

**MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D DE UN ÁREA PILOTO DE LA MINA CERRO
MATOSO Y ACTIVIDADES DE SOPORTE AL PROGRAMA DE PERFORACIÓN**

**ALEJANDRO FAYAD BENITEZ
JOSÉ FERNANDO MILLÁN ACELAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

**MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D DE UN ÁREA PILOTO DE LA MINA CERRO
MATOSO Y ACTIVIDADES DE SOPORTE AL PROGRAMA DE PERFORACIÓN**

**ALEJANDRO FAYAD BENITEZ
JOSÉ FERNANDO MILLÁN ACELAS**

Trabajo de grado para optar al título de geólogo

Modalidad: práctica empresarial

Director:

JESÚS HERNANDO MENDOZA FORERO

Geólogo M.Sc.

Tutor:

GONZALO CASTILLO VELÁSQUEZ

Geólogo

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS**

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a todos los geólogos de la Unidad de Exploración de Cerro Matoso S.A. quienes nos acogieron y brindaron una excelente orientación e instrucción para el desarrollo de la práctica profesional y el presente trabajo. Del mismo modo al profesor Hernando Mendoza por sus valiosos comentarios y sugerencias, y por estar siempre presto a colaborarnos.

A nuestras familias por ser un ejemplo constante de apoyo, tenacidad y amor, a quien debemos lo que hoy somos.

A la Universidad Industrial de Santander y a los docentes de la Escuela de Geología quienes han contribuido inmensamente al desarrollo profesional, académico y personal.

A nuestros compañeros y amigos de quienes aprendimos en todo momento, compartiendo valiosas experiencias que siempre recordaremos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	21
4. MARCO GEOLÓGICO	22
4.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	22
4.1.1. El Cinturón Plegado de San Jacinto.....	24
4.2. GEOLOGÍA DE CERRO MATOSO	31
4.2.1. Estratigrafía	33
4.2.2. Génesis del yacimiento.....	37
5. INTRODUCCIÓN AL MODELAMIENTO GEOLÓGICO	39
5.1. ESTIMACIÓN DE RECURSOS.....	40
5.1.1. Colección y administración de datos.....	42
5.1.2. Modelo geológico.....	51
5.1.3. Modelo de bloques.	56
5.1.4. Estimación de leyes.....	59
5.1.5. Reporte de resultados.....	65
5.2. CONTROL DE LEY.....	67
6. MODELAMIENTO GEOLÓGICO PILOTO DE UN ÁREA DEL PIT 23	69
6.1. CONSIDERACIONES INICIALES	69
6.1.1. Localización y geología.....	70
6.1.2. Información de campo	71
6.2. METODOLOGÍA	72
6.2.1. Software utilizados.....	73
6.2.2. Recopilación de información.....	74
6.2.3. Control de campo y construcción de pozos horizontales.....	76
6.2.4. Interpretación.....	78

6.2.5.	Modelamiento	80
6.3.	VOLÚMENES LITOLÓGICOS Y MODELO DE BLOQUES	83
6.4.	VALIDACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO.....	87
6.4.1.	Validación visual	87
6.4.2.	Validación estadística	88
6.4.3.	Estimación leyes de níquel	93
7.	ACTIVIDADES DE SOPORTE AL PROGRAMA DE PERFORACIÓN DE CMSA	
	103	
7.1.	PLAN DE PERFORACIÓN.....	104
7.1.1.	Determinación de áreas de muestreo	104
7.1.2.	Secciones e interpretación.....	113
7.1.3.	Ubicación de pozos y asignación de profundidades.....	116
7.1.4.	Información adicional.....	118
7.2.	SEGUIMIENTO Y CONTROL DE POZOS PLANEADOS.....	119
7.3.	INDICADOR DE MUESTREO	122
8.	CONCLUSIONES.....	127
9.	RECOMENDACIONES.....	128
	BIBLIOGRAFÍA.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de Cerro Matoso	21
Figura 2. Rasgos estructurales mayores del Caribe colombiano. Modificado de (Guzmán, et al., 2004)	23
Figura 3. Localización de Cinturón Plegado de San Jacinto y sus anticlinorios. Modificado de (Geotec Ltda, 2003)	24
Figura 4. Diagrama cronoestratigráfico del Cinturón Plegado de San Jacinto Modificado de (Rosero, et al., 2014)	26
Figura 5. Principales patrones estructurales de Cerro Matoso.	32
Figura 6. Perfil laterítico idealizado. Modificado de (Marsh & Anderson, 2011)	34
Figura 7. Localización del Pit 1 y Pit 2 y sus perfiles lateríticos.	35
Figura 8. Fases y objetivos de un proyecto minero. Información tomada de (Haldar, 2013).	40
Figura 9. Esquema representativo del reporte de recursos y reservas establecido por el código JORC. Modificado de (Joint Ore Reserves Committee, 1999).	41
Figura 10. Tipos de muestreo utilizados en cada fase de desarrollo de un proyecto minero. Información tomada de (Haldar, 2013).	44
Figura 11. Esquema del funcionamiento de una perforadora RC. Modificado de (Moon, et al., 2006).	46
Figura 12. Almacenamiento de núcleos de perforación. Tomado de (Moon, et al., 2006).	47
Figura 13. Diferentes descripciones geológicas posibles en una muestra de núcleo. Modificado de (Marjoribanks, 2010).	48
Figura 14. Representación gráfica del pozo “Hole 1” en el software Datamine Studio 3. En colores se muestran las diferentes litologías por intervalo de muestra (2m).	51
Figura 15. Construcción de modelos geológicos tridimensionales a partir de secciones bidimensionales. (A) Interpretación de la intersección de una unidad	

geológica en un plano. (B) Interpretación de la misma unidad en dos secciones adyacentes. (C) extensión de los límites hacia planos comunes entre secciones. (D) Interpretación a partir de la unión de los límites de los planos comunes. Fuente: (Houlding, 1994).	54
Figura 16. Vista final de un modelo geológico 3D. Fuente: http://evshelp.ctech.com/Content/module_library_reference/File/indicator_geology.htm	55
Figura 17. Modelamiento geológico implícito realizado en el software Leapfrog Geo a partir de perforaciones de pozo. Fuente: http://www.leapfrog3d.com/	56
Figura 18. Algunas propiedades o características cuantitativas y cualitativas que pueden atribuirse a un bloque. Tomado de (Oyarzun, 2011).	57
Figura 19. (A) Dominio geológico. (B) Dominio geológico discretizado en bloques.	58
Figura 20. Geología de un depósito visualizada en un modelo de bloques. Fuente: https://www.linkedin.com/pulse/surpac-67-multi-threaded-block-modeling-chawki-jreige	59
Figura 21. Semivariograma experimental y parámetros básicos. Modificado de (Giraldo Henao, 2002).	63
Figura 22. Comparación de los modelos Esférico (a), Exponencial (b) y Gaussiano (c). Modificado de (Giraldo Henao, 2002).	63
Figura 23. Principio de la Ponderación por Inverso a la Distancia (IDW) considerando muestras dentro de un radio de búsqueda. Tomado de (Haldar, 2013).	65
Figura 24. Curva de Ley-Tonelaje del proyecto <i>Livengood</i> para recursos inferidos iniciales. La línea verde representa el tonelaje y la azul la ley promedio. Fuente: (International Tower Hill Mines Ltd, 2008).....	67
Figura 25. (A). Localización del área de modelo, (B) Geología preliminar área del modelo. (C) Visualización 3D área del modelo.	71
Figura 26. Filtro de pozos usando el perímetro del área de interés. (A) Base de datos histórica de perforaciones. (B) Pozos filtrados en el área de interés	74

Figura 27. (A) Pozos totales filtrados en el área de interés. (B) Corte con topografía	75
Figura 28. Macroinstrucción utilizada para los procesos de selección y adecuación de la información de pozos en el área de interés.	76
Figura 29. Procesamiento en ArcGIS de información capturada en formato de campo.....	77
Figura 30. (A). Localización de los bancos y pozos horizontales construidos en el área del modelo. (B) Vista 3D de los pozos horizontales mostrando la variación litológica por intervalos. En gris la topografía de la mina.	78
Figura 31. Interpretación de secciones horizontales a partir de datos de pozo. ...	79
Figura 32. Secciones interpretadas en los niveles 77, 70 y 63.	79
Figura 33. Volúmenes litológicos generados inicialmente a partir datos de pozos	80
Figura 34. (A) Modelo geológico inicial y plano estructural (B) Modelo geológico con tendencia estructural definida.	81
Figura 35. (A) Shapefiles de plantas interpretadas generados en ArcGIS. (B) Archivo único de polilíneas de contacto generado en Datamine.	83
Figura 36. Modelo geológico 3D final del área piloto.	84
Figura 37. Volúmenes litológicos finales.	85
Figura 38. Discretización en bloques de los volúmenes litológicos obtenidos en el modelamiento geológico.	86
Figura 39. Algunas de las secciones construidas en la validación visual del modelo geológico.	87
Figura 40. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Sílice.	89
Figura 41. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Saprolito Verde bajo en Mg.	89
Figura 42. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Saprolito Verde alto en Mg.	90
Figura 43. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Peridotita Saprolitizada.	91
Figura 44. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Peridotita.....	91

Figura 45. Pequeñas variaciones omitidas en el modelo geológico.	93
Figura 46. Datos de entrada para el Sapolito Verde alto Mg. A la izquierda se observan los bloques generados en el volumen litológico. En la izquierda se presentan las muestras de pozo contenidas en el volumen.	94
Figura 47. Vista 2D del elipsoide de búsqueda.	95
Figura 48. Elipsoide de búsqueda en uno de los bloques del dominio Sapolito Verde alto Mg.	95
Figura 49. Bloques estimados para cada dominio. El color gris, azul, naranja y rojo indican valores de níquel bajos, moderados, medios y altos respectivamente.	97
Figura 50. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Sílice.	100
Figura 51. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Sapolito Verde bajo Mg.	100
Figura 52. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Sapolito Verde alto Mg.	101
Figura 53. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Peridotita Sapolitizada.	101
Figura 54. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Peridotita.	102
Figura 55. El ciclo de trabajo en la Unidad de Exploración de CMSA	104
Figura 56. Vista 3D del plan de minado FY16 de CMSA en el software Datamine. En gris la topografía de la mina, y en colores los bloques de minado.	105
Figura 57. Vista 2D del plan de minado FY16 de CMSA en el software ArcGIS.	106
Figura 58. Vista 3D del archivo de pozos histórico de la Unidad de Exploración. En gris la topografía de la mina, los colores representan la variación del contenido de níquel.	107
Figura 59. Disposición de los bancos en una mina a tajo abierto.	108
Figura 60. (A) Cartografía de bancos. (B) Cartografía geológica proyectada	109
Figura 61. Área de minado en el Banco 91 del Pit 23	110
Figura 62. Níquel promedio en pozos históricos en el Banco 91 del Pit 23	111

Figura 63. Cartografía geológica en el área del Banco 91 del Pit 23.....	113
Figura 64. Sección con litología por intervalo de muestreo en pozos perforados, y cartografía.	114
Figura 65. Interpretación del comportamiento litológico en profundidad.....	115
Figura 66. Confrontación de la interpretación litológica con grado de níquel.....	116
Figura 67. Planeación de pozos y asignación de profundidades.....	117
Figura 68. Plan de tráfico generalizado de la Unidad de Exploración.....	119
Figura 69. (A) Cartografía preliminar. (B) Cartografía actualizada usando la litología del primer intervalo de muestreo en pozos perforados.	122
Figura 70. Ejemplo de bloque solitario por encima de la topografía.	124
Figura 71. (A) Plan de Minado FY16 original para un sector de la mina. (B) Plan de Minado FY16 cortado con topografía para el mismo sector.	124
Figura 72. (A) Criterios por tipo de área a descontar del plan de minado cortado con la topografía. (B) Área resultante del plan de minado cortado con topografía.	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de perforación.	49
Tabla 2. Estructura de datos de un Collar.	50
Tabla 3. Estructura de datos de un Survey.	50
Tabla 4. Estructura de datos de un Assay.	50
Tabla 5. Resumen porcentajes de coincidencia litológica para muestras contenidas en cada volumen.	92
Tabla 6. Densidades por litología. Información tomada de CMSA.	99
Tabla 7. Porcentaje de diferencia Ni para cada dominio de estimación.	99
Tabla 8. Formato básico del plan de perforación.	118
Tabla 9. Base de datos generalizada de seguimiento a pozos de la Unidad de Exploración.	121
Tabla 10. Resultados del indicador de muestreo calculado a fecha de corte 11 de junio de 2015.	126

RESUMEN

TÍTULO: Modelamiento geológico 3D de un área piloto de la mina Cerro Matoso y actividades de soporte al programa de perforación.¹

AUTORES: FAYAD, Alejandro; MILLÁN, José Fernando.²

PALABRAS CLAVE: Modelo geológico, níquel laterítico, control de ley, muestreo, estimación.

DESCRIPCIÓN:

Los modelos geológicos tridimensionales (3D) hacen parte de la cadena de procesos implicados en la estimación de recursos mineros. Dicho proceso es clave para la representación de la distribución y geometría de los cuerpos rocosos. La implementación de una nueva metodología de modelamiento geológico 3D en un área piloto del Pit 23 del yacimiento de níquel laterítico de Cerro Matoso servirá como base para obtener dominios geológicos de estimación con un alto grado de confianza y elaborados en un margen de tiempo considerablemente menor. Esto implica que los volúmenes litológicos obtenidos pueden ser incorporados al modelo de control de ley de la mina para mejorar la definición de las zonas mineralizadas y la estimación de Níquel, y abre una ventana de posibles aplicaciones en otras áreas de trabajo.

Por otro lado, los programas de perforación en una mina se basan en el muestreo realizado con el fin de recolectar información necesaria para la evaluación de un yacimiento y con cierto grado de confianza. Las actividades de planeación del programa de perforación de Cerro Matoso están enfocadas en el cumplimiento de los objetivos de muestreo para el modelo de control de ley. La intervención en esta etapa permite entender el papel de la geología aplicada al desarrollo minero y la prospección de zonas mineralizadas, e incentiva el desarrollo de proyectos que incidan positivamente sobre los ciclos de producción.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Jesús Hernando Mendoza. Tutor: Gonzalo Castillo Velásquez.

ABSTRACT

TITLE: 3D geological modeling of a pilot area of Cerro Matoso mine, and supporting activities to drilling program.³

AUTHORS: FAYAD, Alejandro; MILLAN, Jose Fernando.⁴

KEY WORDS: Geological model, nickel laterites, grade control, sampling, estimation.

DESCRIPTION:

Three-dimensional (3D) geological models are part of a sequence of processes implicated on mineral resource estimation. Such process is the key for the representation of distribution and geometry of rock boundaries. The implementation of a new methodology in 3D geological modeling on a pilot area of Pit 23 at Cerro Matoso lateritic deposit will help as geological estimation domains with a high level of confidence and less timeframe involved to the construction of it. This implies that lithologic volumes obtained can be incorporated to the grade control model of the mine to improve the definition of mineralized zones and have better Nickel estimation, and enable possible applications in other work areas that need such 3D representation.

In another way, sampling programs of a mine are based on samples realized in order to recollect the necessary information for ore deposit evaluation and with some level of confidence. The planning activities of the drilling program at Cerro Matoso are focused on fulfill the objectives of sampling to the grade control model. The intervention on this stage allow to understand the role of geology applied to the mine development and mineralized zones prospection, and encourage the project development that have a positive impact on production cycle.

³ Degree Project

⁴ Faculty of Physical Chemical Engineering. School of Geology. Director: Jesús Hernando Mendoza. Tutor: Gonzalo Castillo Velásquez.

INTRODUCCIÓN

Cerro Matoso es un depósito de níquel laterítico ubicado a 22 km al suroeste del municipio de Montelíbano, departamento de Córdoba. Fue descubierto en 1940 por la compañía petrolera Shell y ha sido explotado desde 1982 para la producción de ferróníquel en un complejo minero metalúrgico conocido hoy día como Cerro Matoso S.A. (CMSA).

La mena se extrae por minería a cielo abierto (open pit), y se acumula en pilas o stocks discriminándose según su calidad (%Ni). Los materiales que clasifican al proceso son usados para conformar la “súper pila”, una mezcla litológica que debe alcanzar características físico-químicas específicas. Esto constituye una restricción metalúrgica que busca garantizar la estabilidad de los hornos de fundición y la optimización de la línea productiva.

Para la determinación composicional de las unidades litológicas propias del perfil de laterización, la Unidad de Exploración se encarga de perforar y muestrear el depósito validando tipos de roca de acuerdo al análisis geoquímico y la descripción de ripios. Los datos de pozo resultantes son usados por la Unidad de Mina para generar un Modelo de Control de Ley (MCL) con el cual se estiman y clasifican los materiales del Pit, permitiendo estructurar planes de minado a corto plazo que garanticen la disponibilidad permanente de la mezcla bajo las condiciones requeridas por el proceso.

Por lo anterior, es necesario considerar las variables que dominan el comportamiento litológico y de la mineralización, de modo que proporcionen al MCL un ajuste más cercano a la realidad geológica, y faciliten direccionar los planes de perforación a caracterizar zonas potencialmente mineralizadas.

Este trabajo presenta una propuesta para incluir el conocimiento geológico al MCL usando sólidos litológicos como dominios de estimación. Además, una serie de actividades correspondientes al ciclo de planeación de las perforaciones que ejecuta la Unidad de Exploración de CMSA.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar un área piloto de la mina Cerro Matoso, integrando cartografía geológica y datos de pozo, para generar sólidos litológicos de ayuda al Modelo de Control de Ley, y apoyar la planeación de las perforaciones en el yacimiento.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer una metodología para el modelamiento 3D que incluya el tratamiento de la información cartográfica y de pozos.
- Generar sólidos litológicos definiendo el volumen en metros cúbicos.
- Generar un modelo de bloques usando los sólidos litológicos como dominio en la estimación de leyes de níquel.
- Contribuir a la elaboración, seguimiento y control de los planes de perforación semanal.
- Adquirir destreza en el uso del software utilizado en el modelamiento y la planeación (Leapfrog Geo, Datamine, ArcGIS).

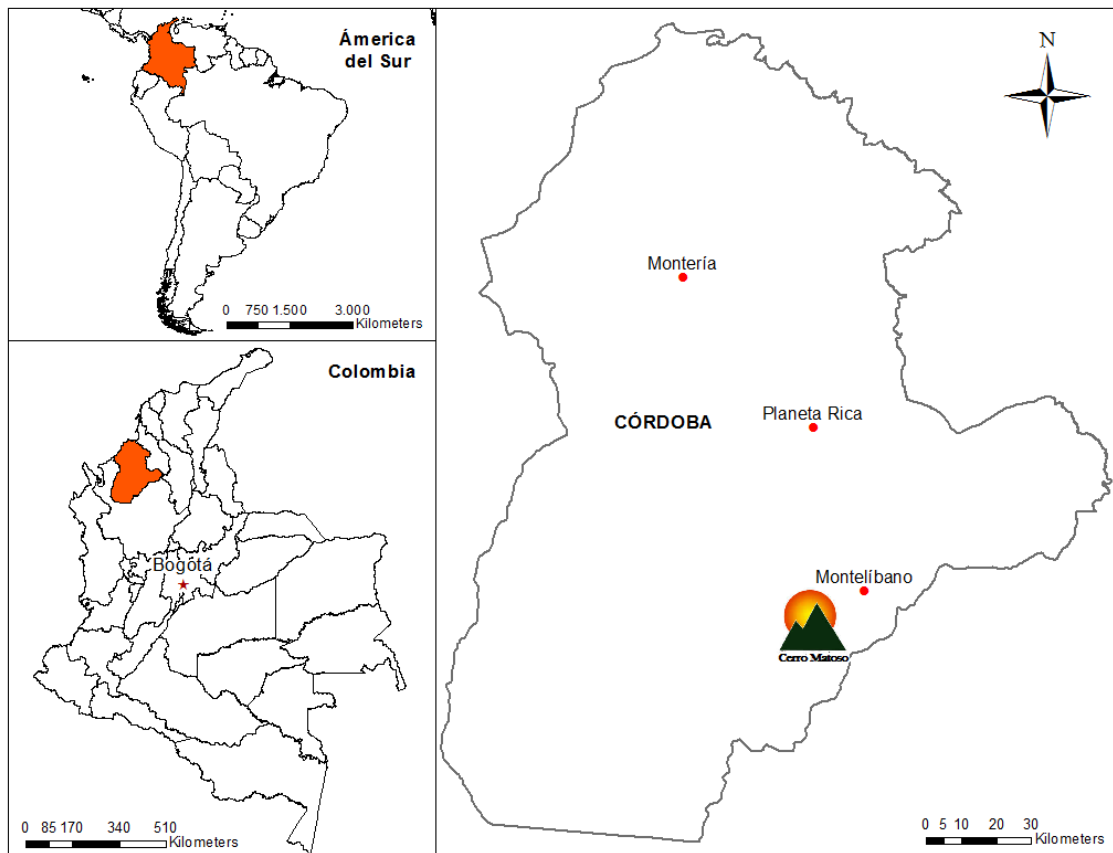
2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene lugar en el marco del soporte a las actividades de planeación que realiza la Unidad de Exploración de CMSA, para asegurar que las perforaciones cumplan con los objetivos de muestreo. Además, como parte de la optimización de los procesos que intervienen en el ciclo productivo, pretende desarrollar una iniciativa que pueda ser usada para responder a la necesidad de incorporar el conocimiento geológico al MCL, generando sólidos que limiten volúmenes litológicos como input de ayuda para mejorar la definición de las zonas mineralizadas y la estimación de tipos de material.

3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Cerro Matoso está localizado en la zona noroccidental de Colombia en el departamento de Córdoba, cuenca alta del río San Jorge, 22 km al suroeste del municipio de Montelíbano. El acceso a Montelíbano puede efectuarse desde el norte por la carretera que conduce desde Montería hasta La Apartada pasando por Planeta Rica, o desde el sur por la carretera que comunica a Medellín con Cartagena. Al llegar a La Apartada desviar al W hacia Montelíbano.

Figura 1. Localización geográfica de Cerro Matoso.



4. MARCO GEOLÓGICO

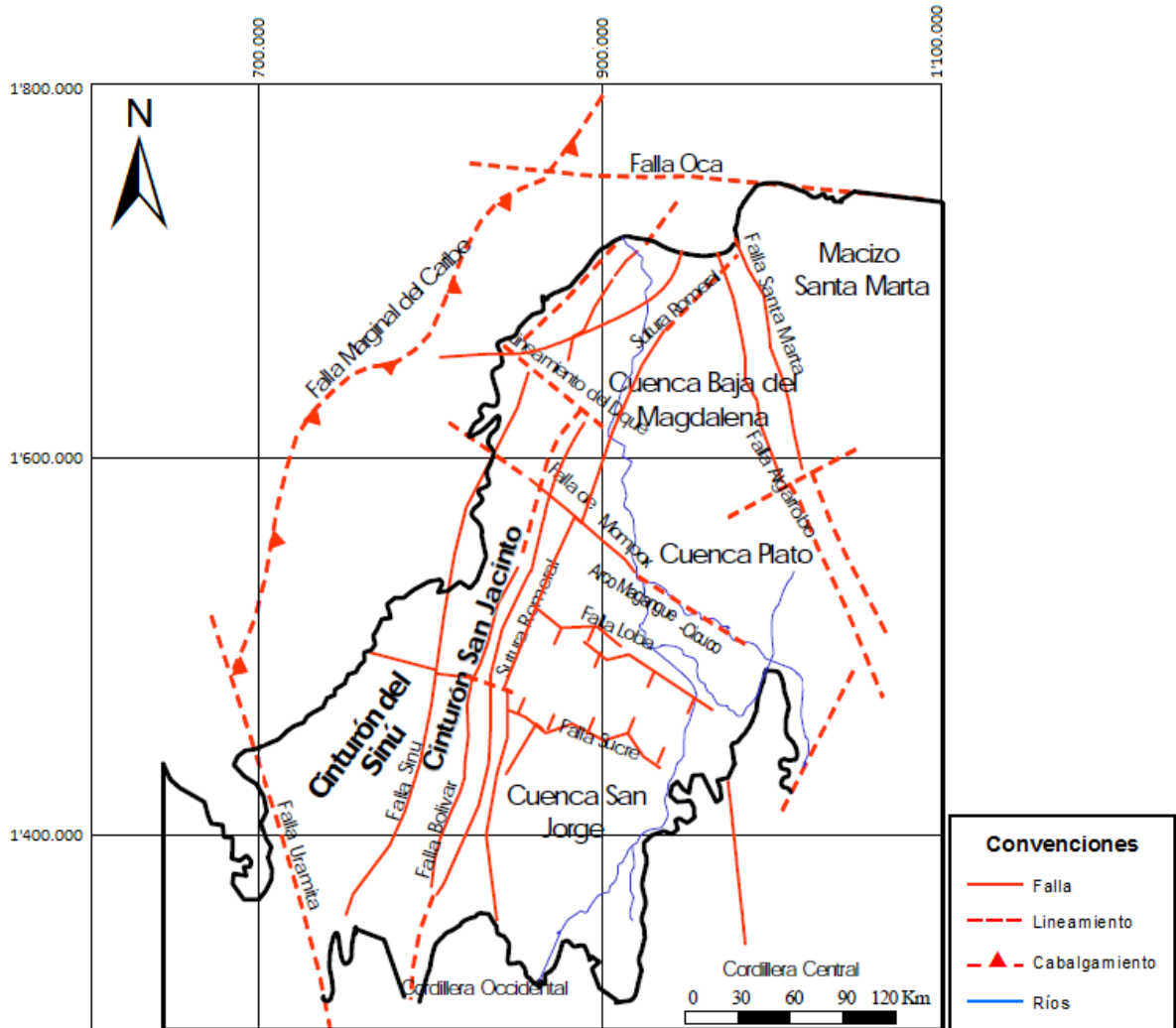
4.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El marco geológico regional del Caribe colombiano está asociado a la evolución geológica de la esquina noroccidental de Suramérica y su relación con el origen de la placa del Caribe. La reconstrucción del movimiento oblicuo de las placas en esta esquina, sugieren la influencia de un desplazamiento dextro-lateral en el borde occidental de Colombia durante el Mesozoico-Cenozoico, indicando que las rocas del Mesozoico en la margen occidental de Colombia pudieron haber sido generadas al SW, y acrecionadas a la cadena montañosa de los Andes, gracias al movimiento oblicuo de las fallas dextro-laterales (Guzmán, et al., 2004).

Elementos claves en el noroccidente colombiano como la Sutura de Romeral, el lineamiento del Sinú, el arco Magangué-Cicuco y las Fallas Santa Marta y Oca (Figura 2) toman un papel importante en la configuración tectono-estratigráfica desde el Cretácico Superior hasta la actualidad, donde se fueron modelando fondos de sedimentación que en el área Caribe de Colombia, de occidente a oriente son: Cinturón Plegado del Sinú (CPS), Cinturón Plegado de San Jacinto (SPSJ) y las subcuencas de Plato y San Jorge (Cuenca del Valle Inferior del Magdalena) (Guzmán, et al., 2004).

Diversos perfiles sísmicos y gravimétricos realizados a través de los Andes indican que la Sutura de Romeral representa uno de los mayores límites geofísicos extendiéndose en más de 500 km y dividiendo dos provincias corticales mayores, una región estable o de plataforma al oriente, que suprayace una corteza continental no plegada, y una región inestable al occidente, que suprayace una corteza oceánica plegada. En la región estable se encuentran las subcuencas de Plato y San Jorge, mientras la región inestable comprende los cinturones del Sinú y San Jacinto, a su vez separados por el Lineamiento del Sinú.

Figura 2. Rasgos estructurales mayores del Caribe colombiano.



Fuente: Modificado de (Guzmán, et al., 2004).

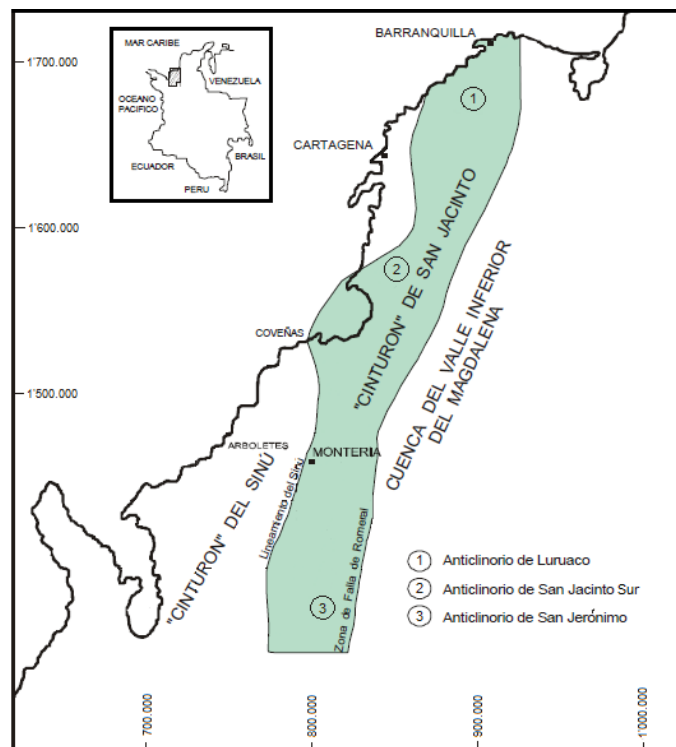
Las márgenes del Caribe sobre la cuenca de Colombia hacia el sur se ampliaron por una acreción continua de los cinturones del Sinú y San Jacinto, cada uno de los cuales pasó por una serie de eventos tectónicos y sedimentarios similares, pero en tiempos diferentes. Se considera que las sedimentitas del CPSJ comenzaron a depositarse a finales del Cretácico, marcando la acreción de corteza oceánica en este sector. Mientras que las sedimentitas del CPS son más jóvenes siendo en su

mayoría del Mioceno hasta el Reciente, lo que sugiere que éste corresponde a una fase posterior de acreción de corteza oceánica que continua en la actualidad y cuyo rasgo más representativo es la presencia de diapirismo y vulcanismo de lodo, rasgo que determina las características estructurales de la zona (Guzmán, et al., 2004).

4.1.1. El Cinturón Plegado de San Jacinto

El CPSJ se localiza adyacente a la plataforma y se encuentra limitado al oriente y occidente por los lineamientos de Sinú y Romeral respectivamente. Está estructuralmente conformado por los anticlinorios de San Jerónimo, San Jacinto Sur y Luruaco (Figura 3) (González & Londoño, 2001). Cerro Matoso se ubica específicamente en el extremo suroriental del Anticlinorio de San Jerónimo, por lo cual en este trabajo se hace énfasis en las unidades litológicas que lo conforman.

Figura 3. Localización de Cinturón Plegado de San Jacinto y sus anticlinorios.

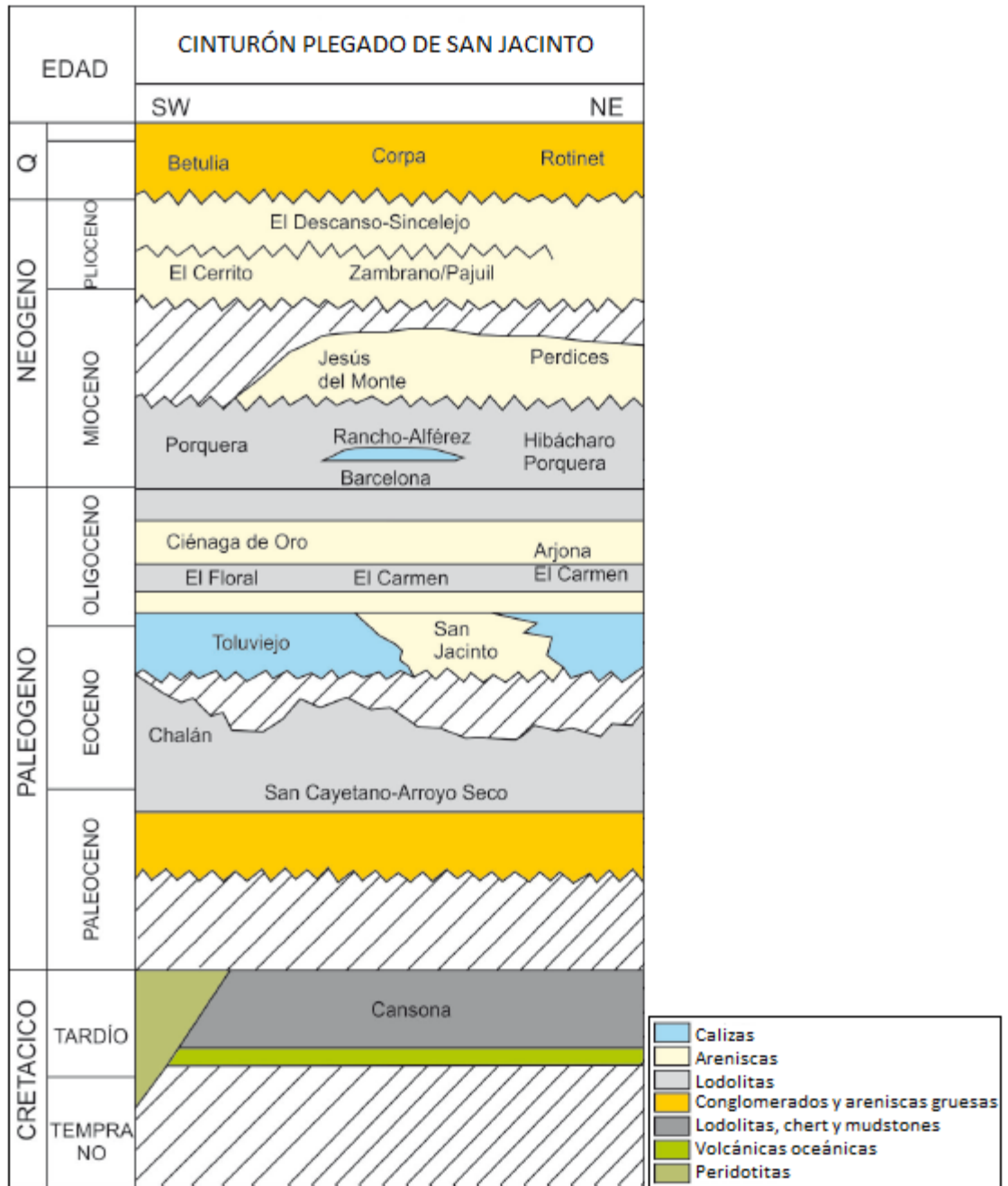


Fuente: Modificado de (Geotec Ltda, 2003).

Aunque estructuralmente los anticlinorios de San Jerónimo y San Jacinto Sur son similares, litológicamente presentan ciertas diferencias, ya que en el primero afloran unidades más antiguas que constituyen el basamento en la cuenca del Cenozoico en el Caribe colombiano (González & Londoño, 2001). Estas unidades están compuestas por peridotitas, basaltos, aglomerados y carbonatos de precipitación pertenecientes al Cretácico Superior.

El registro sedimentario del sector sur del CPSJ inicia con los depósitos finos de la Formación Cansona también del Cretácico Superior, y los depósitos gruesos de la Formación San Cayetano de edad Paleoceno. Suprayaciendo a la Formación San Cayetano se encuentran calizas con intercalaciones de margas y areniscas calcáreas de edad Eoceno Medio-Oligoceno Temprano pertenecientes a la Formación Toluviejo. La sedimentación en el Oligoceno-Mioceno está caracterizada por sucesiones gruesas de areniscas con alto aporte de material carbonoso e intercalaciones de lodolitas y algunas capas de carbones propias de las Formación Ciénaga de Oro. Durante el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano se presentan depósitos predominantemente marinos someros compuestos por una sucesión espesa de lodolitas calcáreas ricas en foraminíferos en la Formación Porquera. Desde el Mioceno Medio al Pleistoceno ocurre inversión tectónica del CPSJ y la sedimentación migra principalmente hacia el VIM caracterizándose por depósitos marinos someros de la Formación Cerrito, y continentales de las Formaciones Sincelejo y Betulia (Rosero, et al., 2014).

Figura 4. Diagrama cronoestratigráfico del Cinturón Plegado de San Jacinto.



Fuente: Modificado de (Rosero, et al., 2014).

4.1.1.1. Estratigrafía

Las unidades litoestratigráficas del CPSJ en el sector del Anticlinorio de San Jerónimo en el departamento de Córdoba son:

- Peridotitas de Planeta Rica (Kp)

Nombre propuesto por Dueñas y Duque-Caro (1981) para referirse a una serie de rocas que afloran al suroccidente del municipio de Planeta Rica y que vienen siendo parte de corteza oceánica acrecionada al continente. Se asocian a esta unidad peridotitas tipo hazburgitas, con dunitas en menor proporción y localmente gabros y serpentinitas. En mayor parte del cuerpo se reporta meteorización dando lugar a una roca saprolítica de color verde oscuro y manchas amarillentas con concentraciones locales de ferroníquel. Se considera anterior al Santoniano (Cretácico Superior) puesto infrayace la Formación Cansona de edad Cenomaniano-Maastrichtiano. Hacia su flanco oriental entran en contacto con los basaltos de la Formación Nuevo Paraíso (Guzmán, et al., 2004).

- Basaltos de Nuevo Paraíso (Kb)

Unidad compuesta de basaltos andesíticos con textura porfírica y matriz microcristalina traquítica, asociados localmente a Diabasas. Inicialmente fueron descritas por Dueñas y Duque-Caro (1981) en la región de Nuevo Paraíso. De acuerdo a su posición estratigráfica estas rocas pueden ser anteriores al Coniaciano, encontrándose relacionadas a parte de corteza oceánica acrecionada al continente (Guzmán, et al., 2004).

- Formación Cansona (K₂C)

Constituida hacia la base por cherts marrones afectados por pequeños diques de roca ígnea meteorizada, con intercalaciones aparentes de diabasa, chert negros, limolitas grises verdosas y arcillolitas. Ocasionalmente presencia de arenitas oscuras y calizas grises. Descansa discordante sobre las Peridotitas de Planeta Rica. Su edad es Santoniano-Maastrichtiano (Cretácico Superior), considerándose

de un ambiente batial profundo a pelágico por la presencia de foraminíferos planctónicos, coccolitofóridos y radiolarios (Guzmán, et al., 2004).

- Formación San Cayetano (E₁E_{2sc})

Unidad compuesta por secuencias de arenitas finogranulares de color amarillo grisáceo y lutitas color verde oliva, con abundante contenido de restos vegetales o láminas carbonosas. Secuencias de arenitas conglomeráticas en capas gruesas de aspecto macizo, en típicas secuencias granodecrecientes, fragmentos de cuarzo, volcanitas, metamorfitas e interclastos de lutitas verdosas. Según Duque-Caro la edad de esta formación es Paleoceno Tardío-Eoceno Temprano. En cuanto al ambiente de depositación, diversos autores han planteado un origen turbidítico, probablemente de un subambiente de abanico proximal interior a medio (Guzmán, et al., 2004).

- Formación Ciénaga de Oro (E₃N_{1co})

La Formación Ciénaga de Oro es predominantemente arenosa, consta de una alternancia de areniscas de grano fino a conglomeráticas, limolitas bioturbadas estratificadas en capas planas paralelas, shales grisáceas levemente calcáreos, shales carbonosos y carbón. Su edad es Eoceno Tardío-Mioceno Temprano y su génesis se encuentra asociada a un ambiente transicional deltaico (Guzmán, et al., 2004).

- Formación Porquera (N_{1p})

En el área de Planeta Rica consta de shales calcáreos abigarrados color pardo amarillento y grises con concreciones calcáreas y macrofósiles hacia el tope (Guzmán, et al., 2004). Su edad comprende el rango Mioceno Medio a Mioceno Tardío y su génesis está asociada a un ambiente marino entre 200-600 m aproximadamente según Dueñas y Duque-Caro (1981).

- Formación El Cerrito (N_{1ec})

La Formación El Cerrito está constituida hacia la base de una serie de intercalaciones de lutitas grises y areniscas de grano fino color amarillento. En el medio se encuentran arcillolitas grises intercaladas con arenitas finas con cemento calcáreo, y hacia el tope arcillolitas gris y verde intercaladas con arenitas de grano medio a conglomeráticas (Guzmán, et al., 2004). Según Duque-caro, quien se apoya en la fauna presente, la edad de la Formación El Cerrito es Mioceno Tardío-Plioceno Temprano, y su ambiente de formación es marino de plataforma nerítica superior.

- Formación Sincelejo (N₂Q₁S)

Unidad potente constituida por areniscas de grano fino a conglomeráticas dispuestas en capas cuneiformes con estratificación cruzada y con variaciones locales a facies lodosas. Hacia el tope predominan los conglomerados matriz soportados sobre areniscas, compuestos principalmente por rocas volcánicas, cuarzo lechoso y chert. El contacto con la suprayacente Formación Betulia está dado por una paraconformidad dudosa. Su edad es Mioceno Tardío-Plioceno y su génesis está asociada a un ambiente continental de río trezado (Guzmán, et al., 2004).

- Formación Betulia (Qb)

La Formación Betulia está compuesta, por una serie monótona de arcillas plásticas ligeramente arenosas de color amarillo mostaza con algunos niveles delgados de gravas que incluyen cantos de cuarzo, fragmentos de caliche y grandes restos aparentemente retrabajados de xilópalos en una matriz areno-limosa rojiza, dispuestos en capas cuneiformes irregulares. Su edad es posiblemente Plioceno Superior de acuerdo a su posición estratigráfica. El ambiente de depositación sugerido es continental lagunar, posiblemente de ciénagas y pantanos drenados ocasionalmente por corrientes fluviales efímeras (Guzmán, et al., 2004).

4.1.1.2. Evolución geológica

La actividad de formación de los estratos altamente tectonizados y fallados por esfuerzos transpresivos que caracterizan al CPSJ inicia a finales del Cretácico Superior debido al choque de las placas Caribe y Suramericana a lo largo de la Sutura de Romeral, levantando el borde continental ya emergido y produciendo deformación y metamorfismo en la zona.

Diversos eventos tectonoestratigráficos del CPSJ pueden resumir su evolución geológica en el marco de dos grandes fases, la primera corresponde al margen pasivo, y la segunda al margen activo asociado a una serie de pulsos durante la deformación (Petroseis Ltda, 2011).

- **Fase 1:** Margen Pasivo (Cretácico Inferior - Cretácico Superior)

Inicio del Margen Pasivo a partir del Cretácico Inferior hasta Cretácico Superior (Maastrichtiense). Durante el Albiense cesa el fallamiento normal asociado a la fase de apertura e inicia la sedimentación marina que se extiende a los márgenes norte y oeste de Suramérica, alcanzando su máxima extensión en el Cenomaniano al Santoniano.

- **Fase 2:** Margen Activo (Maastrichtiense – Eoceno Temprano)

A esta fase se le pueden asociar diferentes eventos de deformación debido a la colisión oblicua de las placas antes mencionadas:

Cretácico Superior – Paleoceno: Diversos investigadores del área sugieren actividad diapírica que da paso a la deformación y emergencia del cinturón. Una transgresión en el área es la causante de sedimentación de rocas pelágicas marino profundo (Fm. Cansona) y batial (Fm. San Cayetano) que suprayacen el basamento oceánico existente.

Eoceno Medio – Oligoceno: Esfuerzos compresivos aumentan producto del avance del Caribe, generando un margen transformante y formando la Fosa del Sinú como nueva zona de subducción. Comienza la orogénesis pre-Andina,

causante del primer levantamiento de mayor relevancia en el Cinturón de San Jacinto. La zona positiva al este de Romeral sirve de fuente a la sedimentación siliciclástica, depositando cherts, margas y lodolitas.

Oligoceno - Mioceno Temprano: Un evento diapírico causa el remodelado del relieve y la culminación de la inconformidad del Oligoceno Temprano. Sucesión de eventos erosivos, basculamiento de estratos y levantamiento de la cuenca hacia el oeste del Cinturón, como consecuencia de los continuos esfuerzos ocurridos en la Fosa del Sinú. Este hecho produce el aumento del ángulo de la falla Romeral por acreción de la cuenca oceánica, y da origen a cabalgamientos transpresivos, levantando las serranías de Sinú y San Jacinto en el Mioceno Medio.

Mioceno Tardío – Plioceno: Inestabilidad tectónica relacionada a la separación de la Sierra Nevada de Santa Marta, dando paso a un lapso totalmente emergente, con inversión de las principales estructuras y half-grabens, seguido de sedimentación turbidítica con aporte terrígeno.

Pleistoceno – Holoceno: El área es controlada por la Orogenia Andina, marca una etapa de plegamiento y fallamiento con intrusiones de lodo que deforman el cinturón plegado y en algunas zonas la exposición de la cubierta sedimentaria de la plataforma.

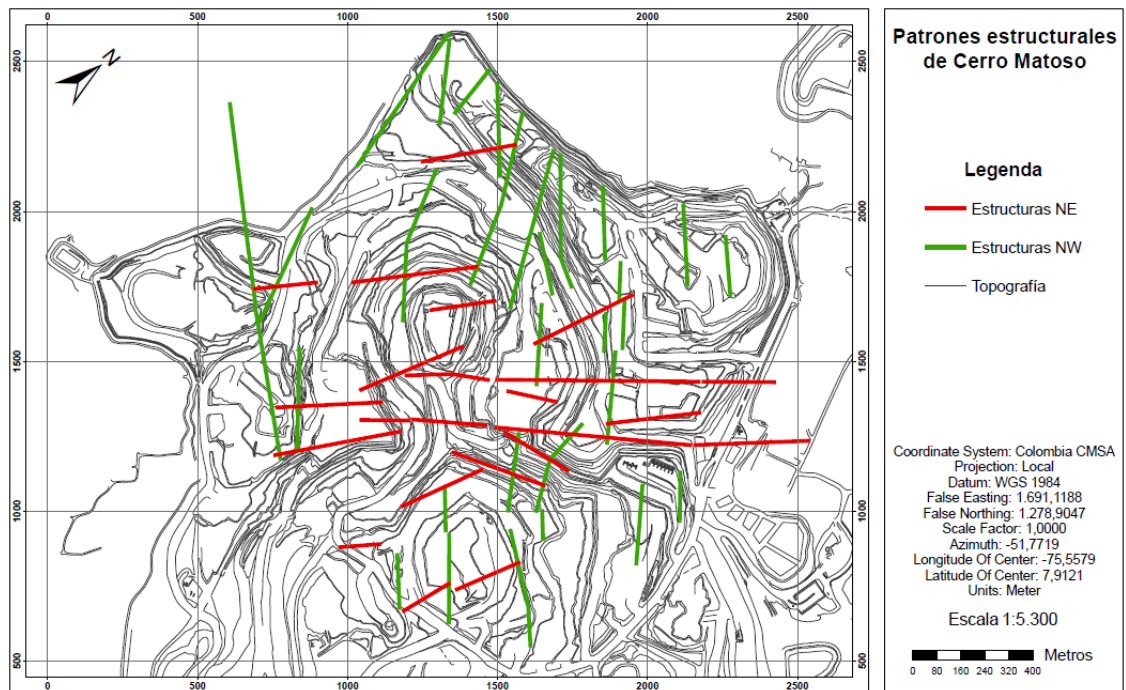
4.2. GEOLOGÍA DE CERRO MATOSO

Cerro Matoso está asociado a un cuerpo aislado de rocas máficas y ultramáficas de edad Cretácico, que forman parte del Complejo Ofiolítico del Cauca, tectónicamente emplazado a lo largo del sistema de fallas Cauca-Romeral durante la orogenia Pre-Andina (Mejía & Durango, 1981). Este sistema de fallas representa una discontinuidad estructural que marca el límite regional entre el núcleo poli-metamórfico de la Cordillera Central y la secuencia ofiolítica acrecionada del pre-Cenozoico.

El depósito se desarrolló sobre un cuerpo peridotítico variable, parcialmente serpentizado y expuesto en forma de colina alargada, aproximadamente de 2,5 km de longitud por 1,5 km de ancho y una altura de 250 m.s.n.m (Gleeson, et al., 2004). Pertenece a un conjunto de escamas o bloques ofiolíticos con una dirección N-S que se extiende desde el municipio de Ituango, continuando en Uré hasta el norte de Planeta Rica (Bermúdez , et al., 2012). Se ha sugerido que dicho cuerpo ultramáfico ha sido sometido a intensa erosión en un ambiente tropical húmedo desde finales del Eoceno (López-Rendón, 1986).

Cerro Matoso presenta dos patrones generales de diaclasas y fallas: el primero, asociado a fallas normales de alto ángulo y rumbos NE, formadas en un sistema de esfuerzos compresionales que ocurrió durante el emplazamiento del cuerpo ultramáfico contra la Paleofosa Romeral; el segundo, asociado a fallas normales de muy alto ángulo y rumbos NW, atribuidas a esfuerzos compresionales durante la Orogenia Andina (Ortiz B, 2004).

Figura 5. Principales patrones estructurales de Cerro Matoso.



4.2.1. Estratigrafía

- Ultramafitas de Cerro Matoso (Ksucm)

Nombre asignado para referirse a un cuerpo rocoso ultramáfico serpentizado con dirección preferencial NW aflorante en el área del Cerro Matoso. Está constituido principalmente por peridotitas tipo hazburgita, de carácter holocristalino y fanerítico, predominantemente verde oscura a negra. Acompañadas de lentes duníticos y abundantes venas locales de magnesita y calcita. Mineralógicamente se componen por olivino (83%), ortopiroxeno (9%), serpentina (7%) y como minerales accesorios magnetita y cromita en cristales diseminados (González & Londoño, 2001). Estas rocas al meteorizarse producen suelos residuales con altas concentraciones en níquel.

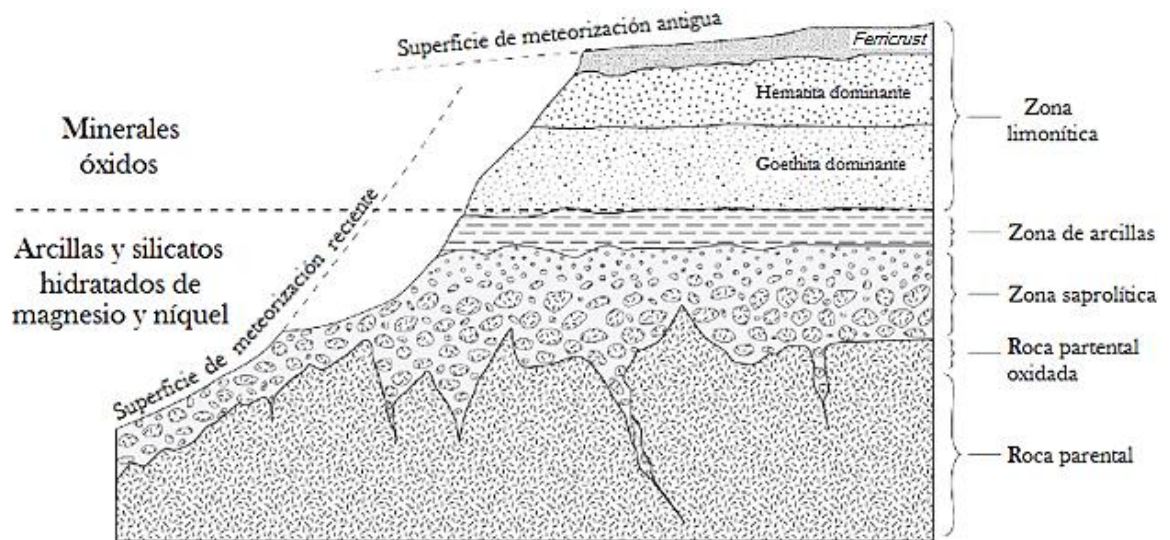
- Laterización

Las lateritas níquelíferas son depósitos supergénicos formados a partir de la intensa meteorización química y mecánica de rocas ultramáficas. Importantes concentraciones secundarias de níquel requieren que la litología protolito esté inicialmente enriquecida. Las rocas ultramáficas pueden presentar contenidos de níquel que varían normalmente del 0.2 al 0.4%. La meteorización extrema elimina todos los elementos del protolito salvo los menos solubles, el material residual puede llegar a concentrar alrededor del 5% Ni (Marsh & Anderson, 2011). La acción simultánea de diversos factores como el clima, la erosión, el drenaje, la geomorfología y la tectónica juegan un papel importante en la concentración de níquel dentro del perfil de alteración.

La mineralogía de un perfil laterítico se puede separar en varias secciones paragénicas (Figura 6). Hacia la base se encuentra el protolito fresco constituido por dunitas o peridotitas serpentizadas como fuente principal de níquel. Estas rocas se componen fundamentalmente de olivino, con cantidades variables de piroxenos y productos de alteración que incluyen serpentina y clorita. Enseguida hay una capa saprolítica que consiste en restos del protolito y lizardita, goethita,

magnetita, maghemita, cromita y silicatos hidratados de magnesio y níquel. La parte superior del saprolito es una transición rica en arcillas. Encima de las arcillas se encuentra una capa de limonita con goethita, maghemita, hematita, gibbsita e hidróxidos de manganeso como la litioforita y la asbolana. En el tope de la secuencia se encuentra un *ferricrust* o capa de hierro rica en hematita y goethita (Marsh & Anderson, 2011).

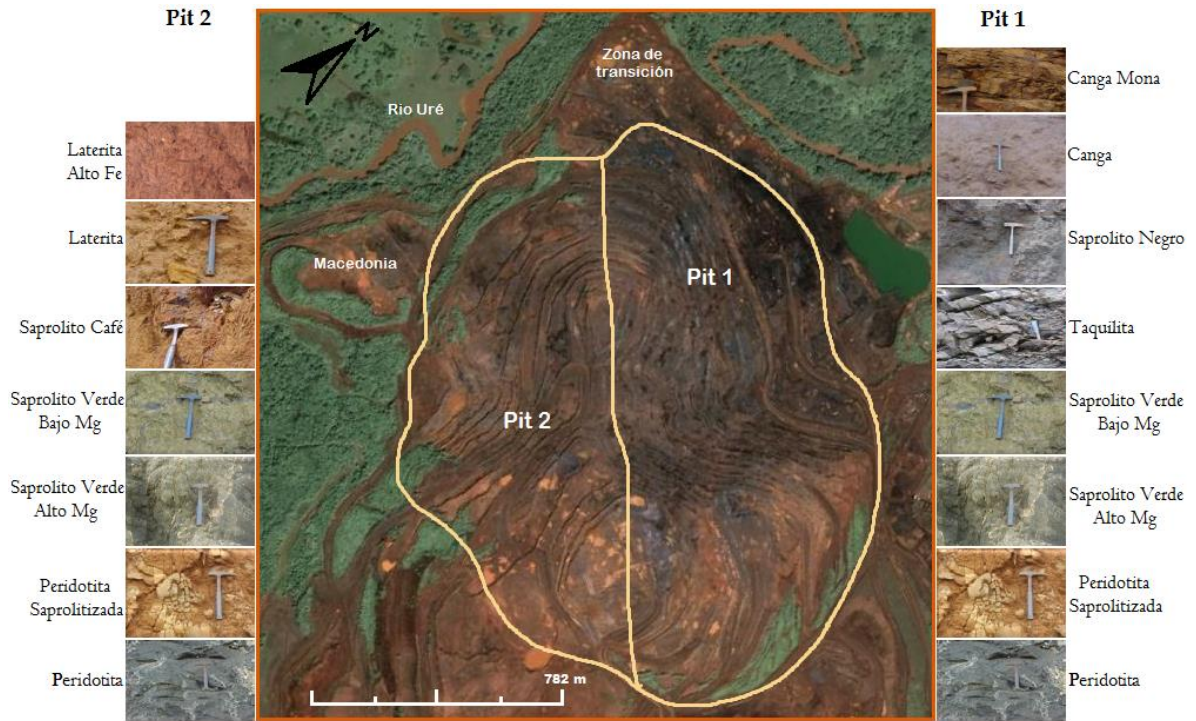
Figura 6. Perfil laterítico idealizado.



Fuente: Modificado de (Marsh & Anderson, 2011).

En Cerro Matoso, el perfil de meteorización es ampliamente variable, tanto vertical como horizontalmente, distinguiéndose hasta 10 litologías diferentes las cuáles conforman dos perfiles lateríticos, que corresponden a dos sectores particulares de la mina conocidos como Pit 1 y Pit 2 (Figura 7). El primero de éstos, caracterizado por concentrar las mayores leyes de níquel.

Figura 7. Localización del Pit 1 y Pit 2 y sus perfiles lateríticos.



Fuente: Cerro Matoso S.A.

Peridotita: Es la roca parental del depósito y corresponde a una peridotita de grano fino, verde oscuro a negro con bandas locales azulosas que obedecen a un incremento en la proporción de piroxenos (Gleeson, et al., 2004). En algunas áreas la peridotita contiene abundantes venas de magnesita y un agregado de silicatos hidratados de color verdoso brillante rico en níquel denominado “garnierita”.

Peridotita Saprolitizada: Litología de color verde pálido a beige que corresponde al primer grado de alteración de la peridotita. Presenta cristales bien definidos de broncita y venas de garnierita en una meteorizada donde generalmente se observan relictos de la roca original. El contacto con la peridotita puede observarse localmente como una transición gradual entre las dos unidades.

Saprolito Verde: Es la unidad de mayor concentración de níquel, alrededor del 9%. Se distinguen dentro de la mina dos tipos de saprolitos verdes: el primero, de alto contenido de magnesio, color verde, grano fino, venas de cuarzo y garnierita, y baja resistencia al esfuerzo; el segundo, es un estado avanzado de meteorización donde varía su color a café pardo, disminuyendo el contenido de magnesio y aumentando el contenido de hierro.

Saprolito Café: Esta unidad se compone de rocas de grano fino, apariencia suave, color café rojizo a café naranja, conservando algunos relictos menores de Peridotita Saprolitizada y piroxenos muy alterados. Presenta venas de óxidos de manganeso y no contiene cantidades significativas de cuarzo. Su contenido de níquel es considerable en algunos sectores particulares con valores hasta del 3%.

Taquilita: Material marrón oscuro a negro, de grano muy fino, compuesto principalmente por óxidos de hierro y fases amorfas. Presenta una textura vítrea, variando su espesor de centímetros a metros, localmente con vetas de cuarzo deformado. Se considera que estas rocas no son producto normal de una secuencia de meteorización (Gleeson, et al., 2004). Están asociadas a zonas de fallas con fuerte control estructural. Aunque el término “taquilita” no corresponde con las características típicas para estos tipos de roca, ha sido acuñado por los geólogos de la mina para referirse a la litología inicialmente descrita.

Saprolito Negro: Esta unidad se encuentra asociada a la Taquilita, en zonas de fallamiento. Es de color negro verdoso a negro verde oscuro, localmente moteado con color rojo como producto de la oxidación. Contiene magnetita nodular y en vetillas de pocos milímetros.

Laterita: Se diferencian dos tipos de lateritas: la primera, una laterita amarilla de grano muy fino, con alto valores de sílice formando pequeñas venas de cuarzo, en ocasiones dispuestas en boxworks; la segunda, una laterita roja a marrón rojiza muy suave de grano fino con alto contenido de hierro y parches locales oscuros ricos en manganeso. Ambos tipos de laterita han logrado un estado avanzado de

meteorización impidiendo reconocer las características y estructuras de la roca parental.

Canga: Es la unidad superior del perfil, se presenta como una capa masiva altamente endurecida, rica en hierro de color rojo oscuro y fuertemente magnética (Mejia & Durango, 1981). Puede presentarse localmente como no magnética, con un aspecto nodular y de color amarillento, a lo que se le ha denominado como la “canga mona”.

- Rocas sedimentarias

Reposan discordantes sobre las Ultramafitas de Cerro Matoso una serie de limolitas intercaladas con arcillolitas grises, areniscas de grano medio a grueso y mantos de carbón pertenecientes a la Formación El Cerrito.

También se encuentran depósitos aluviales asociados al Río Uré, compuestos generalmente de material areno arcilloso matriz soportado con gravas y guijos de peridotitas, cuarzo lechoso y chert negro (Bermúdez , et al., 2012).

4.2.2. Génesis del yacimiento

Diversos autores coinciden en que la formación del yacimiento de Cerro Matoso se desarrolló en un amplio periodo de tiempo al considerar los espesores y concentraciones de níquel inusuales respecto a otros yacimientos descritos de este tipo (Mejia & Durango, 1981; López-Rendón , 1986; Gleeson, et al., 2004). Iniciaría en la última etapa de la orogenia Pre-Andina a finales de Eoceno Tardío. El perfil de laterización y sus variabilidades en la distribución de los contenidos de níquel fueron más favorecidos y de mayor grosor en la zona nororiental del cuerpo ultramáfico, lo que sería consecuencia de varios factores. El menor grado de serpentinización, el desarrollo de una capa ferrosa o ferricrust (Canga) que actuó como un horizonte de hierro protegiendo el perfil, y un levantamiento con perturbaciones después de la Orogenia Andina del Mioceno Tardío-Plioceno que facilitó la erosión de la zona suroccidental del cuerpo (Ortiz B, 2004).

Dos grandes ideas sobre la génesis del depósito han surgido a través de observaciones de campo, análisis paleontológicos, geoquímicos y mineralógicos de las rocas que se encuentran en el perfil. La primera sostiene que es consecuencia de procesos meramente supergénicos donde la peridotita parcialmente serpentizada fue sometida a eventos tectónicos que la deformaron producto del alto fallamiento y diaclasamiento. Esto permitió una roca permeable que expuesta a clima tropical de intensa humedad fue infiltrada por aguas superficiales que lixiviaron los elementos más solubles a niveles inferiores. Fluctuaciones en el nivel freático y un extenso periodo de tiempo bajo condiciones de intemperismo favorecieron la aparición de grandes horizontes con altas concentraciones de níquel (López-Rendón , 1986).

La segunda hipótesis plantea un enriquecimiento inicial que formó sulfuros de níquel bajo un ambiente submarino euxínico caracterizado por la presencia de ventilas hidrotermales, rico en azufre, donde una secuencia de rocas calcáreas autigénicas fosilíferas y depósitos hidrotermales precipitaron sobre la peridotita de Cerro Matoso. Esta secuencia no continua se constituye de base a tope de siderita de cristalinidad gruesa a muy gruesa, arcillolitas fosilíferas verdes, arcillolitas fosilíferas cafés, Saprolito Negro, Canga de alta alúmina y Canga mona. Posteriormente, y una vez acrecionadas las rocas peridotíticas a la margen noroccidental de Colombia a finales del Cretácico Superior, sufren un enriquecimiento residual secundario debido a procesos de intensa meteorización química hasta configurar el yacimiento laterítico conocido (Castrillón Peña, 2012). Esta idea sugiere el origen de unidades anteriormente descritas las cuales se han descartado como producto de la meteorización de la peridotita. Es el caso del Saprolito Negro, inicialmente relacionado a zonas de falla junto con Taquilita.

La complejidad geológica de Cerro Matoso, demanda ejecutar otros análisis detallados que permitan una mejor y más completa interpretación de todas las rocas que constituyen el depósito, algunas de las cuáles han sido pobremente estudiadas.

5. INTRODUCCIÓN AL MODELAMIENTO GEOLÓGICO

Una vasta cantidad de información geológica utilizada para la exploración y caracterización de un yacimiento mineral es colectada en investigaciones y procesos realizados en diferentes etapas de un proyecto minero (Figura 8). El nivel de detalle geológico aumenta conforme avanza el proyecto, enfocándose desde el inicio en los factores que actúan como controles de mineralización, ya sean litológicos, estructurales, hidrotermales o cualquier característica que contribuya a la concentración de un elemento de interés económico.

La interpretación de la información capturada a diferentes escalas además de permitir explicar la génesis del depósito y desarrollar criterios que faciliten localizar nuevas zonas con potencial, conduce a la construcción de un **modelo geológico tridimensional** que constituye la base fundamental para conocer y entender la posible configuración de las rocas y la mineralización en el subsuelo. Su utilidad en el ámbito minero viene a dar lugar en aspectos tan importantes como la estimación de recursos y el control de ley.

Al ser una herramienta clave, conocer el proceso completo en el que el modelamiento geológico toma partida, iniciando con los estudios preliminares y de factibilidad relacionados a la estimación de recursos, hasta concentrarse en el desarrollo de los planes de minería a corto plazo asociados al control de ley, es importante para dimensionar el impacto que éste supone a la industria (Rossi & Deutsch, 2013).

Figura 8. Fases y objetivos de un proyecto minero.



Fuente: Información tomada de (Haldar, 2013).

5.1. ESTIMACIÓN DE RECURSOS

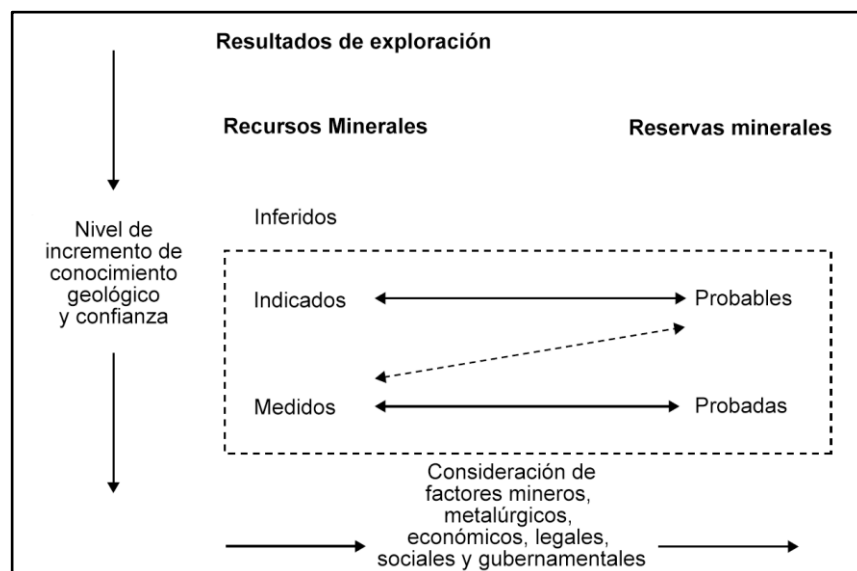
Una vez identificado, todo depósito mineral requiere cuantificar y caracterizar los recursos disponibles. Para esto, y en base a la geología, una serie de procedimientos entre los que se destacan el uso de herramientas estadísticas espaciales, son efectuados para evaluar a partir de datos de muestreo de campo la cantidad total de mineral (mena) y la concentración del elemento de interés en la misma (ley). Este proceso es conocido como *estimación de recursos*, necesario para la ejecución de los estudios de factibilidad que determinan la viabilidad económica de una operación de explotación minera.

La densidad de información y la calidad de los datos, los procedimientos estadísticos, y principalmente el conocimiento geológico influyen en la confianza que tienen los resultados de una estimación. Para proveer una valoración global de dicha confianza a los interesados en un proyecto, incluyendo socios, accionistas e instituciones financieras de inversión, existen clasificaciones estandarizadas que establecen reglas como guía para un correcto reporte de recursos (Rossi & Deutsch, 2013).

Una de estas medidas para regular el nivel de confianza de una estimación minera y los diferentes grados de evaluación técnica y económica es el Código JORC (Joint Ore Reserves Committee), creado en 1971 por el Consejo de Minerales de Australia (MCA, por sus siglas en inglés), Instituto Australiano de Minería y Metalurgia (The AusIMM), y el Instituto Australiano de Geocientíficos (AIG), que provee de un sistema obligatorio para la clasificación de resultados exploratorios minerales, recursos y reservas, con el propósito de informar resultados a inversionistas o posibles inversionistas y a sus asesores (Joint Ore Reserves Committee, 1999).

Según lo establecido por el código JORC, los recursos minerales son divididos, en orden de incremento de conocimiento geológico y confianza, en las categorías *inferidos*, *indicados* y *medidos*; y considerando los factores mineros, metalúrgicos, económicos, legales, sociales y gubernamentales, se subdividen en *reservas probables* y *probadas* (Figura 9).

Figura 9. Esquema representativo del reporte de recursos y reservas establecido por el código JORC.



Fuente: Modificado de (Joint Ore Reserves Committee, 1999).

Las reservas representan la fracción del recurso minero medido e indicado razonablemente extraíble de acuerdo a un amplio escenario técnico, económico, financiero y legal. Son indispensables en la elaboración de los planes de minería a largo, mediano y corto plazo, cuyos rangos de tiempo varían en general de acuerdo a la naturaleza del depósito y los métodos de extracción.

Toda estimación de recursos, se compone de diversas etapas que pueden ser abordadas en cinco grandes áreas de trabajo (Rossi & Deutsch, 2013):

- Colección y administración de datos
- Modelamiento geológico
- Modelo de bloques
- Estimación de leyes
- Reporte de resultados

5.1.1. Colección y administración de datos

La industria minera colecta más datos que cualquier otra industria de recursos naturales. Esto provee una oportunidad de entender mejor las variaciones locales e investigar los controles geológicos que ejercen sobre la distribución de las leyes. Su abundancia permite definir las estrategias de estimación a usar para su implementación, las cuáles han sido históricamente influenciadas por métodos estadísticos. La calidad de una estimación de recursos depende de la forma en que se colectan de los datos y los procedimientos de verificación que se hagan para corroborarlos.

La información colectada es generalmente geológica, y sólo aquella que proviene de un muestreo riguroso debe ser tomada en cuenta.

5.1.1.1. El Muestreo

Es un proceso selectivo, científico, aplicado a grandes masas o grupos (o a una población, como lo sea definido por el investigador) en orden de reducir sus dimensiones con propósitos interpretativos. Esto es alcanzado mediante la

identificación de una parte del componente (la muestra) que refleje las características de la población parental sin límites aceptables de exactitud, precisión y efectividad de costos (Moon, et al., 2006).

Realizar análisis geoquímicos de laboratorio a todo el material demanda costos elevados que de ser implementados las relaciones costo-beneficio no serían favorables para la industria. Por tanto realizar campañas de muestreo que permitan hacer inferencias sobre la ubicación y contenido de las zonas mineralizadas de un yacimiento, supone una alternativa económica para evaluar el comportamiento de las variables que componen el subsuelo con buen grado de confianza, lo que depende en gran medida de la implementación de controles de aseguramiento de la calidad de la información.

Generalmente, estas campañas buscan recolectar muestras de roca siguiendo patrones en forma de grillas regulares hasta abarcar la totalidad del objetivo. Estas porciones de roca son descritas por geólogos y sometidas a análisis de laboratorio que miden las variables geoquímicas de interés económico. Es común realizar el análisis para otro tipo de variables que pueden no ser propiamente económicas pero funcionan como indicadores de prospección o información útil en procesos metalúrgicos.

La ley promedio del tonelaje total de un cuerpo de roca mineralizado es estimada mediante muestras extraídas de unos pocos kilogramos, las cuáles son reducidas a unos cuantos gramos (porción química) antes de ser ingresada al laboratorio (Moon, et al., 2006). Los resultados son expresados en unidades de concentración como partes por millón (ppm) o porcentaje.

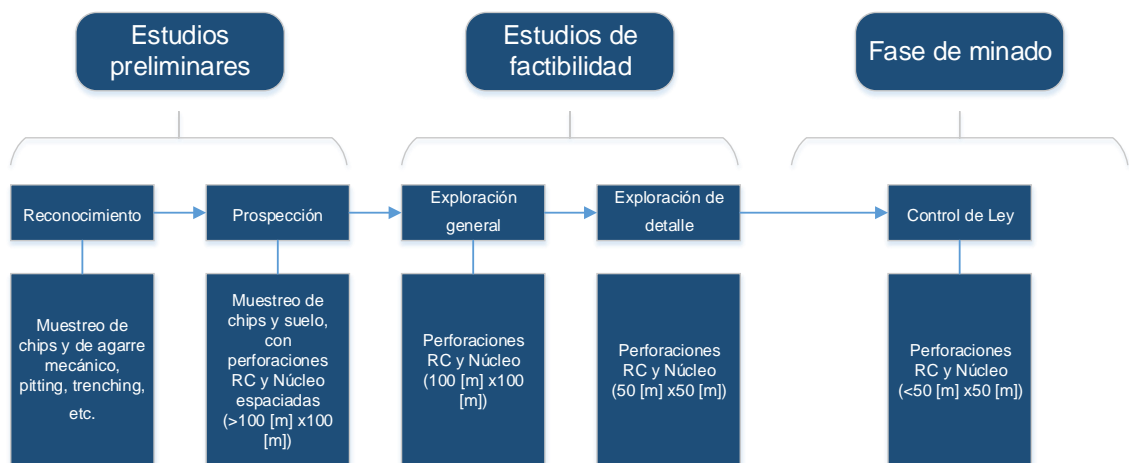
Existen múltiples formas de tomar muestras y cada una es aplicada en las distintas fases de la exploración mineral de acuerdo al presupuesto definido (Figura 10). Cada una varía en metodología, calidad de información y error intrínseco del método (Haldar, 2013). Algunos de éstas pueden ser:

- Muestreo de suelos: Se recoge material de suelo transportado o residual.

- Pitting: Consiste en hacer excavaciones someras de dimensiones 1 [m] x 1 [m] para obtener roca fresca. La profundidad del hueco es dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la roca fresca.
- Trenching: Trincheras cortadas a través del yacimiento. Las muestras son recogidas a lo largo de ésta a espacios regulares.
- Muestreo de canal: Utilizado más que todo para cuerpos mineralizados uniformes y consta de muestras recogidas en los afloramientos expuestos en canales de agua.
- Muestreo de chips: Utilizado cuando la mineralización es irregularmente diseminada y difícil de reconocer. Se toman fragmentos de un afloramiento de tamaños pequeños (1-2 cm), regularmente espaciadas en forma de grilla de 25cm x 25cm.

Los métodos anteriores son utilizados generalmente en la fase de reconocimiento de un proyecto minero, sin embargo a partir de la fase de prospección se empiezan a utilizar técnicas más elaboradas con un consecuente margen de error menor. Es el caso del muestreo por perforación.

Figura 10. Tipos de muestreo utilizados en el desarrollo de un proyecto minero.



Fuente: Información tomada de (Haldar, 2013).

El muestreo por perforación es, según Rossi & Deutsch (2013), el método más común e importante para obtener muestras representativas, ya que permite extraer fragmentos de roca no expuestos de forma rápida, precisa y con un grado de error inferior respecto a otros métodos. Eso lo hace exclusivo para la construcción de modelos de estimación.

Los tipos de perforación más comunes son:

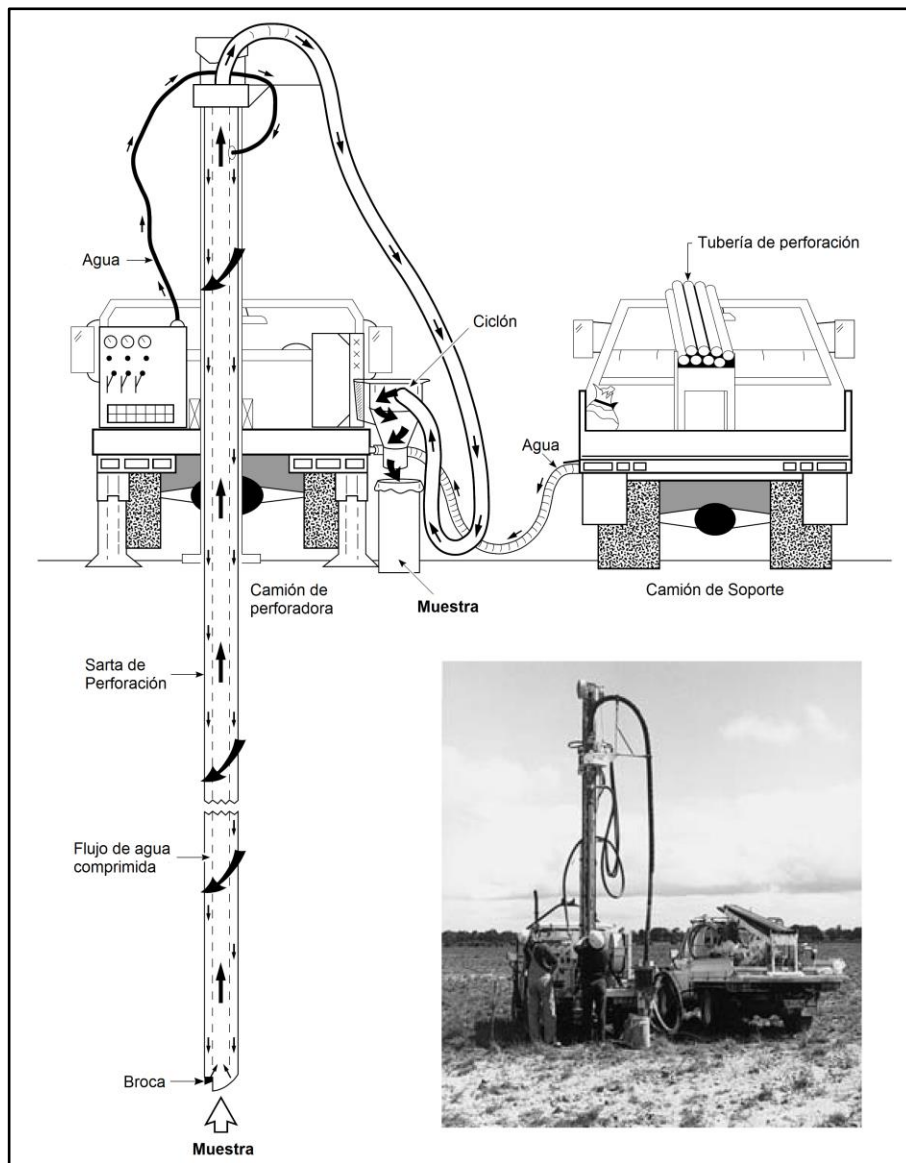
- Perforación con circulación reversa (RC)

La perforación RC (Reverse Circulation) ha sido usada en exploración desde mediados de los años 70's y puede ser empleada tanto en depósitos no consolidados como depósitos aluviales o en rocas consolidadas. Las muestras recogidas son ripios de roca triturada, tomadas a profundidad y elevadas a superficie por presión de agua o aire. La técnica de circulación reversa emplea una doble pared de tubos de perforación, utilizando un compresor de agua de gran capacidad. El agua es inyectada en la cámara exterior y sube junto con las muestras de ripios por la cámara interior del conducto central (Figura 11). Los ripios llegan a un ciclón donde pierden velocidad y son transportados hacia un cuarteador, cuya función es dividir la muestra de ripio para finalmente recoger una fracción pequeña de ese volumen que sea proporcional y razonable de manejar. (Moon, et al., 2006). Las muestras son recolectadas cada cierto intervalo de profundidad, organizadas en contenedores como canecas o recipientes y enviadas al laboratorio para su respectivo análisis.

Las ventajas de utilizar este método es su extremada rapidez (40m de perforación por hora, en algunos casos) y poca contaminación. Por eso, son ampliamente utilizados en los sistemas de control de ley, sobre todo en grandes minas Open Pit (a cielo abierto) (Haldar, 2013). La desventaja es la dificultad para obtener buenas descripciones geológicas que podrían resolver interrogantes en situaciones de carácter interpretativo de un depósito, lo que sí es posible con perforaciones diamantinas (Rossi & Deutsch, 2013).

Este tipo de perforación es mucho más económica respecto a otros tipos, lo que supone una alternativa muy conveniente que puede proveer mucha información si se hace cuidadosamente y bajo condiciones favorables se pueden obtener datos muy confiables.

Figura 11. Esquema del funcionamiento de una perforadora RC.



Fuente: Modificado de (Moon, et al., 2006).

- Perforación diamantina

La perforación diamantina consiste en incorporar una broca diamantada que rota en el extremo de las barras de perforación y permite efectuar un corte sobre la roca cuyo testigo es un cilindro macizo o núcleo que se desplaza hacia arriba dentro de la tubería y se recupera en superficie. Estos núcleos de roca permiten capturar evidencias geológicas y estructurales mucho más detalladas (Figura 13). Puede producir un gran volumen de muestras no contaminadas con una alta tasa de recuperación, lo que favorece en términos del análisis geoquímico. Las perforaciones de núcleos pueden ser orientadas permitiendo una medición real de las estructuras geológicas.

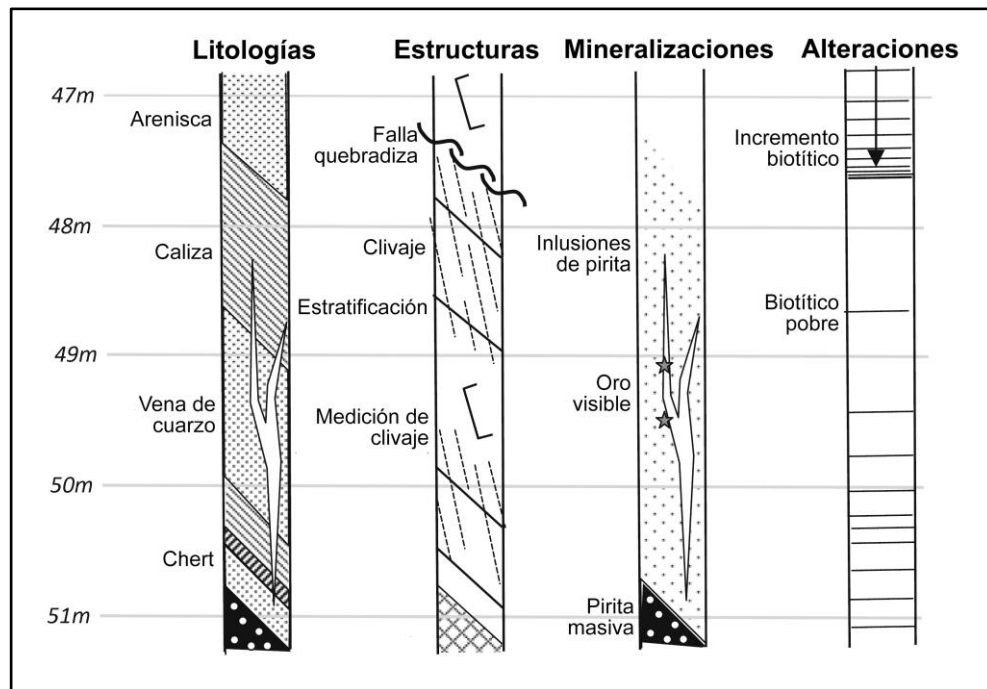
Figura 12. Almacenamiento de núcleos de perforación.



Fuente: Tomado de (Moon, et al., 2006).

La perforación diamantina puede ser usada en las diferentes etapas de un proyecto, desde una etapa temprana donde se usa para delinear cuerpos mineralizados, determinar la continuidad de la mineralización o verificar leyes, hasta una etapa avanzada en la cual se requiere ampliar las reservas existentes o ejercer controles en producción. En cualquier caso podría ser indispensable para incrementar el nivel de conocimiento geológico (Marjoribanks, 2010).

Figura 13. Descripciones geológicas posibles en una muestra de núcleo.



Fuente: Modificado de (Marjoribanks, 2010).

5.1.1.2. Bases de datos

Toda la información proveniente del muestreo es organizada en bases de datos digitales (Tabla 1). Para esto, es necesario la construcción de un inventario donde se relacionen los diferentes tipos de datos provenientes de un pozo de perforación. Datos básicos, datos operativos y datos geológicos, dentro de los que se encuentran

la descripción de ripios hecha por un geólogo y los resultados del análisis geoquímico.

El principal objetivo de preparar y ordenar los datos es verificar la integridad de los mismos antes de ser usados en un trabajo. Las técnicas de verificación incluyen conteos y estadísticas básicas que permiten corregir problemas típicos como datos corruptos, datos faltantes, datos duplicados, entre otros.

Tabla 1. Inventario de perforación.

Datos de identificación			Datos operativos		Datos geológicos											
ID del pozo	Ubicación			Intervalos (m)		Modelo perforadora	Fecha	Descripción de ripios				Geoquímica (%)				
	X	Y	Z	From	To			Color	Estructuras	Minerales	Observaciones	NI	FE	SiO2	MgO	Al2O3
Hole 1	1309.375	1046.875	168	0	2	Drilltech T25KW	15/01/2015	Verde Oscuro	Boxworks	Cuarzo	-	0.21	5.7	40.01	37.32	0.5
Hole 1	1309.375	1046.875	166	2	4	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Boxworks	Cuarzo	-	0.23	5.8	41.36	35.58	0.3
Hole 1	1309.375	1046.875	164	4	6	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Boxworks	Cuarzo	-	0.27	6.2	41.76	34.81	0.4
Hole 1	1309.375	1046.875	162	6	8	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Boxworks	Cuarzo	-	0.4	4.8	46.84	32.3	0.4
Hole 1	1309.375	1046.875	160	8	10	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Boxworks	Cuarzo	-	0.3	4	48.55	31.25	0.3
Hole 1	1309.375	1046.875	158	10	12	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Boxworks	Cuarzo	-	0.39	5.3	43.6	34.01	0.3
Hole 1	1309.375	1046.875	156	12	14	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	-	-	-	0.29	5.7	43.04	34.34	0.4
Hole 1	1309.375	1046.875	154	14	16	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	-	-	-	0.2	6.1	41.03	38.13	0.7
Hole 1	1309.375	1046.875	152	16	18	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	-	-	-	0.37	7.1	58.65	18.63	0.8
Hole 1	1309.375	1046.875	150	18	20	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	-	-	-	0.56	9	47.15	22.75	0.8
Hole 1	1309.375	1046.875	148	20	22	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	-	-	-	0.38	6.6	48.39	27.31	0.8
Hole 1	1309.375	1046.875	146	22	24	Drilltech T25KW	15/01/2015	Verde Oscuro	Venas de sílice	-	-	0.36	7.1	50.73	23.97	0.5
Hole 1	1309.375	1046.875	144	24	26	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Venas de sílice	-	-	0.46	7.8	49.65	22.95	1.1
Hole 1	1309.375	1046.875	142	26	28	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Moderado	Venas de sílice	-	-	0.63	8.5	50.51	21.37	0.9
Hole 1	1309.375	1046.875	140	28	30	Drilltech T25KW	15/01/2015	Cafe Oscuro	Venas de sílice	-	-	0.88	9	52.21	18.95	0.5
Hole 1	1309.375	1046.875	138	30	32	Drilltech T25KW	15/01/2015	Naranja oscuro	-	Plagioclasa	-	0.83	10.4	48.11	19.84	0.6
Hole 1	1309.375	1046.875	136	32	34	Drilltech T25KW	15/01/2015	Naranja oscuro	-	Plagioclasa	-	0.82	10.9	48.23	17.99	0.7
Hole 1	1309.375	1046.875	134	34	36	Drilltech T25KW	15/01/2015	Naranja oscuro	-	Plagioclasa	-	0.94	11.3	51.28	15.49	0.6
Hole 1	1309.375	1046.875	132	36	38	Drilltech T25KW	15/01/2015	Naranja oscuro	-	Plagioclasa	-	0.76	8.7	54.22	17.7	0.8
Hole 1	1309.375	1046.875	130	38	40	Drilltech T25KW	15/01/2015	Naranja oscuro	-	Plagioclasa	-	0.85	8.2	57.29	15.37	0.4
Hole 1	1309.375	1046.875	128	40	42	Drilltech T25KW	15/01/2015	Naranja oscuro	-	Plagioclasa	-	0.87	9.5	51.14	19.28	1.2

Generalmente la estructura de las bases de datos obedece a características comunes adoptadas por los diferentes software de proceso que se usan para realizar las actividades concernientes al *análisis exploratorio de los datos* donde se definen las estrategias de estimación para su posterior ejecución.

Independientemente del software, los componentes básicos de la estructura de los datos asociados a un pozo son:

- Identificador: nombre y categoría.
- Localización: Coordenada inicial del pozo, conocido como *Collar* (Tabla 2).
- Geometría: describe la longitud máxima, dirección e inclinación del pozo, también conocido como *Survey* (Tabla 3).

- Contenido de información primaria: consiste en las observaciones y valores asociados a los intervalos de muestra, conocido como Assay (Tabla 4).

Estas tres categorías conocidas como collar, survey y assay, son dispuestas en tres archivos independientes, los cuales son indispensables a la hora de cargar la información en un software, puesto garantizan atribuirle a los datos del muestreo provenientes de un pozo una posición específica en el espacio (Figura 14).

Tabla 2. Estructura de datos de un Collar.

ID	X	Y	Z
Hole 1	1309.375	1046.875	168

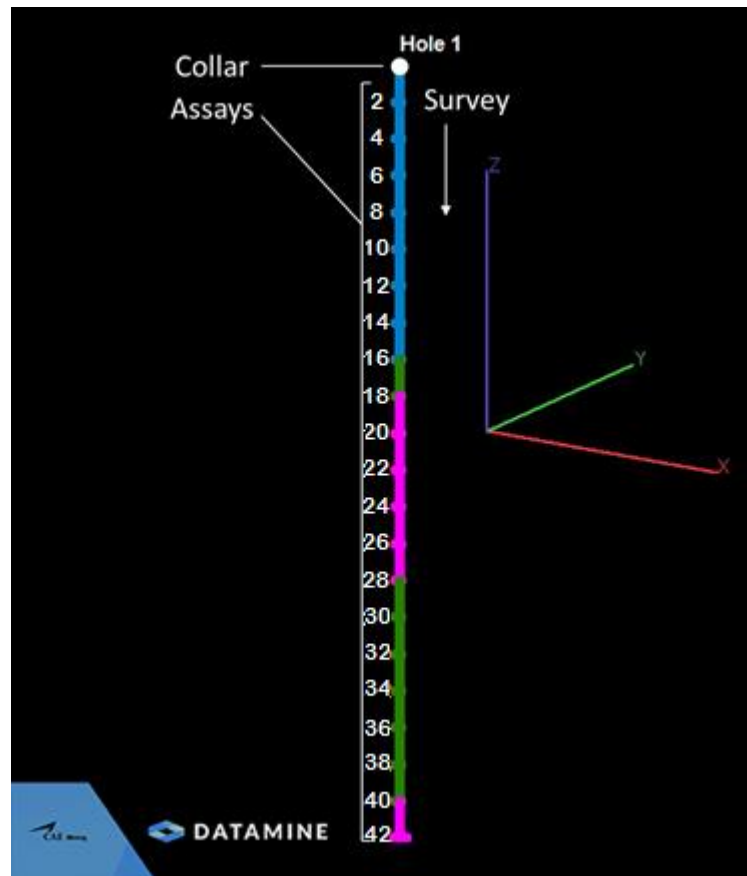
Tabla 3. Estructura de datos de un Survey.

ID	Prof. Máx.	Azimuth	Inclinación
Hole 1	42	0	90

Tabla 4. Estructura de datos de un Assay.

ID	FROM	TO	NI	FE	SiO2	MgO	Al2O3	LITOLÓGÍA
Hole 1	0	2	0.21	5.7	40.01	37.32	0.5	Peridotita
Hole 1	2	4	0.23	5.8	41.36	35.58	0.3	Peridotita
Hole 1	4	6	0.27	6.2	41.76	34.81	0.4	Peridotita
Hole 1	6	8	0.4	4.8	46.84	32.3	0.4	Peridotita
Hole 1	8	10	0.3	4	48.55	31.25	0.3	Peridotita
Hole 1	10	12	0.39	5.3	43.6	34.01	0.3	Peridotita
Hole 1	12	14	0.29	5.7	43.04	34.34	0.4	Peridotita
Hole 1	14	16	0.2	6.1	41.03	38.13	0.7	Peridotita
Hole 1	16	18	0.37	7.1	58.65	18.63	0.8	Sapolito Verde
Hole 1	18	20	0.56	9	47.15	22.75	0.8	Peridotita Sapolitizada
Hole 1	20	22	0.38	6.6	48.39	27.31	0.8	Peridotita Sapolitizada
Hole 1	22	24	0.36	7.1	50.73	23.97	0.5	Peridotita Sapolitizada
Hole 1	24	26	0.46	7.8	49.65	22.95	1.1	Peridotita Sapolitizada
Hole 1	26	28	0.63	8.5	50.51	21.37	0.9	Peridotita Sapolitizada
Hole 1	28	30	0.88	9	52.21	18.95	0.5	Sapolito Verde
Hole 1	30	32	0.83	10.4	48.11	19.84	0.6	Sapolito Verde
Hole 1	32	34	0.82	10.9	48.23	17.99	0.7	Sapolito Verde
Hole 1	34	36	0.94	11.3	51.28	15.49	0.6	Sapolito Verde
Hole 1	36	38	0.76	8.7	54.22	17.7	0.8	Sapolito Verde
Hole 1	38	40	0.85	8.2	57.29	15.37	0.4	Sapolito Verde
Hole 1	40	42	0.87	9.5	51.14	19.28	1.2	Peridotita Sapolitizada

Figura 14. Representación gráfica del pozo “Hole 1” en el software Datamine Studio 3. En colores se muestran las diferentes litologías por intervalo de muestra.



5.1.2. Modelo geológico

La geología utilizada como soporte en la estimación de recursos minerales es entendida como el análisis de información recopilada a medida que avanza un proyecto minero (Rossi & Deutsch, 2013). El modelamiento de las propiedades geológicas permite entender la génesis del depósito, la distribución de las rocas mineralizadas y el desarrollo de criterios de evaluación y exploración que contribuyan a incrementar los recursos disponibles.

Un **modelo geológico** es una representación de la distribución espacial de las rocas y los *factores de concentración* de un mineral de interés económico. La

caracterización geológica utilizada para su generación es tratada de forma tridimensional (3D) mediante volúmenes o Wireframes⁵ (Houlding, 1994). Cuando se realiza un modelo geológico, se están definiendo implícitamente los dominios de estimación, concebidos como las características geológicas que representan los controles mineralizantes y que a su vez están relacionados con la definición de zonas estacionarias⁶ dentro de un depósito, las cuales pueden constituirse, por ejemplo, como zonas de óxido-reducción, alteración, control estructural o litológico, y su función es sectorizar o diferenciar espacialmente aquellas zonas que presentan un comportamiento geoquímico similar.

Las variables observadas en un depósito mineral no son independientes una de otra. Su dependencia espacial es consecuencia de la génesis del depósito, y por tanto, es necesario determinar aquellos factores que las controlan. En etapas tempranas exploratorias cuando no hay certeza sobre cuáles son los controles mineralizantes, realizar un análisis exploratorio de los datos permite evaluar, mediante herramientas estadísticas, la información recolectada. El objetivo consiste en encontrar patrones de correlación espacial que sirvan como soporte a las consideraciones geológicas iniciales para la definición de los dominios de estimación.

La litología, por ejemplo, puede encontrarse estrechamente relacionada a la mineralización. En ese caso, la construcción de un modelo litológico permite definir volúmenes de roca en donde la variable de interés adquiere un carácter estacionario.

⁵ Wireframe es una representación visual tridimensional de un objeto físico que consta de superficies trianguladas, empleado en gráficos computacionales 3D.

⁶ Una zona estacionaria es un volumen del espacio en el que la concentración de un elemento es muy constante o tiene poca variación.

5.1.2.1. Modelamiento convencional

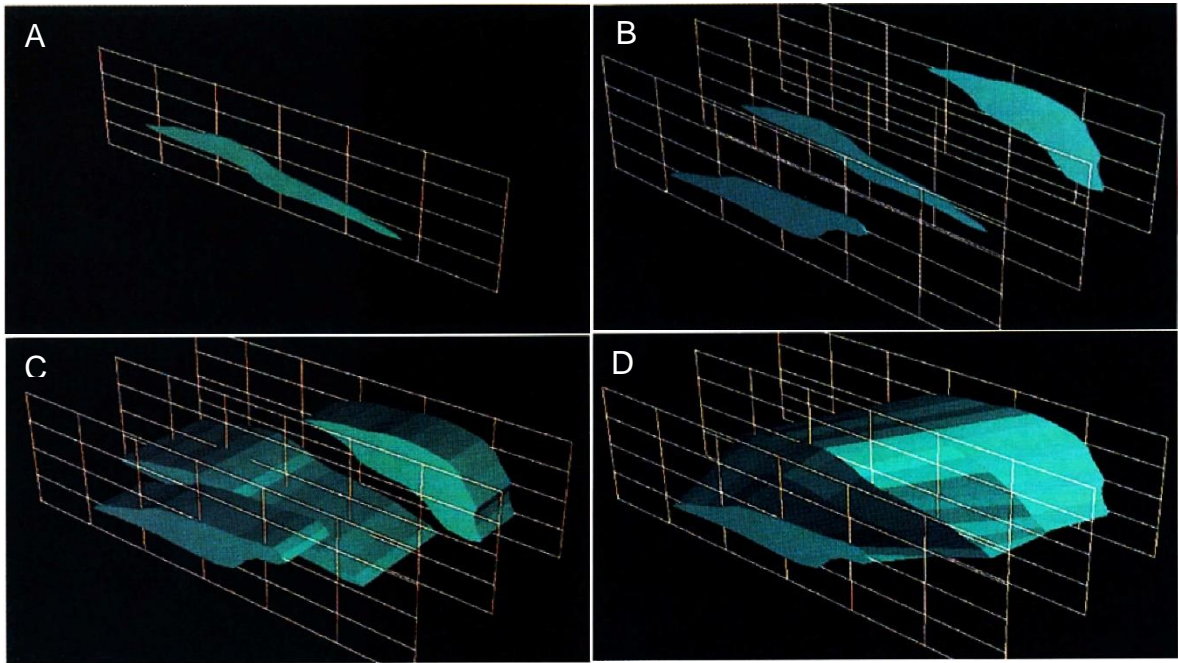
Un enfoque tradicional para crear un modelo geológico es efectuar interpretaciones mediante secciones y mapas geológicos.

Las construcción perfiles geológicos están comúnmente dirigidos a interpretar la información obtenida de muestreos mediante perforaciones, por lo tanto se basan en la cantidad y distribución de las mismas. Sin embargo, es necesario considerar todas las fuentes de información, como mapeos de superficie y líneas sísmicas, entre otras. Las líneas de contacto dibujadas en las secciones deben alcanzar un alto grado de confianza, lo que está fuertemente relacionado con la densidad y la calidad de la información (Rossi & Deutsch, 2013).

Para ilustrar el proceso se considera la interpretación de una unidad geológica en un corte vertical (Figura 15A). Así mismo la interpretación de la misma unidad en dos secciones adyacentes paralelas al primero indica un cambio en la geometría del cuerpo (Figura 15B). El proceso requiere extender las secciones interpretadas hasta el plano en común (Figura 15C). Se puede emplear un algoritmo para unir las extensiones, tal que sean modificadas para obtener una interpretación tridimensional continua de la unidad geológica (Figura 15D). En general, las interpretaciones bidimensionales iniciales son estiradas y corregidas en la tercera dimensión para definir el volumen de la unidad (Houlding, 1994).

Es necesario garantizar la continuidad de los cuerpos litológicos entre secciones para dar confianza a la interpretación. Teniendo en cuenta que dichas secciones muestran la información obtenida de los pozos de perforación, es recomendable utilizar perforaciones espaciadas entre 50 a 70 m en el caso de depósitos masivos de gran tonelaje, e iguales o menores a 20 m para depósitos de geología variable (Rossi & Deutsch, 2013).

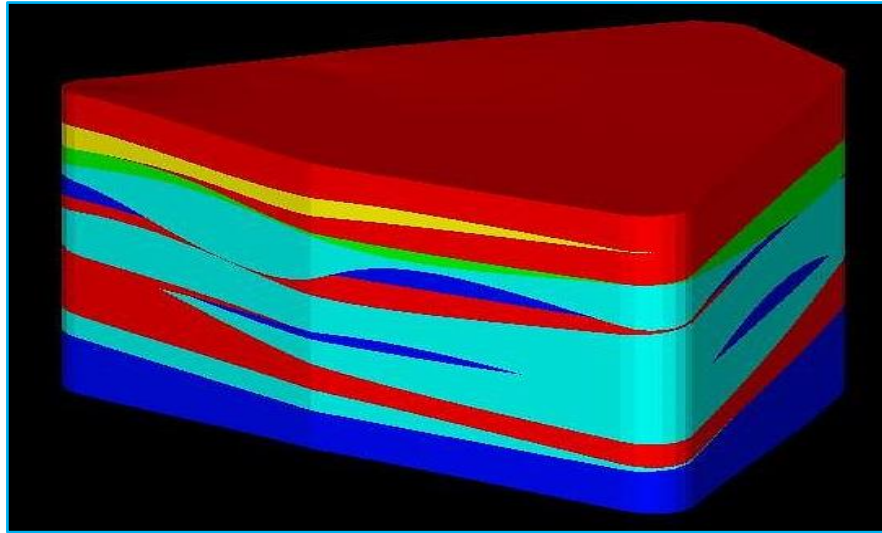
Figura 15. Construcción de modelos geológicos tridimensionales a partir de secciones bidimensionales. (A) Interpretación de la intersección de una unidad geológica en un plano. (B) Interpretación de la misma unidad en dos secciones adyacentes. (C) extensión de los límites hacia planos comunes entre secciones. (D) Interpretación a partir de la unión de los límites de los planos comunes.



Fuente: (Houlding, 1994).

La representación final de un depósito consiste en un número de sub-volúmenes o dominios geológicos, en el que cada uno define una porción del espacio y sus características geológicas (Figura 16) (Houlding, 1994). Este resultado es lo que a menudo es considerado como un *modelo geológico determinístico* (Rossi & Deutsch, 2013).

Figura 16. Vista final de un modelo geológico 3D.



Fuente: http://evshelp.ctech.com/Content/module_library_reference/File/indicator_geology.htm

5.1.2.2. Modelamiento implícito

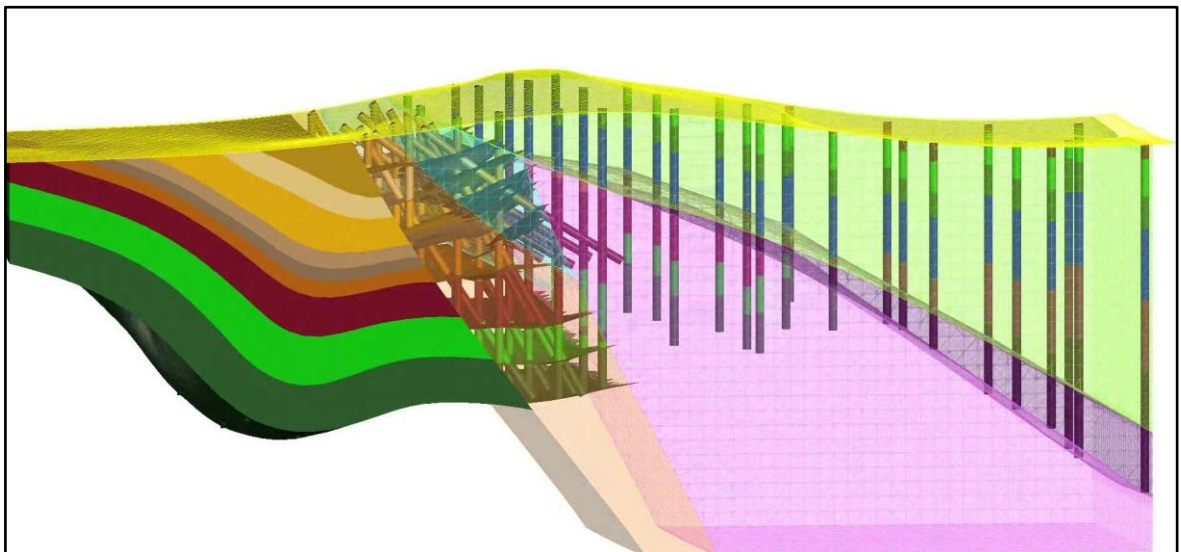
El modelamiento implícito es un concepto relativamente nuevo. Utiliza algoritmos computacionales para crear superficies geológicas 3D directamente a partir de los datos (Figura 17), eliminando la necesidad de la digitalización manual e impactando positivamente en la calidad y la reducción del tiempo empleado.

El algoritmo usado permite a los datos dispersos en 3D ser descritos por una función matemática simple en base radial. Los RBF (Radial Basis Function) son una forma natural de interpolar datos dispersos, sobre todo cuando los puntos de datos no se encuentran en una cuadrícula regular y cuando varía la densidad de muestreo. Esta es la razón por la cual las interpolaciones de base radial son ideales para los datos de perforaciones (Aranz Geo Limited, 2015).

Las superficies de contacto son generadas principalmente mediante este algoritmo a partir de una combinación de datos que incluye, además de las perforaciones, datos estructurales y muestreos de superficie, entre otros.

También existe la posibilidad de hacer ajustes manuales para garantizar que los modelos reflejen la interpretación deseada.

Figura 17. Modelamiento geológico implícito realizado en el software Leapfrog Geo a partir de perforaciones de pozo.



Fuente: <http://www.leapfrog3d.com/>

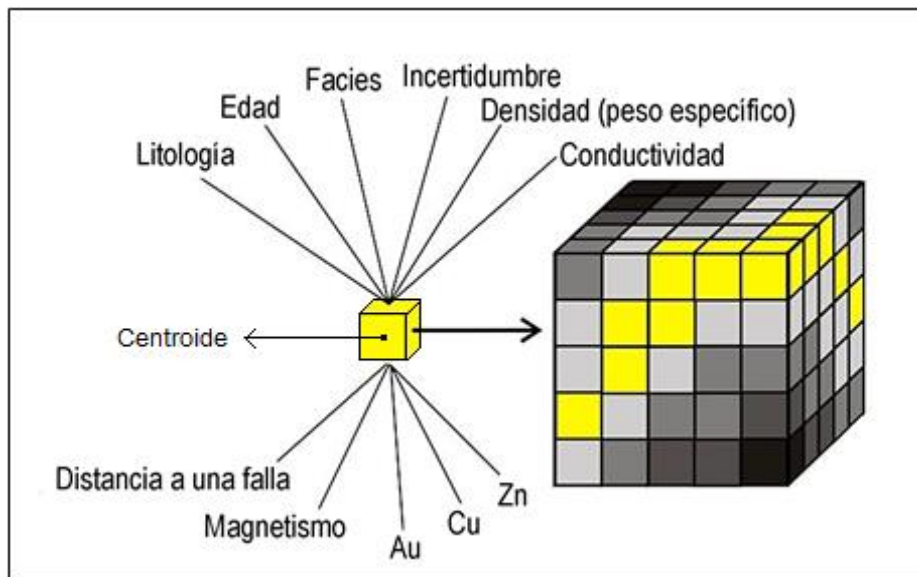
5.1.3. Modelo de bloques.

Un modelo de bloques consiste en una serie o colección de cubos o paralelepípedos de dimensión determinada generada a partir de un modelo geológico (Skelly & Loy, 2009). Cada bloque o celda ocupa un volumen discreto al que se pueden asignar indeterminado número de propiedades para describir un cuerpo. Pueden ser

categorías como el tipo de roca, o cuantitativas como la densidad o ley de mineral (% de metal o g/t) (Figura 18).

Surge de la necesidad de discretizar y regularizar los volúmenes generados en el modelamiento geológico, los cuales representan las litologías o categorías correspondientes idealmente a los dominios de estimación en los que la variable de interés se comporta de manera estacionaria (Figura 19).

Figura 18. Algunas propiedades o características cuantitativas y cualitativas que pueden atribuirse a un bloque.

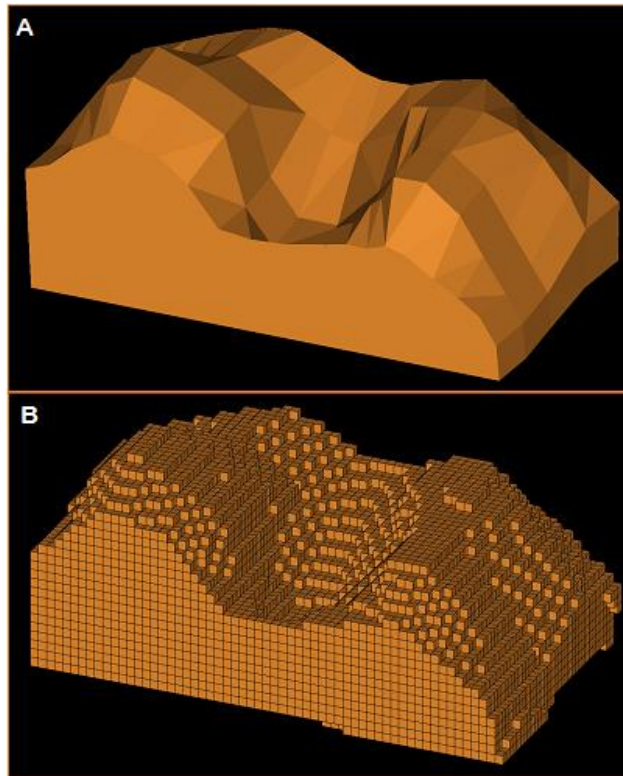


Fuente: (Oyarzun, 2011).

Al efectuar una estimación de recursos, se asignan valores a puntos no muestreados a partir de puntos muestreados. En un volumen, inclusive pequeño, del espacio euclidiano, existe una cantidad incalculable de puntos infinitesimales. Por lo cual hacer una estimación resultaría casi imposible. En consecuencia, es muy común simplificar esto a una cantidad finita de puntos en el espacio, a menudo espaciadas regularmente, en forma de grillas tridimensionales, en donde cada punto

es estimado y su valor representa un volumen discreto. Estos puntos coinciden con los centroides de cada bloque y las propiedades atribuidas aplican para su volumen.

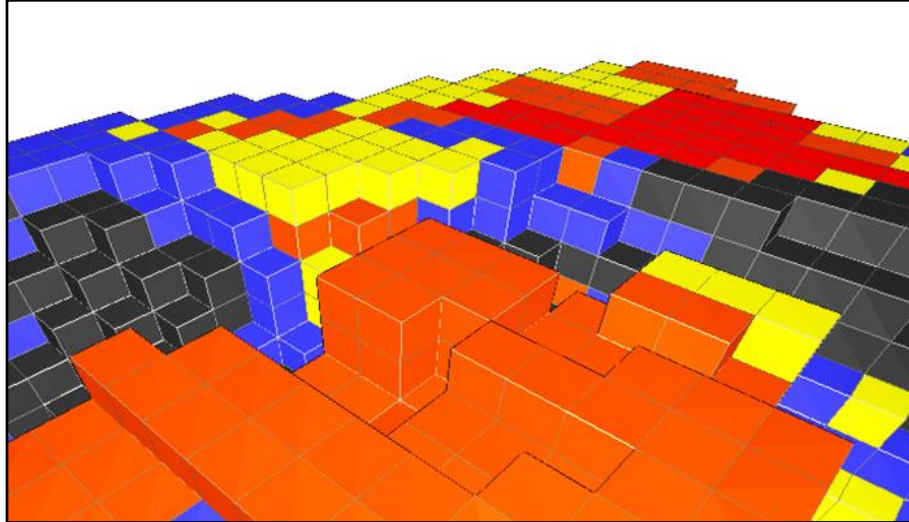
Figura 19. (A) Dominio geológico. (B) Dominio geológico discretizado en bloques.



Generar este tipo de volúmenes finitos permite realizar un inventario del yacimiento, facilitando los procesos de planeación y explotación. Además, funciona para efectuar ejercicios fundamentales como la denominada *reconciliación*, en la cual se compara la predicción de un modelo con los valores reales obtenidos, lo que posibilita identificar errores y realizar ajustes, de modo que se evite poner en riesgo las decisiones sobre el minado.

La geometría de los bloques depende de las características del depósito, las propiedades geológicas a modelar y los requerimientos de planeación minera, como también el tamaño y tipo de equipos a usar en la operación (Rossi & Deutsch, 2013).

Figura 20. Geología de un depósito visualizada en un modelo de bloques.



Fuente: <https://www.linkedin.com/pulse/surpac-67-multi-threaded-block-modeling-chawki-jreige>.

5.1.4. Estimación de leyes

La estimación de leyes está asociada a un conjunto de técnicas estadísticas que permiten calcular el valor aproximado de un parámetro de una población a partir de datos proporcionados por muestras. Esto significa asignar el valor de una variable en un punto en el espacio no muestreado a partir de datos muestreados. El espacio no muestreado se representa mediante un modelo de bloques, cuyos centroides de cada bloque constituyen los puntos a estimar (Zhang, 2011).

En antiguas operaciones mineras se efectuaban pocas planificaciones sobre el desarrollo del minado. El uso de información exploratoria para estimar recursos y reservas era poco común a pesar de que se empleaban con mucha frecuencia datos para el control de ley y el monitoreo de las operaciones. Las primeras estimaciones de recursos surgieron en función de este control de ley, donde, por ejemplo, las

muestras subterráneas y superficiales eran usadas para delinear un bloque de minado. Fue hasta sólo la mitad del siglo XX en donde las perforaciones de pozos exploratorios tomaron lugar en la definición de un inventario del mineral de interés.

Los primeros métodos de estimación usados eran todos variantes de la estimación poligonal⁷ y métodos convencionales como la Ponderación por Inverso a la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés). Sin embargo fueron desarrollándose, y entre los años 1950s y 1960s hubo varios intentos para ajustar modelos matemáticos simples (como la regresión lineal) al dato de muestra y así derivar parámetros estadísticos tales como el promedio y la varianza de una población de datos. En 1952, Danie G. Krige desarrolló las bases estadísticas para la evaluación de recursos mineros que luego en 1960 Georges Matheron sintetizaría en una fórmula estadística conocida como *Kriging*, sentando las bases de lo que hoy se conoce como geoestadística.

Con la llegada de computadores increíblemente rápidos y confiables, fueron introducidos en 1970 software de planeación minera que incorporaban estimaciones de recursos y reservas, lo que proveyó la habilidad de generar modelos de un yacimiento, ofreciendo una variedad de técnicas de estimación. Los paquetes de software minero continuaron desarrollándose en los años 1980's, obteniendo muchas ventajas en el modelamiento de dominios geológicos complejos. Fue durante este tiempo en el que se generaron, en sentido estricto, las primeras estimaciones de recursos (Glaken & Snowden, 2001).

El objetivo de la estadística espacial en los yacimientos minerales es predecir la posible distribución espacial de aquellas variables o leyes de mineral. Los métodos convencionales de estimación como el IDW sólo incorporan la distancia como el factor determinante en la importancia asignada al valor de una muestra. Ante la falta de control geológico, se estableció la manera de describir y modelar estadísticamente los procesos genéticos que mejorarían la predicción de las

⁷ Estimación poligonal: Método primitivo de estimación que se encarga de asignar el mismo valor de la ley mineral a un bloque de una muestra contenida en éste.

mineralizaciones y las leyes en espacios no muestreados mediante el uso de técnicas geoestadísticas que se resumen en el *Kriging*; en el que aparte de considerar la distancia de los puntos muestreados respecto a los no muestreados, también se incluyen las funciones que describen la correlación espacial de las variables (Rossi & Deutsch, 2013).

Si bien, teóricamente el *kriging* es el método ideal en cualquier proceso de estimación, en la práctica algunas veces no es conveniente, ya que este tipo de análisis requiere grandes cantidades de tiempo y dinero. En los planes de minería a corto plazo, donde el desarrollo minero es más avanzado, se ha optado en diversas ocasiones por utilizar herramientas de estimación menos complejas pero que bajo ciertas condiciones y parámetros establecidos sean posibles de utilizar. Es el caso del IDW que por su naturaleza permite ahorrar tiempo y obtener resultados con un margen de error tolerable (Rossi & Deutsch, 2013).

En consecuencia, existen dos posibles escenarios en los cuales diferentes métodos de estimación toman relevancia: la *estimación parcial*, con datos ampliamente espaciados en el que el grado de incertidumbre es alto y es necesaria la implementación de métodos estadísticos más robustos como el Kriging; y la *estimación final*, con el propósito de hacer un control detallado de las mineralizaciones, donde se utiliza una malla de muestreo más densa de modo que el grado de incertidumbre sea mínimo, permitiendo utilizar métodos más sencillos como la Ponderación por Inverso a la Distancia.

5.1.4.1. Métodos comunes

- Kriging

Sea un depósito en el cual se han tomado n muestras S_1, S_2, \dots, S_n , cuyas leyes son X_1, X_2, \dots, X_n . Se desea encontrar el mejor estimador Z^* , es decir:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

En donde a_i representa los pesos o ponderaciones de los valores de la muestras que son calculadas a partir de funciones de correlación espacial (Matheron, 1969).

El proceso de estimación geoestadística, además de considerar la distancia de las muestras al punto de interés, tiene en cuenta las funciones que describen la correlación espacial de las variables. Esto es, cuantificar el concepto de variabilidad espacial en forma de un *semivariograma* que constituye la herramienta central de esta rama de la estadística. Para una variable regionalizada $Z(x)$ existe una función de semivarianza y se define como:

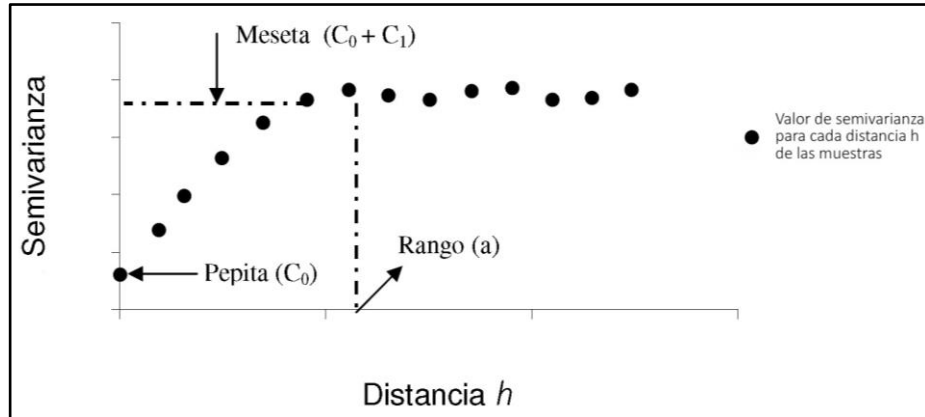
$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

Donde $\bar{\gamma}(h)$ = función de semivarianza, n = número de pares de muestras, z = valor de la variable, x = posición del primer par de muestra en el espacio, $x+h$ = posición del otro par a una distancia h de la primera (Giraldo Henao, 2002).

Las variables en un depósito están en función del ambiente geológico. Por tanto, la idea de esta fórmula parte de que las muestras tomadas muy cerca entre sí tienden a reflejar las mismas condiciones geológicas. A medida que la distancia entre las muestras incrementa la similitud o grado de correlación disminuye, hasta que a cierta distancia ya no hay correlación alguna (Moon, et al., 2006).

Los valores se pueden representar mediante un gráfico en donde el eje X es la distancia h y el eje Y es el valor de la función semivarianza $\bar{\gamma}(h)$. Este procedimiento es lo que se conoce como *semivariograma experimental* (Figura 21).

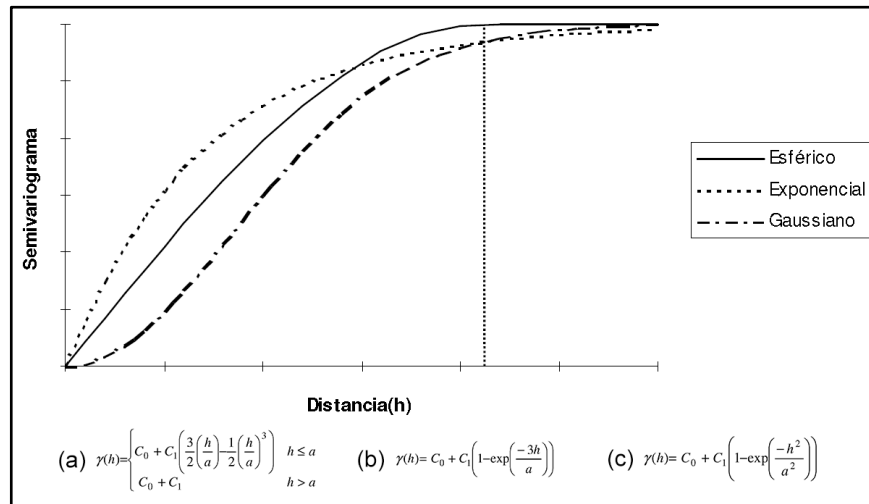
Figura 21. Semivariograma experimental y parámetros básicos.



Fuente: Modificado de (Giraldo Henao, 2002).

Por último, es necesario realizar un ajuste que generalice lo observado en el semivariograma experimental a cualquier distancia. Se logra generando modelos teóricos de semivarianza hasta identificar el que mejor describa el comportamiento espacial de las muestras (Figura 22).

Figura 22. Comparación de modelos Esférico (a), Exponencial (b) y Gaussiano (c).



Fuente: Modificado de (Giraldo Henao, 2002).

- Ponderación por Inverso a la Distancia (IDW)

El IDW un método clásico basado en las distancias que existen entre el punto a estimar y las correspondientes muestras involucradas en su estimación. Asigna mayor relevancia a los valores de las variables muestreadas que estén más cerca, disminuyendo la influencia de los valores lejanos (Figura 23). La ponderación se puede expresar de la siguiente forma:

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Donde z_i es el valor de cada muestra, w_i son los pesos asignados a las muestras de acuerdo a su relevancia y z^* es el valor estimado.

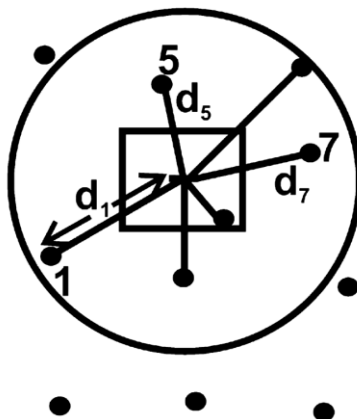
El cálculo de los pesos w_i es basado en el inverso de la distancia entre la muestra y el punto a estimar. Es escrito como :

$$w_i = \frac{1}{c + d_i^\omega}$$

Donde d_i es la distancia entre la muestra y el punto a estimar, ω es el exponente y c es una constante que evita la sobre ponderación de datos demasiado cercanos.

El exponente usado más común es $\omega=2$, tomando así el nombre de Inverso de la Distancia al Cuadrado (Inverse Distance Squared) (Rossi & Deutsch, 2013).

Figura 23. Principio de la Ponderación por Inverso a la Distancia (IDW) considerando muestras dentro de un radio de búsqueda.



Fuente: Tomado de (Haldar, 2013).

5.1.5. Reporte de resultados

Una vez ejecutada la estimación, en donde se han asignado las leyes a cada bloque del modelo, la evaluación económica demanda información de la ley y las toneladas de los materiales del yacimiento con las cual se establecen las decisiones de minado. Existen diversas formas de presentar la información resultante de una estimación de recursos, sin embargo la curva de Ley-Tonelaje (Figura 24) constituye la mejor opción para graficar las toneladas y las leyes promedio para cada dominio de estimación en función de la ley de corte (Cut-off) (Wellmer, et al., 2008). Para esto tengamos en cuenta las siguientes definiciones:

Ley de corte o Cut-off grade: Es definida como la ley más baja que puede tener un cuerpo mineralizado para ser extraído con beneficio económico (Codelco, 2015).

Tonelaje: Son las toneladas del material correspondiente a cada dominio de estimación.

Ley promedio o Average grade: Es la ley promedio que presenta el tonelaje a determinado Cut-off.

Estos datos son posibles gracias a la información asignada a los bloques que conforman los diferentes dominios de estimación y las propiedades que se pueden inferir de ellos como el volumen.

Las toneladas por bloque son calculadas de acuerdo con la siguiente formula:

$$t = V * \rho$$

Donde t son las toneladas; ρ es la densidad del material que constituye el bloque de acuerdo al dominio de estimación; y V es el volumen calculado con las dimensiones del bloque.

El tonelaje (T) es el resultado de la sumatoria de las toneladas de cada bloque:

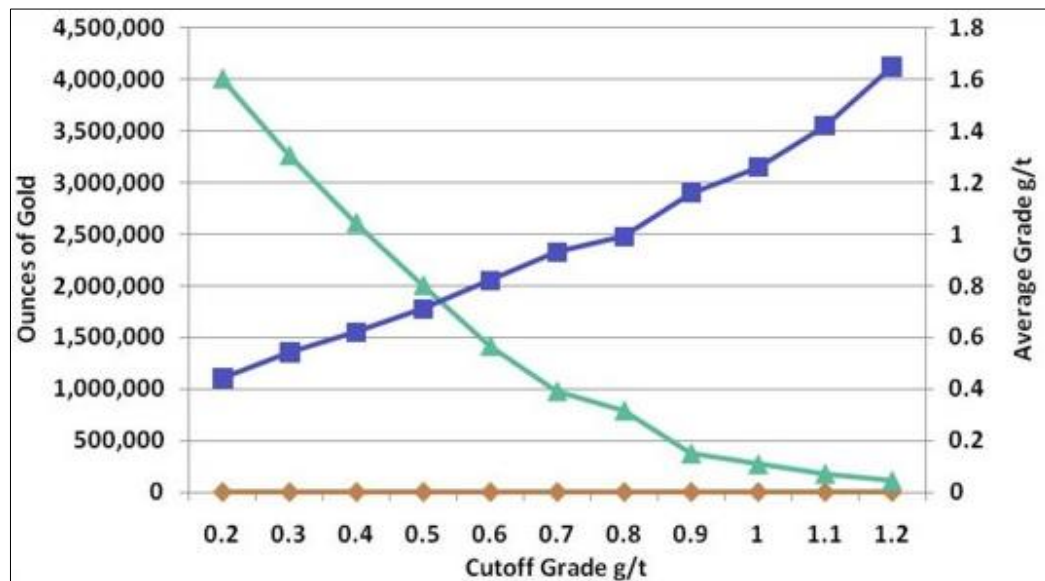
$$T = \sum t$$

La ley promedio o Average grade es un promedio ponderado resultante de la siguiente ecuación:

$$\text{Average grade} = \frac{\sum t*v}{T}$$

Donde v es la variable estimada en cada bloque, t son las toneladas de cada bloque y T las toneladas totales.

Figura 24. Curva de Ley-Tonelaje del proyecto *Livengood* para recursos inferidos iniciales. La línea verde representa el tonelaje y la azul la ley promedio.



Fuente: (International Tower Hill Mines Ltd, 2008).

Normalmente el material que se encuentre por encima del Cut-off es usado para desarrollar los planes de minado, por consiguiente los bloques que clasifiquen serán programados para extracción (Moon, et al., 2006). Cabe resaltar que los planes de minería se desarrollan sobre las *reservas*, una vez los recursos indicados y medidos han sido sometidos a un estricto análisis de viabilidad como fue mencionado inicialmente.

5.2. CONTROL DE LEY

Aún la mejor estimación de recursos no es la inicial, son estimaciones parciales modificadas a medida que otros datos estén disponibles y cuyo objetivo es garantizar información con precisión razonable a una escala de producción de largo plazo. En el momento del minado o justo antes de minar la naturaleza de los requerimientos de estimación es diferente. Los resultados que son precisos a una escala de largo plazo pueden no ser suficientes para la etapa final de minado (Rossi

& Deutsch, 2013). Por esta razón es necesario emplear una herramienta que solvete la falta de precisión.

El control de ley es la estimación final que busca corroborar la información resultante de la estimación parcial. Constituye la base de la decisión económica que selecciona el destino de los bloques de minado. Los errores en esta etapa son costosos e irreversibles y pueden ser medidos en términos de flujo de efectivo y costos operativos, por lo tanto afecta directamente la economía de una compañía minera (Rossi & Deutsch, 2013). Se llama control de ley porque es el encargado del proceso de selección y decisión final e irreversible que determina la naturaleza del material: mineral (rentable) o estéril⁸.

El modelo de control de ley es igualmente un modelo de bloques donde las estimaciones permiten una clasificación detallada de los materiales de la mina. El proceso es similar a la estimación de recursos, salvo que modifica características para alcanzar el grado de detalle deseado. Por ejemplo, el tamaño de los bloques es más pequeño, requiere un muestreo espacialmente más cerrado e interpretación geológica a escala detallada.

Al efectuarse el control de ley sobre el plan minero a mediano y corto plazo implica centrarse en áreas específicas y más pequeñas, por lo cual los métodos de estimación de leyes generalmente utilizados son aquellos que se ajustan a la naturaleza del depósito proporcionando información aceptable con procesos más simples en tiempos menores de ejecución.

⁸ Un material se considera estéril cuando su ley de mineral se encuentra por debajo del Cut-off, lo que significa que no es factible su extracción.

6. MODELAMIENTO GEOLÓGICO PILOTO DE UN ÁREA DEL PIT 23

El modelamiento geológico piloto de un área del pit 23 surge como iniciativa para tratar de dar respuesta a la necesidad de incorporar el conocimiento geológico al MCL de CMSA. Actualmente el MCL usa sólo los datos de pozos provenientes del muestreo y ciertas técnicas estadísticas tanto para la asignación del tipo de litología como para la estimación de las leyes de cada bloque. Esto ha generado que los resultados de las estimaciones no concuerden con la *realidad* del material de la mina, generando incertidumbre, desviaciones y reajustes en los planes de minería.

Partiendo de la idea de incluir un modelo geológico que represente el comportamiento y la distribución de las rocas incorporando datos estructurales, contactos litológicos e interpretación, y que además no demande altos costos ni tiempos prolongados de ejecución, siendo funcional para las áreas finitas del plan de minería que se someten al control de ley, este trabajo presenta una propuesta por modelamiento implícito el cual ha incorporado las características geológicas del área, y cuyos volúmenes litológicos han sido validados y discretizados en bloques, y probando su total aplicabilidad siendo usados como dominios de estimación en leyes de níquel. Lo anterior garantiza que los geólogos encargados del MCL puedan realizar las pruebas y comparaciones necesarias a fin de evaluar las diferencias en los resultados de estimación respecto al método actual y, de ser posible, sugerir el uso oficial y la estandarización de este método.

6.1. CONSIDERACIONES INICIALES

Para determinar el área a modelar se tuvieron en cuenta diferentes aspectos tanto en localización como en información disponible:

- Área del plan de minado FY16 programada para los meses más próximos a la publicación del modelo.
- Mínimo 1 hectárea de terreno
- Mínimo 25 perforaciones por hectárea
- Fuerte control estructural

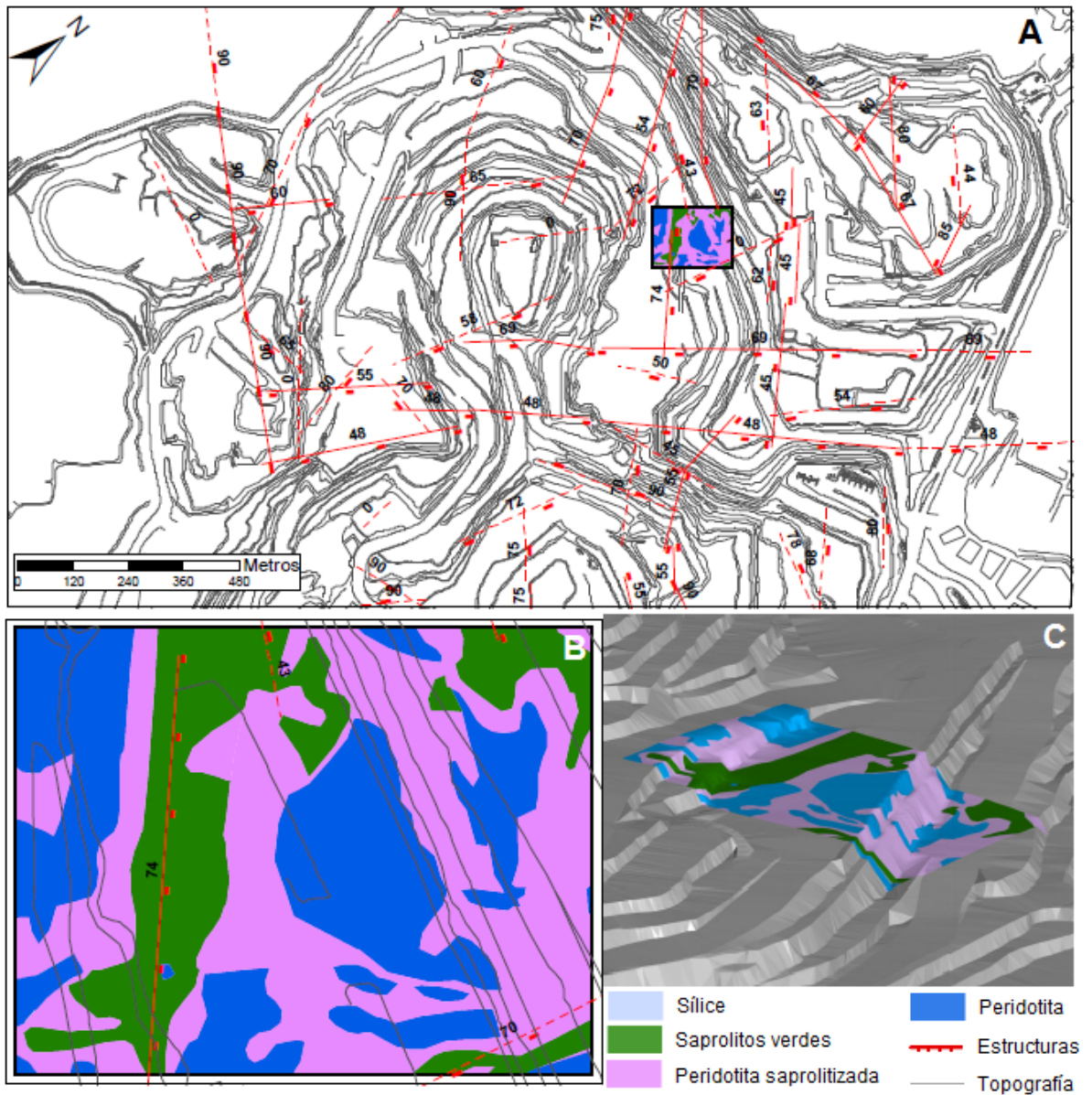
- Mineralización potencial

6.1.1. Localización y geología

El área se encuentra localizada al norte de la mina dentro del Pit 1 exactamente en la subdivisión conocida como Pit 23. Consta de dos hectáreas de dimensión 160x130 metros aproximadamente abarcando desde el banco a nivel 91 hasta el 56. La topografía de corte con la cual se realizó el modelo es del 08 de abril de 2015.

La mineralización se encuentra asociada principalmente a saprolitos de alto y bajo magnesio, controlados por una estructura predominante en dirección NW e inclinación de 74° hacia el NE. Aunque no ha sido posible determinar la cinemática de la estructura debido a las condiciones de alteración del sector, datos estructurales en planos difusos pero reconocibles han permitido definir su rumbo y buzamiento. Los espesores de esta cuña mineralizada se encuentran restringidos a la zona de influencia estructural donde la disposición de la peridotita como roca parental y sus correspondientes litologías de alteración representan el comportamiento típico en lo que actualmente se considera el fondo del depósito.

Figura 25. (A). Localización del área de modelo, (B) Geología preliminar área del modelo. (C) Visualización 3D área del modelo.



6.1.2. Información de campo

Para la generación del modelo geológico del área se usaron 146 pozos verticales RC, 1 pozo inclinado de núcleo, y 5 pozos horizontales generados a partir de

cartografía de bancos cuya metodología es detallada en el capítulo siguiente. La malla de muestreo promedio es de 12.5x12.5 metros, aclarando que hay zonas que han sido perforadas a un intervalo más cerrado y otras a un intervalo más espaciado. La profundidad promedio de los pozos verticales RC es de 32.5 metros, donde la profundidad mínima es 2 metros (equivalente a un intervalo de muestreo), y la profundidad máxima es 102 metros. El pozo de núcleo se perforó con una inclinación de 45° alcanzando una distancia de 80 metros y una profundidad vertical de 58 metros respecto a la superficie.

6.2. METODOLOGÍA

Una vez es obtenido el perímetro del área a modelar se procede a filtrar todos los datos de pozos de la base de datos histórica de la mina. Sin embargo es necesario ejecutar varios procesos a los pozos filtrados de la zona, puesto algunos pueden estar por encima de la topografía vigente, es decir pozos antiguos que fueron realizados sobre material que ya ha sido removido. Todos estos ejercicios son agrupados en la fase inicial de captura de información existente, incluyendo la cartografía preliminar de la zona que proviene del mapa geológico oficial de Cerro Matoso.

Cuando la información previa ha sido capturada, se procede al control de campo, en donde se levantan puntos de control litológico, puntos de contacto y control estructural a modo de validar y corroborar la información de la cartografía oficial. Esta información actualizada del área es ingresada al software de modelamiento por medio de la adición de pozos horizontales que evidencian los cambios litológicos a lo largo del talud de los bancos, y trenes estructurales que controlan la mineralización de la zona.

La interpretación del geólogo se soporta en los datos antes mencionados una vez se realizan secciones horizontales o plantas que muestran la litología de las muestras de pozo a diferentes profundidades permitiendo contornear los cuerpos rocosos. Estas plantas interpretadas también son añadidas en la construcción del

modelo garantizando direccionar los volúmenes litológicos obtenidos para que alcancen una disposición geológicamente razonable. Finalmente pueden ser realizados diversos ajustes manuales dependiendo del nivel de detalle que se quiera alcanzar.

6.2.1. Software utilizados

En las diferentes etapas correspondientes a la generación y validación del modelo geológico, intervienen tres software especializados:

- ArcGIS

Es un conjunto de software relacionado a los sistemas de información geográfica. Herramienta indiscutible en la captura, edición, análisis, tratamiento y diseño de información geográfica. Permite la digitalización y georreferenciación de grandes cantidades de información geológica capturada en campo.

- Datamine

Es una herramienta líder en la industria minera para la evaluación de recursos y reservas. Posee una versatilidad en la manipulación y transformación de datos de sondeo o perforaciones. Trabaja a partir de *comandos*, pequeños algoritmos que realizan funciones determinadas a datos de entrada, produciendo datos de salida. La combinación de comandos en secuencia forma lo que se conoce como una cadena de procesos que moldea los datos de acuerdo a lo requerido (CAE Inc, 2015).

- Leapfrog Geo

Especializado en la construcción de modelos geológicos tridimensionales utilizando algoritmos avanzados para generar superficies y volúmenes a partir de información regionalizada como datos puntuales de campo, datos estructurales, líneas de contorno y principalmente perforaciones.

6.2.2. Recopilación de información

Para extraer la información necesaria se utilizó el perímetro de trabajo definido con anterioridad y dibujado en ArcGis. Este perímetro fue exportado a Datamine para extraer el grupo de pozos que se encuentren inmersos en él sin importar su posición respecto a la Z (Figura 26). A medida que se efectúan cambios en los niveles topográficos de la mina los pozos antiguos quedan situados en el aire, indicando que en algún momento se hicieron en campañas de perforación pasadas. Particularmente, algunos de los pozos históricos que se encuentran dentro del área de interés aún tienen intervalos por debajo de la topografía, por lo que se hizo necesario cortarlos con la topografía vidente para rescatar la información útil y eliminar los datos que actualmente no tienen vigencia o no sirven para caracterizar el material con el que se cuenta (Figura 27). Esto se hace con el fin de incluir únicamente datos que puedan ser confrontados con la información que se captura en superficie, además de filtrar alguna información antigua que puede generar ruido.

Figura 26. Filtro de pozos usando el perímetro del área de interés. (A) Base de datos histórica de perforaciones. (B) Pozos filtrados en el área de interés.

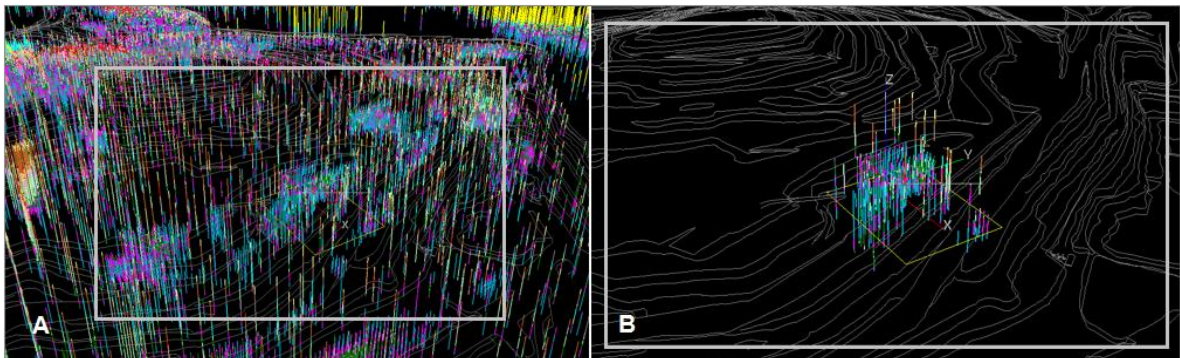
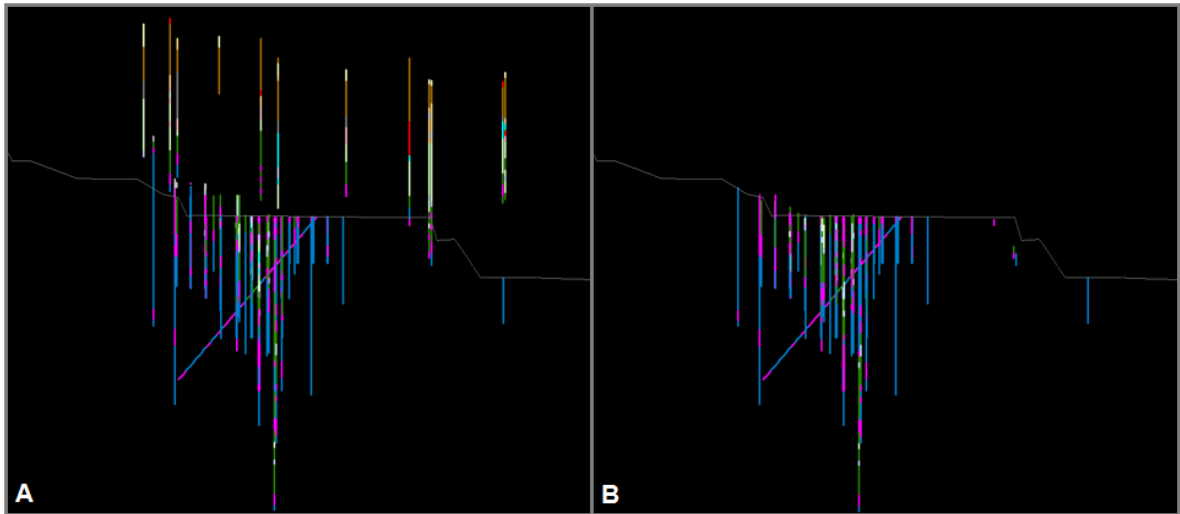


Figura 27. (A) Pozos totales filtrados en el área de interés. (B) Corte con topografía.



Datamine tiene la facilidad de permitir elaborar macroinstrucciones. El tipo de lenguaje no es equivalente a ninguno conocido en plataformas virtuales comunes ya que es totalmente nativo o propio. Por medio de una macro se ha logrado establecer y ejecutar una cadena de procesos que tienen como datos de ingreso el perímetro de un polígono correspondiente a un área y la topografía vigente, arrojando como resultado los datos de pozo cortados con topografía asociados a los tres archivos típicos, collar, assay y survey. Con el desarrollo de esta macro se está garantizando que el procedimiento pueda ser replicado de una manera rápida y eficiente en una próxima ocasión (Figura 28).

Figura 28. Macroinstrucción utilizada para los procesos de selección y adecuación de la información de pozos en el área de interés.

```

#Corta con topografía
!SELTRI &IN($dh#),&OUT(a1),&WIREPT($topa#PT),&WIRETR($topa#TR),
      *X(X),*Y(Y),*Z(Z),@SELECT=2

!MGSORT &IN(a1),&OUT(a2),*KEY1(BHID),*KEY2(FROM),@ORDER=2.0,
      @KEYSFRST=1.0

!EXTRA &IN(a2),&OUT(a3),@APPROX=1.0
IF (PREV(BHID) != BHID)
FROM=B
TO=FROM+LENGTH
END

IF (PREV(BHID) == BHID)
FROM=PREV(TO)
TO=FROM+LENGTH
END
GO

#Selecciono pozos dentro del perímetro
!SELEXY &IN(a3),&PERIM($perim#),&OUT($dh1#),
      *X(X),*Y(Y),@OUTSIDE=0.0

#Assays
!SELDEL &IN($dh1#),&OUT($assays#),*F1(X),*F2(Y),
      *F3(Z),*F4(LENGTH),*F5(RADIUS),*F6(A0),*F7(B0),*F8(C0),
      @KEEPALL=2.0

#Collars
!SELCOP &IN($dh1#),&OUT(c1),*F1(BHID),*F2(X),*F3(Y),*F4(Z),*F5(LENGTH)
      @KEEPALL=2.0

!MGSORT &IN(c1),&OUT(c2),*KEY1(BHID),@ORDER=2.0,@KEYSFRST=2.0

!EXTRA &IN(c2),&OUT(c3)
FLAG=2
IF (BHID == PREV(BHID))
FLAG=0
END
Z=Z+(LENGTH/2)
ERASE (LENGTH)
GO

!COPY &IN(c3),&OUT(c4),FLAG=1

!EXTRA &IN(c4),&OUT($collars4#)
ERASE (FLAG)
GO

#Surveys
!SELCOP &IN($dh1#),&OUT(s1),*F1(BHID),*F2(TO),*F3(B0),*F4(A0),@KEEPAL
!MGSORT &IN(s1),&OUT(s2),*KEY1(BHID),@ORDER=2.0,@KEYSFRST=1.0

!EXTRA &IN(s2),&OUT(s3)
FLAG=1
IF (BHID == NEXT(BHID))
FLAG=0
END
GO

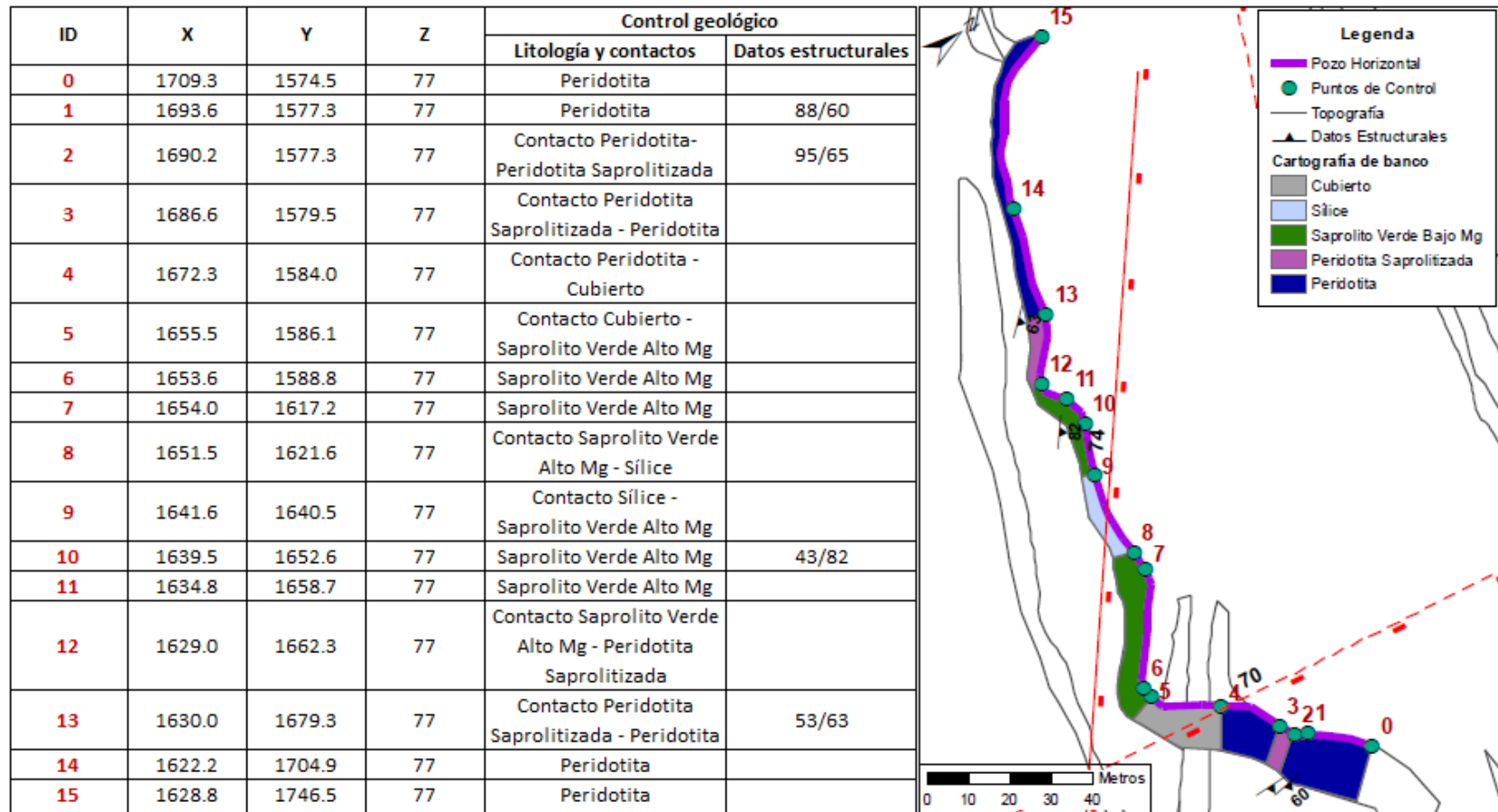
!COPY &IN(s3),&OUT(s4),FLAG=1

```

6.2.3. Control de campo y construcción de pozos horizontales

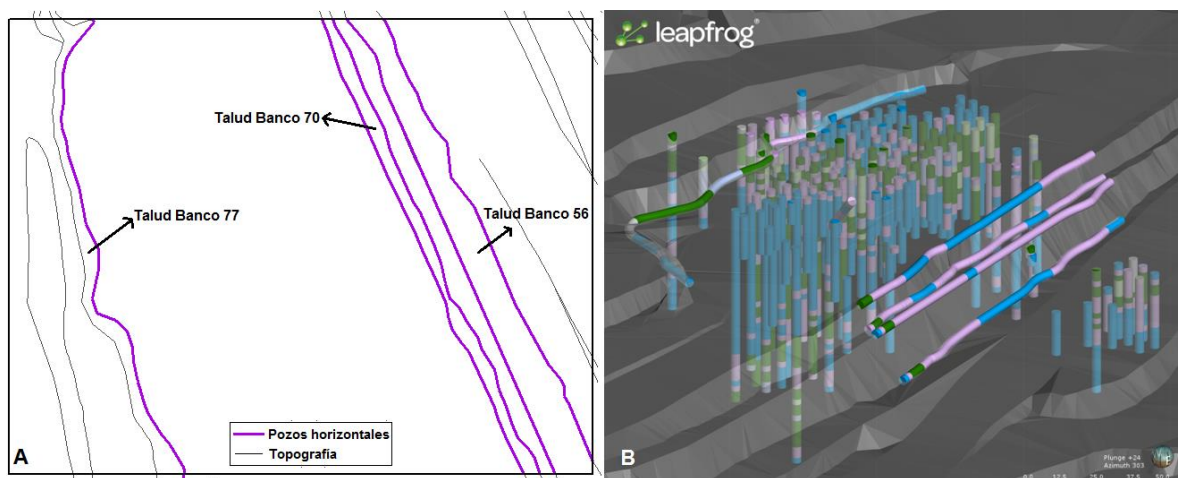
Para poder incluir los datos de control geológico que se adquieren en campo al modelamiento implícito que asigna la mayor importancia a los datos de pozo en la generación de superficies y volúmenes, se han generado 5 *pozos horizontales* a partir de información geológica capturada en la cartografía de tres bancos a nivel 77, 70 y 53. El geólogo inicia el levantamiento de puntos de control indicando litología, contactos y datos estructurales a lo largo del talud expuesto. Para esto requiere de GPS de alta precisión, brújula, martillo y lupa. Los datos se registran en un formato sencillo el cual es el suministro en la construcción de los pozos artificiales que se incorporan al modelo para dar una directriz real de lo observado en campo (Figura 29). En este caso se recorrieron aproximadamente 450 metros distribuidos en los tres bancos mencionados. La variación litológica lateral a lo largo de los pozos, los puntos de contacto exactos entre cada uno de los intervalos y la tendencia estructural de la zona permiten direccionar la generación del modelo.

Figura 29. Procesamiento en ArcGIS de información capturada en formato de campo.



Los datos capturados en campo son procesados para generar los archivos básicos asociados a la estructura de un pozo, collar, assay, y survey. Con los cuáles se podrán visualizar los pozos en el software de modelamiento geológico, en este caso Leapfrog Geo (Figura 30).

Figura 30. (A). Localización de los bancos y pozos horizontales construidos en el área del modelo. (B) Vista 3D de los pozos horizontales mostrando la variación litológica por intervalos. En gris la topografía de la mina.



6.2.4. Interpretación

Al modelo geológico fueron incluidas tres secciones horizontales interpretadas utilizando la información litológica por intervalo de muestra en los pozos disponibles y considerando la tendencia estructural en la zona (Figura 31). Se realizó un contorno de las diferentes litologías presentes a nivel 77, 70 y 63, teniendo en cuenta que a dichos niveles se cuenta con una densidad significativa de información que permite realizar la interpretación (Figura 32). Con esto se cubren 14 metros en profundidad, lo correspondiente a dos bancos, en donde se busca direccionar la geometría de los cuerpos rocosos y los contactos a profundidad.

Figura 31. Interpretación de secciones horizontales a partir de datos de pozo.

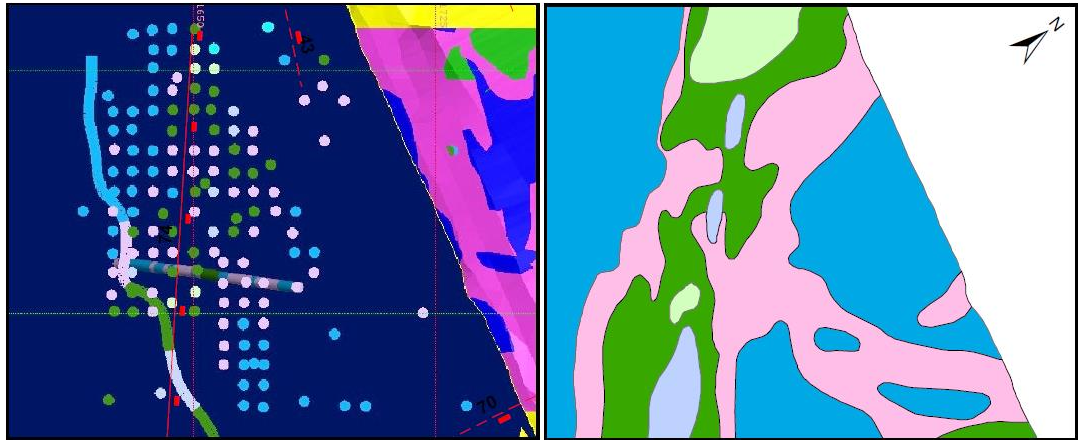
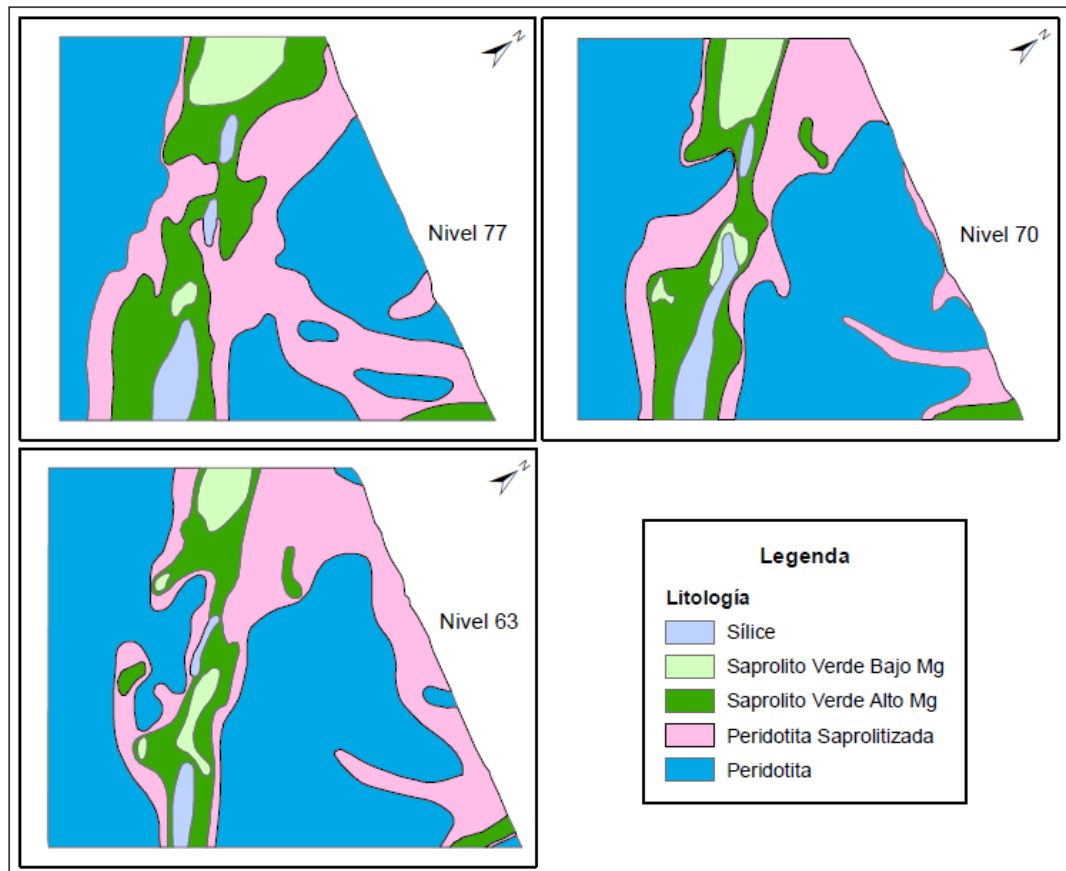


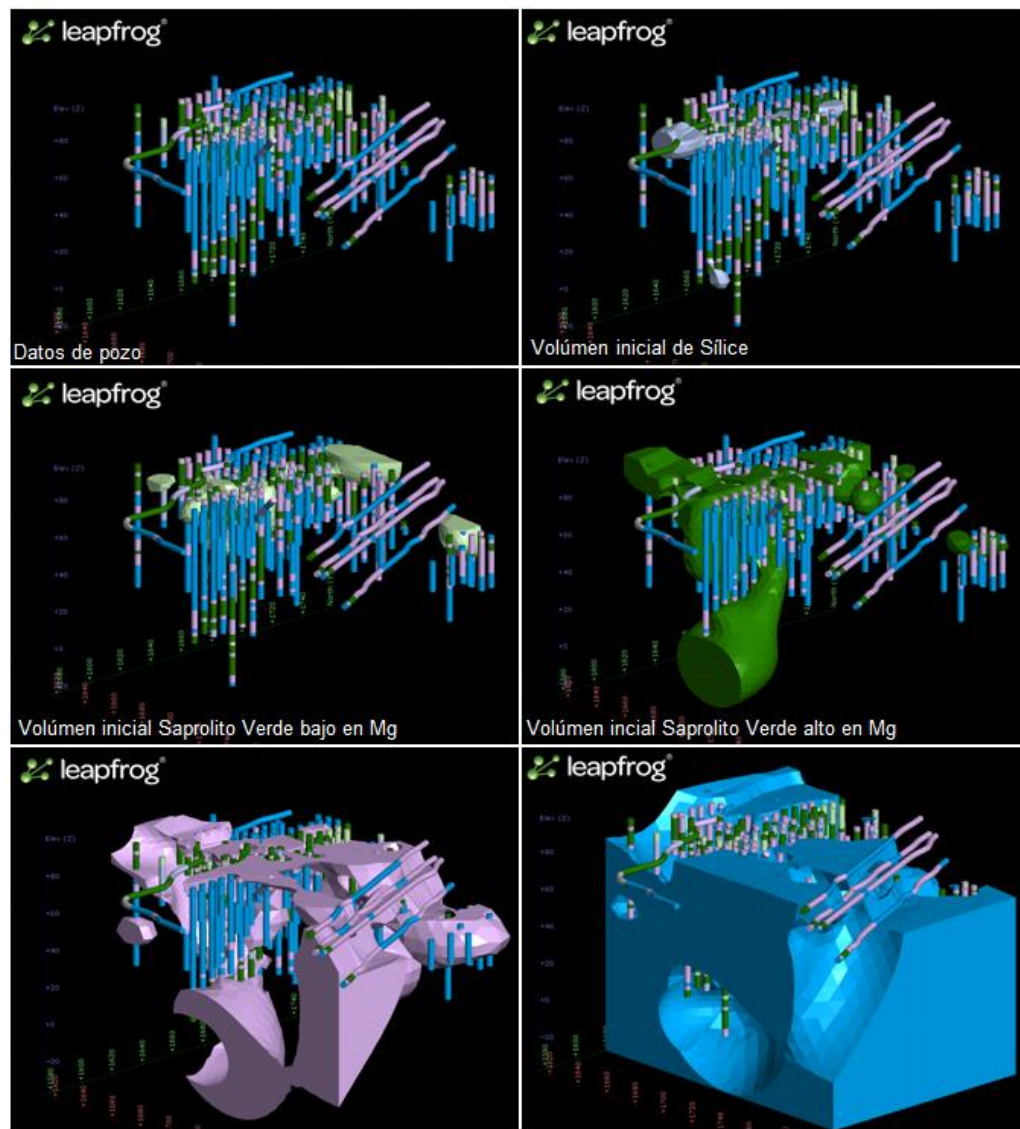
Figura 32. Secciones interpretadas en los niveles 77, 70 y 63.



6.2.5. Modelamiento

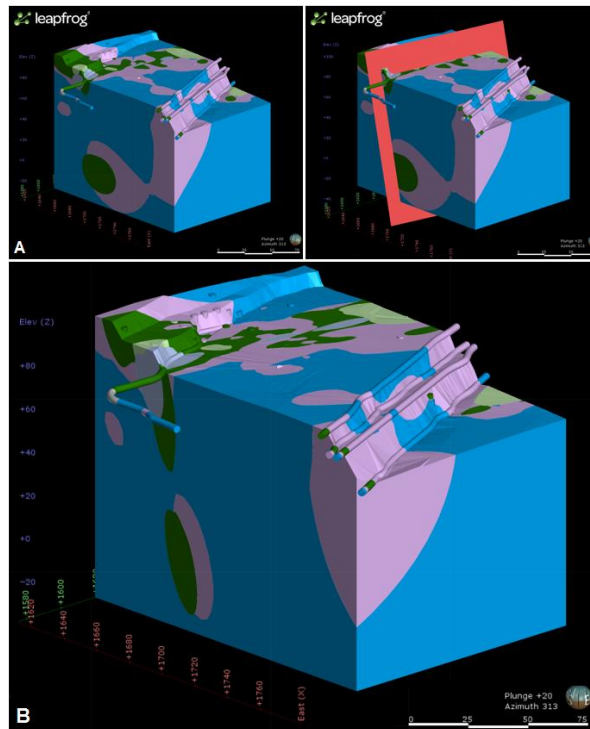
Los datos de las muestras de pozos fueron utilizados para la generación de los volúmenes iniciales. El modelado va sujeto al orden cronológico de las litologías presentes. En este caso el establecido, del más antiguo al más joven, fue: Peridotita, Peridotita Saproilitizada, Saproilito Verde alto Mg, Saproilito Verde bajo Mg y Sílice.

Figura 33. Volúmenes litológicos generados inicialmente a partir datos de pozos.



Los volúmenes generados mostrados en la Figura 51 son producto de una interpolación lineal básica que consiste en crear pequeños cuerpos a partir de un dato de muestra o grupo de muestras. A medida que dos cuerpos generados estén más cerca entre sí tenderán a unirse. Para que el modelo tenga consistencia geológica se incluyeron una serie de parámetros que modifican la geometría de los volúmenes. Las litologías del área modelada están condicionadas por una estructura, por tanto se adicionó una *tendencia estructural* (Structural Trend, en Leapfrog Geo), de modo que se adapten a la orientación preferencial. Para esto se tomó en cuenta la estructura cartografiada del área que fue corroborada en campo con varias mediante mediciones. Se ingresaron los datos correspondientes al software a partir de los cuáles se generó un plano estructural (Figura 34).

Figura 34. (A) Modelo geológico inicial y plano estructural (B) Modelo geológico con tendencia estructural.

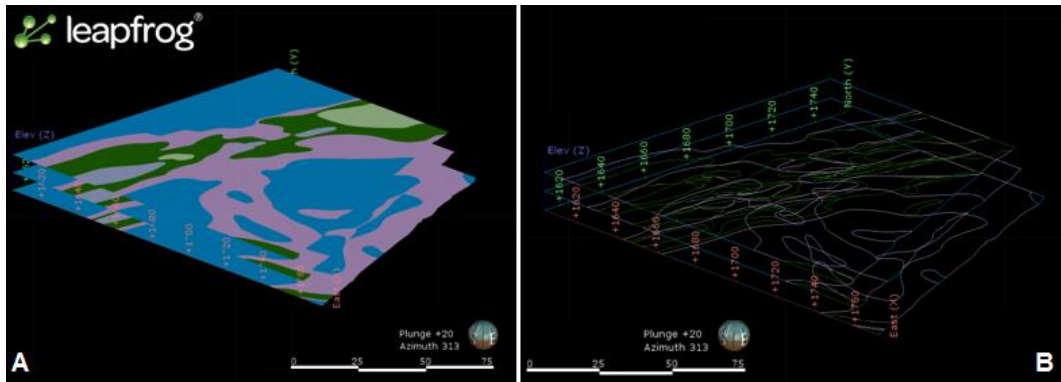


Se tiene la concepción de que el desarrollo litológico de un yacimiento laterítico como Cerro Matoso, incluyendo las zonas de control estructural, ocurre de manera gradual, es decir, van surgiendo diferentes litologías derivadas de la roca parental ultramáfica dependiendo del nivel de alteración. Cuando hay un flujo superficial de agua que se infiltra por un plano de debilidad se desarrolla una zona de influencia predominante en el que las rocas más cercanas al plano se ven más afectadas por los procesos de alteración. Nótese que la definición de la cuña alterada en la Figura 52 mejora a profundidad con los ajustes aplicados. En superficie se alcanza a apreciar una transición lógica entre las rocas de acuerdo a lo establecido en el perfil del depósito.

Posteriormente fueron incluidos al modelo otras herramientas de refinación por medio de las plantas geológicas y ajustes manuales. Fueron realizados bajo el criterio y conocimiento geológico con el objetivo de proporcionar mayor importancia a la interpretación. En este caso los contactos litológicos de las secciones previamente realizadas para los niveles 77, 70 y 63, fueron ingresados como líneas GIS, una vez sufrieron un proceso en Datamine que permite tomar los shapefile⁹ provenientes de ArcGIS y extraer la información georeferenciada compilándola en un solo archivo de polilíneas (Figura 35).

⁹ Shapefile hace referencia al formato de archivo informático de datos espaciales manejado por ArcGIS.

Figura 35. (A) Shapefiles de plantas interpretadas generados en ArcGIS. (B) Archivo único de polilíneas de contacto generado en Datamine.

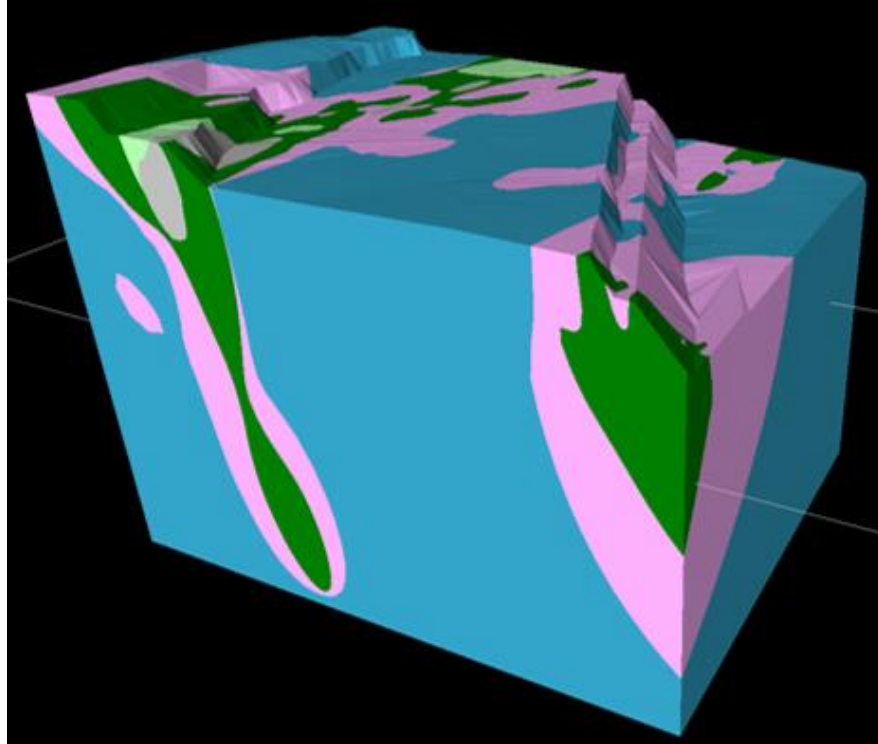


Los ajustes manuales se ejecutaron directamente en Leapfrog Geo sobre los volúmenes generados por medio de la herramienta de creación y adición de polilíneas.

6.3. VOLÚMENES LITOLÓGICOS Y MODELO DE BLOQUES

El resultado de todas las consideraciones estructurales e interpretativas, junto con la implementación de todas las herramientas de ajuste anteriormente detalladas se ve reflejadas en el modelo geológico final del área piloto presentado en este trabajo.

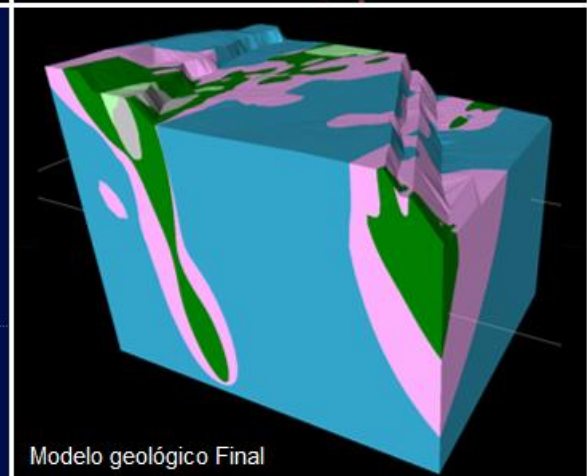
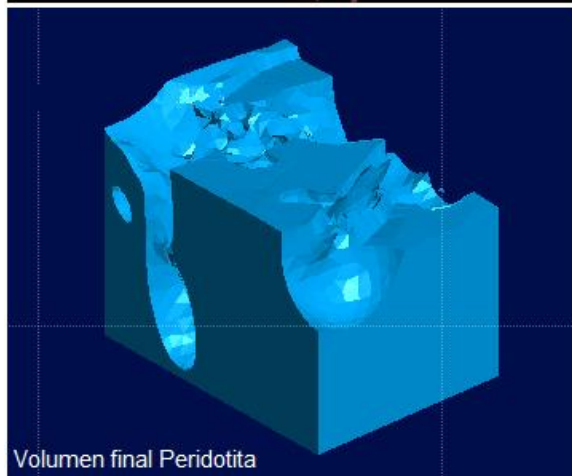
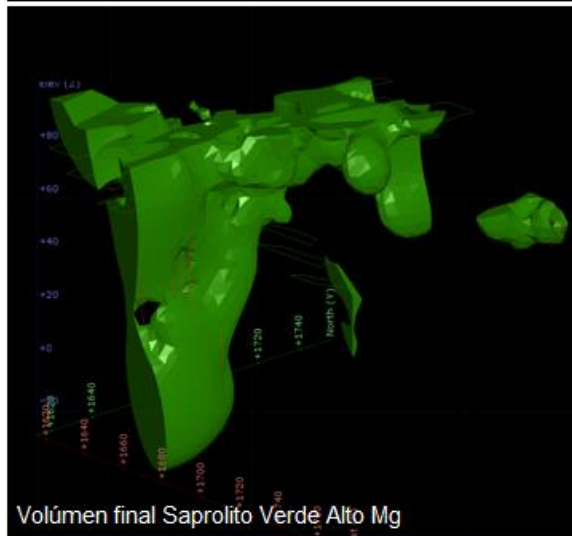
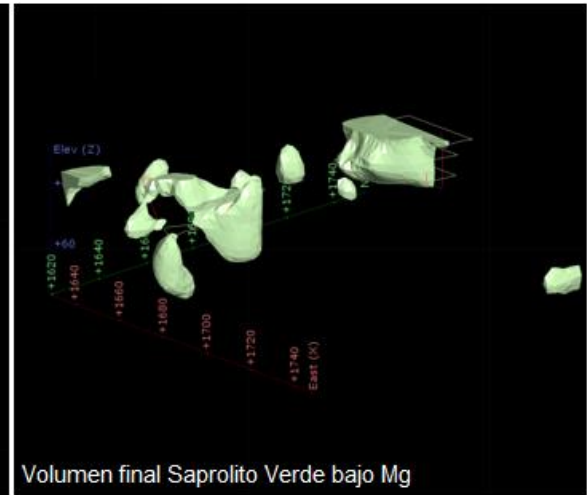
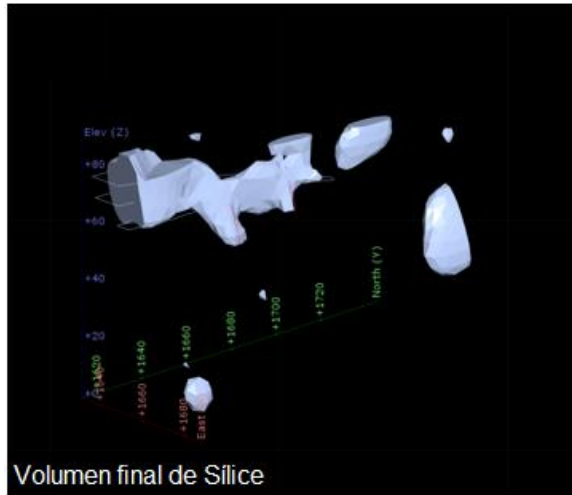
Figura 36. Modelo geológico 3D final del área piloto.



El volumen obtenido para cada litología se relaciona a continuación:

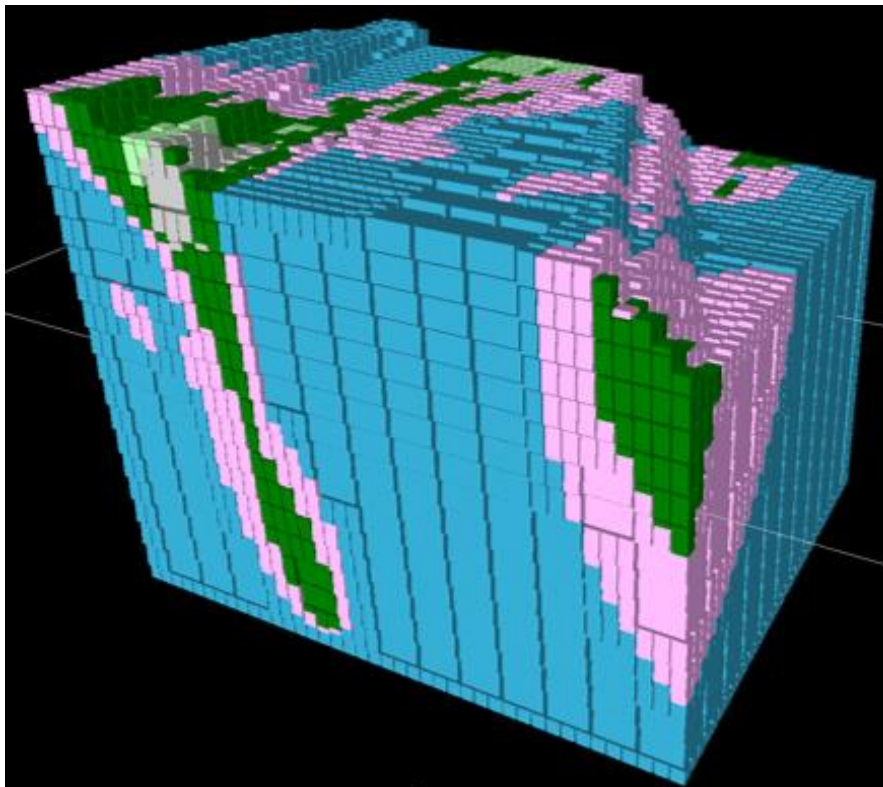
- Sílice: 9861.11 m³
- Saprolito Verde bajo Mg: 9279.51 m³
- Saprolito Verde alto Mg: 83498.26 m³
- Peridotita Saprolitizada: 205720.48 m³
- Peridotita: 1772803.82 m³

Figura 37. Volúmenes litológicos finales.



Dado que en Cerro Matoso se ha definido la litología como dominio para los procesos de estimación, los volúmenes litológicos obtenidos del modelamiento geológico del área piloto que permiten la sectorización espacial de las rocas, fueron discretizados en bloques de modo que puedan ser usados en una estimación de leyes de níquel a manera de validar la funcionabilidad del producto obtenido. Cada bloque se creó con dimensiones de 6.25 m de ancho, 6.25 m de largo y 3.5 m de alto. El valor litológico de cada bloque corresponde al mismo del volumen en el que se encuentre inmerso.

Figura 38. Discretización en bloques de los volúmenes litológicos obtenidos en el modelamiento geológico.



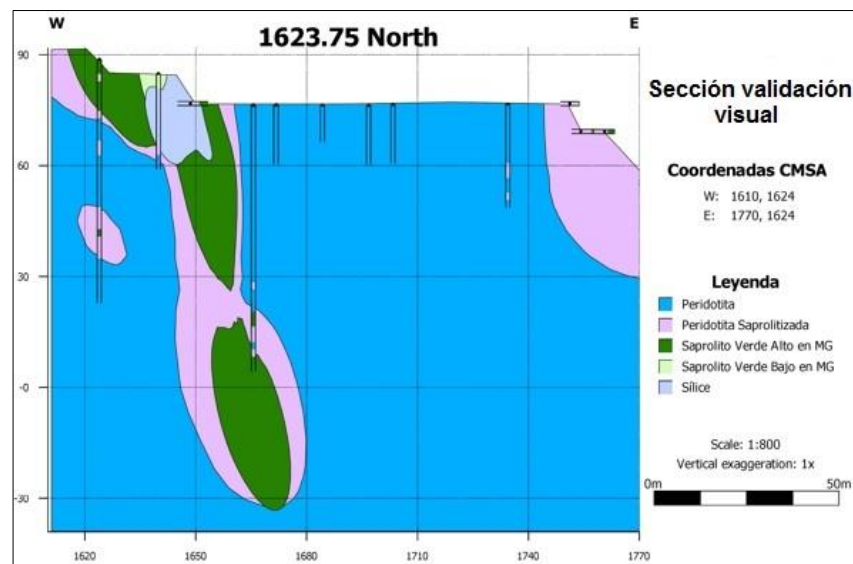
6.4. VALIDACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO

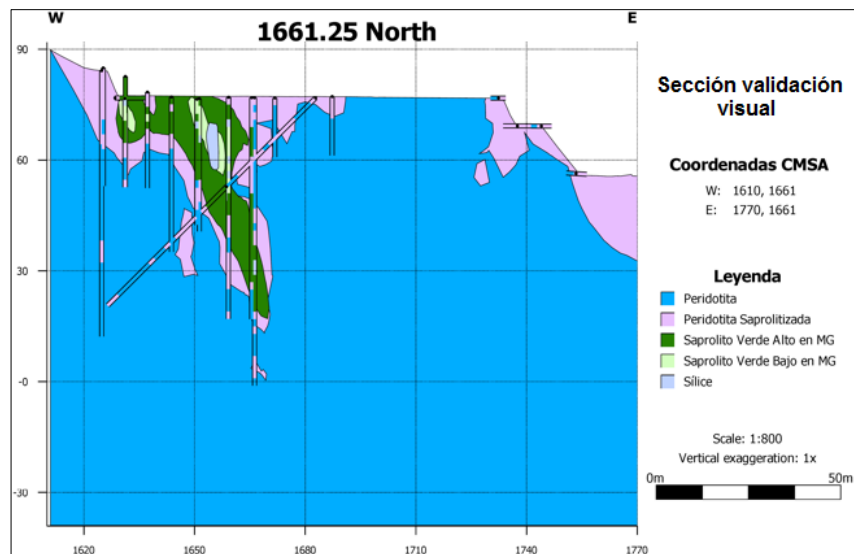
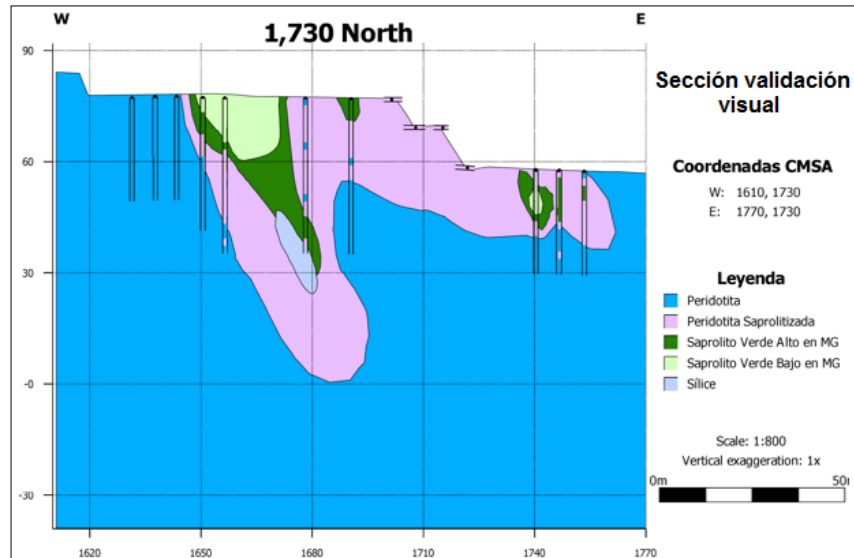
Como todo resultado debe ser soportado por medio de herramientas o métodos que sirvan para corroborar lo obtenido, para el modelo geológico se hicieron tres tipos de validación: visual, estadística y por estimación de leyes de níquel. Esta última a modo de corroborar la funcionabilidad de los sólidos generados en el modelamiento geológico en un proceso de estimación, usándolos como dominios de estimación.

6.4.1. Validación visual

El objetivo de esta validación fue verificar que la interpretación geológica fuese acertada y efectuar pequeños cambios en forma, de ser necesario. Para esto, se realizó una serie de cortes con la herramienta “Cross Sections” de Leapfrog Geo, en el que se visualizaron varias zonas del modelo geológico mediante cortes, definidos con un formato de presentación propio del software. En las secciones se muestran volúmenes litológicos y pozos, evaluando la concordancia litológica e interpretación.

Figura 39. Secciones construidas en la validación visual del modelo geológico.





6.4.2. Validación estadística

Este tipo de validación corresponde a un método más cuantitativo, una manera más objetiva de verificar el grado de asertividad que tuvo el modelo. Consistió en hacer una tabla estadística de la litología para las muestras contenidas en cada volumen.

Partiendo de cada volumen litológico, mediante un comando en Datamine se realizó un filtro de muestras, tomando sólo las que estuvieran contenidas en cada volumen. Luego, en una hoja de Excel, se calculó la frecuencia absoluta del valor litológico de las muestras y se representó en porcentaje. El valor de la misma litología Volumen-Muestra lo llamamos *porcentaje de coincidencia*.

Figura 40. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Sílice.

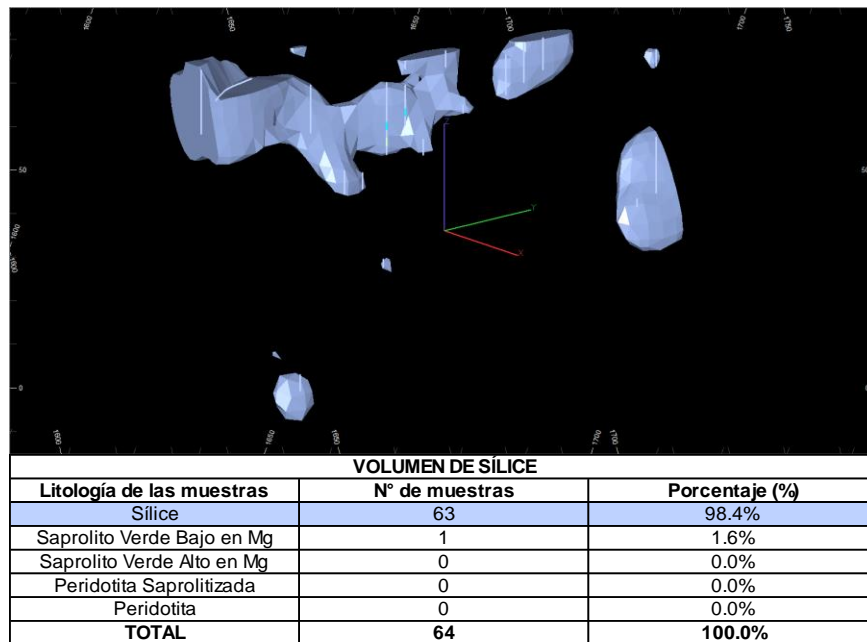


Figura 41. Porcentaje litológico muestras volumen Sapolito Verde bajo en Mg.

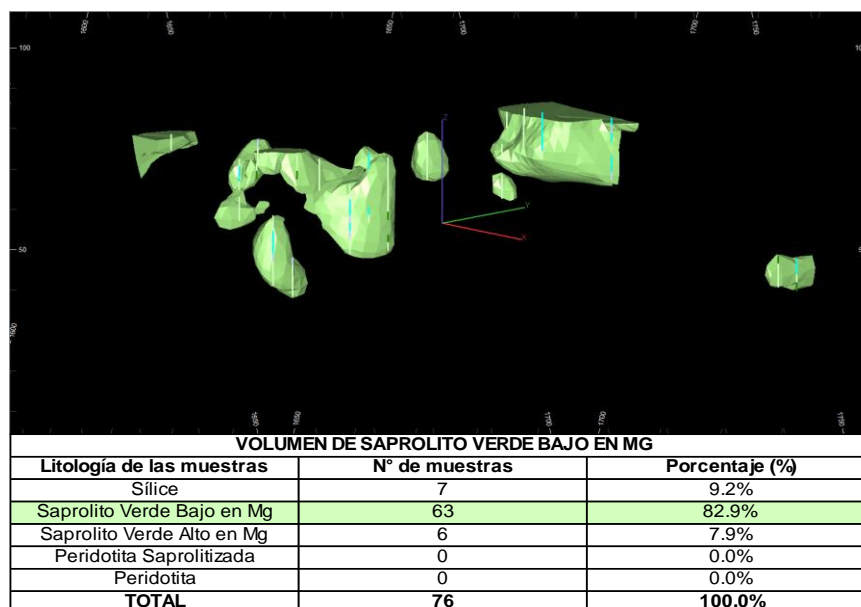


Figura 42. Porcentaje litológico muestras volumen de Sapolito Verde alto en Mg.

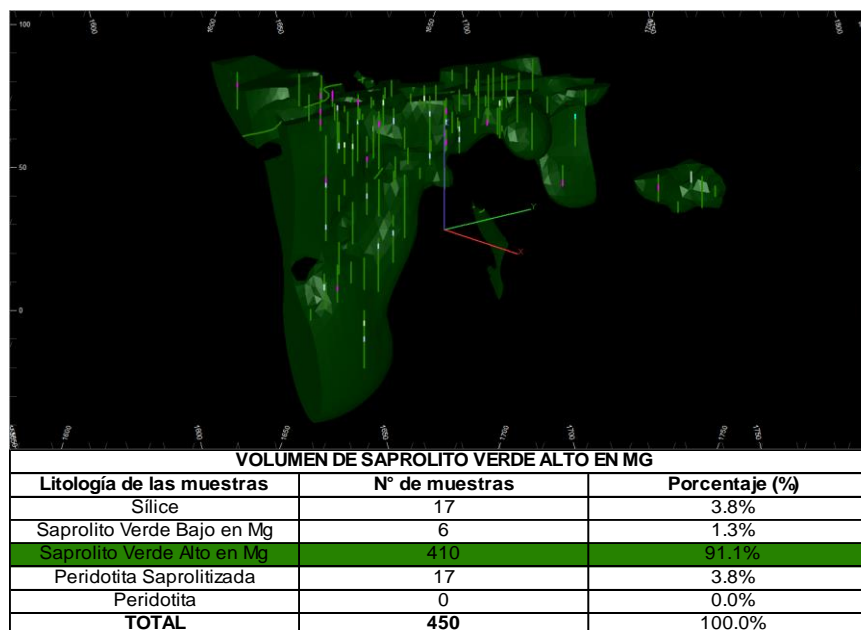


Figura 43. Porcentaje litológico de muestras volumen de Peridotita Sapolitizada.

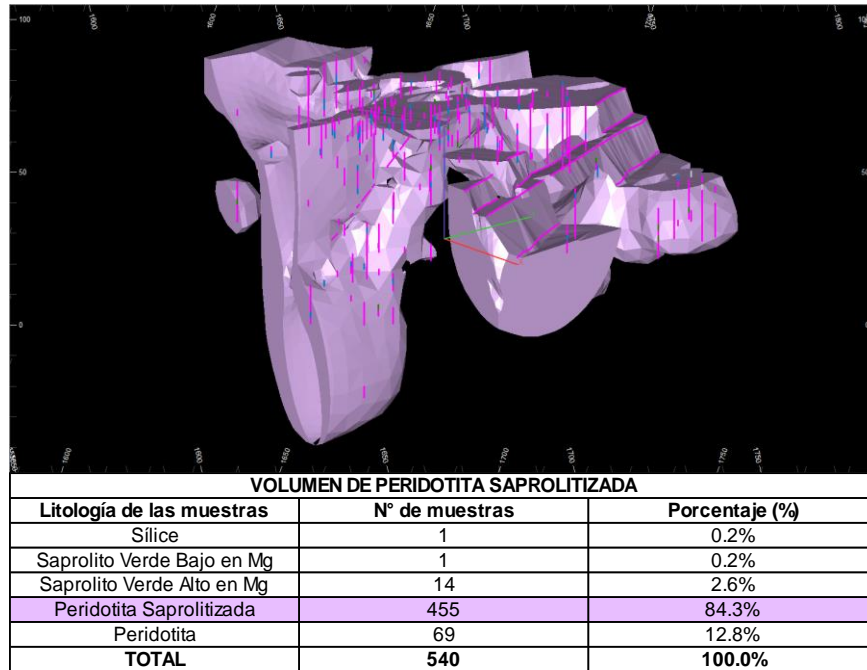
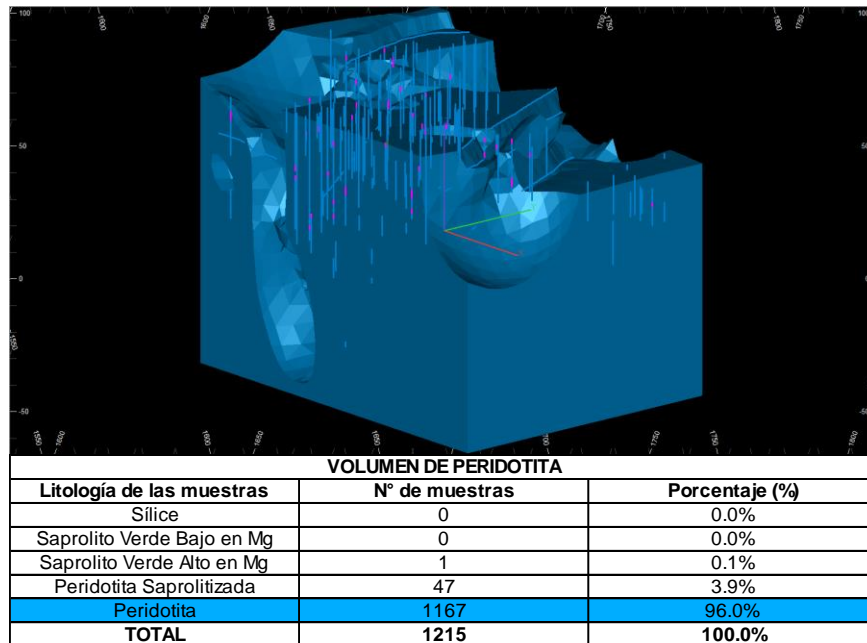


Figura 44. Porcentaje litológico de muestras en volumen de Peridotita.



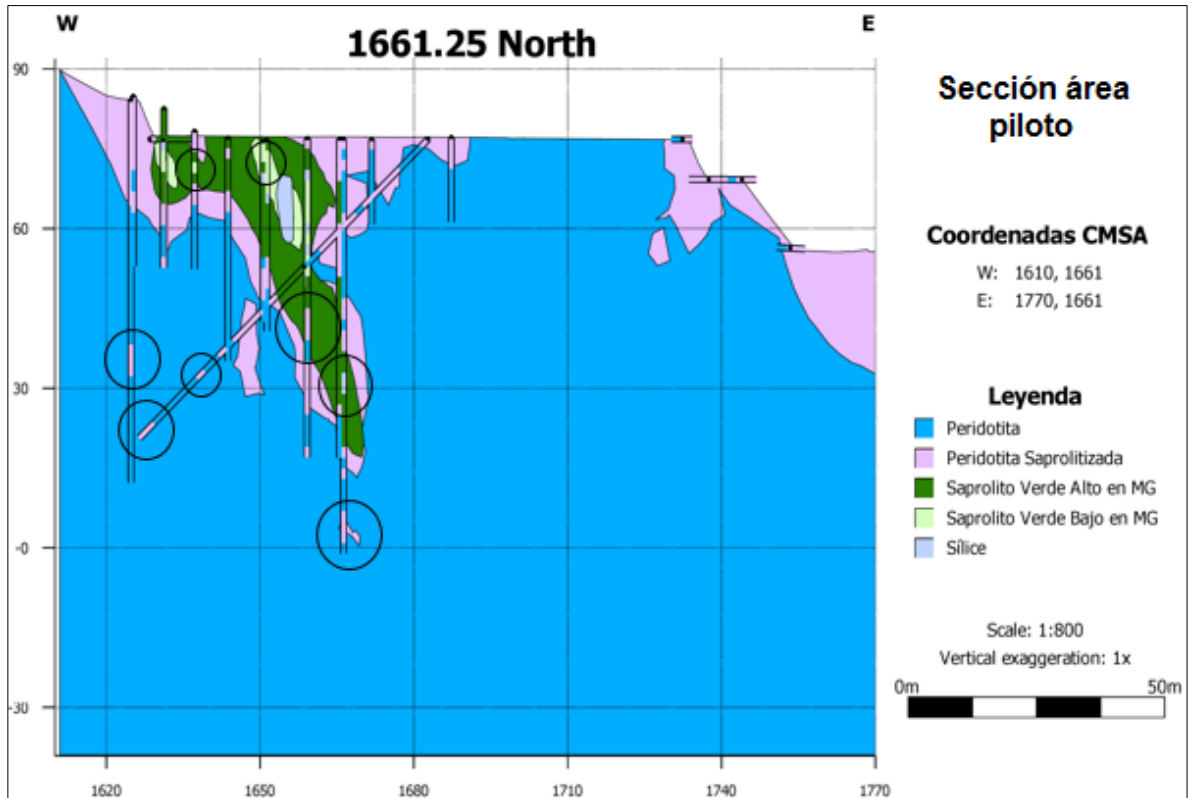
Los resultados obtenidos a partir de las tablas estadísticas generadas se resumen en la Tabla 8, donde se consignan los porcentajes de coincidencia, mostrando altos valores para la Sílice, Peridotita y Saprolito Verde alto en Mg, y valores más moderados para el Saprolito Verde bajo en Mg y la Peridotita Saprolitizada.

Tabla 5. Resumen porcentajes de coincidencia litológica para muestras contenidas en cada volumen.

Litología	Porcentaje de coincidencia (%)	Otras litologías
Sílice	98.4%	1.6%
Saprolito Verde Bajo en Mg	82.9%	17.1%
Saprolito Verde Alto en Mg	91.1%	8.9%
Peridotita Saprolitizada	84.3%	15.7%
Peridotita	96.0%	4.0%

Idealmente las muestras contenidas dentro de cada volumen deberían corresponder litológicamente en un 100% con el mismo, pero la fuerte variación geológica impide una diferenciación completa de las litologías mediante volúmenes, ya que modelar a un nivel de detalle mucho mayor causaría “ruido” y no sería favorable para su uso en los modelos de estimación, lo que lleva a hacer una omisión de las pequeñas muestras aisladas cuyo valor no amerite hacer una diferenciación volumétrica. La Figura 63 corresponde a una de las secciones mostradas en la sección de validación visual, haciendo un señalamiento ejemplo de los pequeños intervalos omitidos.

Figura 45. Pequeñas variaciones omitidas en el modelo geológico.



El contacto entre la Peridotita y la Peridotita Sapolitizada con frecuencia es difuso, gradual, al igual que entre los Sapolitos Verdes de Alto y Bajo Mg. Por esta razón, es posible que los porcentajes de coincidencia reflejen sus valores en este sentido. Sin embargo, el porcentaje de coincidencia promedio (total del modelo) es del 90.5%, por lo que el resultado es favorable y aceptado, aclarando que el 9.5% restante se debe en gran medida a la variabilidad intrínseca de las litologías en el depósito.

6.4.3. Estimación leyes de níquel

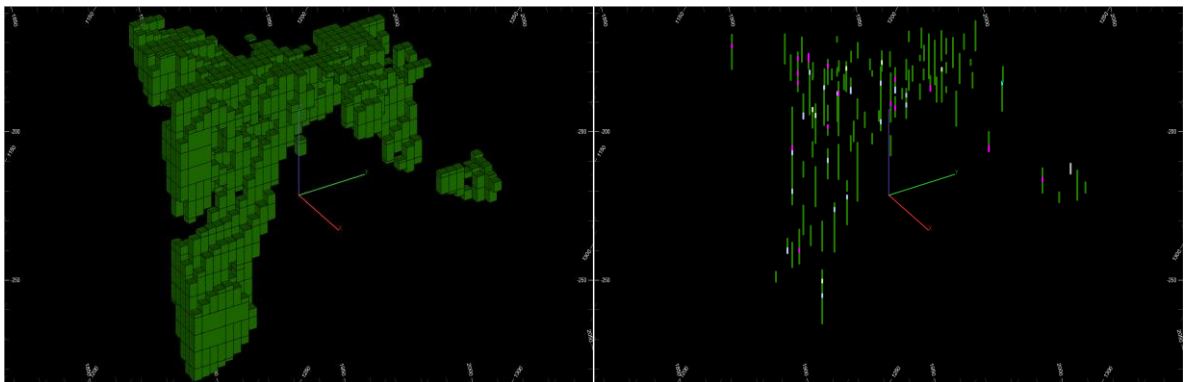
Habiendo efectuado validaciones con relación a la litología, se buscó probar la funcionalidad y aplicabilidad de volúmenes litológicos utilizándolos como dominios

geológicos en un proceso donde se evaluó la variable níquel. Para esto fue necesario definir unos datos de entrada y los parámetros a usar en la estimación.

- Datos de entrada

Se utilizó el modelo de bloques previamente generado a partir de los dominios (volúmenes litológicos) y las muestras de perforaciones RC (disponen de datos geoquímicos) contenidas en cada uno, como los datos de entrada.

Figura 46. Datos de entrada para el Saprolito Verde alto Mg. A la izquierda se observan los bloques generados en el volumen litológico. En la izquierda se presentan las muestras de pozo contenidas en el volumen.



- Parámetros de estimación

El método de estimación para evaluar las leyes de níquel fue la ponderación por el Inverso de la Distancia al Cuadrado, ya que, como bien ha sido explicado, es un método acertado cuando existe una densidad considerable de datos y la extensión del modelo es moderada.

- Parámetros de búsqueda

Se utilizaron dos parámetros para limitar o regular la cantidad de muestras usadas en la estimación de los bloques: Primero, un elipsoide de búsqueda, que obliga a

estimar un punto no muestreado (centroide de un bloque) tomando únicamente las muestras que se encuentran contenidas en éste. Estrictamente se trata de un esferoide con $X=14\text{ m}$, $Y=14\text{ m}$ y $Z=7\text{ m}$. Segundo, se estableció un mínimo y máximo número de muestras a usar para la estimación de un bloque, en un rango de 2 a 16 respectivamente.

Figura 47. Vista 2D del elipsoide de búsqueda.

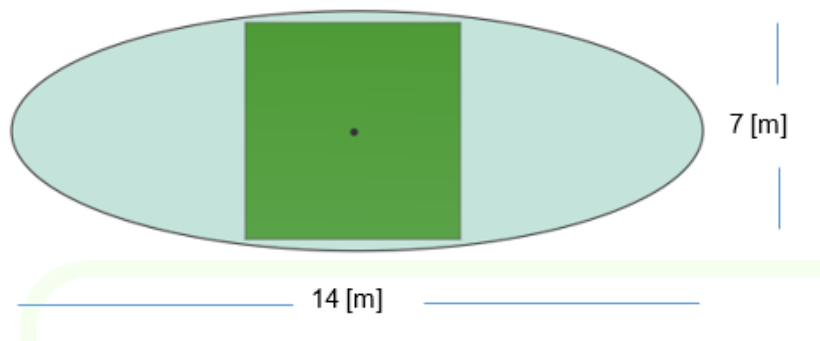
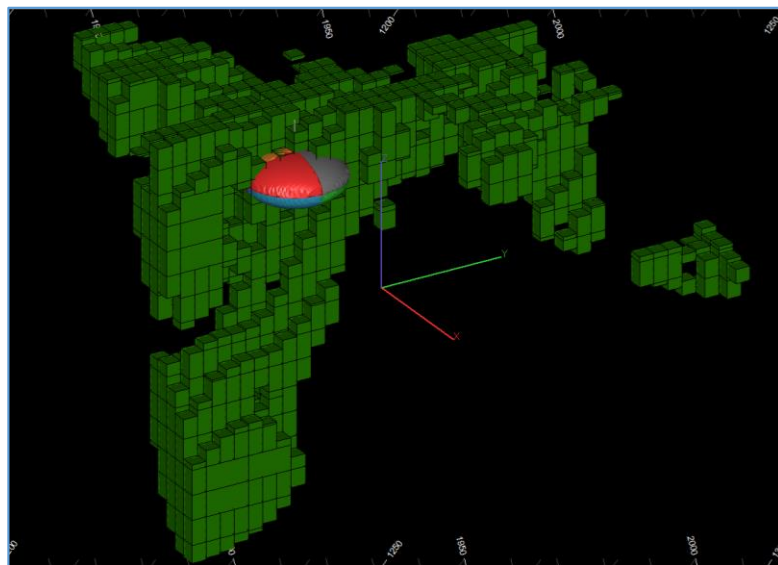


Figura 48. Elipsoide de búsqueda en uno de los bloques del dominio Saprolito Verde alto Mg.

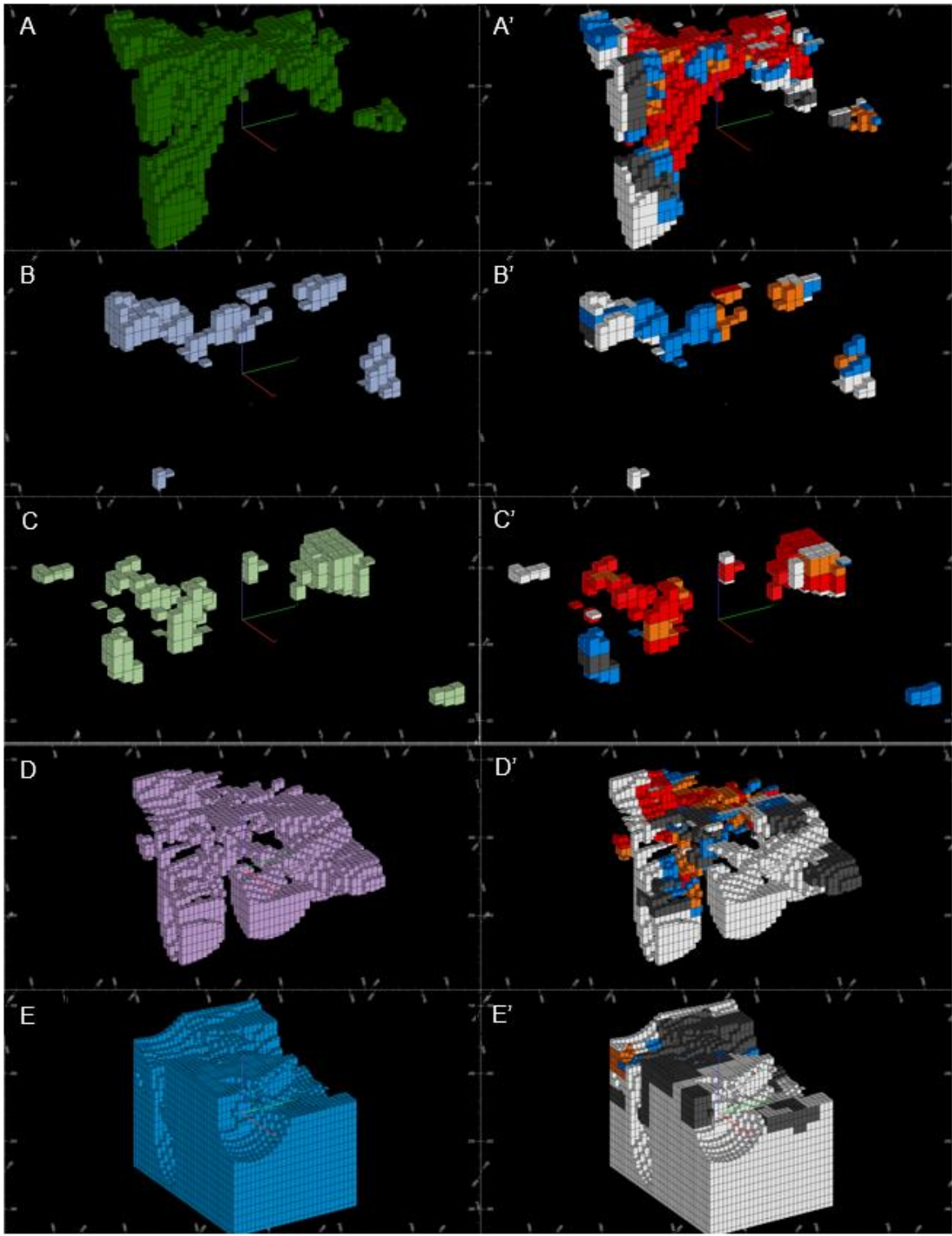


- Estimación

La estimación fue realizada en Datamine, en el que se ingresaron los datos de entrada, los parámetros de estimación y búsqueda. A partir de los datos geoquímicos de las muestras seleccionadas se asignó un valor de níquel al centroide de cada bloque, que viene caracterizando a la totalidad del bloque, usando la fórmula de la ponderación por el Inverso de la Distancia al Cuadrado. Fueron ejecutadas cinco corridas con diferentes elipsoides de búsqueda y rangos de mínimo y máximo de muestras hasta determinar el que mejor se ajustara a todos los dominios de estimación. El resultado fue un modelo de bloques estimado por cada dominio geológico, cuyo porcentaje de bloques estimados bajo las condiciones anteriormente descritas fue del 61%, quedando un total del 39% sin estimar.

Cabe resaltar que es válido usar parámetros de estimación diferentes en cada uno de los dominios, buscando obtener los mejores resultados. Así como también pueden efectuarse diversas corridas con diferentes configuraciones de menor exigencia para tratar de estimar la mayor cantidad de bloques, aunque implique una reducción de confianza en los resultados.

Figura 49. Bloques estimados para cada dominio. El color gris, azul, naranja y rojo indican valores de níquel bajos, moderados, medios y altos respectivamente.



- Níquel promedio en muestras Vs. Níquel promedio en bloques.

Una de las formas que se usó para validar la estimación fue comparando los datos geoquímicos de níquel presente en las muestras con las estimaciones de níquel en los bloques.

Por una parte, para cada dominio se calculó el grado promedio de los datos geoquímicos de níquel presente en las muestras (\overline{Nim}), ponderándolo con la longitud de los intervalos de muestreo, así:

$$\overline{Nim} = \frac{\sum Ni * l}{L}$$

Donde Ni = grado de níquel, l = Longitud de la muestra, L = Longitud total de todas las perforaciones, calculado con $L = \sum l$.

Por otro lado, se calculó el grado promedio de níquel estimado en los bloques, ponderándolo con las toneladas estimadas (\overline{Nib}):

$$\overline{Nib} = \frac{\sum Ni * t}{T}$$

Donde Ni = grado de níquel, t = toneladas de cada bloque, T =Toneladas totales estimadas, calculada con $T = \sum t$.

Para calcular las toneladas se usó la fórmula $t = \frac{\rho * v}{1000}$, donde v es el volumen de cada bloque en metros cúbicos y ρ es la densidad de la litología asignada. Para esto, CMSA cuenta con una lista de densidades relacionadas en la tabla

Tabla 6. Densidad para cada litología.

LITOLÓGÍA	DENSIDAD
Sílice	1.5
Saprolito Verde Bajo en Mg	1.54
Saprolito Verde Alto en Mg	1.75
Peridotita Saprolitizada	2.09
Peridotita	2.61

Fuente: Cerro Matoso S.A.

Luego se hizo una comparación entre los promedios de níquel, calculando una diferencia y representando el resultado en porcentaje. A esto le llamamos *porcentaje de diferencia Ni*, en el que los valores más bajos significan que los promedios de níquel se asemejan más y, por ende, mejor estimados. Al final se generó una tabla donde se consignaron los resultados para cada dominio geológico.

$$\% \text{ Diferencia Ni} = (N_{ib} - N_{im}) * 100$$

Tabla 7. Porcentaje de diferencia Ni para cada dominio de estimación.

LITOLÓGÍA	PROMEDIO PONDERADO NI EN BLOQUES	PROMEDIO PONDERADO NI EN MUESTRAS	PORCENTAJE DIFERENCIA NI
Sílice	0.831	0.990	16%
Saprolito Verde Bajo en Mg	1.905	1.943	2%
Saprolito Verde Alto en Mg	1.445	1.670	13%
Peridotita Saprolitizada	0.805	1.016	21%
Peridotita	0.319	0.330	3%

Tomando como referencia un porcentaje máximo de 15% de diferencia, de acuerdo a los valores obtenidos se observa un ligero incremento en los valores de la Sílice, y un desfase significativo en la Peridotita Saprolitizada.

- Curvas Ley-Tonelaje

Se presentan curvas de Ley-Tonelaje para los bloques estimados en cada dominio geológico. Se graficaron las toneladas y la ley promedio de níquel para una serie de Cut-off (COG) con intervalos de 0.1, iniciando desde 0.0 y finalizando en 2.0.

Figura 50. Curva Ley-Tonelaje variable Ni en bloques estimados de Sílice.

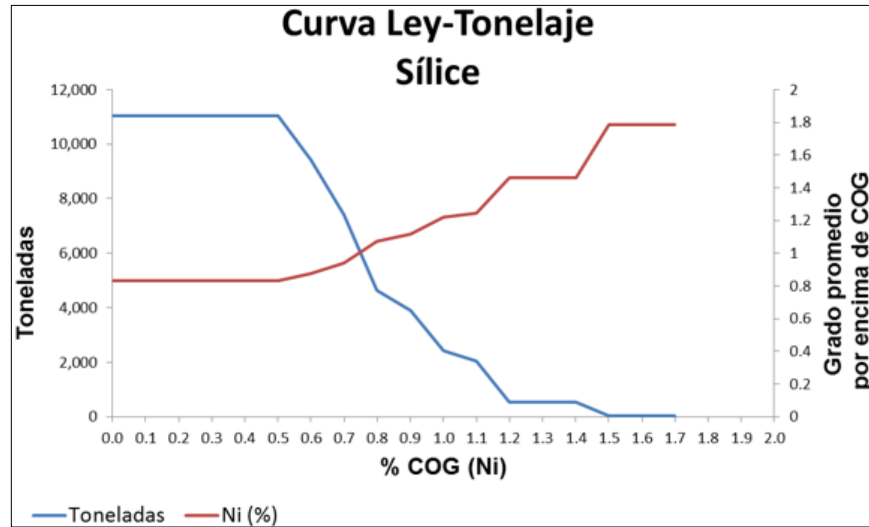


Figura 51. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Saprolito Verde bajo Mg.

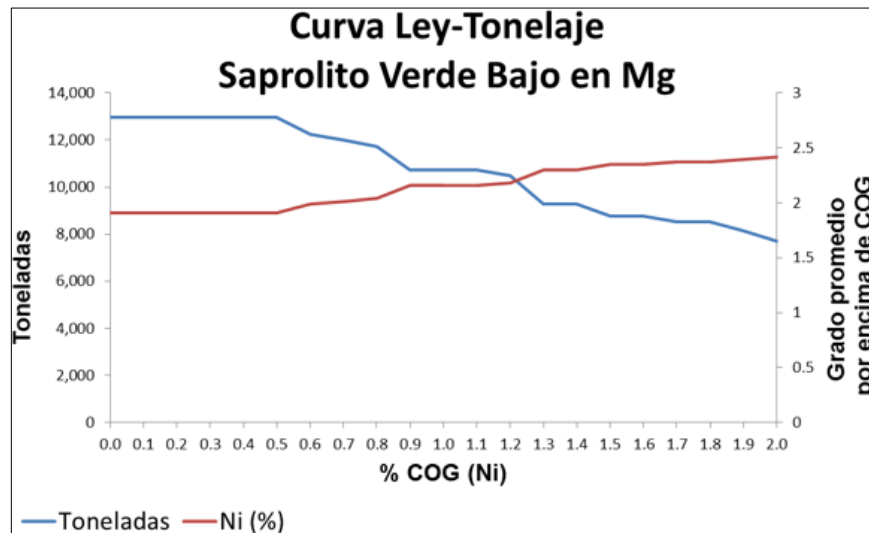


Figura 52. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Sapolito Verde alto Mg.

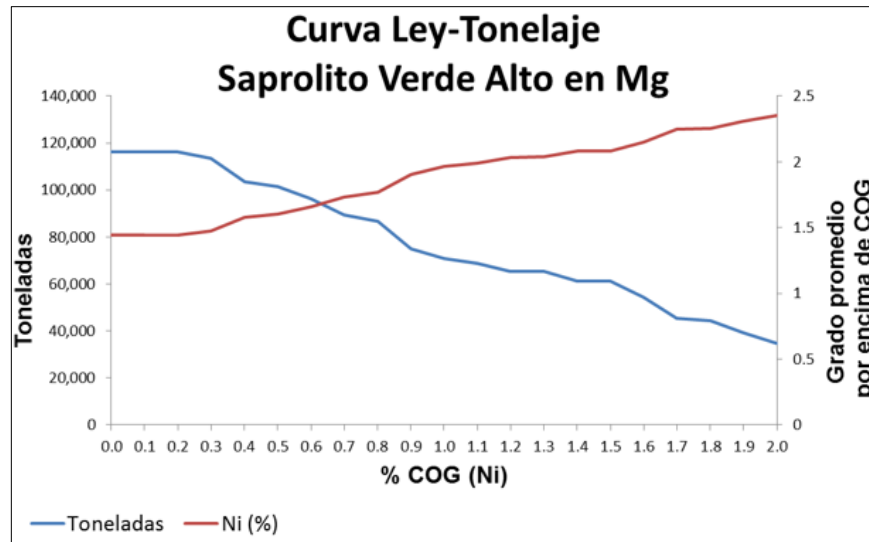


Figura 53. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Peridotita Sapolitizada.

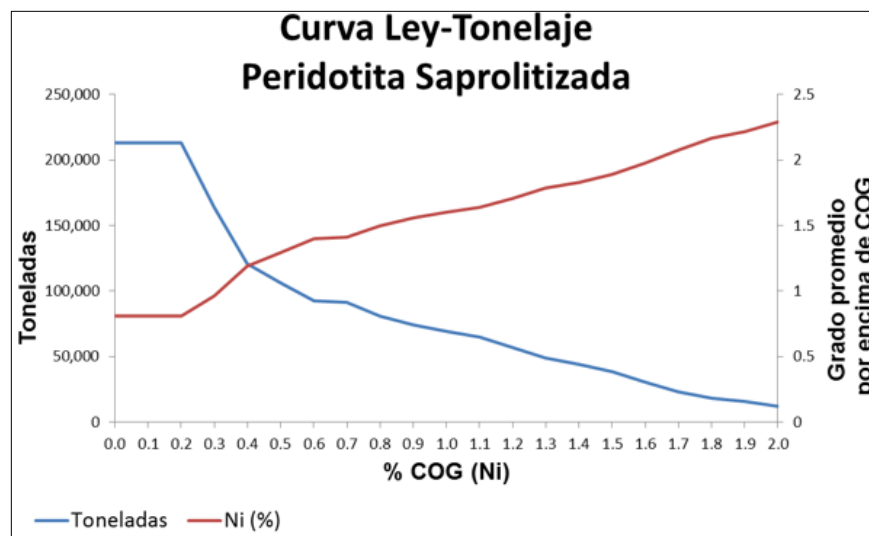
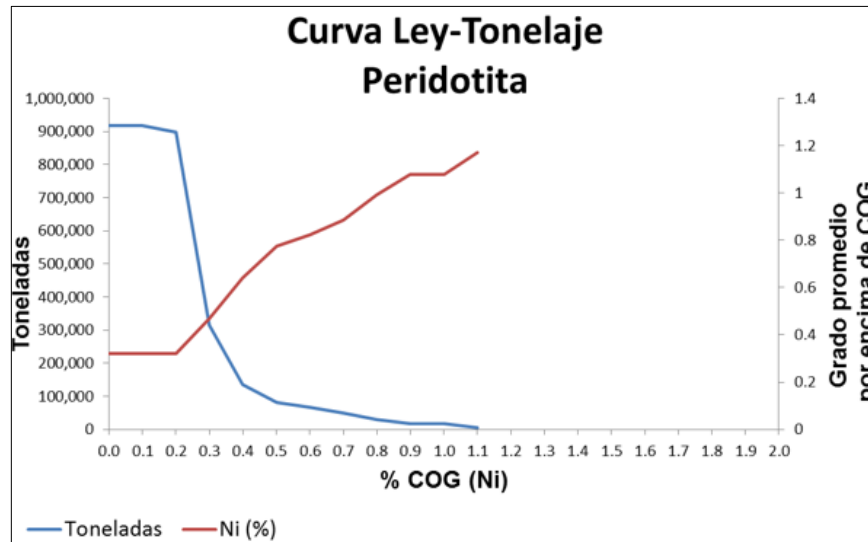


Figura 54. Curva Ley-Tonelaje para la variable Ni en bloques estimados del dominio Peridotita.



Las curvas de Ley-Tonelaje permiten establecer un punto de comparación entre la cantidad de material estimada y la cantidad real extraída. Los procesos de estimación y validación buscan reducir dicha diferencia, de modo que exista una base real de datos calculados que permitan una planificación y uso adecuado de los recursos disponibles.

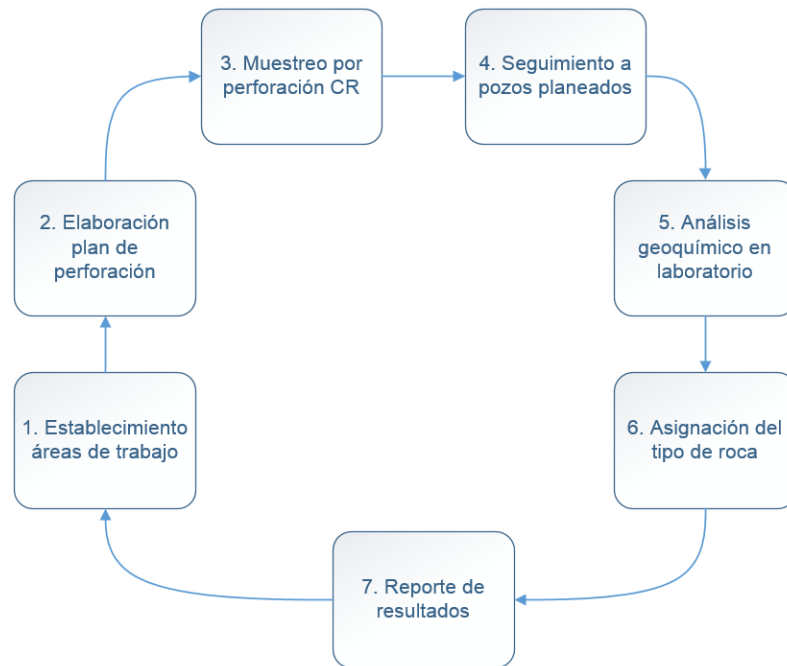
7. ACTIVIDADES DE SOPORTE AL PROGRAMA DE PERFORACIÓN DE CMSA

La Unidad de Exploración de CMSA actualmente es la encargada de la planeación y ejecución de las perforaciones para el muestreo del yacimiento. Tiene como objetivo garantizar información para la actualización del Modelo de Recursos y el Modelo de Control de Ley (MCL) de la mina. Enfocándose principalmente en este último, ya que se debe contar con el mayor porcentaje de muestreo sobre los planes de minería a corto plazo. La importancia radica en que las estimaciones del MCL deben ser confiables puesto proporcionan información vital para las decisiones que se toman sobre los bloques de minado que pretenden asegurar la disponibilidad permanente de material a la planta de producción de ferroníquel.

El desarrollo de la perforación se encuentra enmarcado en un ciclo que inicia desde la determinación de áreas y la planeación de pozos, hasta su ejecución y validación final de los datos obtenidos en donde un experto asigna a las muestras recolectadas una litología correspondiente, basado en la descripción geológica y el análisis geoquímico (Figura 55). El éxito está determinado por la calidad de la información, el porcentaje de muestreo en las áreas del plan minero y la definición de zonas con potencial. La perforación que se usa habitualmente en la mina es por circulación reversa, sin embargo pueden desarrollarse campañas eventuales de perforación diamantina con objetivos específicos.

Las actividades de planeación sobre las cuales se centra este trabajo se condensan en la producción de un *plan de perforación semanal* que establece las directrices para el desarrollo de la operación en campo, la cual a su vez es controlada en un seguimiento a los pozos propuestos.

Figura 55. El ciclo de trabajo en la Unidad de Exploración de CMSA



7.1. PLAN DE PERFORACIÓN

7.1.1. Determinación de áreas de muestreo

- Áreas plan de minado

La selección de las áreas de trabajo inicia con la entrega del plan de minado por parte del grupo de Planeación Mina. Corresponde a un modelo cuyos bloques están previstos a ser extraídos a lo largo del siguiente año financiero¹⁰ (FY) (Figura 56). Este modelo recibe un tratamiento mediante macroinstrucciones¹¹ para proyectarse a superficie y generar polígonos que sirvan como representación bidimensional de

¹⁰ Un año financiero o Financial Year (FY) es un periodo de 12 meses usado para calcular informes financieros en empresas y otras organizaciones en todo el mundo.

¹¹ Las macroinstrucciones son comandos de texto a modo de lenguaje de programación que sirven para efectuar múltiples procesos en un software de manera organizada.

los bloques, los cuales pueden ser visualizados y manipulados en software relacionados a sistemas de información geográfica (Figura 57).

Figura 56. Vista 3D del plan de minado FY16 de CMSA en el software Datamine. En gris la topografía de la mina, y en colores los bloques de minado.

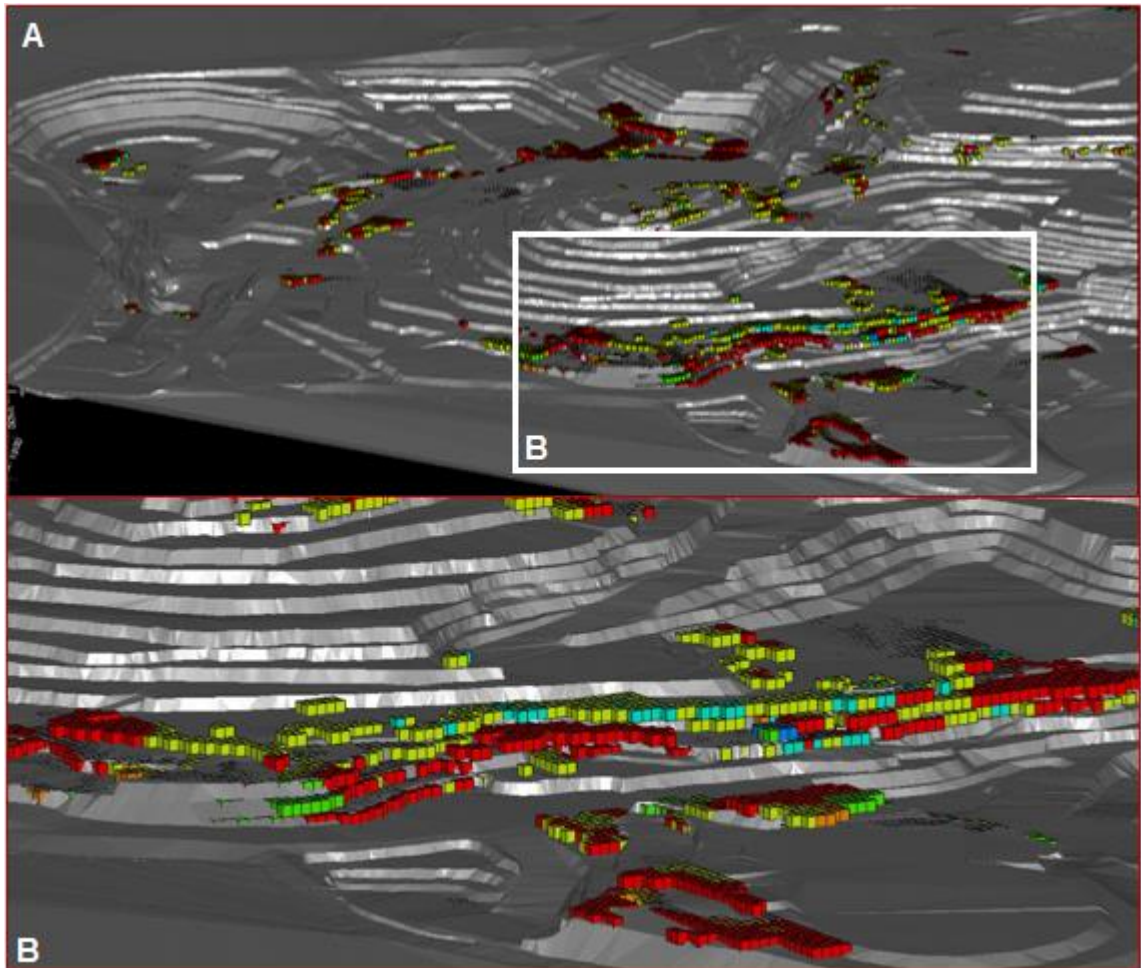
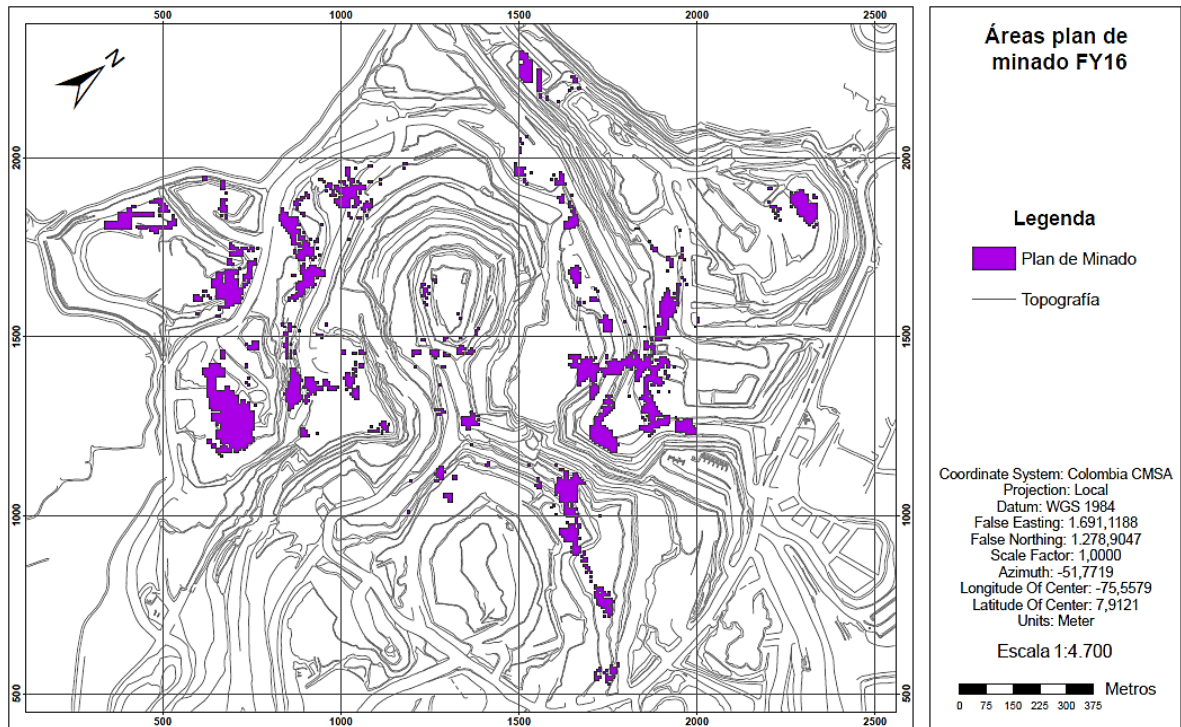


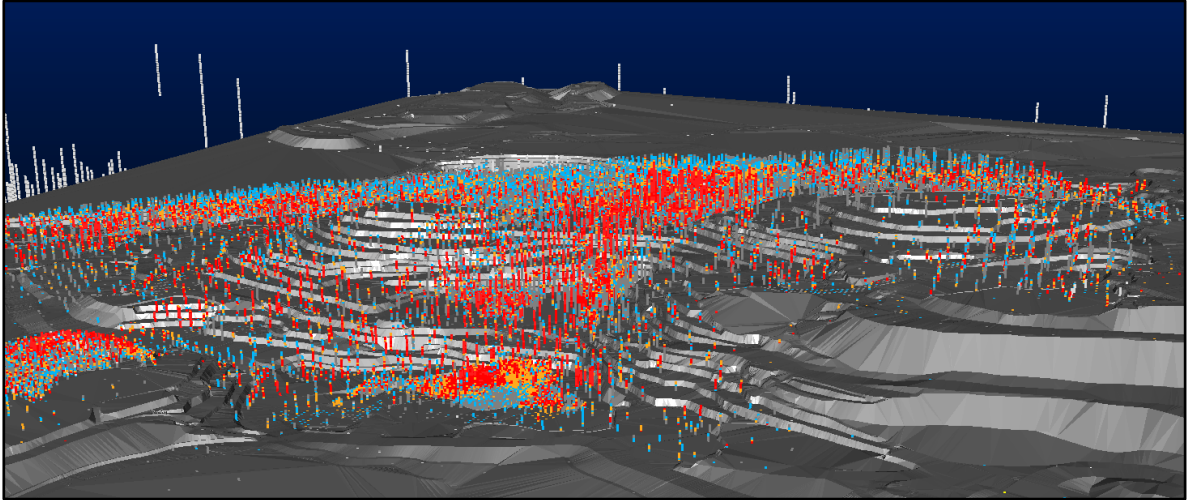
Figura 57. Vista 2D del plan de minado FY16 de CMSA en el software ArcGIS.



- Áreas con mineralizaciones conocidas (datos geoquímicos)

Luego de enfocarse en las áreas de minado, lo conveniente es identificar qué sub-áreas pertenecientes o no al plan son las más interesantes de acuerdo al contenido de níquel. Con esto se busca establecer un control a las zonas mineralizadas que permita definir a partir de los datos de perforaciones históricas, áreas de mayor y menor relevancia. Los datos de pozo recopilados también evidencian aquellos lugares que nunca han sido perforados.

Figura 58. Vista 3D del archivo de pozos histórico de la Unidad de Exploración. En gris la topografía de la mina, los colores representan la variación del contenido de níquel.



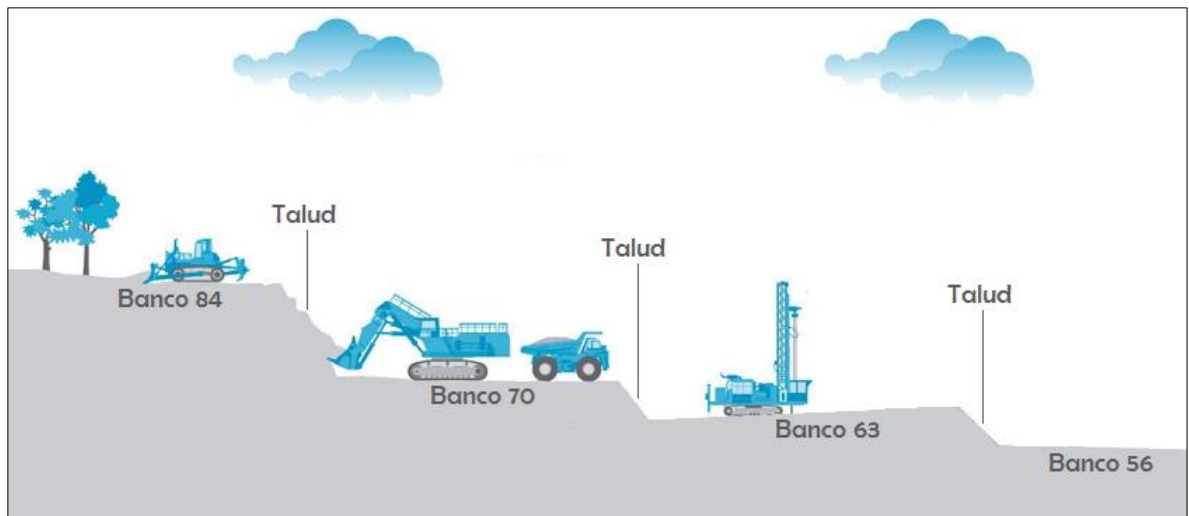
- Áreas con potencial de mineralización

Si bien la geoquímica representa una gran ayuda para enfocarse en las zonas con mayor potencial mineral, es necesario determinar a qué comportamiento litológico y estructural está asociada la mineralización. Históricamente los saprolitos verdes han tenido las mayores concentraciones de níquel. Sin embargo, en algunas ocasiones, cabe la posibilidad de encontrar peridotitas saprolitizadas con alto grado o inclusive peridotitas aparentemente estériles con valores considerables. Lo que se podría explicar, por ejemplo, con el contenido de venas de garnierita. Para resolver este tipo de inquietudes las descripciones de ripios que contienen información textural y mineralógica son de gran ayuda. Aún mejor el mapa geológico es una herramienta esencial que permite hacer inferencias y lecturas rápidas de las zonas estableciendo ciertos criterios.

Un aspecto a destacar es que la cartografía en una mina es diferente a la convencional. En minas a tajo abierto como Cerro Matoso se cartografían solo los frentes o taludes de los bancos (Figura 59). Esto tiene una razón lógica y es que

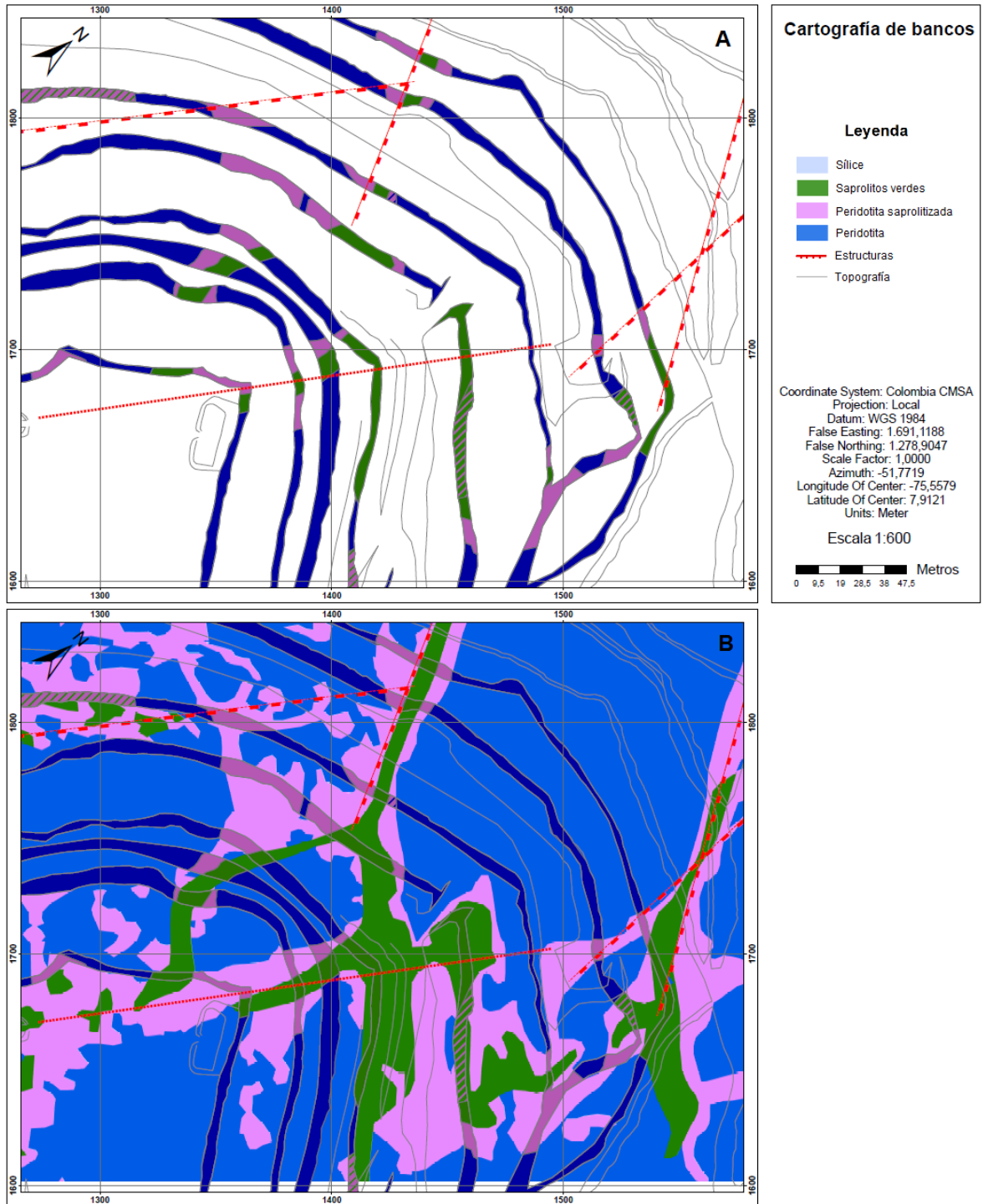
son los únicos afloramientos de roca donde con certeza se encuentra el material in situ. El piso de los bancos sirve como vía de vehículos pesados y livianos por lo que generalmente se encuentran cubiertas por materiales para su adecuación. Particularmente para completar la cartografía de la mina se usa el método de proyecciones (Figura 60). Si se cuenta con la cartografía de bancos cercanos y se conoce el control estructural que condiciona los patrones de alteración se pueden establecer correlaciones litológicas para determinar las zonas no cartografiadas.

Figura 59. Disposición de los bancos en una mina a tajo abierto.



Debido al avance de la minería, la topografía sufre cambios constantes por lo que periódicamente se deben hacer actualizaciones de la cartografía de modo que se cuente con información confiable a la hora de ejecutar labores de planeación.

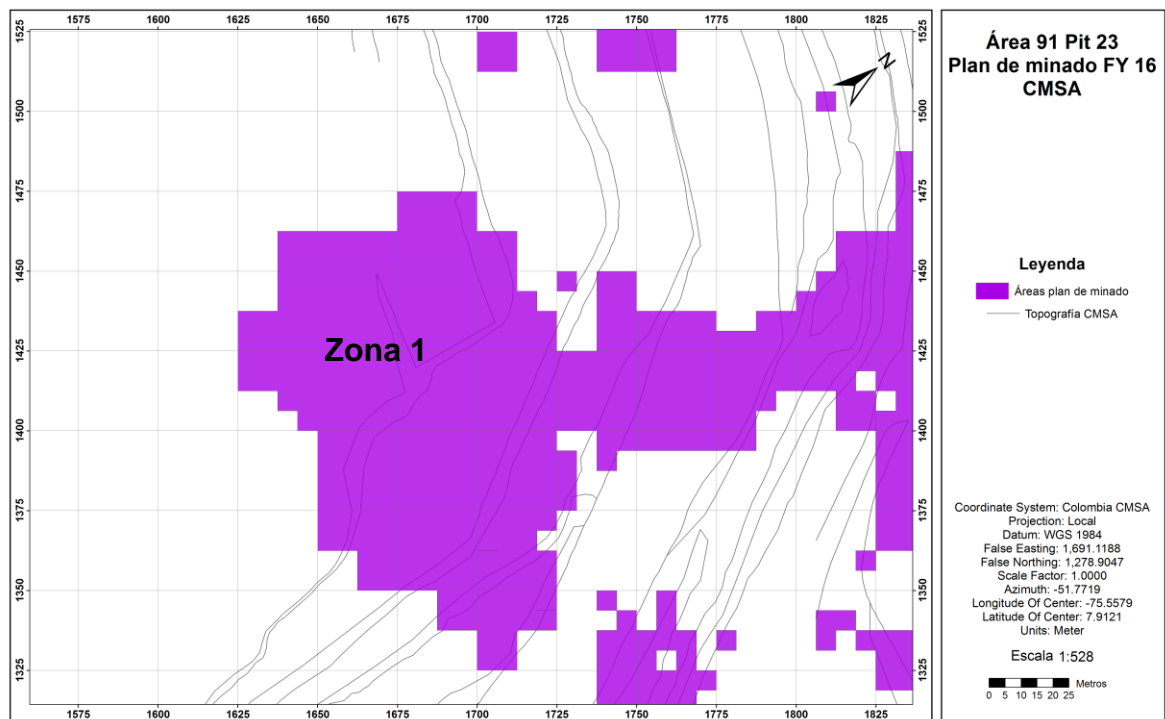
Figura 60. (A) Cartografía de bancos. (B) Cartografía geológica proyectada.



Metodología

Considérese el banco 91 del pit 23 como ejemplo de área a muestrear. Se encuentra programada para ser minada en el FY16. El área de intersección entre el perímetro correspondiente plan de minería y el perímetro que limita el banco 91, constituye lo que se puede denominar en orden de prioridad como la Zona 1 de muestreo (Figura 61).

Figura 61. Área de minado en el Banco 91 del Pit 23.

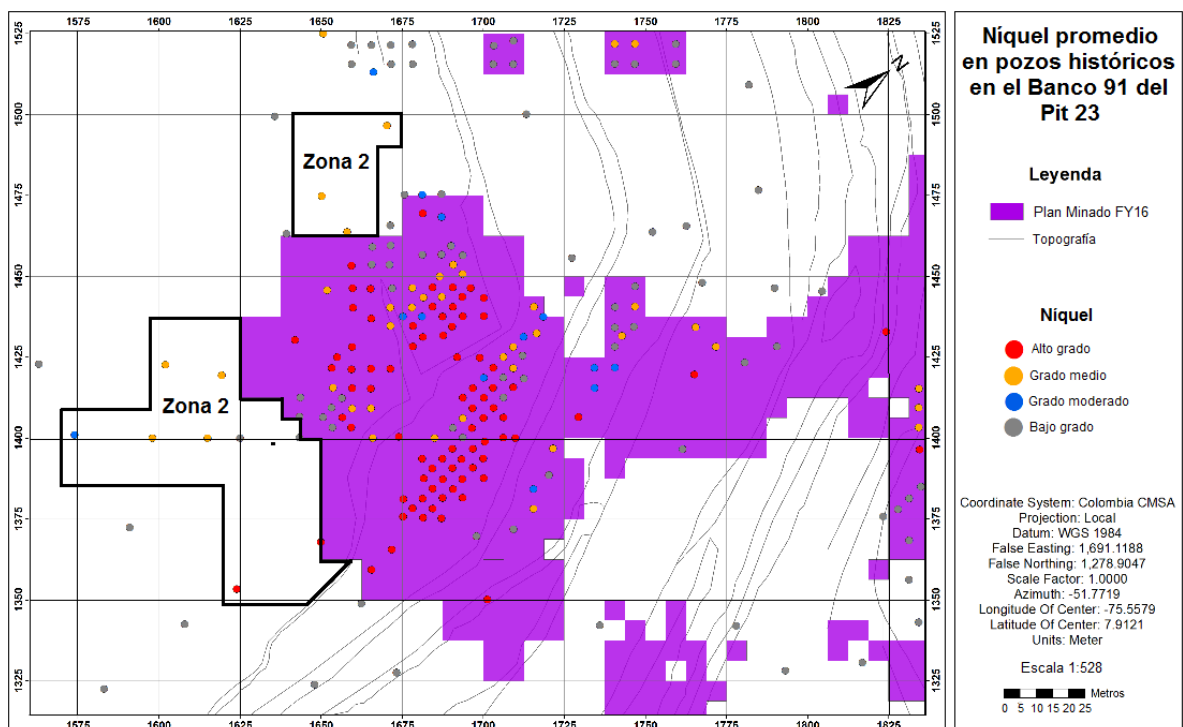


Posteriormente se visualizan los valores de níquel de las muestras recolectadas en campañas de perforación anteriores para este mismo lugar o en zonas aledañas. En un ejercicio más riguroso, se toman en cuenta por lo menos tres variables: níquel (Ni) y sílice (SiO₂) por un lado, cuyos valores se comportan a menudo proporcionales entre sí; y óxido de magnesio (MgO) cuyo valor tiende a ser

inversamente proporcional a los valores de Ni y SiO₂. En este caso y para efectos prácticos se hace énfasis directamente en la variable de mayor interés, níquel.

En la figura tal aparecen superpuestos los valores de níquel promedio en cada pozo perforado en el área, representados mediante círculos de color rojo, amarillo, azul y gris, que indican alto, medio, moderado y bajo grado respectivamente. Teniendo como base la Zona 1, se procede a definir prospectos en los alrededores que puedan manifestar valores atractivos de níquel clasificados como Zona 2 (Figura 62).

Figura 62. Níquel promedio en pozos históricos en el Banco 91 del Pit 23.



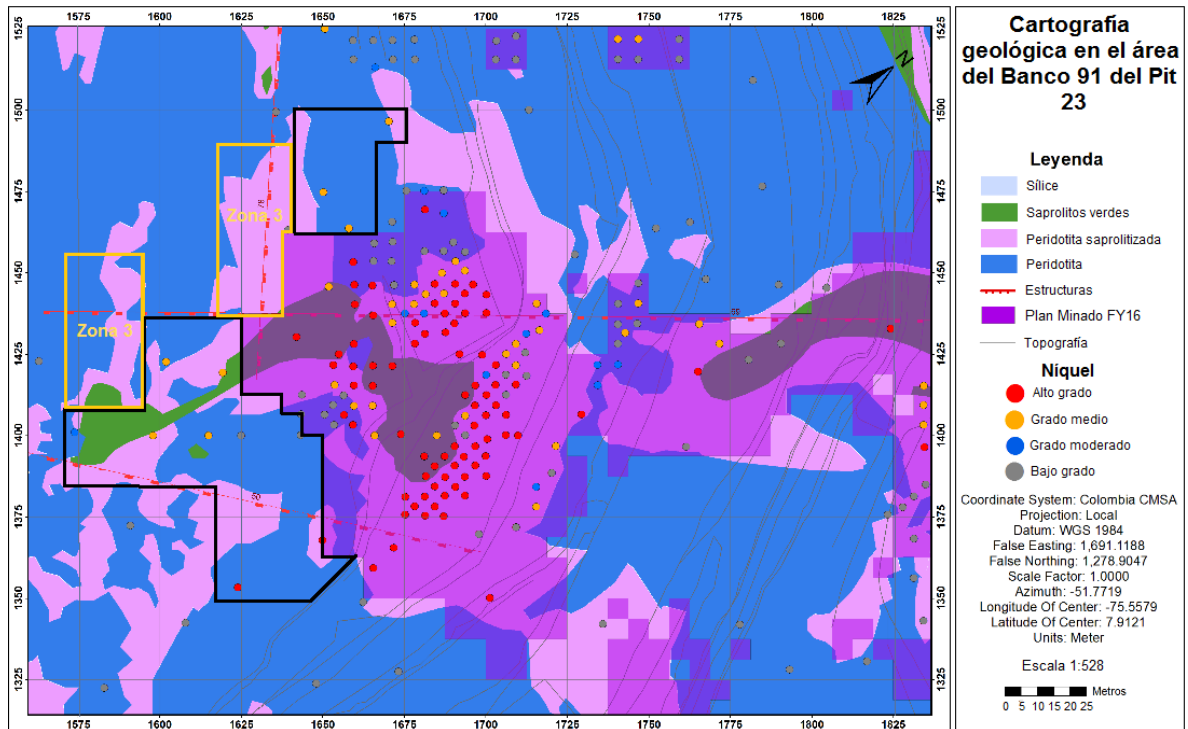
Cuando se agrega un tercer escenario con la cartografía geológica, se puede corroborar si existe relación entre lo que se definió como un prospecto y el

comportamiento litológico y estructural de la zona. De ese modo los perímetros denominados como Zona 2 pueden ganar o perder atractivo.

Cabe resaltar que después de 30 años de desarrollo minero, el contexto actual de Cerro Matoso es muy diferente a los espesores litológicos continuos en pseudoestratificación que caracterizaron el depósito por años. La mineralización hacia el fondo del depósito es más restringida, encontrándose asociada a zonas de fuerte control estructural. Esta idea permite que la cartografía sea usada para definir otros perímetros en aquellos lugares donde no se ha perforado o donde hay poca densidad de datos.

En el caso propio, la Zona 1 y Zona 2 previamente definidas coinciden con la manifestación de roca alterada (bien sea saprolito o peridotita saprolitizada) y parte de las estructuras cartografiadas. Además, también es posible establecer nuevos perímetros que no han sido muestreados y que de acuerdo a la cartografía tienen cierto potencial. Es el caso de la Zona 3 (Figura 63). El banco 91 del pit 23 se distingue por presentar una potente mineralización en forma de “tabaco” asociada a grandes estructuras que atraviesan la dirección preferencial del cerro.

Figura 63. Cartografía geológica en el área del Banco 91 del Pit 23.

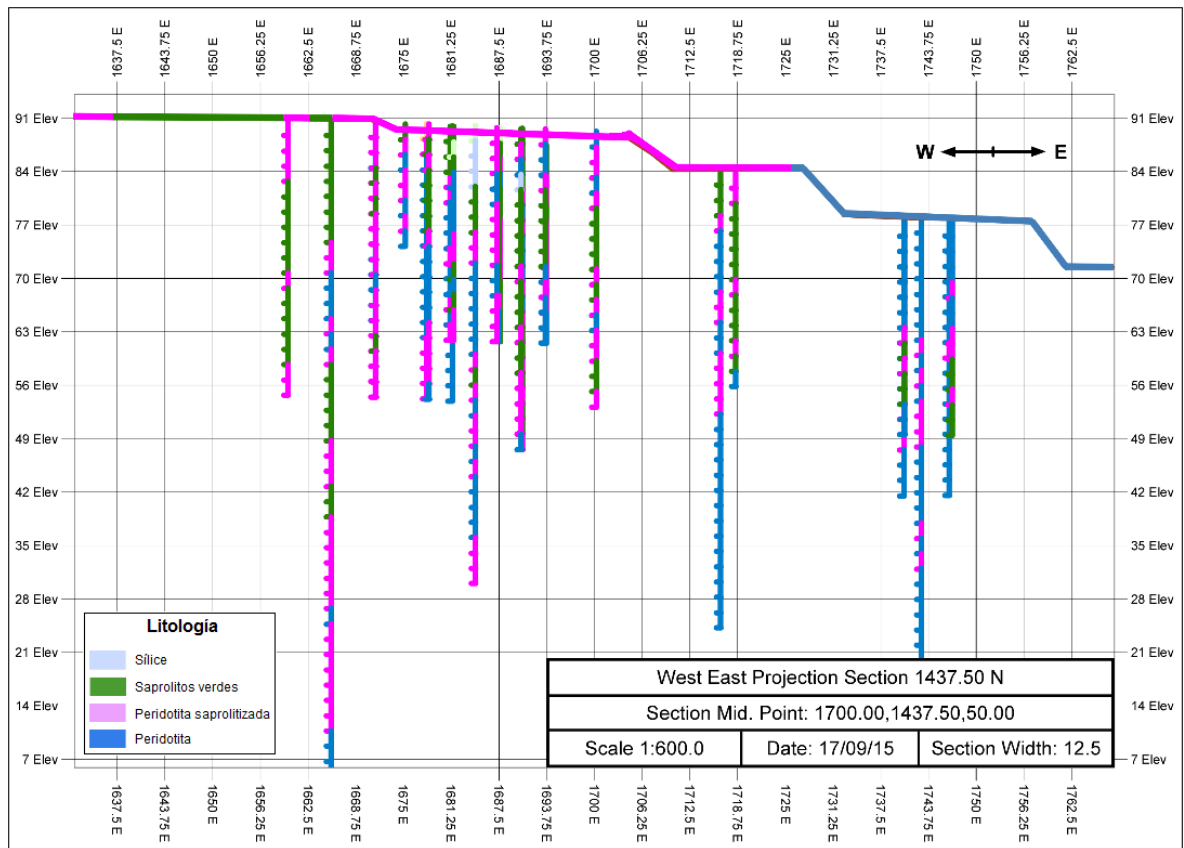


7.1.2. Secciones e interpretación

Una vez definidas las áreas a muestrear se procede a la elaboración de secciones con el objetivo de interpretar el comportamiento geológico a profundidad tomando las perforaciones existentes como soporte. Es por esto que las secciones están supeditadas a la densidad de datos. Normalmente se orientan perpendiculares a las estructuras presentes, en caso de que las haya.

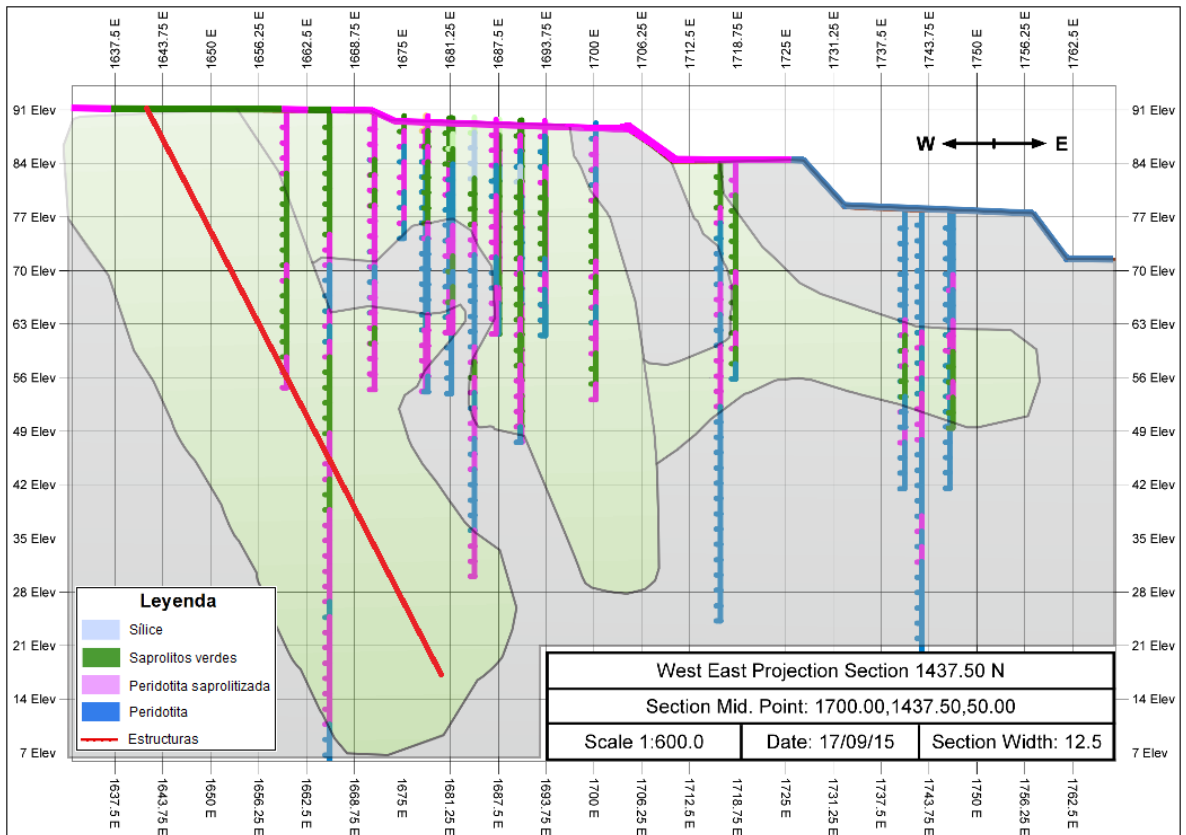
La Figura 34 corresponde a una sección donde se visualizan los pozos con las litologías correspondientes a cada uno de los intervalos de muestreo. También es posible observar la litología de acuerdo a la cartografía geológica en el trazo topográfico.

Figura 64. Sección con litología por intervalo de muestreo en pozos perforados, y cartografía.



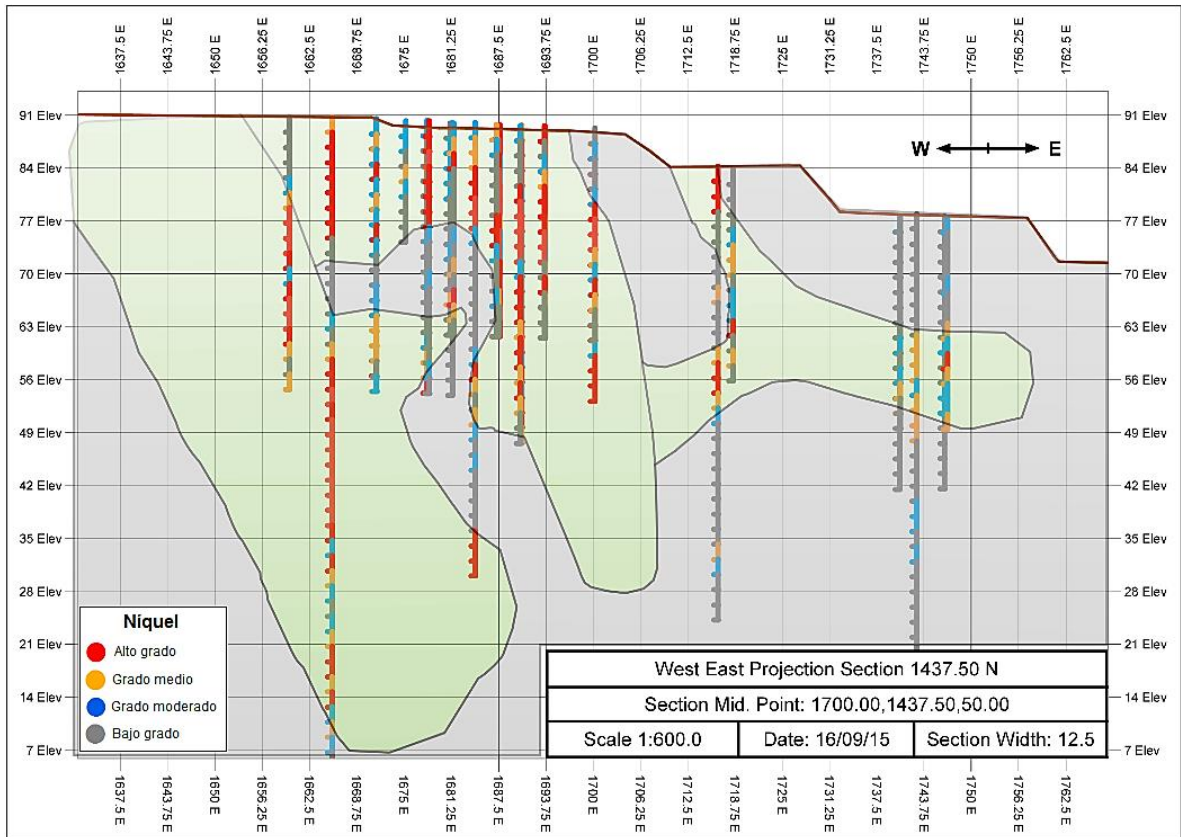
Sobre las secciones que se obtienen se realiza una delimitación macro para identificar y diferenciar la roca alterada de la roca fresca. Se consideran y grafican los datos estructurales con el objetivo de verificar si la orientación de los cuerpos de roca obedece a las estructuras conocidas o se encuentra influenciada por otro factor (Figura 65). Debido a la alta variabilidad litológica del depósito la delimitación de estos cuerpos no es totalmente precisa, no obstante de acuerdo a la calidad de la interpretación suele tener un margen de error menos al 15%.

Figura 65. Interpretación del comportamiento litológico en profundidad.



La interpretación litológica debe ser confrontada con la geoquímica de las muestras. La Figura 36 muestra una estrecha relación entre el alto grado de níquel y los saprolitos. El hecho de encontrar peridotita saprolitizada con alto grado de níquel puede indicar en principio dos posibles causas: un enriquecimiento por silicatos hidratados de níquel dispuestos en vetillas; o una mezcla litológica producto de la transición entre materiales de alteración. Uno de los objetivos del muestreo es capturar evidencias que permitan comprender las características propias de las diferentes zonas del depósito. La interpretación resultante es la base para la asignación de profundidades y la optimización los metros de perforación disponibles.

Figura 66. Confrontación de la interpretación litológica con grado de níquel.

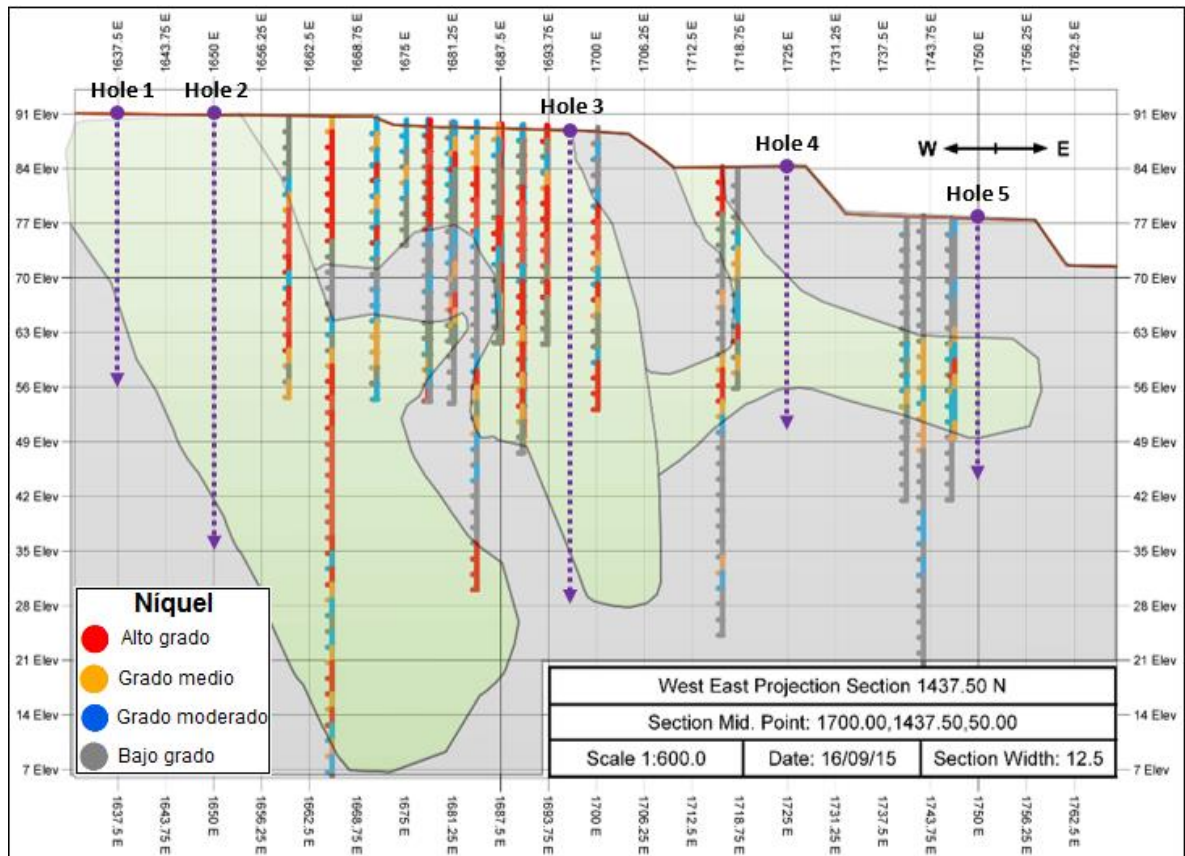


7.1.3. Ubicación de pozos y asignación de profundidades

En la etapa de ubicación de pozos a perforar se tienen en cuenta como límites espaciales las zonas definidas con anterioridad respetando la prioridad que se les ha asignado. La cantidad de pozos planeados depende de la extensión de dichas áreas, los metros de perforación disponibles y la malla de muestreo que se utilice (distancia entre pozos). Generalmente en zonas de mayor interés se muestrea usando una malla más cerrada. En aquellos lugares que no tienen potencial pero que necesitan ser corroborados se utiliza una malla más amplia. Considerando las posibles interpretaciones que puedan surgir de las diferentes secciones que se realizan para el análisis de un área, se determina la profundidad promedio a la cual deben llegar los pozos. El objetivo es orientar las perforaciones para que logren dar

con el material mineralizado. Es posible que se asigne un metraje de perforación excedente en cada pozo llegando a perforar unos cuantos metros el estéril que se encuentra por debajo del cuerpo alterado con el fin de tener mayor certeza en el control de las mineralizaciones.

Figura 67. Planeación de pozos y asignación de profundidades.



Es común que habiendo llegado el último intervalo de muestreo, el grado de níquel sea significativamente alto, lo que sugiere que la mineralización continúa a profundidad desconociendo sus dimensiones finales. En estos casos el geólogo en campo puede determinar con base en las muestras de ripio a qué profundidad debe llegar un pozo. También puede presentarse el caso en el que un pozo se planea a

altas profundidades sin tener resultados positivos. Por esta razón, la buena delimitación e interpretación de los cuerpos mineralizados garantiza un rendimiento más acertado que supone un ahorro en gastos operativos

Por último, los pozos planeados son consignados en un formato con información básica necesaria, como el nombre del pozo, la profundidad planeada, el área al que pertenece y las coordenadas de localización, tal como se muestra en la Tabla 5. Este es un ejemplo bastante sencillo y simplificado del formato real del plan de perforación que incluye múltiples variables como el tiempo de ejecución de cada proceso, los traslados programados y mantenimiento de maquinaria, datos estadísticos de los metros de perforación por intervalo de tiempo, entre otras.

Tabla 8. Formato básico del plan de perforación.

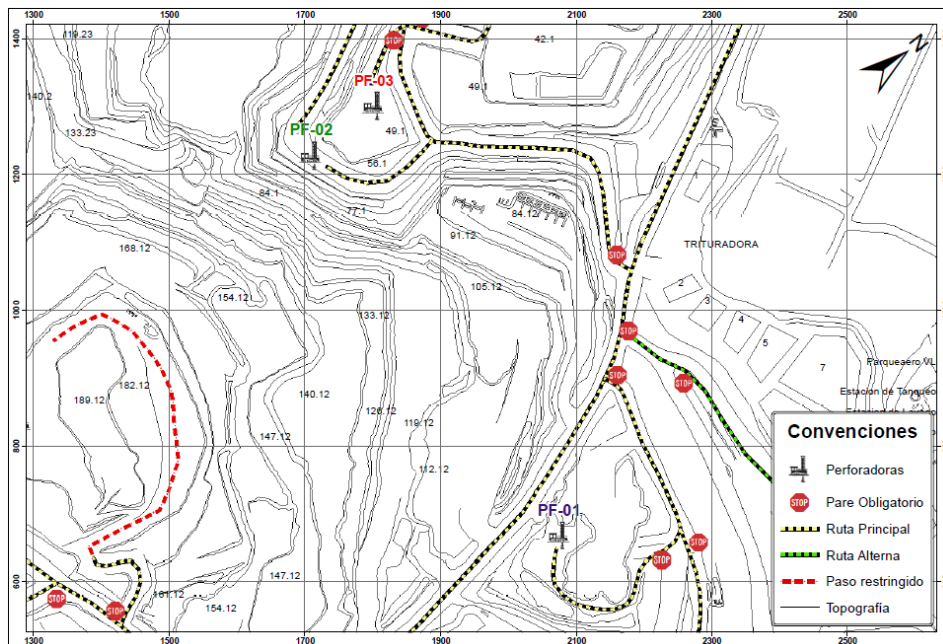
Pozos	Profundidad Planeada	Área	Localización		
			X	Y	Z
Hole 1	35	Banco 91 Pit 23	1637.5	1437.5	91
Hole 2	56	Banco 91 Pit 23	1650	1437.5	91
Hole 3	63	Banco 91 Pit 23	1696	1437.5	91
Hole 4	35	Banco 84 Pit 23	1725	1437.5	84
Hole 5	35	Banco 77 Pit 23	1750	1437.5	77

7.1.4. Información adicional

La divulgación del plan de perforación semanal incluye mapas de localización de los puntos que fueron planeados y consignados en el formato, así como también información operativa en mapas de tráfico donde se ilustran las rutas disponibles para la movilización de todos los equipos que intervienen en la operación, desde maquinaria para la adecuación de áreas, hasta perforadoras y vehículos livianos (Figura 68).

El grupo de ejecución de la Unidad de Exploración es el encargado de hacer una subdivisión del plan de perforación en donde seleccionan los pozos que se perforan por día de acuerdo al criterio técnico y operativo, y las actividades necesarias para llevar a cabo los objetivos planteados de manera eficaz y bajo todo el estándar de seguridad implementado en la compañía.

Figura 68. Plan de tráfico generalizado de la Unidad de Exploración.



7.2. SEGUIMIENTO Y CONTROL DE POZOS PLANEADOS

En el transcurso de la semana programada los geólogos de campo y el personal de ejecución reportan de manera diaria el avance del plan. Toda la información es almacenada en bases de datos que registran aspectos relacionados al estado de los pozos planeados (Tabla 9).

Desde la adecuación de terrenos conforme a los requerimientos de las perforadoras y demás maquinaria que intervenga en el desarrollo de las actividades hasta la

ubicación de los pozos planeados en campo y la realización de los mismos, es consignado en un reporte diario donde se relaciona la fecha de cada movimiento. Las clasificaciones que pueden atribuirse a un pozo y que son manejadas en este tipo de reportes son las siguientes:

Pozo **Ubicado**: se ha realizado una adecuación del área y se ha colocado un marcador con el nombre del pozo planeado en la coordenada correspondiente, indicando su habilitación para ser perforado.

Pozo en **Stand By**: Su ubicación y adecuación no ha sido exitosa. Puede deberse a dos motivos catalogados como: *Stand By por Operación*, debido a complicaciones topográficas, condiciones inapropiadas del terreno, disponibilidad de equipos o requerimientos por parte de otras unidades de trabajo; *Stand By por Planeación*, debido a decisiones tomadas en el transcurso del plan de acuerdo a las características geológicas reportadas por los geólogos de campo a partir de descripción de rípios y lecturas parciales de níquel con herramientas de análisis químico portátil.

Pozo **Perforado**: La perforación del pozo y el muestreo se han completado exitosamente, las muestras han sido descritas por los geólogos de campo y enviadas al laboratorio.

El *estado* de los pozos es constantemente monitoreado de acuerdo a las fechas consignadas para cada proceso.

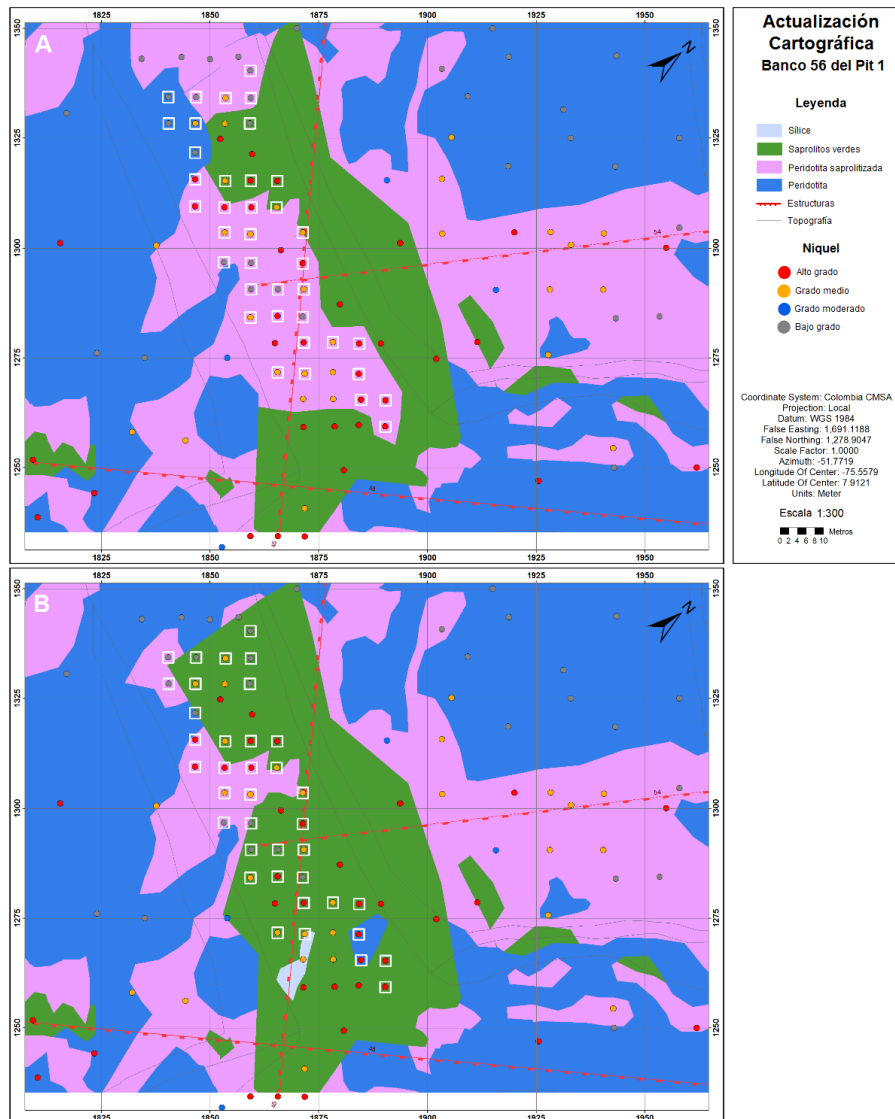
Tabla 9. Base de datos generalizada de seguimiento a pozos de la Unidad de Exploración.

POZO	AREA	Estado	Planeación del pozo	Stand By por Operación	MOTIVO	Ubicado	Stand By por Planeación	Perforado
Hole 1	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		17/03/2015
Hole 2	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		18/03/2015
Hole 3	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		18/03/2015
Hole 4	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		18/03/2015
Hole 5	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		18/03/2015
Hole 6	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		18/03/2015
Hole 7	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		17/03/2015
Hole 8	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		19/03/2015
Hole 9	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		19/03/2015
Hole 10	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		19/03/2015
Hole 11	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		18/03/2015
Hole 12	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		20/03/2015
Hole 13	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		19/03/2015
Hole 14	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		20/03/2015
Hole 15	168 Pit 2	Perforado	09/01/2015			09/01/2015		12/01/2015
Hole 16	91 Pit 2	Ubicado	15/01/2015			19/01/2015		
Hole 17	91 Pit 2	Stand By	15/01/2015	19/01/2015	Talud			
Hole 18	91 Pit 2	Perforado	15/01/2015			19/01/2015		23/01/2015
Hole 19	91 Pit 2	Perforado	15/01/2015			19/01/2015		24/01/2015
Hole 20	91 Pit 2	Ubicado	15/01/2015			19/01/2015		
Hole 21	91 Pit 2	Ubicado	15/01/2015			19/01/2015		
Hole 22	91 Pit 2	Stand By	15/01/2015	16/01/2015	adecuación complicada			
Hole 23	91 Pit 2	Perforado	19/01/2015			19/01/2015		22/01/2015
Hole 24	91 Pit 2	Perforado	19/01/2015			20/01/2015		22/01/2015
Hole 25	91 Pit 2	Perforado	19/01/2015			19/01/2015		22/01/2015
Hole 26	91 Pit 2	Stand By por Geología	19/01/2015			19/01/2015	21/01/2015	
Hole 27	91 Pit 2	Perforado	19/01/2015			19/01/2015		22/01/2015
Hole 28	91 Pit 2	Perforado	19/01/2015			19/01/2015		22/01/2015
Hole 29	91 Pit 2	Perforado	19/01/2015			19/01/2015		22/01/2015

La información geológica también es recopilada durante el desarrollo de un plan. La descripción de ripios de los pozos perforados detalla las principales características físicas de los materiales recolectados lo que implica una verificación y actualización de la cartografía preliminar.

En la Figura 39 se muestra un ejemplo para el área del banco 51 del Pit 1 en el que con base en la descripción litológica del primer intervalo de muestra obtenido en diferentes pozos planeados y perforados, se realizan ajustes en la cartografía de la zona.

Figura 69. (A) Cartografía preliminar. (B) Cartografía actualizada usando la litología del primer intervalo de muestreo en pozos perforados.



7.3. INDICADOR DE MUESTREO

Una forma de conocer el avance de las perforaciones y el muestreo sobre las áreas del plan de minado es mediante el cálculo de un indicador. Sirve para visualizar los lugares que han sido intervenidos y los que no, además de proveer información sobre las zonas de las cuales ya se tiene caracterización química y litológica y su

correspondiente validación, y aquellas que ya se han perforado pero carecen de información completa. Esto se debe al flujo intrínseco de los procesos, en el que los análisis químicos de las muestras pueden demorar o la validación de la información se encuentra en desarrollo.

El indicador de áreas tiene una periodicidad mensual y es una de las herramientas que evalúan la evolución en el desarrollo de las metas de perforación y muestreo establecidas al comienzo de un año financiero. Para efectuar el cálculo es necesario partir del área total de minado y efectuar los siguientes procedimientos:

- Descontar los bloques que se encuentran por encima de la topografía (Corte con topografía actual)

Puede pasar que el modelo de bloques correspondiente al plan de minado de un año financiero tenga bloques solitarios cuyo centroide se encuentre por encima de la topografía vigente (Figura 70). Esto indica que el material de la mina que corresponde a dichos bloques ha sido removido antes del tiempo para el cual se encontraba programado, obligando a descontar las áreas donde se ubican (Figura 71). En el caso en el que existan bloques por encima de la topografía pero hagan parte de una columna de bloques en donde algunos se encuentren aún por debajo de la topografía, esta área no será descontada puesto indica que todavía cuenta con material programado para minar.

Figura 70. Ejemplo de bloque solitario por encima de la topografía.

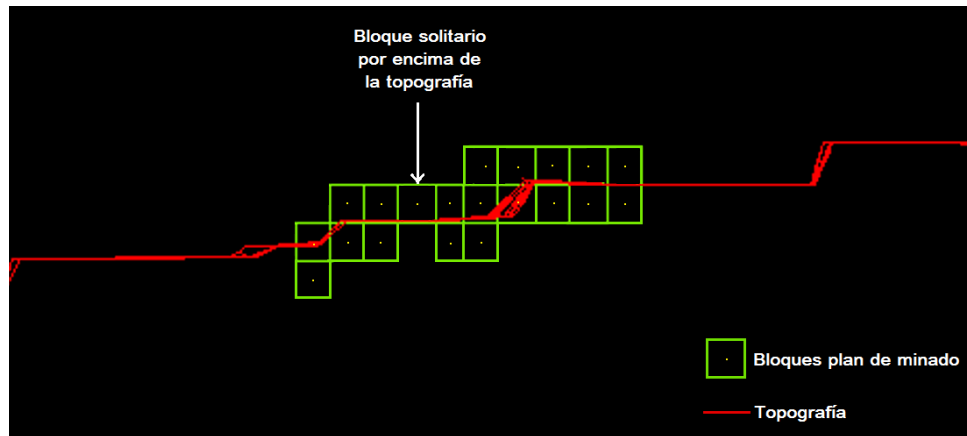
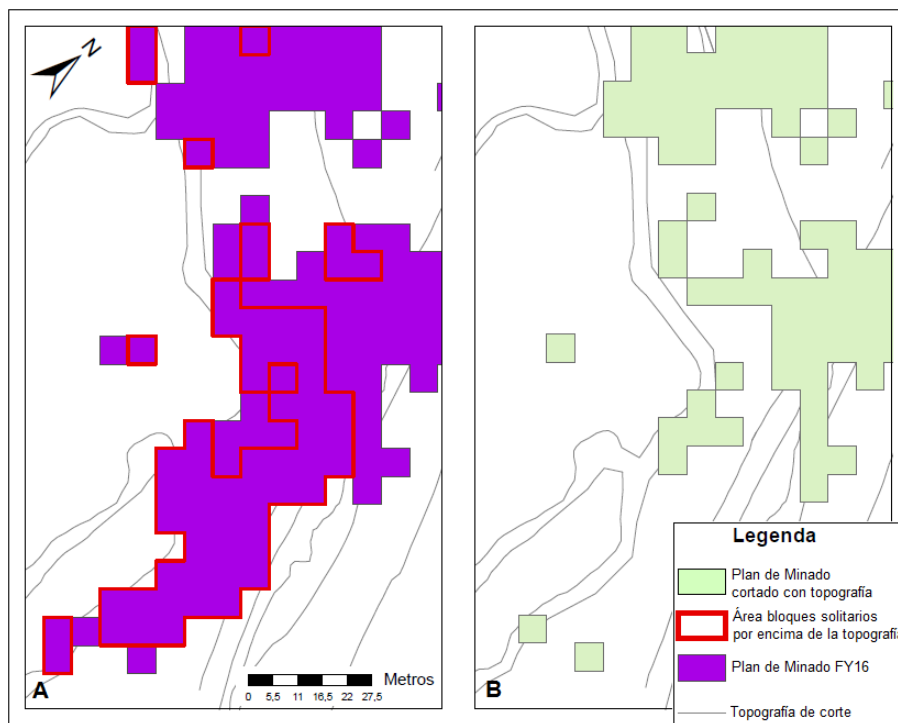


Figura 71. (A) Plan de Minado FY16 original para un sector de la mina. (B) Plan de Minado FY16 cortado con topografía para el mismo sector.



- Descontar las áreas que han sido muestreadas

Una vez se tiene el plan de minado cortado con la topografía vigente es necesario descontar aquellas áreas que han sido perforadas y cuyas muestras recolectadas ya tienen caracterización química y litológica con su correspondiente validación.

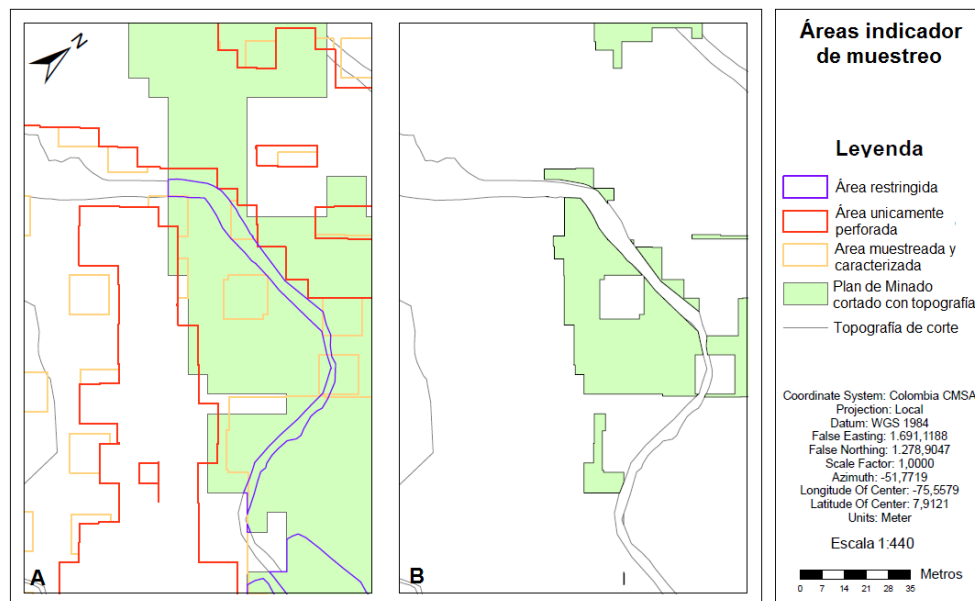
- Descontar las áreas que han sido únicamente perforadas

Las áreas que han sido perforadas pero cuyas muestras no han sido sometidas a los análisis correspondientes o se encuentran en proceso de validación, se deben descontar puesto a pesar de lo anterior ya han sido intervenidas.

- Decontar las áreas que están restringidas

Algunas de las áreas del plan de minería pueden encontrarse sobre sitios restringidos en la mina en donde momentaneamente no es posible realizar el proceso de perforación y muestreo, las más comunes son aquellas de difícil acceso como bancos angostos. También se pueden presentar restricciones en aquellos sitios donde hay bermas divisorias, canales activos o reservorios de agua.

Figura 72. (A) Criterios por tipo de área a descontar del plan de minado cortado con la topografía. (B) Área resultante del plan de minado cortado con topografía.



Resultados

La tabla 7 relaciona las hectareas totales del plan original de minado del FY16 y los correspondientes descuentos que se hacen según los criterios mencionados anteriormente, tomando como fecha de corte el 11 de junio de 2015. Para ese momento el 69% del área real (11,56 Ha) se encontraba intervenida teniendo solo el 65% del área muestreada, es decir caracterizada completamente tanto química como litológicamente. Finalmente el área faltante por intervenir es el 12,19%, que de llevarse a cabo completamente alcanzaria el 81,19% total y posible sobre el área real considerando que el 18.81% de ésta no se encuentra disponible.

Tabla 10. Resultados del indicador de muestreo calculado a fecha de corte 11 de junio de 2015.

INDICADOR DE ÁREAS MINA			
	Junio 11 2015		
	Ha	% No Intervenido	% Intervenido
Area Original Plan Minado FY16	13,86	100%	0%
Area real (corte con topografía a fecha de corte)	11,56	83%	0%
Area Real - Área muestreada	4,10	35%	65%
(Área real - Área muestreada) - Área Perforada	3,59	31%	69%
Área por intervenir <i>DISPONIBLE</i>	1,41 (12,19% del área real)		
Área por intervenir <i>NO DISPONIBLE</i>	2,18 (18,85% del área real)		

8. CONCLUSIONES

El modelamiento geológico permitió determinar los volúmenes de las litologías presentes en el bloque obteniendo 9861.11 m³ de Sílice, 9279.51 m³ de Saprolito Verde bajo Mg, 83498.26 m³ de Saprolito Verde alto Mg, 205720.48 m³ de Peridotita Saprolitizada y 1772803.82 m³ de Peridotita. Ha sido generado con un promedio total de coincidencia litológica del 90.5% para las muestras contenidas en cada volumen, indicando una alta confianza en la distribución y geometría de las rocas en el área modelada. La variabilidad litológica intrínseca del depósito obliga a restringir la generación de volúmenes en intervalos de muestra mínimos.

La validación visual del modelo geológico corroboró la consistencia geológica de las litologías de alteración producidas fundamentalmente en la zona de influencia estructural.

Los parámetros utilizados en el proceso de estimación permitieron evaluar el 61% de los bloques del modelo distribuidos en las cinco litologías. El porcentaje de diferencia entre el níquel promedio en muestras y el níquel promedio en bloques sugiere mayor confianza en la estimación de los dominios Saprolito Verde bajo Mg con 2%, la Peridotita con 3% y el Saprolito Verde alto Mg con 13%.

La metodología ha sido diseñada para desarrollarse en áreas finitas y en periodos de tiempo cortos, además de garantizar la inclusión de los datos obtenidos en la cartografía geológica de bancos y el muestreo por perforación RC y diamantina, lo que prueba ser totalmente funcional y aplicable para el modelo de control de ley.

Las actividades concernientes al programa de perforación de la mina dirigido por la Unidad de Exploración, permiten comprender el papel y la importancia de la geología aplicada al desarrollo minero, incentivando la construcción y el desarrollo de ideas que puedan mejorar los ciclos de planeación y producción.

9. RECOMENDACIONES

- Ejecutar diversas corridas con parámetros de búsqueda y estimación diferentes para cada uno de los dominios.
- Evaluar los valores de níquel estimados y la distribución de las rocas a profundidad respecto a los datos reales obtenidos en el momento del minado.
- Evaluar la posible aplicación de modelos geológicos 3D en temas geotécnicos.
- Evaluar la incorporación del modelamiento geológico implícito en el desarrollo del Modelo de Recursos de la mina.

BIBLIOGRAFÍA

Aranz Geo Limited. (17 de Agosto de 2015). Leapfrog Geo. Obtenido de <http://www.espanol.leapfrog3d.com/quienes-somos/>

Bermúdez , J. G., Arango, M. I., Rodriguez, G., Zapata, G., & Ramírez, C. (2012). Cartografía geológica de las planchas 72 Pueblo Nuevo y 82 Montelíbano (Departamento de Córdoba). Escala: 1:100.000. Informe. Ingeominas, Medellín.

Bermúdez, J. G., Arango, M. I., Rodriguez, G., Zapata, G., Ramírez, C., Ramos, K., & Sepúlveda, M. J. (2012). Geología de la plancha 82 Montelíbano. Escala: 1:100.000. Ingeominas, Medellín.

Castrillón Peña, A. (2012). Determinación de las estructuras tubulares presentes en el Pit 6 en el depósito laterítico de níquel de Cerro Matoso (Tesis de maestría). 122 p. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.

CIM Standing Committee on Reserve Definitions. (2014). CIM Definition Standards - For Mineral Resources and Mineral Reserves. Canadian Institute of Mining. Obtenido de www.cim.org

Codelco. (2015). Codelco Educa-Diccionario Minero. Obtenido de https://www.codelcoeduca.cl/glosario/glosario_l.asp

Forero, J. F., Londoño, J. H., Manrique, J. J., & Rojas, F. W. (2009). El níquel en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá.

Geotec Ltda. (2003). Geología de los Cinturones Sinú-San Jacinto Planchas 50 Puerto Escondido, 51 Lórica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierra Alta. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. Ingeominas, Bogotá.

Glaken, I. M., & Snowden, D. V. (2001). Mineral Resource Estimation, in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice. Melbourne, Victoria, Australia: A C Edwards.

- Gálvez , E. (2001). Geología del departamento de Córdoba. Escala 1:250.000. Ingeominas, Bogotá.
- Geotec Ltda. (1997). Geología de los Cinturones Sinú-San Jacinto. Escala 1:100.000. Informe. Ingeominas, Bogotá.
- Gonzáles , H., & Londoño, A. C. (2001). Mapa geológico del departamento de Córdoba. Escala 1:250.000. Memoria explicativa. Ingeominas, Bogotá.
- Gleeson, S. A., Herrington, R. J., Durango, J., Velásquez , C. A., & Koll, G. (2004). The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. *Economic geology*, 99, 1197-1213.
- Guzmán, G. (2003). Mapa geológico de Sinú-San Jacinto y borde oeste del Valle Inferior del Magdalena. Escala 1:300.000. Ingeominas, Bogotá.
- Guzmán, G., Gómez, E., & Serrano, B. E. (2004). Geología de los Cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena Caribe Colombiano. Escala 1:300.000. Informe. Ingeominas, Bogotá.
- Giraldo Henao, R. (2002). Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación. Producción Bibliográfica, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Estadística, Bogotá, Colombia.
- Houlding, S. W. (1994). 3D Geoscience Modeling, Computer Techniques for Geological Characterization. Vancouver, Canada: Springer.
- Haldar, S. K. (2013). Mineral Exploration: Principles and Applications. Elsevier.
- International Tower Hill Mines Ltd. (2008). Material Change Report. Vancouver, B.C. Obtenido de <http://www.sec.gov/Archives/edgar/containers/fix070/1134115/000137829608000094/exhibit2.htm>
- Joint Ore Reserves Committee. (1999). Código JORC. Australia.

- López-Rendón , J. (1986). Geology, mineralogy and geochemistry of the Cerro Matoso nickeliferous laterite, Córdoba, Colombia (Tesis de maestría). Colorado State University.
- Mejia, V., & Durango, J. (1981). Geología de las lateritas níquelíferas de Cerro Matoso S.A. Boletín de Geología, 15, 117-123.
- Marsh, E., & Anderson, E. (2011). Ni-Co laterite deposits. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Matheron, G. (1969). Cours de Géostatistique. Material de curso, Escuela de Minas de París.
- Moon, C. J., Whateley, M. K., & Evans, A. M. (2006). Introduction to Mineral Exploration (Segunda ed.). Wiley-Blackwell.
- Ortiz B, F. (2004). Guías para la localización de metales preciosos en ofiolitas colombianas. Informe proyecto Cyted XIII.1. Ofiolitas: Características mineralógicas y petrográficas del yacimiento de níquel de Cerro Matoso. Dyna, 71(142), 11-23.
- Oyarzun, R. (2011). Introducción a la Geología de Minas (Vol. I). Madrid, España: Ediciones GEMM - Aula2punto.net.
- Petroseis Ltda. (2011). Informe final Sinú San Jacinto 2D 2005. ANH, Bogotá.
- Rosero, S., Silva, J. C., Sial, A. N., Borrero, C., & Pardo, A. (2014). Quimioestratigrafía de isótopos de estroncio de algunas sucesiones del Eoceno-Mioceno del Cinturón de San Jacinto y el Valle Inferior del Magdalena. Boletín de geología, 36(1), 15-27.
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2013). Mineral Resource Estimation. New York: Springer.
- Skelly and Loy. (2009). Block Modelling Applications for Mine Planning. VII(3). (M. M. Coyne, Ed.) Harrisburg, Pensilvania, Estados Unidos. Obtenido de

<http://www.skellyloy.com/aboutus/news/pdfs/Volume%20VII,%20Issue%203%20Portal.pdf>

Wellmer, F.-W., Dalheimer, M., & Wagner, M. (2008). *Economic Evaluations in Exploration* (Segunda ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-73559-5

Zhang, Y. (2011). *Introduction to Geostatistics*. Course Notes, University of Wyoming, Department of Geology & Geophysics.