vértices en eje Y	3 metros
Ángulo de giro en el eje Z	0°



**Figura 4. 33:** Vista en Planta de la Triangulación de la capa base utilizando el método pentaédrico a partir de los parámetros definidos en la Tabla T3.



**Figura 4. 34:** Vista isométrica con cara sólida del cuerpo mineralizado en la que se pueden observar la generación de secciones paralelas cada 3 metros.



**Figura 4. 35:** Vista isométrica de la Triangulación con los sondeos realizados.

A partir de la capa mineral triangulada en la que se calculan los triángulos se procede a definir los parámetros (Tabla XXII) que se detallan a continuación:

**Tabla XXII:** Parámetros para la generación de los pentaedros.

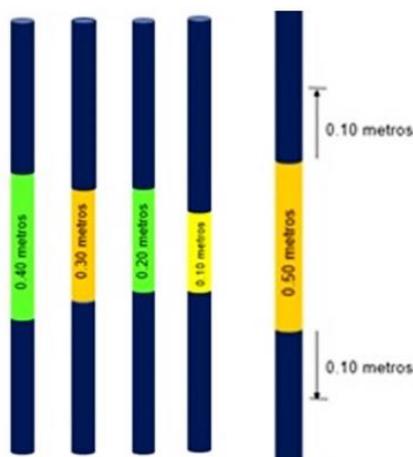
Parámetros	Valores
Densidad de la capa mineral	2.7 t/m <sup>3</sup>
Cut-off	3 g/t
Potencia Minera	0.10 m
Overbreak	0.10 m
Máxima Potencia de Estéril	0.10 m
<b>Índice del Inverso a la Distancia</b>	2
<b>Distancia Máxima de Influencia</b>	50 metros

La densidad de la capa mineral y la ley de corte son parámetros fijos que están en función del yacimiento. La ley de corte se define como la concentración mínima que debe tener un elemento en un yacimiento para ser explotable, es decir, la concentración que hace posible pagar los costes de su extracción, tratamiento y comercialización (Bustillo & López, 1997).

En todo proyecto minero resulta imprescindible conocer la ley de corte, en este caso la mina LAS PARALELAS, ya tiene establecida una ley de corte mínima la cual es de 3 g/t.

Por otra parte, la potencia minera relaciona a la potencia mínima de minada que la empresa explota en esa mina, como los proyectos que se desarrollan en esta zona son de Pequeña Escala, la potencia mínima de minado por lo general se encuentra entre 0.05 a 0.10 m.

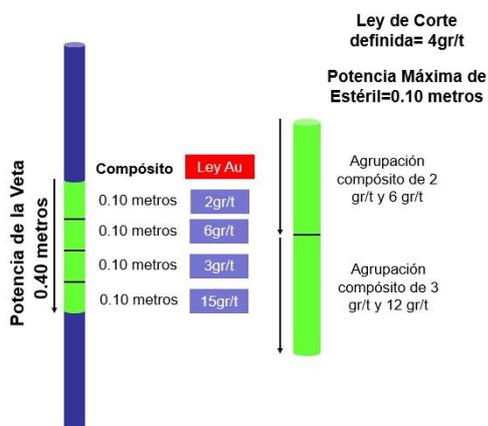
El overbreak, es la parte de estéril que se podría incluir por arriba y por abajo del sondeo, en otras palabras, es la dilución lateral por sobreexplotación (Figura 4.36). En este caso los sondeos tienen una longitud muy baja, ya que están definidos por la potencia de la veta en la galería donde se realizó el muestreo, por tal motivo fue necesario aumentar la longitud de estos sondeos 1 metro por arriba y por debajo, para definir que la sobreexplotación sería de 0.10 m como máximo, esto por motivos de que nunca se realiza una extracción perfecta del mineral, es decir, siempre se incluirá un porcentaje de material de estéril, material que correspondería al 10% de la dilución que se debe incluir en todo proceso de explotación.



**Figura 4. 36:** Ejemplo del Parámetro de Dilución Lateral por Sobreexplotación.

Otro de los parámetros a definir es la máxima potencia de estéril que se puede incluir en los sondeos, este criterio se atribuye a los sondeos de gran longitud donde se han realizado análisis químicos a cada compósito y se determinan las leyes de mineral, que al compáralas con la ley de corte del yacimiento, se catalogan como bajas si se encuentran por debajo de la ley de corte,

Por tanto, la potencia máxima de estéril será la longitud máxima que se incluiría en la zona mineral si a ambos lados del sondeo presenta una ley suficiente como para sobrepasar la ley de corte, tal como se muestra en la Figura 4.37.



**Figura 4. 37:** Ejemplo del Criterio de "Máxima Potencia de estéril" definido en el programa RecMin.

En este caso, sea cual sea el valor que se defina en la potencia máxima de estéril el programa no realizará ninguna agrupación ya que todos los compósitos que se definieron tiene los mismos valores de leyes.

El programa por defecto realiza la estimación de las leyes y de la potencia por el método de inverso a la distancia, para el establecimiento del factor de ponderación no existen métodos concretos que permitan conocer el valor más adecuado, sin embargo, según Bustillos & López (1997) un factor de 2 puede considerarse el más adecuado, pues genera resultados con un nivel de suavizado aceptable.

Mientras que la distancia máxima de influencia, será el radio del elipsoide de búsqueda, para el cual lo ideal sería definirla en función del alcance del semivariograma, que es de 6 metros.

Pero en este caso, no es posible realizarlo a esa distancia ya que solo estimaría los valores de leyes a 6 metros y como en la mitad del cuerpo mineral no existen muestreos pues no sería factible el modelamiento.

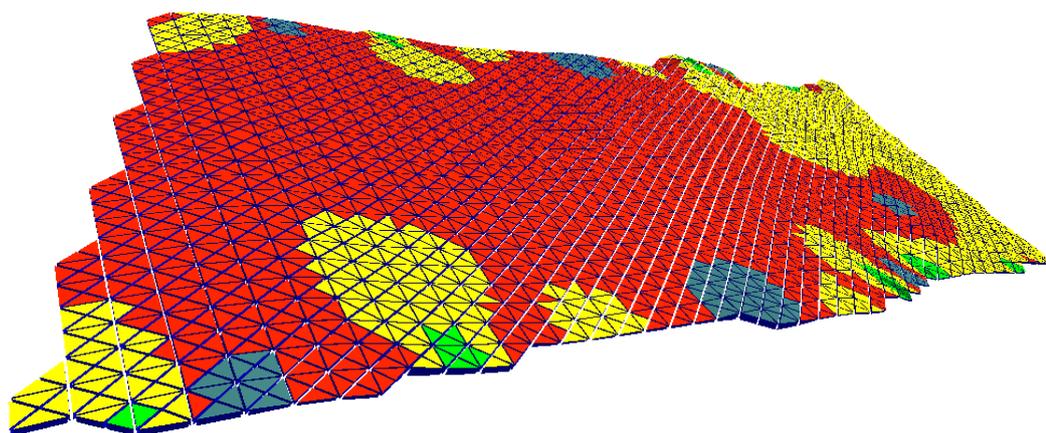
Por dicho motivo, se estableció que la distancia máxima de influencia debería ser de 60 metros ya que esa es la distancia entre las dos secciones donde se ubican las muestras (originales y proyectadas) que el elipsoide de búsqueda agrupe a ambos grupos.

Posteriormente, se realiza el cálculo de las intersecciones y es aquí donde el programa calcula los ángulos entre los sondeos y la capa en los puntos de intersección con la finalidad de calcular las potencias reales. El ángulo es el formado por el sondeo con el plano de la capa base, es decir que si el sondeo es perpendicular a la capa el ángulo será  $90^\circ$  y la potencia real y aparente serán iguales (Castañón Fernández, 2016).

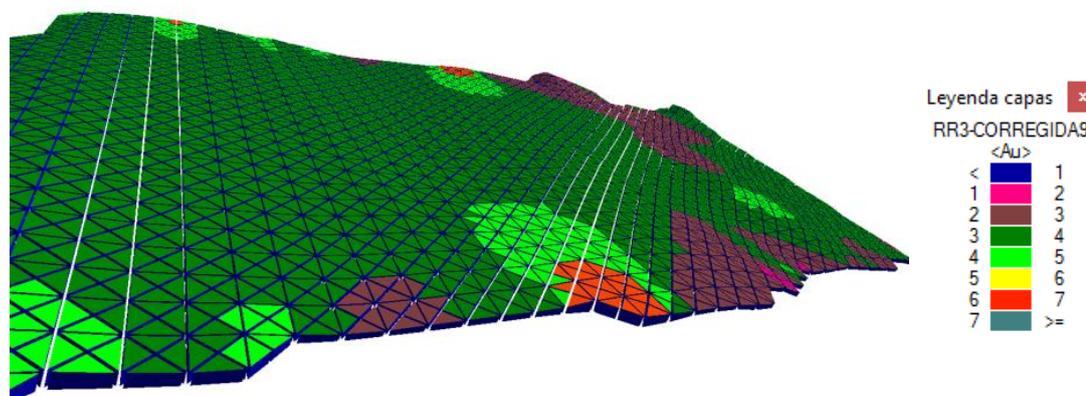
Posteriormente se realiza la interpolación de la nube de puntos, vértices de los triángulos, con las intersecciones y se obtiene una base de datos con los tonelajes de cada intersección definida como:

- **Potencia Geológica:** Considera únicamente el Ancho de capa del cuerpo mineral (Figura 4.38).
- **Potencia Minera con dilución lateral:** Añade a cada lado los parámetros que se definieron al inicio en el overbreak (cantidad de estéril de 0.10 metros) (Figura 4.39).

La Figura 4.38 y la Figura 4.39 muestran el modelamiento del cuerpo mineral empleando el método pentaédrico exclusivo del programa RecMin separados en dos categorías.



**Figura 4. 38:** Modelamiento del cuerpo mineral por categoría Potencia Geológica.



**Figura 4. 39:** Modelamiento del cuerpo mineral por categoría Potencia Minera.

El modelamiento del cuerpo mineral permite tener un mayor conocimiento del bloque, por ende, permite planificar mejor las labores de explotación subterránea del bloque.

Según la leyenda la ley promedio del bloque se encuentra en un rango de 3 y 4 g/t, tomando en cuenta que se incluye una dilución de 0.20 metros de estéril, al momento de la extracción del mineral. El color rojo indica las leyes más altas del bloque las cuales están entre 6 y 7 g/t. No obstante, la optimización de los procesos de perforación y voladura permitirán que la dilución se reduzca y se pueda incrementar la recuperación del mineral, pero en este caso de estudio, el porcentaje de dilución representa el 10% según lo que se observó en el área de estudio.

La Tabla XXIII resume los tonelajes de las reservas probables del bloque 2 del sector "X7" por categoría de minado.

**Tabla XXIII:** Reporte de las Reservas Totales del Bloque 2 del Sector "X7" mina LAS PARALELAS.

<b>Categoría</b>	<b>Tonelaje</b>	<b>Ley Media del Bloque de Au (g/t)</b>	<b>Potencia Real (m)</b>
Potencia Geológica	3,830	6.11	0.27
Potencia Minera	6,658	3.75	0.47

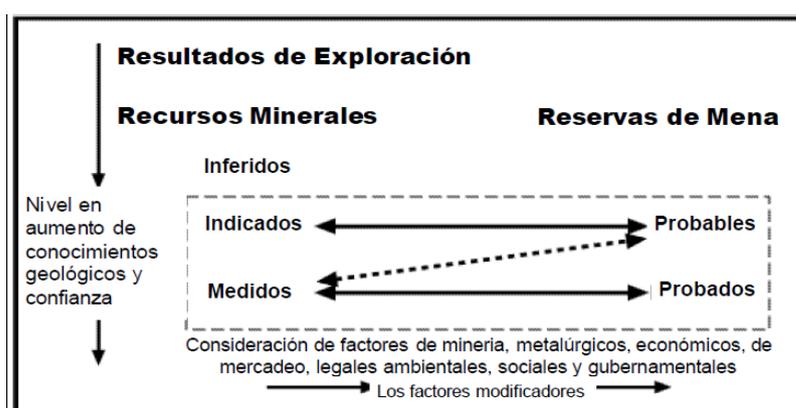
Al presentar el modelamiento del cuerpo mineral por categoría geológica (Figura 4.38) se observa leyes mucho más altas que las reservas por potencia minera de la Figura 4.39, esto se debe a que no se toma en cuenta la dilución del mineral, sino más bien, solo considera las leyes que se encuentran por encima de la ley de corte (3 g/t), las cuales representan el 91.66% de las muestras recolectadas en la galería principal, y como era de esperarse, el

tonelaje y la potencia real es menor ya que toma en cuenta únicamente el mineral (veta) sin material estéril.

#### 4.10. Categorización de las reservas del bloque de explotación.

Según el código JORC (1999), Una “Reserva Mineral” es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido o Indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se pueden producir cuando se extraiga el material. El término “económico” implica que ha sido establecido o ha sido demostrado analíticamente que la extracción de la reserva mineral es viable y justificable bajo suposiciones razonables de inversión.

Para efectos de técnico, resulta necesario categorizar las reservas del bloque de explotación con códigos mineros como, por ejemplo, el Código JORC “The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute Council of Australia”.



**Figura 4. 40:** Categorización de las Reservas Mineras según el Código JORC.

(Fuente: JORC, 1999)

Una vez realizado el modelamiento de la veta, se determina el volumen del mineral que se podría extraer del mismo y se puede categorizar las reservas en orden creciente de confianza, según JORC (1999):

**Reservas probables de minerales:** Es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Indicado y en algunas circunstancias de un Recurso Mineral Medido. Incluye los materiales de dilución y tolerancias por pérdidas que puedan producirse cuando se explota el material.

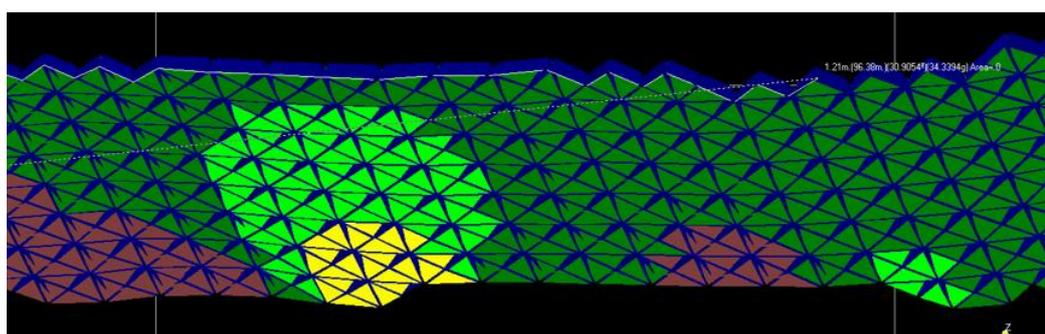
Una reserva probable tiene un nivel más bajo de confianza que una reserva probada, por cuanto se define como la cantidad de mineral que se obtiene en base a información menos exhaustiva que en el caso de las reservas probadas. Tanto la geometría, como el volumen de mineral y la ley han sido inferidos a partir de estudios preliminares, por lo que se indica que existe riesgo de discontinuidad en la zona a ser estimada.

**Reservas probadas de minerales:** Es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido. Incluye los materiales de dilución y tolerancias por pérdidas que puedan producirse cuando se explota el material.

Una reserva probada implica el más alto grado de confianza en la estimación, por cuanto se define como la cantidad de mineral que se obtiene a partir de resultados de muestreo y sondajes. Los estudios permiten establecer la geometría de la reserva, su volumen y la ley del mineral, por lo que se indica que se tiene certeza de su continuidad en el área de estimación.

A partir de estas aclaraciones, se procede a categorizar las reservas (Tabla XXIV) en función de la distancia máxima de influencia del semivariograma (alcance) el cual es de 6 metros, para ello, fue necesario recortar el modelo numérico del cuerpo mineral (pentaedros) (Figura 4.42) y posteriormente calcular el área de la capa mineral y multiplicarla por la potencia minera real que incluye la dilución del mineral.

Se toma en cuenta la categorización de la Potencia Minera (incluye la dilución), ya sea en función de código minero CH20235 (El Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, El Colegio de Geólogos de Chile A.G y la Sociedad Nacional de Minería., 2015) o el Código JORC (1999), ambos establecen que para ser considerado un recurso como reserva ya sea probada o probable, el volumen de mineral debe incluir el material de dilución – material no identificado como mineral - el cual, debido a las condiciones de extracción, debe ser extraído y transportado a la planta de procesamiento.

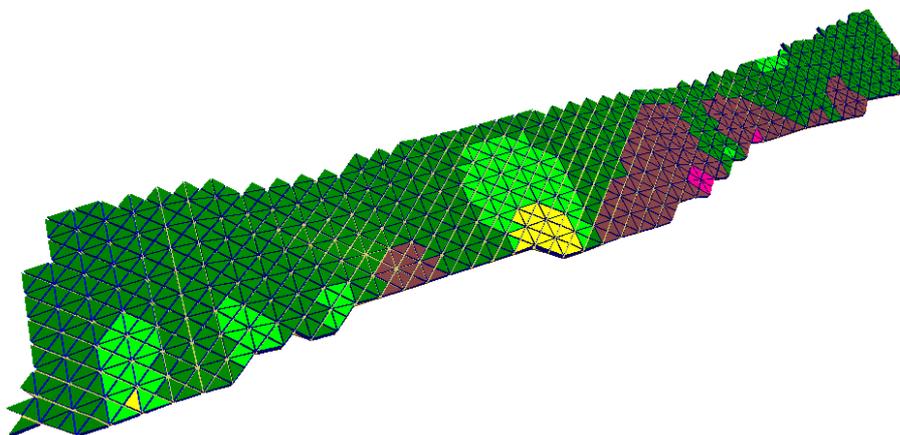


**Figura 4. 41:** Recorte de la cama mineral a una distancia de 6 metros a partir de la galería principal.

**Tabla XXIV:** Reporte de las Reservas Probadas de la Capa Mineral.

Parámetros	Resultados
Área de la capa proyectada en el Plano NE	1124 m <sup>2</sup>
Potencia Minera de la Capa	0.47 m
Volumen de la Capa	528.50 m <sup>3</sup>
Tonelaje de las Reservas Probadas	1426.95 t

A partir de la categorización se determina que el tonelaje de las Reservas Probables del Bloque 2 del Sector “X7” es de 5231.05 t y se incluye el modelamiento final de la capa mineral de tales reservas (Figura 4.43).



**Figura 4. 42:** Vista Isométrica de la capa de mineral de las reservas probadas del Bloque 2 del Sector “X7”.

# **CAPÍTULO 5**

## **5. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL BLOQUE 2 DEL SECTOR X7**

### **5.1. Método de Explotación Subterráneo**

#### **5.1.1. Metodología de selección del método de explotación**

La selección de un método de explotación para el laboreo de un yacimiento es un proceso comparativo donde se evalúan las características y naturaleza propia del depósito, en relación con el desarrollo técnico de los diferentes métodos.

Debe ser un proceso iterativo y lo suficientemente flexible para admitir variaciones en los sistemas debido a las diferencias propias de cada yacimiento, hasta detectar el más conveniente. Los procedimientos para la selección de un método de explotación se basan principalmente en dos parámetros: las características físicas y geológicas del depósito y las

condiciones geomecánicas de la zona de la mena y su roca encajante (Nicholas, 1992).

Para la identificación de los métodos de explotación más adecuados según estos parámetros se utilizó la metodología propuesta por Nicholas, D. (1981), quién determina la factibilidad técnica de la aplicación de un método minero a partir de una valoración cuantitativa.

La metodología consiste en clasificar el yacimiento según su geometría y distribución mineral (Tabla 28), y de acuerdo a las características geomecánicas de la caja y la zona de mena para el bloque que se desea explotar, tal como se muestra en la Tabla 29. Una vez caracterizado el yacimiento se efectúa una clasificación numérica sumando la valoración de estos parámetros para cada método de explotación según la Tabla XXIV y la Tabla XXV.

Las valoraciones de estas tablas representan la idoneidad de la característica para cada método de explotación; un valor de 3 o 4 indica que esa característica es factible técnicamente para ese método de explotación, un valor de 1 o 2 indican que se puede ajustar con un grado de dificultad el método a esa característica, mientras que un valor de 0 indica que el método no es adecuado para esa característica sin descartarlo del todo. Un valor de -49 indica que esa característica elimina totalmente el uso de aquel método de explotación en particular.

**Tabla XXV:** Definición de la geometría y distribución de leyes del yacimiento.

Forma General	Potencia	Buzamiento	Distribución de Leyes
<b>Equidimensional:</b> Todas las dimensiones son del mismo orden de magnitud	Angosta: < 10 m	Echado: < 20°	Uniforme: La ley en cualquier punto del depósito no varía significativamente de la ley media.
<b>Plano – Tabular:</b> Dos dimensiones son mucho mayores que en una tercera	Intermedia: 10 – 30 m	Intermedio: 20° - 55°	Gradacional: Las leyes tienen características zonales y varían gradualmente.
<b>Irregular:</b> Dimensiones varían en distancias cortas	Potente: 30 – 100 m	Subvertical: > 55°	Errático: Las leyes varían radicalmente en distintas cortas sin patrón alguno.
	Muy potente: >100		

(Fuente: Nicholas, 1981)

**Tabla XXVI:** Clasificación de las características geomecánicas de las rocas.

Resistencia sustancial de la roca (resistencia a la compresión simple/ presión de sobrecarga)	Frecuencia de Fracturas	Resistencia al corte de fracturas
<b>Débil: &lt; 8</b>	Muy juntas: RQD 0 – 20 %	Débil: Juntas limpias con superficies lisas o rellenas de material con menor resistencia que la roca.
<b>Moderada: 8 - 15</b>	Juntas: RQD 20 – 40%	Moderada: Juntas limpias con superficie rugosa
<b>Fuerte: &gt; 15</b>	Espaciadas: RQD 40 – 70%	Fuerte: Juntas rellenas con material igual o más resistente que la roca
	Muy espaciadas: RQD 70 - 100	

(Fuente: Nicholas, 1981)

**Tabla XXVII:** Valoración de la geometría y distribución de leyes para diferentes métodos de explotación.

Mining Method	General Shape			Ore Thickness				Ore Plunge			Grade Distribution		
	M	T/P	I	N	I	T	VT	F	I	S	U	G	E
Open Pit Mining	3	2	3	2	3	4	4	3	3	4	3	3	3
Block Caving	4	2	0	-49	0	2	4	3	2	4	4	2	0
Sublevel Stopping	2	2	1	1	2	4	3	2	1	4	3	3	1
Sublevel Caving	3	4	1	-49	0	4	4	1	1	4	4	2	0
Longwall Mining	-49	4	-49	4	0	-49	-49	4	0	-49	4	2	0
Room and Pillar Mining	0	4	2	4	2	-49	-49	4	1	0	3	3	3
Shrinkage Stopping	2	2	1	1	2	4	3	2	1	4	3	2	1
Cut and Fill Stopping	0	4	2	4	4	0	0	0	3	4	3	3	3
Top Slicing	3	3	0	-49	0	3	4	4	1	2	4	2	0
Square Set Stopping	0	2	4	4	4	1	1	2	3	3	3	3	3

M = Massive  
 T/P = Tabular or Platy  
 I = Irregular  
 N = Narrow  
 I = Intermediate  
 T = Thick  
 VT = Very Thick  
 F = Flat  
 I = Intermediate  
 S = Steep  
 U = Uniform  
 G = Gradational  
 E = Erratic

(Fuente: Nicholas, D. 1981)

**Tabla XXVIII:** Valoración de las propiedades geomecánicas para diferentes métodos de explotación.

**Key:**

*Rock Substance Strength*  
 W = Weak  
 M = Moderate  
 S = Strong

*Fracture Spacing*  
 VC = Very Close  
 C = Close  
 W = Wide  
 VW = Very Wide

*Fracture Strength*  
 W = Weak  
 M = Moderate  
 S = Strong

Mining Method	Hanging Wall											
	Rock Substance Strength			Fracture Spacing				Fracture Strength				
	W	M	S	VC	C	W	VW	W	M	S		
Open Pit Mining	3	4	4	2	3	4	4	2	3	4		
Block Caving	4	2	1	3	4	3	0	4	2	0		
Sublevel Stopping	-49	3	4	-49	0	1	4	0	2	4		
Sublevel Caving	3	2	1	3	4	3	1	4	2	0		
Longwall Mining	4	2	0	4	4	3	0	4	2	0		
Room and Pillar Mining	0	3	4	0	1	2	4	0	2	4		
Shrinkage Stopping	4	2	1	4	4	3	0	4	2	0		
Cut and Fill Stopping	3	2	2	3	3	2	2	4	3	2		
Top Slicing	4	2	1	3	3	3	0	4	2	0		
Square Set Stopping	3	2	2	3	3	2	2	4	3	2		

**5a: Ore Zone**

Mining Method	Rock Substance Strength			Fracture Spacing				Fracture Strength		
	W	M	S	VC	C	W	VW	W	M	S
Open Pit Mining	3	4	4	2	3	4	4	2	3	4
Block Caving	4	1	1	4	4	3	0	4	3	0
Sublevel Stopping	-49	3	4	0	0	1	4	0	2	4
Sublevel Caving	0	3	3	0	2	4	4	0	2	2
Longwall Mining	4	1	0	4	4	0	0	4	3	0
Room and Pillar Mining	0	3	4	0	1	2	4	0	2	4
Shrinkage Stopping	1	3	4	0	1	3	4	0	2	4
Cut and Fill Stopping	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2
Top Slicing	2	3	3	1	1	2	4	1	2	4
Square Set Stopping	4	1	1	4	4	2	1	4	3	2

**5c: Footwall**

Mining Method	Rock Substance Strength			Fracture Spacing				Fracture Strength		
	W	M	S	VC	C	W	VW	W	M	S
Open Pit Mining	3	4	4	2	3	4	4	2	3	4
Block Caving	2	3	3	1	3	3	3	1	3	3
Sublevel Stopping	0	2	4	0	0	2	4	0	1	4
Sublevel Caving	0	2	4	0	1	3	4	0	2	4
Longwall Mining	2	3	3	1	2	4	3	1	3	3
Room and Pillar Mining	0	2	4	0	1	3	3	0	3	3
Shrinkage Stopping	2	3	3	2	3	3	2	2	2	3
Cut and Fill Stopping	4	2	2	4	4	2	2	4	4	2
Top Slicing	2	3	3	1	3	3	3	1	2	3
Square Set Stopping	4	2	2	4	4	2	2	4	4	2

(Fuente: Nicholas, D., 1981)

Los métodos con las valoraciones positivas más altas en la suma final son aquellos que mejor se ajustan a las condiciones del yacimiento. Esta metodología no considera factores económicos por lo que se recomienda fuertemente, una vez obtenida la valoración total de los métodos de explotación para las características del yacimiento, realizar una evaluación económica a los dos o tres métodos de explotación con mayor puntaje.

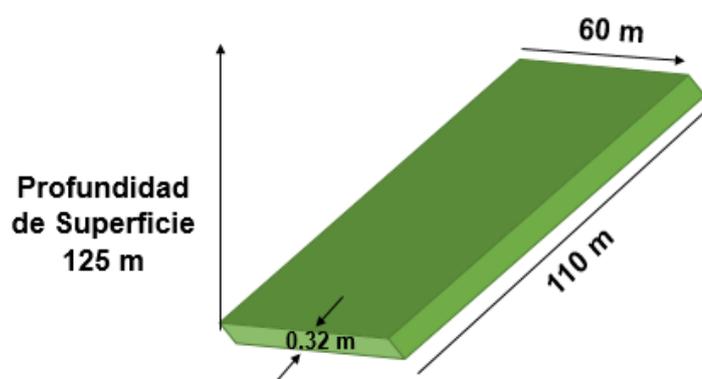
### 5.1.2. Selección del Método de Explotación del Bloque 2 Sector “X7” Mina LAS PARALELAS.

En la Tabla XIV se describen las condiciones en base a las cuales se puede clasificar al yacimiento para la selección del método más apropiado para la explotación del Bloque 2 del Sector “X7” – Salida 3, los cuales fueron recopilados a partir del estudio geológico y topográfico, además de recopilar información sobre ensayos geotécnicos.

**Tabla XXIX:** Características Geométricas del Cuerpo Mineralizado.

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
<b>Profundidad desde superficie (m)</b>	125
<b>Longitud (m)</b>	110
<b>Ancho (m)</b>	50
<b>Potencia promedio (m)</b>	0.32
<b>Buzamiento promedio de la veta (°)</b>	33
<b>Distancia Inclínada (m)</b>	50
<b>Volumen de la veta (m<sup>3</sup>)</b>	481.39

(Fuente: Velarde V., 2016)



**Figura 5. 1:** Características Geométricas del Cuerpo Mineralizado.

El cálculo de la resistencia sustancial de la roca (zona de mena) se realiza en función de la resistencia a la compresión simple de las rocas (Tabla XXX) y de la presión de la sobrecarga, que se puede estimar como el esfuerzo vertical  $\sigma_z$  O la presión ejercida por la columna de la roca a partir de  $\sigma_z = \gamma z$ , donde  $\gamma$  representa el peso unitario de la roca ejerciendo presión y  $z$  la profundidad a la que se calcula el esfuerzo (Hoek & Brown, 1985).

La Tabla XXXI muestra los resultados de la estimación del parámetro para la selección del método.

**Tabla XXX:** Características geomecánicas del macizo rocoso en el depósito.

Zona	Tipo de Roca general	Resistencia a la compresión simple promedio (MPa)	Densidad ( $t/m^3$ )
<b>Mena</b>	Lavas andesíticas silicificadas	90.1	2.79
<b>Caja</b>	Lavas andesíticas	63.9	2.56

(Fuente: Velarde V., 2016)

Para el caso de estudio, donde el yacimiento es intermedio es decir con un buzamiento entre 20° y 55°

**Tabla XXXI:** Estimación de la resistencia sustancial de las rocas.

Zona	Profundidad (m)	Esfuerzo vertical (MPa)	Resistencia sustancial de la roca	Clasificación (según Nicholas, D., 1981)
<b>Mena</b>	125 m	3.5	25.7	Fuerte
<b>Caja</b>	100 m	3.9	16.4	Fuerte

(Fuente: Velarde V., 2016)

La zona de la mena tiene una mayor resistencia debido principalmente al efecto de la silificación en esta.

El RQD o el espaciamiento de fracturas varía a lo largo del yacimiento y está controlado estructuralmente por las principales zonas de falla que lo atraviesan, apareciendo zonas de bajo RQD cerca de las zonas de falla. De esta manera se categoriza el espaciamiento de las fracturas como juntas (RQD: 20 – 40%) para considerar estos efectos adversos de la zona de mena. Para la zona de caja que no sufre el mismo grado de fracturamiento se asignó la clasificación de espaciadas de (RQD: 40 – 70%).

**Tabla XXXII:** Clasificación del yacimiento para la selección del método de explotación según Nicholas, D. (1981).

Geometría del yacimiento		Zona	Características geomecánicas		
			Resistencia sustancial de la roca	Espaciado de fracturas	Resistencia de fracturas
<b>Forma general</b>	Tabular	<b>Caja</b>	Fuerte	Juntas	Moderado
<b>Potencia</b>	Angosta	<b>Mena</b>	Fuerte	Espaciadas	Moderado
<b>Buzamiento</b>	Intermedio				
<b>Distribución de leyes</b>	Errático				

En base a esta clasificación se efectuó la valoración de los métodos de explotación para determinar los más adecuados según las condiciones propias del yacimiento. En la Tabla XXXIII se presenta la valoración total de los métodos.

**Tabla XXXIII:** Valoración de métodos de explotación según las condiciones propias del yacimiento.

Método	Geometría	Características geomecánicas		Total
		Caja	Mena	
<b>Block Caving</b>	-45	7	7	-31
<b>Sublevel Caving</b>	-44	7	9	-28
<b>Longwall Minig</b>	8	6	3	17
<b>Room and Pilar</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>27</b>
<b>Skrinkage Stoping</b>	5	7	9	21
<b>Sublevel Stoping</b>	5	6	7	18
<b>Cut and Fill</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>29</b>

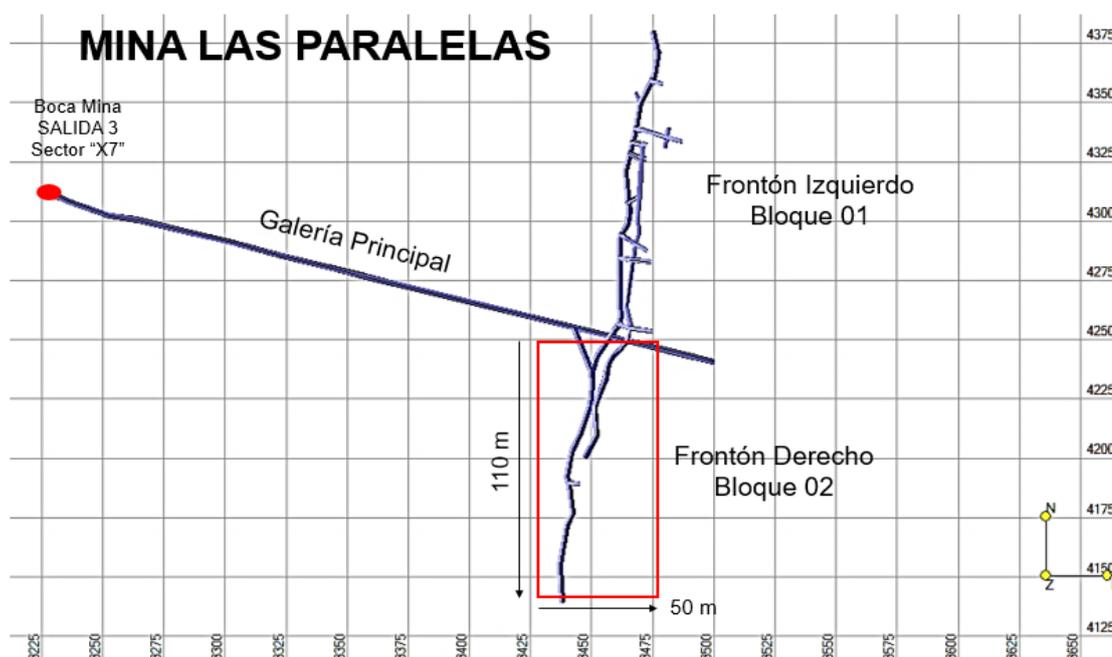
De acuerdo con la Tabla XXXIII el método de explotación que tiene un mayor puntaje es el de Corte y Relleno, por lo que es el que mejor se ajusta a las características propias del yacimiento.

Sin embargo, en la empresa utilizan la combinación de dos técnicas de explotación tanto Cámaras y Pilares como Corte y Relleno.

Por lo que se podría proponer un sistema combinado y realizar un diseño preliminar de ambos métodos ya que resultan los más opcionados para el sistema de explotación.

## 5.2. Labores de destape en el Bloque 2 del Sector "X7".

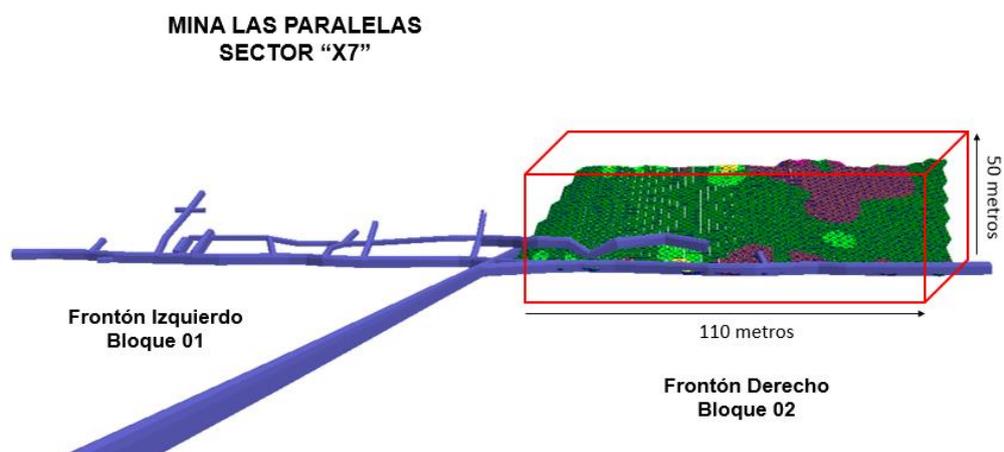
Las labores de destape en el Frontón Derecho del Sector "X7" permitieron realizar el correspondiente muestreo en la galería principal lo que facilito el cálculo de las reservas de las Bloque. En la Figura 5.2, se muestran las labores de destape del Frontón Derecho del Sector "X7" de la Mina LAS PARALELAS con las que se cuenta hasta el momento, además se muestran las dimensiones del Bloque 2, en que se evaluaron las reservas minerales.



**Figura 5. 2:** Labores Subterráneas de la Mina LAS PARALELAS Sector "X7".

Las secciones de la galería principal fueron modeladas por el software minero RecMin, con un área de 3 x 2 metros, mientras que las labores de la sobrelínea (niveles superiores de acceso) presentan una sección más pequeña de 1.5 x 1.5 metros (Figura 5.3), por cuanto se requiere economizar costos de perforación y voladura, con una distancia del eje al piso de cero metros, ya que a medida que avanzan los trabajos con el método de corte y relleno ascendente, lo ideal es dejar el cuerpo mineral en el piso de la galería de tal manera que facilite la extracción del mineral de caja controlando la dilución, y favoreciendo la estabilidad de las galerías.

La explotación que se realizan en las galerías es denominada “Por desembanque” de modo que, al extraer toda la roca de caja (estéril), el mineral útil queda en forma de cama en el piso de la galería.

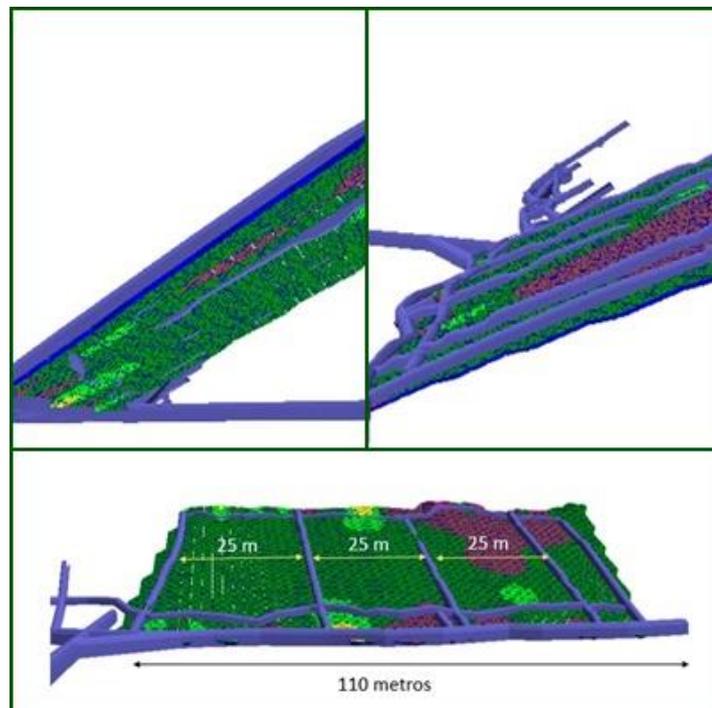


**Figura 5. 3:** Vista Isométrica de la Labores Subterráneas Actuales de la Mina LAS PARALELAS Sector "X7".

### 5.3. Diseño Preliminar de las Labores del Bloque 2 Sector “X7”.

El conocimiento de la morfología del cuerpo mineral permite efectuar un modelamiento de las labores mineras y por ende una mejor planificación de las labores mineras, de tal manera que se facilite la toma de decisiones en cuanto a la extracción del mineral.

En la Figura 5.4 se muestra el diseño final de las labores de explotación del Bloque 2 del Sector “X7”.



**Figura 5. 4:** Vista Isométrica de la Labores Finales de la Mina LAS PARALELAS Sector “X7”.

**Tabla XXXIV:** Descripción del sistema de explotación de la Mina LAS PARALELAS Sector "X7".

<b>Galerías principales</b>	(2mx3m) dividiendo niveles a lo largo del rumbo de la veta de 110 m
<b>Sobrelínea</b>	(1.5mx1.5m) dejando 5 m de pilar de protección para iniciar explotación
<b>Chimeneas</b>	(1.5mx1.5m) conectoras cada 30 m para caída por gravedad de material
Arranque de material siguiendo en dirección del buzamiento de la veta	

#### 5.4. Cálculo de la Productividad del Bloque 2 del Sector "X7"

En la evaluación económica de un depósito mineral, uno de los parámetros más importantes que intervienen es el Ritmo de Optimo de Producción (ROP), que también puede ser expresado como Vida Optima de la Explotación (VOE), en años, a partir de las reservas que se consideran explotables dentro de un yacimiento (Bustillo & López, 1997).

La fórmula a utilizar es la propuesta por Brian Mackenzie (1982) específica para minera subterránea, la cual se basa en varios estudios realizados en distintas minas, en el que correlaciona el ritmo de producción y las reservas minerales, posteriormente realizan una regresión lineal para obtener la fórmula empírica que se muestra a continuación (Bustillo & López, 1997).

$$ROP \left( \frac{t}{\text{año}} \right) = 4.22 \times (\text{Reservas } (t))^{0.756}$$

Las reservas probables del bloque son de 6658 t, obtenidas a partir de la estimación que se realizó con el software RecMin y considerando 350 día útiles

de producción, se obtuvo aproximadamente un ritmo de producción de 10 t/día, lo que quiere decir que el Bloque de explotación tendría una vida útil de alrededor de 1.9 años o 1 año y 11 meses.

Mientras que la empresa extrae en el Bloque 2 del Sector "X7" alrededor de 15 t/día, básicamente por el requerimiento de la planta de procesamiento mineral, lo que quiere decir que en la práctica la vida útil que tendría el bloque es de 1.27 años o 1 año y 3 meses.

#### **5.5. Estimación de los Costos del Proyecto (Presupuesto General).**

Es necesario considerar que para una mejor estimación de reservas se debe recolectar una cantidad mayor de muestras, de acuerdo a las galerías de acceso para cerrar el bloque, teniendo en cuenta 2 galerías de 110 metros aproximadamente y 2 chimeneas de 50 metros, espaciadas cada 3 metros, se tiene un total de 104 muestras.

La Tabla XXXV refleja los costos generales que deben ser considerados para la estimación de reservas, en la cual se tomó como referencia que el costo del análisis de ensayo al fuego de una muestra, para la determinación de Ley Total de Oro, se encuentra alrededor de \$25, basándose en costos de la Empresa.

**Tabla XXXV:** Costos Generales para la estimación de reservas minerales del Bloque 2.

<b>Análisis Químico de las Muestras Minerales para la determinación de Ley Total de Au (104 muestras)</b>	\$ 2,600.00
<b>Salario del Ingeniero de Minas (Especialista en Estimación de Reservas Minerales)</b>	\$2000.00
<b>Salario Ayudante para la toma de datos en campo</b>	\$500.00
<b>Costo de implementación del Software Minero RecMin</b>	\$0.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$5,100.00</b>

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

1. Una de las limitaciones del Software Minero de Libre Acceso RecMin, es el impedimento de la creación de un modelo de bloques para yacimientos que manejan gran cantidad de información, ya que la base de datos con la que trabaja es Microsoft Office Access, dicho programa puede contener datos que no superen los 2 Gb de memoria.
2. Una de las desventajas del Software Geoestadístico SGeMS es que no permite añadir estadísticos como el sesgo o asimetría y el coeficiente de variación, y no realiza gráficas de probabilidad para corroborar el carácter normal de los datos, además que solo cuenta con tres tipos de modelamiento del semivariograma, lo cual puede ser un problema a la hora de ajustar el modelo teórico al experimental.

3. Generar el modelo de bloques de manera convencional para cuerpos minerales de baja potencia no es lo apropiado, al menos con RecMin, ya que el tamaño de bloques mínimo que puede ser generado a partir de las dimensiones del cuerpo mineral, es de (1x1x1) metros, aplicando este criterio, el modelo numérico (bloques) no se ajusta al cuerpo vetiforme impidiendo continuar con la estimación.
  
4. El método pentaédrico es una solución viable para la estimación de reservas cuando se tiene cuerpos vetiformes angostos, además presenta una ventaja frente al modelo de bloques tradicional que es la estimación de la potencia, de tal manera que se convierte en un método más selectivo al momento de planificar el sistema de explotación. Sin embargo, es un método nuevo del que no existe bibliografía al respecto, por lo que genera cierto grado de desconfianza.
  
5. Realizar un buen muestreo es de vital importancia para que los resultados de los valores de leyes sean confiables, lo cual asegura que el trabajo realizado sea el correcto.

6. La categorización se realizó en función de Códigos Mineros Internacionales como JORC (1999) y CH20235 (2015) y se identificó que la reserva total del bloque tiene alrededor de 6658 toneladas de roca mineralizada, de las cuales 1458 toneladas se categorizaron como reservas probadas, a partir de la distancia máxima de influencia que tiene una muestra sobre otra, distancia que permite estimar con mayor grado de confianza las reservas.
  
7. Las alternativas de explotación identificadas para la extracción de las reservas mineras que mejor se ajustan a su naturaleza en base a criterios técnicos son los métodos de Corte y Relleno y Cámaras y Pilares, según la valoración efectuada a partir de la geometría y condiciones geomecánicas del yacimiento.
  
8. De manera general, el software minero RecMin es una herramienta informática que se ajusta perfectamente a las necesidades de cualquier empresa minera de Pequeña Escala, ya que ofrece soluciones integrales a los problemas de incertidumbre del depósito mineral, mediante el modelamiento geológico y numérico de las estructuras mineralizadas,

además es un software de dominio público lo cual no conlleva inversión económica por parte de la empresa, tan solo la capacitación del personal técnico para su utilización.

9. Para el tipo de minería que se desarrolla en la mayoría de territorio ecuatoriano es de Pequeña Escala, conformada por pequeñas cooperativas de empresas privadas, las cuales no necesitan que el software que emplean sea certificado, tan solo que empiecen a emplear métodos computacionales que simplifique las actividades que la industria minera requiera, por la que es software RecMin resulta muy útil para este campo.

10. Los costos generales para la estimación de reservas resultan en alrededor de \$5,100.00, con dimensiones similares al bloque de explotación del presente proyecto.

11. El tiempo promedio a invertir para el cálculo de reservas de un Bloque en general con similares dimensiones, y empleando la misma metodología que el presente proyecto, es de aproximadamente 1 o 2 meses, desde el levantamiento de información en campo hasta la presentación de los resultados finales.
  
12. Es importante recalcar que todos los resultados del muestreo tanto en la cantidad de muestras recolectadas y valores de leyes total de Au fueron adulterados para proteger los resultados de la empresa.

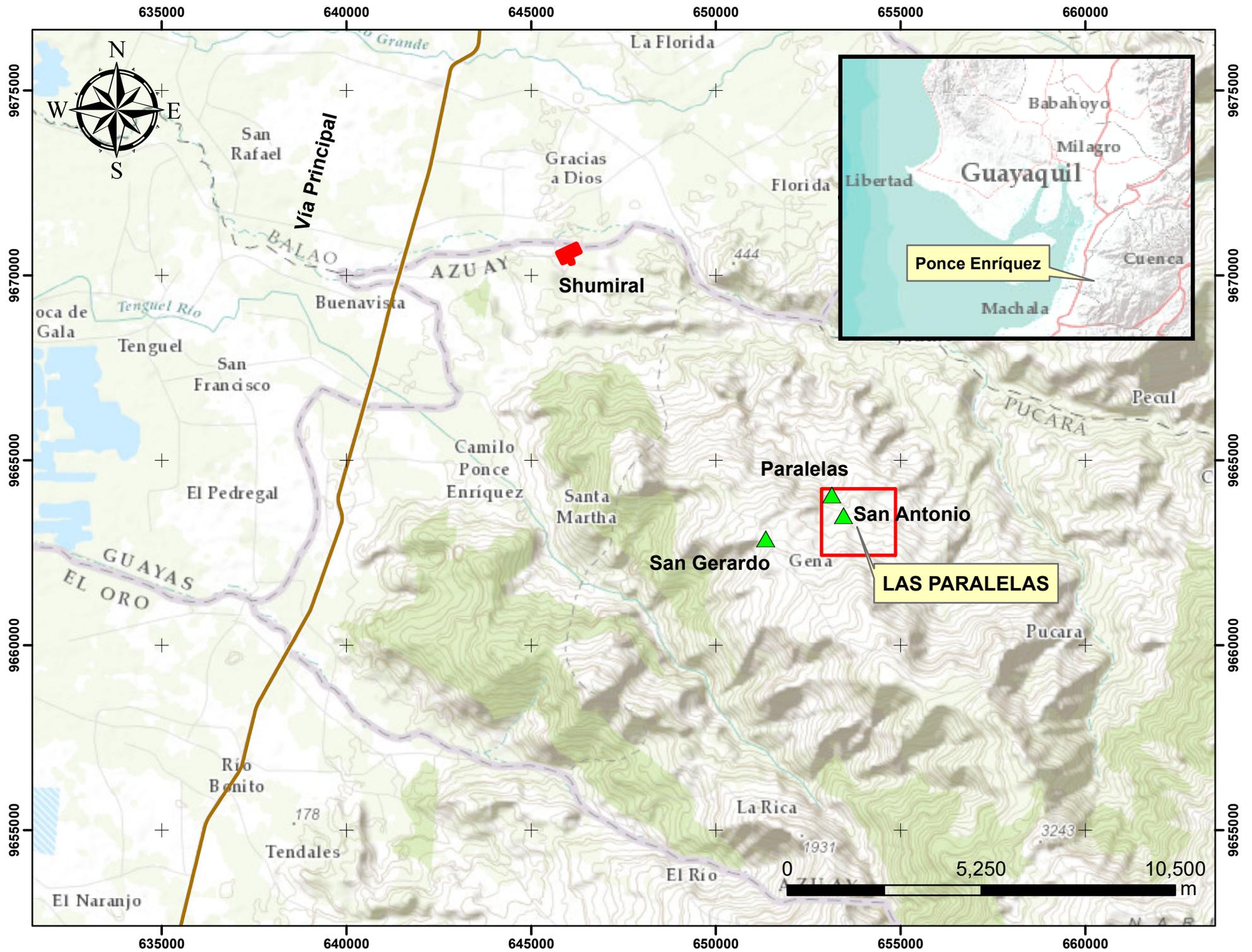
## **Recomendaciones**

1. Para la aplicación de estos métodos computacionales es necesario tener la mayor cantidad posible de sondeos o cantidad de muestras en canaletas en diferentes sectores del bloque que se desea evaluar, de tal manera que se pueda realizar un mejor modelamiento del cuerpo mineral y el error sea mínimo.

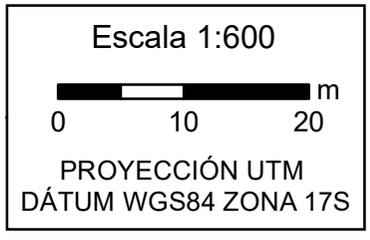
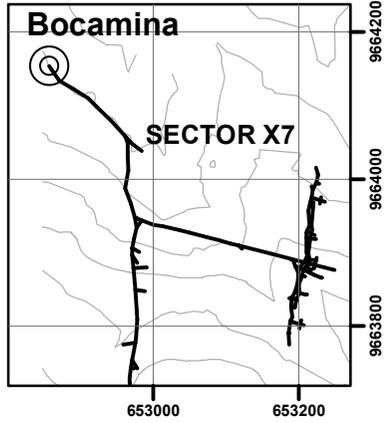
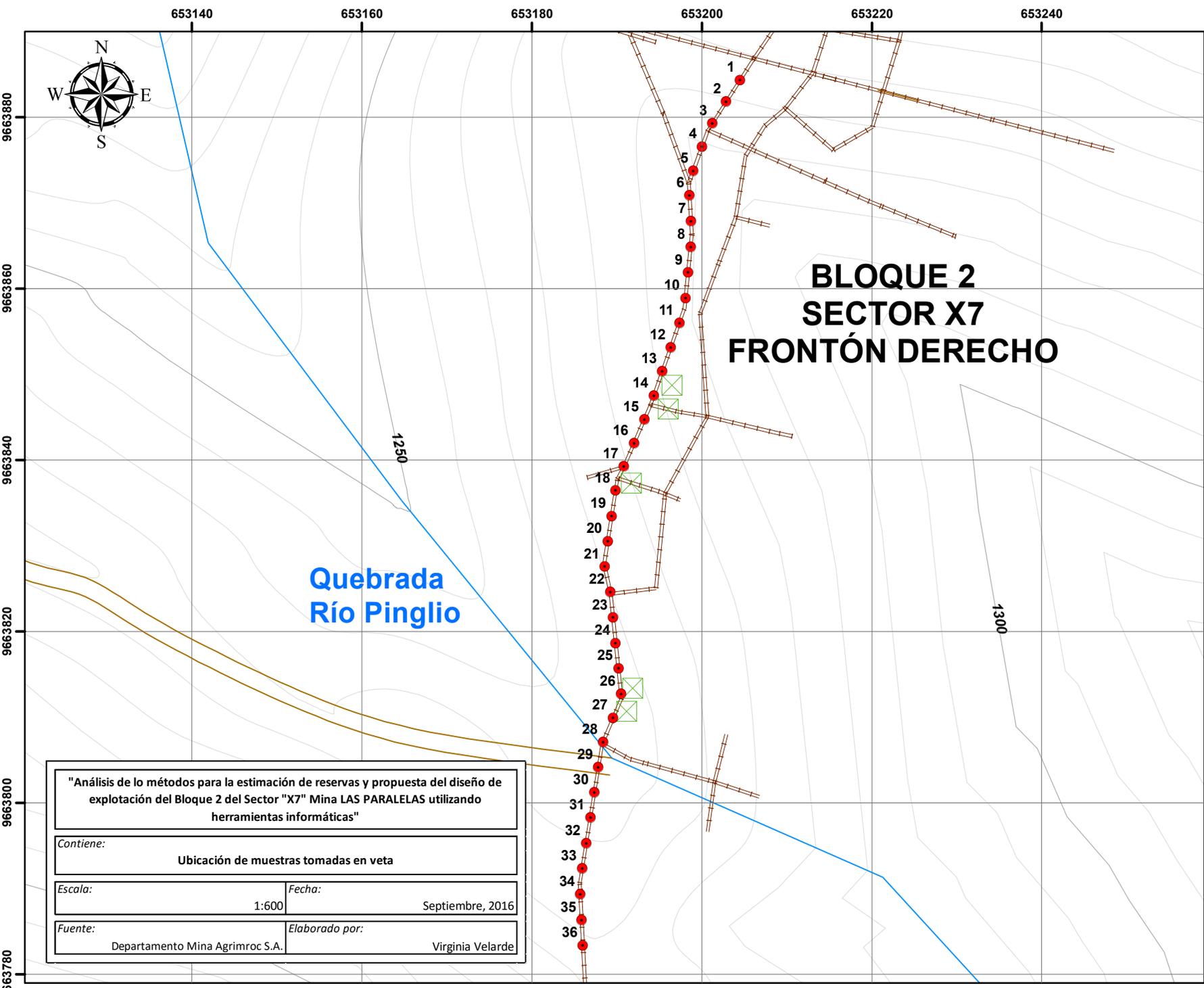
2. Como recomendación se establece que resulta necesario un estudio detallado del sistema de fallas del yacimiento, para poder predecir las áreas del bloque con mayor inestabilidad y que puedan llegar a impedir la extracción de mineral.
  
3. Se recomienda realizar un análisis de la anisotropía geométrica que presenta el yacimiento para diferentes direcciones, de tal manera que se pueda contar con la mayor cantidad de información posible e incluir más parámetros al momento de la interpolación.
  
4. Es importante realizar un estudio de pre-factibilidad de cada uno de los métodos de explotación seleccionados antes de su aplicabilidad, ya que no se consideraron criterios económicos para su elección.

# **ANEXOS**

**Anexo A:** Mapa Base de la Zona de Estudio (Concesión LAS PARALELAS, cantón Camilo Ponce Enríquez).



**Anexo B:** Mapa de las Labores Mineras Subterráneas y Malla de Muestreo del Sector “X7” de la Mina LAS PARALELAS del cantón Camilo Ponce Enríquez.



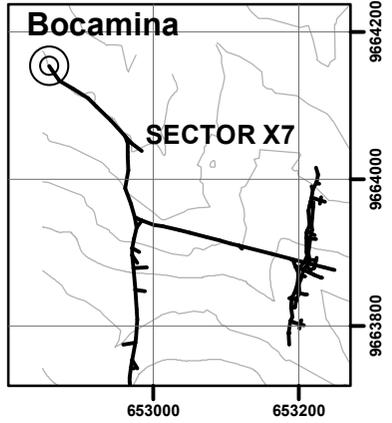
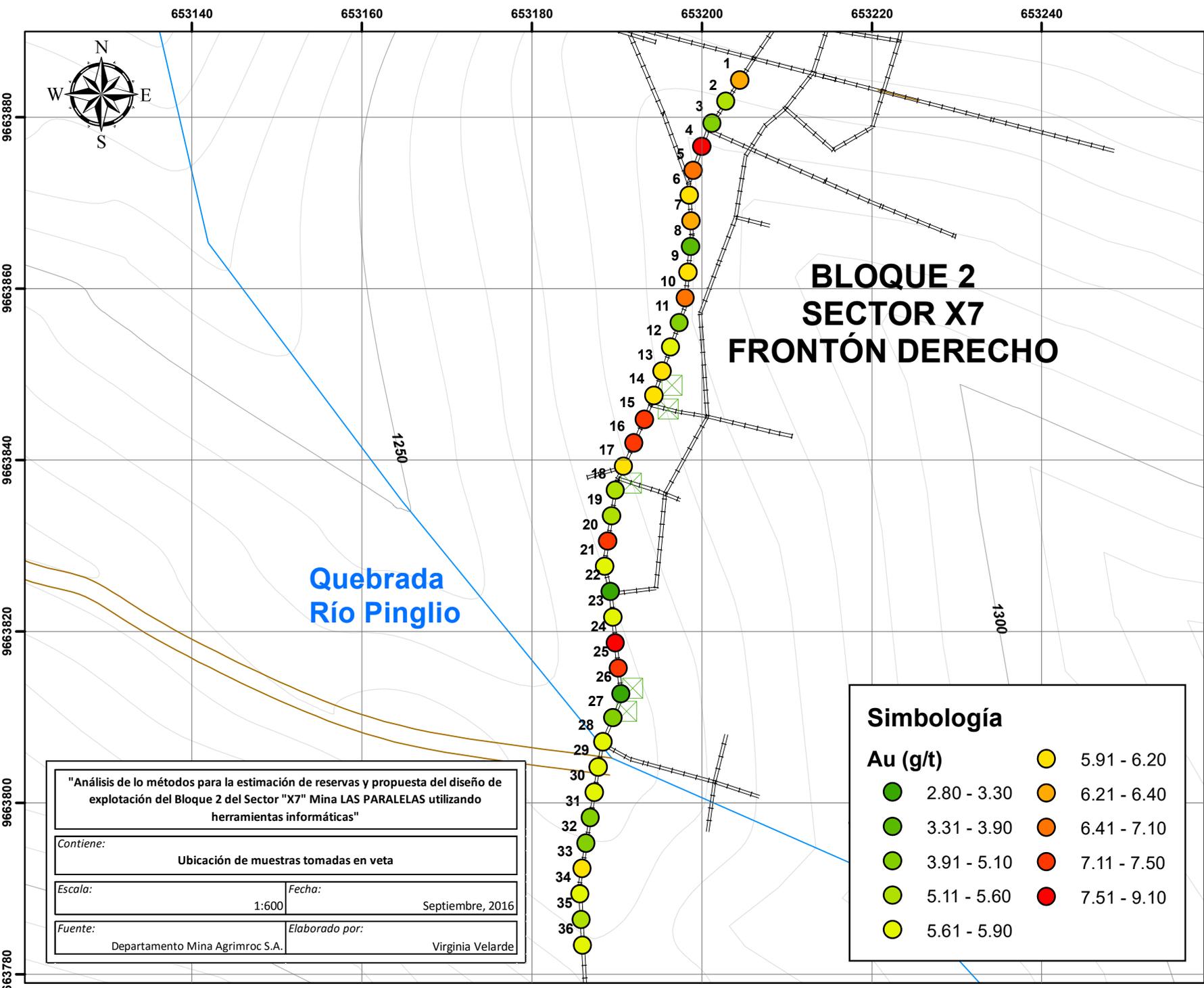
"Análisis de los métodos para la estimación de reservas y propuesta del diseño de explotación del Bloque 2 del Sector "X7" Mina LAS PARALELAS utilizando herramientas informáticas"

Contiene: **Ubicación de muestras tomadas en veta**

Escala: 1:600      Fecha: Septiembre, 2016

Fuente: Departamento Mina Agrimroc S.A.      Elaborado por: Virginia Velarde

**Anexo C:** Mapa de valores de Leyes de Au (g/t) del frontón derecho del Sector "X7" Bloque 2.



"Análisis de los métodos para la estimación de reservas y propuesta del diseño de explotación del Bloque 2 del Sector "X7" Mina LAS PARALELAS utilizando herramientas informáticas"

Contiene: **Ubicación de muestras tomadas en veta**

Escala: 1:600      Fecha: Septiembre, 2016

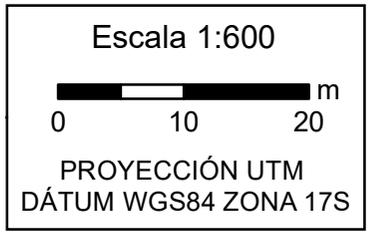
Fuente: Departamento Mina Agrimroc S.A.      Elaborado por: Virginia Velarde

**Simbología**

Au (g/t)	
	2.80 - 3.30
	3.31 - 3.90
	3.91 - 5.10
	5.11 - 5.60
	5.61 - 5.90
	6.21 - 6.40
	6.41 - 7.10
	7.11 - 7.50
	7.51 - 9.10

**Simbología**

- Labores Subterráneas
- Buzones
- Caminos
- Quebradas
- Curvas de Nivel



## BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro, M. (2007). Estimación de Recursos Mineros. Madrid: Centro de Geoestadística de la Escuela de Minas de París.
2. Alulima, J. R. (2009). "Rendimiento de la flotación para concentrar sulfuros minerales de los relaves en los distritos mineros de Portovelo - Zaruma, Bella Rica y San Gerardo". Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
3. Annels, A. E. (1991). Ore-reserves by (classical methods). En Mineral Deposit Evaluation (págs. 134-158). London: CHAPMAN & HALL.
4. ArcGIS Resources. (Agosto de 2016). Ayuda de ArcGis 10.0. Obtenido de <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.0/index.html#//0v2000000050000000>.
5. Bieniawski, Z. (1992). Ground Control. En H. Hartman, SME Mining Engineering Handbook (págs. 897 - 937). Colorado: SME.
6. Brady, B., & Brown, E. (2004). Rock Mechanics for Underground Mining. Third Edition. New York: Kluwer Academic Publishers.
7. Bullock, R. (2011). Room-and-Pillar Mining in Hard Rock. En P. Darling, SME Mining Engineering Handbook 3rd Edition (págs. 1327 - 1339). Colorado: SME.
8. Bustillo, M., & López, C. (1997). Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras (Primera ed.). Madrid: Gráficas Arias Montano S.A.
9. Castañón Fernández, C. D. (2016). Tutorial de RecMin - Español. RecMin (Recursos Mineros), 8-10.
10. Collins, D. (2014). MineSight para Geólogos: Un enfoque integrado para el modelamiento geológico. Series MINTEC.
11. DATAMINE. (2016). Advanced Geostats Preview. News Feed, 1-2.
12. Duque, P. (2000). Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador (Primera ed.). Quito, Ecuador: UCP PRODEMINECA Proyecto MEM BIRF 3655EC.

13. El Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, El Colegio de Geólogos de Chile A.G y la Sociedad Nacional de Minería. (2015). CH 20235 "Código para Informar sobre los Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas Minerales". Santiago de Chile: Comisión Calificadora Competencias en Recursos y Reservas Mineras.
14. ESPO. (2012). Mapa Hidrogeológico del Ecuador. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
15. Estupiñán, T. d. (2002). "Diseño y Explotación Subterránea del Nivel A de la Mina Expobonanza - San Gerardo ubicada en el cantón Pucará Provincia del Azuay". Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
16. Farmer, I. (1992). Room and pillar mining. En H. Hartman, SME Mining Engineering Handbook (págs. 1681 - 1686). Colorado: SME.
17. Geodatapoint. (2014). Maptek Vulcan 9.1 Features New Modeling, Mine-Planning Tools. Geodatapoint.
18. GEOVIA SURPAC. (2013). El Software de Geología y Planificación Minera más usado del mundo. GEOVIA SURPAC, 1-4.
19. Gómez, O., Cuador Gil, J., & Estévez, E. (2011). Determinación del tamaño racional del bloque para la estimación de recursos minerales en el yacimiento Mariel. Minería y Geología, XXVII(4), 20-39.
20. Hoek, E., & Brown, E. (1985). Excavaciones Subterráneas en Roca. McGrawHill.
21. Hohn, M. E. (1999). Geostatistics and Petroleum Geology (Segunda ed.). KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
22. ITGE. (1991). Manual de evaluación técnico-económica de proyectos mineros de inversión. Madrid: Ministerio de Industria y Energía.
23. JORC. (1999). Código de Australasia para Informar sobre Recursos Minerales y Reservas de Mena (EL Código JORC). Australia: "The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists, and The Minerals Council of Australia.
24. José Quintín CUADOR-GIL. (2002). ESTUDIOS DE ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA PARA LA CARACTERIZACIÓN.

Holguín: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez'.

25. Maptek. (2015). Herramientas de datos geoespaciales para la exploración. Maptek Eureka, 1-4.
26. Martin, W. (s.f.). Algunas aplicaciones de la información geoquímica de la Cordillera Occidental. En Geoquímica y Medio Ambiente (págs. 33 - 34).
27. Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistical. Economic Geology 58, 1246-1266.
28. McIntosh, J. (2015). Modelling with the offset surface tool. leapgrog blog, 3.
29. MineSight. (2012). 3D Data and Visualization Empower Mine Exploration and Production. 3D Visualization World Magazine, 1-5.
30. Mining Magazine. (1974). Evaluación de Reservas. Mining Magazine, 130(3), 12-26.
31. Nicholas, D. (1981). Method Selection - A Numerical Approach. En D. Stewart (Ed.), Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines (págs. 39-53). New York: SME-AIME.
32. Nicholas, D. (1992). Ch. 23.4 Selection Procedure. En H. Hartman. En M. & Society for Mining, SME Mining Engineering Handbook (Second Edition ed., págs. 2090-2106). Colorado: SME.
33. Núñez del Arco, E. (1987). Geología del Ecuador (Primera ed.). Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
34. Pratt, W., Figueroa, J., & Flores, B. (1997). Informe N°1, Proyecto Del Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Mapa escala 1:200.000. Quito.
35. PRODEMINCA. (2000). Depósitos Pórfidos y Epitermales del Campo Minero San Gerardo. En PRODEMINCA, Evaluación de Distritos Mineros en el Ecuador (Colección) (Primera ed., págs. 141-168). Quito: UCP PRODEMINCA Proyecto MEM BIRF 36-55 EC.
36. RecMin. (2016). Modelamiento de Recursos. Madrid.

37. Remy, N., Boucher, A., Wu, J., Ting, L., Rajiv, J., & Sharps, M. (2004). The Stanford Geostatistical Modeling Software. The Stanford Geostatistical Modeling Software. Recuperado el 6 de Agosto de 2016, de <http://sgems.sourceforge.net/old/index.html>.
38. Revista Minería Chilena. (2013). Software en Minería: Aporte en precisión, rapidez y versatilidad. Santiago de Chile: EDITEC.
39. Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B., Dobak, P. J., & McEwan, C. ... (2015). Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types. Canadá: Barrick Gold Corporation.
40. Ruiz, Y., Chero, D., & Castañón, C. (2008). Aplicación de Software Minero Gratuito para la Estimación de recursos y evaluación Técnica-Económica de reservas minerales. SolMine, 4-9.
41. Tituana, K. (2014). Modelo de Bloques del Depósito de Cobre ESPOL-X para la Selección del Método de Explotación Minera Utilizando Herramientas Informáticas. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Litoral.
42. Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R., & Luzieux. (s.f.). Evolución Geodinámica de la Cordillera Occidental (Cretácico Tardío-Paleógeno).
43. Weaver, R. (1964). Relative merits of interpolation and approximating functions in the grade prediction problem. En Computers in the Mineral Industries (págs. 171-185). Stanford: G.A. Parks.
44. Zipf, R. (2001). Pillar Design to Prevent Collapse of Room-and-Pillar Mines. En W. Hustrulid, & R. Bullock, Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. (págs. 493 - 501). Colorado: SME.