



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelación y evaluación de
un yacimiento mineral con el
uso de MinePlan 3D**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Araceli Monserrat Hernández Hernández

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado MODELACION Y EVALUACION DE UN YACIMIENTO MINERAL CON EL USO DE MINEPLAN 3D, que presenté para obtener el título de INGENIERA DE MINAS Y METALURGISTA es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ARACELI MONSERRAT HERNANDEZ HERNANDEZ
Número de cuenta: 316230131

Índice

Índice de Tablas.....	II
Índice de Figuras.....	II
Agradecimientos	1
Resumen	2
1. Introducción.....	3
2. Marco teórico	5
2.1. Prospección y exploración	5
2.2. Sondeos de exploración.....	5
2.2.1 Manejo y almacenamiento	6
2.2.2. Análisis de muestras.....	7
2.2.3. Caracterización mineralógica y ensaye químico	9
2.3. Modelo geológico	10
2.4. Modelo de bloques.....	13
2.4.1. Métodos clásicos	13
2.4.2. Métodos estadísticos	14
2.5 Evaluación del yacimiento.....	15
3. MinePlan 3D (Paquete Geología).....	17
4. Aplicación: Desarrollo de un modelo de bloques.....	18
4.1. Sondeos de exploración.....	18
4.2. Modelo geológico	23
4.3. Modelo de bloques.....	24
5. Resultados	30
5.1. Sondeos de exploración.....	30
5.2. Modelo geológico	30
5.3. Modelo de bloques.....	31
6. Conclusiones	33
7. Referencias	34

Apéndice A. Manejo de la base de datos de una campaña de exploración con MinePlan 3D	36
A.1. Importar base de datos	38
A.2. Respaldo back up	44
A3. Visualización de sondeos	46
A4. Codificación de litología y mineralización.	52
A.5. Puntos de contacto	57
Apéndice B. Diseño de un modelo geológico con MinePlan 3D	60
B.1. GRID SET	60
B.4. Correlación de sondeos	62
B5. Modelo geológico.....	67
Apéndice C. Diseño de un modelo de bloques con MinePlan 3D	74
C1. Archivo 3DBM.....	74
C2. Vista modelo de bloques	77
C3. Propiedades de un modelo de bloques	78
C4. Cálculo de densidad por mineralización	84
C5. Leyes de cobre y molibdeno.....	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Técnicas convencionales para la caracterización mineralógica de las muestras. Melgarejo, et al., (2010).....	10
Tabla 2. Técnicas no convencionales para la caracterización mineralógica de las muestras. Melgarejo, et al., (2010).....	10
Tabla 3. Tablas de datos obtenidos en una campaña de exploración.	18
Tabla 4. Códigos litológicos y mineralógicos.	22
Tabla 5. Códigos litológicos y mineralógicos.	26

Índice de Figuras

Figura 1. Perforación de sondeos.....	6
Figura 2. Manejo de testigos de roca (Castilla & Herrera, 2012).	7
Figura 3. Contactos de mineralización (Snowden, s.f.).....	12
Figura 4. Ejemplo de columna estratigráfica (Vázquez, s.f.).....	13
Figura 5. Descripción general del proyecto (Hexagon Mining, 2022).	19

Figura 6. Importación de sondeos de exploración.	20
Figura 7. Sondeos de exploración en vista de planta.	21
Figura 8. Caracterización del sondeo.	21
Figura 9. Sondeos de exploración y código de mineralización.	22
Figura 10. Correlación de leyes de cobre.	23
Figura 11. Avance del solido del modelo geológico.	24
Figura 12. Modelo geológico.	24
Figura 13. Topografía en el modelo de bloques.	25
Figura 14. Litología en el modelo de bloques.	26
Figura 15. Mineralización en el modelo de bloques.	26
Figura 16. Densidad en el modelo de bloques.	27
Figura 17. Interpolación para las leyes de cobre.	28
Figura 18. Modelo de bloques por leyes de cobre.	29
Figura 19. Sondeos de exploración.	30
Figura 20. Modelo geológico.	31
Figura 21. Modelo de bloques.	32
Figura A1. Aplicación MS Torque.	36
Figura A2. Configuración para crear un nuevo proyecto de MS Torque.	37
Figura A3. Archivos .mdf y .ldf creados.	37
Figura A4. Comando Setup activado.	38
Figura A5. Datos de la tabla Assays.	38
Figura A6. Datos de la tabla Collar.	39
Figura A7. Datos de la tabla Geology.	39
Figura A8. Datos de la tabla Survey.	39
Figura A9. Ítems creados.	40
Figura A10. Comando General Importer.	40
Figura A11. Configuración General importer.	41
Figura A12. Información cargada.	41
Figura A13. Configuración de unidades.	42
Figura A14. Comando Sample site geometry.	42
Figura A15. Modulo Interval Samples.	43
Figura A16. Opción Save para guardar la información importada.	43
Figura A17. Tablas importadas.	44
Figura A18. Módulo Backup.	45
Figura A19. Crear un Backup.	45
Figura A20. Archivo .bak.	46
Figura A21. Módulo Restore.	46
Figura A22. Crear nueva carpeta.	47

Figura A23. DM Torque.....	47
Figura A24. Crear nuevo visor.....	48
Figura A25. Rangos para TCU.....	48
Figura A26. Diámetro de sondeos.....	49
Figura A27. Configuración etiquetas en Survey.....	49
Figura A28. Crear filtro.....	50
Figura A29. Configuración de etiquetas en Intervals.....	50
Figura A30. Visualización de etiquetas.....	51
Figura A31. Herramienta Query.....	51
Figura A32. Importar topografía.....	52
Figura A33. Topografía y sondeos de exploración.....	52
Figura A34. Datos del proyecto asignado por Hexagon.....	53
Figura A35. Solidos litológicos.....	54
Figura A36. Item Lith Code.....	54
Figura A37. Color Lith Code.....	55
Figura A38. Opción Geometry Set.....	55
Figura A39. DH_Litologia.....	56
Figura A40. Configuración final Code DH.....	56
Figura A41. Codificación de litología.....	57
Figura A42. Objeto geométrico para puntos de contacto.....	58
Figura A43. Configuración puntos.....	59
Figura A44. Puntos de contacto creados.....	59
Figura B1. Configuración límites del proyecto.....	60
Figura B2. Herramienta Grid set.....	61
Figura B3. Configuración grid set.....	61
Figura B4. Selección de Grid.....	62
Figura B5. Herramienta Clipping.....	62
Figura B6. Plano coordenada 7000.00.....	63
Figura B7. Configuración de Clipping.....	63
Figura B8. Resultado de Clipping a 12.5m.....	64
Figura B9. Configuración de Labels.....	64
Figura B10. Configuración de Strips.....	65
Figura B11. Herramienta Drillhole Paintbrush Tool.....	65
Figura B12. Uso de DPT.....	66
Figura B13. Opción Commit.....	66
Figura B14. Resultados de INT.....	67
Figura B15. Carpeta Modelo Geológico.....	68
Figura B16. Modo Vertical Tri Viewer.....	68

Figura B17. Área con presencia de sólidos.....	69
Figura B18. Óxidos en tres grids diferentes.....	70
Figura B19. Resultado final de polígonos.....	70
Figura B20. Select Polylines.....	71
Figura B21. Triangulate Polyline.....	71
Figura B22. Object Contents Browser.....	72
Figura B23. Lista de objetos.....	72
Figura B24. Configuración Intersect Surfaces Tool.....	73
Figura B25. Sólido y topografía.....	73
Figura C1. Crear PCF.....	74
Figura C2. Nuevo MB15.....	75
Figura C3. ítems modelo de bloques.....	75
Figura C4. Configuración de sub-bloques.....	76
Figura C5. Incluir ítems.....	76
Figura C6. New Model View.....	77
Figura C7. Seleccionar archivo para el ModelView.....	78
Figura C8. Cuadrícula modelo de bloques.....	79
Figura C9. Área del modelo de bloques.....	79
Figura C10. Configuración de Geometry Set Editor.....	80
Figura C11. Codificación topografía.....	81
Figura C12. Exportar codificación.....	81
Figura C13. Selección de ítem LITO.....	82
Figura C14. Objetos litología.....	82
Figura C15. Codificación de litología.....	83
Figura C16. Resultados de la codificación de litología.....	83
Figura C17. Resultados de la codificación de mineralización.....	84
Figura C18. Model Calculation Tool.....	84
Figura C19. Configuración Model Selection.....	85
Figura C 20. ítems seleccionados para la interpolación.....	85
Figura C 21. Ítems de escritura y de lectura.....	86
Figura C 22. Código Python.....	86
Figura C23. Test one block.....	88
Figura C24. Configuración de intervalos de densidad.....	89
Figura C25. Densidad por mineralización.....	89
Figura C26. Nuevo Model interpolation Tool.....	90
Figura C27. Configuración Primary Search.....	90
Figura C28. Configuración Selection Rules.....	91
Figura C29. Configuración Item Mapping.....	91

Figura C30. Configuración Store Items.....	92
Figura C31. Resultado de la ponderación.	92
Figura C32. Configuración de intervalos de la ley de cobre.	93
Figura C 33. Resultado del modelo de bloques.....	93

Agradecimientos

A mis padres, *José y Rosa*, por cada sacrificio, por cada esfuerzo y por brindarme siempre su amor incondicional. Gracias por enseñarme el valor de la responsabilidad, la perseverancia y el trabajo duro. Todo lo que soy hoy es resultado de la educación, los valores y el apoyo que me han dado a lo largo de los años. Este logro también es de ustedes.

A mis hermanos, *Pilar y Omar*, gracias por ser mis cómplices y compañeros de vida, por creer en mí y por impulsarme siempre a ser una mejor persona. Los quiero profundamente y siempre llevaré conmigo todo el apoyo y amor que me han brindado.

A *Max*, tu compañía, comprensión y confianza fueron fundamentales para llegar hasta aquí. Gracias por tu amor, paciencia, apoyo incondicional y por la vida que estamos construyendo juntos. Te amo.

A mi asesor *Dr. José Enrique Santos Jallath*, por su tiempo, paciencia, orientación y compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por confiar en mí, por su apoyo y sus constantes consejos para muchos aspectos de mi vida.

A mis *profesores*, les agradezco sinceramente por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas a lo largo de mi formación académica.

A *Jordi, Andrea y Erika*, por su amistad y hacer que la vida sea más divertida.

A *Hexagon*, desarrolladora del software *MinePlan 3D*, por proporcionar la herramienta base del desarrollo de este trabajo y por el apoyo que nos brindan a los estudiantes de la Facultad de ingeniería.

A *Software Minero*, formar parte de este proyecto me permitió adquirir experiencia práctica y desarrollar habilidades profesionales dentro del ámbito minero y tecnológico. Gracias por la confianza y las enseñanzas recibidas, las cuales han sido fundamentales para mi crecimiento académico y personal.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* y a la *Facultad de Ingeniería* por abrirme sus puertas y permitirme formar parte de esta gran institución. Gracias por brindarme las herramientas, conocimientos y experiencias que contribuyeron a mi formación académica y profesional. Llevaré siempre con orgullo todo lo aprendido durante esta etapa de mi vida.

Resumen

El presente trabajo propone una metodología para diseñar un modelo de bloques y una evaluación económica de un yacimiento mineral, empleando el software Mine Plan 3D de Hexagon, el cual cuenta con distintos paquetes que facilitan trabajos de geología, ingeniería y planeación.

El trabajo presenta un ejercicio práctico, desarrollado con el objetivo de servir de guía para las y los estudiantes de las carreras de Ingeniería de Minas y Metalurgia e Ingeniería Geológica, por lo que se maneja una explicación detallada y clara para facilitar el entendimiento por parte de las y los estudiantes y así complementar la falta de enseñanza de software dentro del actual plan de estudios.

Asimismo, la metodología se basa en la explicación de las etapas de prospección y exploración minera, destacando la información relevante a los sondeos de exploración, para poder entender cómo se lleva a cabo el manejo, almacenamiento, análisis, caracterización mineralógica y ensaye químico de las muestras y obtener como resultado tablas que contengan toda esta información.

Las tablas de datos son la base para iniciar el trabajo con el software Mine Plan 3D, por lo tanto, la primera parte del uso de software contempla importar la información obtenida en la campaña de exploración, visualizar los sondeos de exploración y asignar las propiedades de topografía, mineralización y litología que les corresponda a cada uno de los sondeos. Una vez que se tiene la información de los sondeos de exploración integrada en el software, se procede a diseñar el modelo geológico óptimo de acuerdo con las características del yacimiento. Este modelo está creado a partir de las leyes del mineral, la ubicación espacial de las muestras y la topografía.

Finalmente, la última parte del ejercicio es crear un modelo de bloques que sirva de base para realizar una evaluación económica lo más exacta posible, por esto, el modelo contempla distintos parámetros: topografía, leyes, litología, mineralización y dilución.

Los “Apéndice A”, “Apéndice B” y “Apéndice C” están desarrollados en forma de manual explicando a detalle el uso de los diversos comandos del software para cada uno de los productos que se incluyen en el trabajo: topografía del terreno, proyección de sondeos, modelo geológico, modelo de bloques.

1.Introducción

La correcta y constante evaluación de los recursos minerales es esencial en el desarrollo de los distintos proyectos mineros, pues permite reducir el nivel de incertidumbre para facilitar la planificación y la toma de decisiones en las diferentes etapas de los proyectos mineros. Una de las etapas principales es la exploración. En esta se realiza una toma de muestras mediante perforaciones en el subsuelo (sondeos), para obtener información precisa de lo que se encuentra en la zona. Las muestras obtenidas requieren ser sometidas a pruebas físicas, químicas, mineralógicas y de análisis químico para conocer las propiedades de los minerales presentes.

La información recopilada puede ser manipulada con un software de diseño minero como MinePlan 3DI contar con toda la información necesaria de las tablas de la ubicación (Collar), geometría (Survey), análisis de leyes (Assays) y geología (Geology), el programa fácilmente puede mostrar una visualización de las perforaciones realizadas y sus propiedades correspondientes, por ejemplo: leyes, litología y mineralización.

Con la información recabada de las muestras de los sondeos, se puede crear una interpretación geológica del yacimiento, esto es un modelo geológico que muestre la distribución de las diferentes leyes minerales. De igual manera, el software facilita la obtención de este modelo mediante un sólido que representa la presencia de las leyes de interés. La parte esencial de la interpretación de los datos dentro del software es el modelo de bloques, el cual es una representación tridimensional de bloques del yacimiento mineral. El diseño de un modelo de bloques usando un software especializado en el diseño minero, es una herramienta esencial en la evaluación del proyecto, pues no solo permite conocer la presencia y distribución de las leyes de mineral, también involucra algunos otros parámetros geológicos como son la litología, la mineralización y la densidad de las rocas presentes que facilitan el análisis de la viabilidad del proyecto.

En la actualidad es esencial que los alumnos de las carreras de Ingeniería de Minas y Metalurgia e Ingeniería Geológica conozcan los parámetros necesarios y la metodología para el desarrollo de un modelo de bloques dentro del software MinePlan 3D y así tengan la habilidad de realizar una evaluación económica del yacimiento y el diseño minero del proyecto a lo largo de su vida académica y profesional. Por lo tanto, el objetivo del presente escrito es laborar una guía para el uso del software MinePlan 3D en la construcción de un modelo geológico y un modelo de bloques a partir de la información generada con sondeos de exploración y de factores económicos y operativos, con el propósito de poder hacer la evaluación de un yacimiento mineral.

Este material servirá de apoyo para fortalecer el aprendizaje de las y los alumnos, ya que en los planes de estudio actuales de las carreras de Ingeniería de Minas y Metalurgia y de Ingeniería Geológica, no incluye la enseñanza de software especializado.

2. Marco teórico

2.1. Prospección y exploración

Todo proyecto minero se conforma de una secuencia de etapas necesarias para llegar a la extracción óptima de los recursos minerales, estas son la prospección, la exploración, el desarrollo, la explotación, el cierre y postcierre de las operaciones mineras.

La etapa inicial en la vida de una mina se conoce como *prospección*, su objetivo es encontrar minerales de interés en una zona determinada, empleando, principalmente, métodos de prospección directos. Estos métodos, están limitados a depósitos superficiales, pues se basan en un análisis visual de la exposición del depósito y de los pequeños fragmentos separados del mismo, que puedan existir cerca de la zona. De estos depósitos, los ingenieros geólogos manipulan muestras para analizarlas y obtener un mayor acercamiento a los cuerpos minerales (Hartman, 2002).

Durante esta primera etapa también se utilizan métodos indirectos para conocer características del yacimiento. A diferencia de los directos, los indirectos se basan en técnicas y estudios no destructivos que permiten obtener información del subsuelo sin afectar el terreno; algunos ejemplos son: estudios sísmicos, estudios gravimétricos, estudios radiométricos, estudios electromagnéticos, entre otros. Además, los geólogos se pueden apoyar de otros análisis como la interpretación de estudios geológicos previos que pudieran existir, pues estos están conformados por fotografías aéreas, mapas topográficos y estructurales de la región que pueden complementar la información recabada. Posterior a todo el análisis, si se obtiene un resultado favorable se inicia con la etapa de *exploración*.

La etapa de *exploración* permitirá hacer una dimensión más exacta de la ubicación del posible yacimiento, definir su forma, tamaño y los valores de mineral que contiene. A diferencia de la prospección, durante esta etapa, todo el análisis se hace mediante métodos directos, lo que quiere decir que se requiere hacer una toma de muestras más allá de lo superficial, y esto se lleva a cabo mediante perforaciones al subsuelo, que conforman lo que se conoce como sondeos de exploración.

Las muestras obtenidas son sometidas a diferentes pruebas físicas, mecánicas, mineralógicas y de análisis químico, que miden propiedades objetivas que tienen en mayor o menor medida todos los minerales (García de Miguel, 2005) La evaluación de las muestras permite a los ingenieros, calcular el tonelaje y la ley mineral del yacimiento, establecer el valor económico del mineral, estimar los costos de extracción y evaluar todos los factores financieros necesarios para determinar la viabilidad del proyecto (Hartman, 2002).

2.2. Sondeos de exploración

Los *sondeos de exploración* son la técnica más importante empleada durante esta etapa, las perforaciones que se realizan en el proceso proporcionan información de la localización

y valor económico de una mineralización, además, verifica todas las ideas, teorías y predicciones que se generaron en las prospecciones o incluso en exploraciones previas (Castilla & Herrera, 2012).

Moon, Whateley y Evans (2006) mencionan que los sondeos verticales son los más sencillos de realizar, pueden ser mediante perforación a rotación, o perforación a diamante, la cual es la más versátil logrando perforar a una profundidad entre 1500-2000 metros. Para poder interceptar de mejor manera a los yacimientos verticales o sub-verticales, los sondeos se perforan con una inclinación de 30° a 60° con respecto a la horizontal de la superficie, tal y como se muestra en la Figura 1.

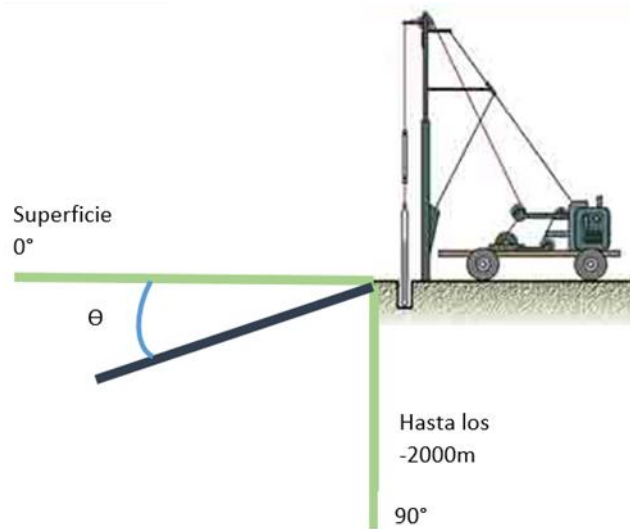


Figura 1. Perforación de sondeos.

2.2.1 Manejo y almacenamiento

Es importante considerar que cada sondeo proporciona información diferente, por ello es necesario recoger y almacenar todas las muestras de manera adecuada. Los tipos de muestras que se pueden obtener en una campaña de exploración son las siguientes Servicio Geológico Mexicano (2017):

- Dentritus seco. Obtenido durante la perforación de sondeos con aire.
- Dentritus húmedo. Obtenido del lodo de la perforación en la que se utilizó agua como fluido.
- Núcleos de barrenación. Obtenidos en el barril del tubo de perforación.

Todos los tipos de muestra arrojan información importante, sin embargo, obtener muestras testigo, genera un beneficio mayor, ya que permiten una mejor identificación geológica. Lo complicado de este tipo de muestra es su almacenamiento, debido a la cantidad de metros

que se obtienen de cada testigo. En el inciso A de la Figura 2 se puede apreciar la recuperación del núcleo, en el inciso B la colocación en cajas y la descripción del sondeo, y en el inciso C el almacenamiento de estos sondeos en cajas, las cuales serán colocadas dentro de una infraestructura que permita su almacenamiento de manera sistemática y así poder localizar la información de manera más sencilla (Castilla & Herrera, 2012).



Figura 2. Manejo de testigos de roca (Castilla & Herrera, 2012).

2.2.2. Análisis de muestras

El análisis y ensayo de testigos durante las primeras fases de la campaña de exploración tiene varios propósitos, entre ellos: identificar la existencia de elementos de interés, así como la ubicación y forma en la que se distribuyen dentro del depósito mineral; la estratigrafía de la zona y los tipos de roca presentes con una clasificación geotécnica de las mismas.

Los intervalos que se deben seguir durante la toma de muestras los determina la geología; pues, aunque se debe recabar la información de toda la longitud del sondeo, los modelos existentes generados por estudios previos sirven para detectar las estructuras supuestas

en los modelos geológicos. Estos intervalos de interés serán seleccionados en función de la geología y se deberán indicar sobre el propio testigo a medida que se obtienen las muestras. Así los límites de la mineralización deberían corresponder con los que la geología indicaba previamente, de no ser así, se deben registrar los límites reales encontrados.

Durante el análisis de las muestras es casi obligado que se realicen ensayos destructivos, por lo que, no se podrían realizar ensayos posteriores a las muestras ya modificadas. Castilla y Herrera (2012) mencionan que por ese motivo es necesario manipular el testigo por su eje longitudinal, por la mitad, o incluso en cuatro partes. Estos autores enlistan los métodos para tomar muestras de testigos para su ensayo dependiendo del estado del testigo de la siguiente manera:

1. **Muestreo con navaja.** Esta técnica se emplea cuando se encuentran estructuras húmedas de arcilla.
2. **Muestreo con cuchara.** Si el material está altamente fragmentado, se usa una cuchara o una espátula para recoger una sección representativa de la muestra para cada intervalo objeto de estudio.
3. **Molienda del testigo.** Si la muestra no se considera interesante para ser cortada con sierra circular, se puede moler parte del testigo completo para ser ensayada por métodos químicos a modo de comprobación.
4. **Fragmentación por cincel.** En rocas cristalinas relativamente homogéneas como rocas ígneas o rocas sedimentarias masivas pueden obtenerse muestras para ensayo con un cincel.
5. **Corte con sierra de disco.** Este es el método estándar de trabajo y el más utilizado para tomar muestras de testigos. En este caso el testigo es cortado longitudinalmente con una sierra circular usando discos de diamante. Este método es relativamente lento y caro, es la única manera de obtener una muestra de testigo de manera precisa.

Los registros geológicos obtenidos de las muestras en los trabajos de perforación requieren de una descripción adecuada de los materiales atravesados (depósitos minerales y roca encajonante), equipo y métodos de perforación, toma de muestras, condiciones geotécnicas e interpretaciones geológicas. Cualquier pérdida de testigo o daños causados por el mal manejo debe ser anotado y considerado durante los análisis de muestras.

Durante las campañas de perforación, se manejan diferentes datos respecto al proyecto y las perforaciones que se realizan. Castilla y Herrera (2012) enlistan los parámetros que suelen presentarse durante las operaciones realizadas:

- Al inicio del proyecto:
 - Identificación del proyecto

- Datos de la empresa perforista
 - Fecha de comienzo del sondeo
 - Número de sondeo (código de identificación)
 - Datos de la máquina empleada
 - Fluido de perforación: tipo de fluido, composición y aditivos empleados
 - Ubicación
 - Coordenadas
 - Altitud
 - Rumbo
 - Ángulo de perforación
 - Retorno del fluido: porcentaje de fluido recuperado.
 - Color del fluido de perforación en el retorno
 - Cementación empleada
 - Tipo de terminación del sondeo
 - Razón por la que se ha dado por terminado el sondeo
 - Tiempo de perforación
 - Fecha de finalización del sondeo
- Durante la campaña:
- Datos sobre el nivel de presencia de agua.
 - Ensayos realizados.
 - Exfoliación y bandeo reconocible.
 - Columna litológica obtenida.
 - Longitud de muestra analizada.
 - Dureza.
 - Tipo de roca
 - Litología. Composición, tamaño de grano, textura, color.
 - Discontinuidades.
 - Meteorización y alteraciones observadas.
 - Textura.
 - Pérdidas de sondeo.

Parte de estos datos se obtendrán directamente a pie de sondeos mientras que otros se pueden obtener una vez procesados los sondeos en laboratorio.

2.2.3. Caracterización mineralógica y ensaye químico

Generalmente el estudio que se realiza para la valoración de un depósito mineral se enfoca principalmente en el análisis de los elementos presentes y el valor económico que pueden llegar a generar, sin embargo, es muy importante que también se tome conciencia en el estudio mineralógico detallado de las asociaciones minerales. Ya que este puede ayudar

a incrementar la profundidad de la investigación, logrando descartar o confirmar el interés del depósito. La Tabla 1 y la Tabla 2, enlistan las principales técnicas de caracterización mineralógica más utilizadas:

Tabla 1. Técnicas convencionales para la caracterización mineralógica de las muestras. Melgarejo, *et al.*, (2010).

Técnicas convencionales	
Nombre	Descripción
Difracción de rayos X	La difracción de polvo es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina.
Microscopio electrónico de barrido con analizador de energías (SEM-EDS)	Se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir del barrido de esta con un haz de electrones, como resultado de las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra.
Análisis mediante catodoluminiscencia (CL)	La catodoluminiscencia es un caso particular de luminiscencia en que la fuente de excitación son electrones.
Microsonda electrónica (EMP)	Utiliza los rayos X secundarios, generados por un haz de electrones focalizados sobre una muestra sólida pulida.

Tabla 2. Técnicas no convencionales para la caracterización mineralógica de las muestras. Melgarejo, *et al.*, (2010).

Técnicas no convencionales	
Nombre	Descripción
Particle Induced X-Ray Emission (Micro-PIXE)	Se analizan los rayos X producidos al bombardear una muestra mediante un haz de protones que puede ser focalizado a escala micrométrica.
Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS)	Se basa en bombardear la muestra con un haz de partículas cargadas; los iones arrancados de la muestra son analizados mediante un espectrómetro de masas.
Laser-Ablation- Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS)	Utiliza un láser para arrancar por ablación (sublimación) los elementos de la muestra.

2.3. Modelo geológico

En términos generales, un modelo se define como la representación de un objeto, proceso, idea o sistema diseñado para explicar y comprender teorías o problemas complejos, creando una relación con la realidad (Chamizo, 2010). En términos geológicos se tienen tres tipos de modelos:

- Modelo geomecánico. Muestra características geotécnicas e hidrológicas del macizo rocoso.
- Modelo geotécnico. Representa el comportamiento del subsuelo en una zona determinada al momento y después de realizar alguna modificación por obras ingenieriles.
- Modelo geológico. Representa litología, estructuras, valores de concentración mineral y su distribución en el macizo rocoso.

El objetivo principal de un modelo geológico es recopilar toda la información básica de un yacimiento y con esta, generar una representación 2D y 3D de la distribución espacial de las formaciones rocosas y del mismo yacimiento. Una correcta interpretación geológica será la base para realizar una buena estimación de recursos, por ello se deben identificar controles de la mineralización para definir las estructuras que define los recursos.

Los controles principales que se consideran en este tipo de análisis son los litológicos, leyes, intemperismo y estructurales (Snowden Mining Industry Consultants, s.f.). Al definir estos controles, el objetivo es centrarse en la mineralización, sin embargo, el resto de los controles, como los límites del recurso, forma del yacimiento, densidad del mineral, ubicación espacial respecto a la superficie del terreno, entre otros; serán requisitos importantes para el diseño de obras y para seleccionar el método de minado.

Durante la campaña de exploración es importante recopilar, con la mayor precisión posible, los contactos superior e inferior que se tienen entre las diferentes mineralogías presentes, tal y como se muestra en la Figura 3. Así es como se irá construyendo una columna estratigráfica.

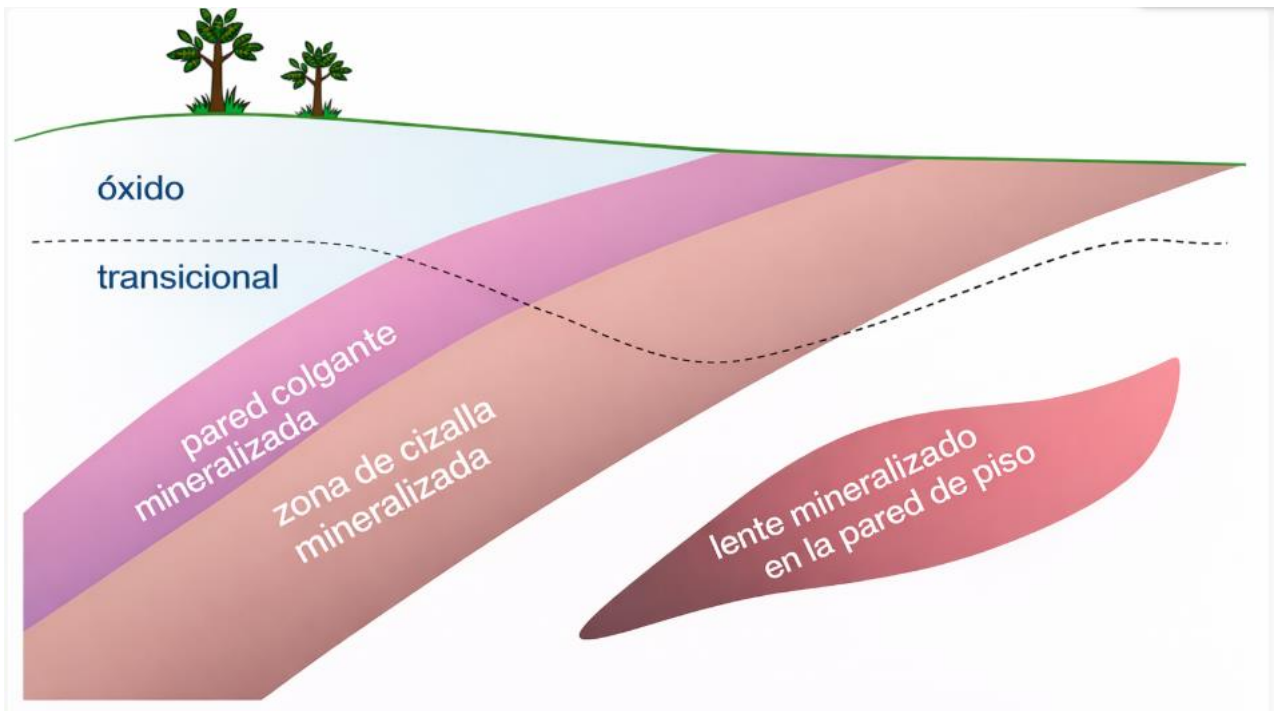


Figura 3. Contactos de mineralización (Snowden, s.f.)

Una columna estratigráfica como la que se muestra en la Figura 4, representa la sucesión de las rocas existentes de manera vertical en un área determinada. Y haciendo una correlación entre columnas se puede construir un perfil estratigráfico (Polare, 2021).

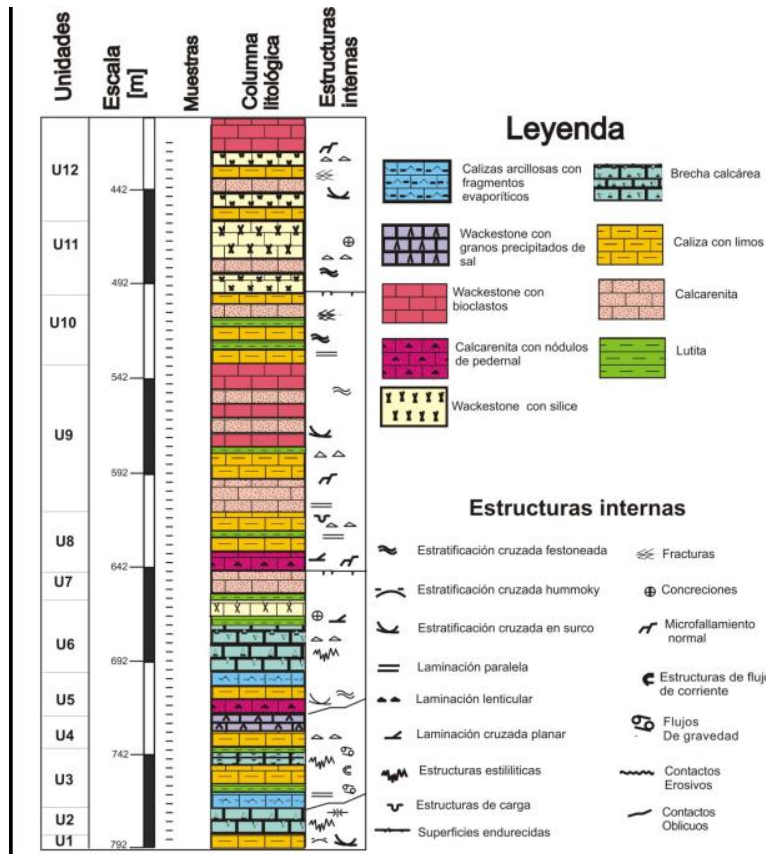


Figura 4. Ejemplo de columna estratigráfica (Vázquez, s.f.)

2.4. Modelo de bloques

Tomando en cuenta la definición de modelo descrita en el apartado anterior, un modelo de bloques representa al yacimiento siguiendo una cuadrícula tridimensional, es decir el yacimiento es representado por un conjunto de bloques y cada uno contiene información específica de su mineralógica (forma, distribución y ley de los minerales presentes) y estratigráfica (forma, composición, propiedades físicas y geoquímicas y secuencia de disposición del subsuelo); así como datos económicos descritos a detalle en el apartado 2.5. Es importante mencionar que la cantidad y tamaño de los bloques en las que se dividirá el modelo no está establecida, estos parámetros dependerán de la precisión que se requiera para la evaluación de las leyes (López, 2013).

2.4.1. Métodos clásicos

Los modelos de bloques son una de las herramientas más utilizadas en el proceso de evaluación de un yacimiento. Estos modelos se obtienen a partir de los resultados del análisis de las muestras tomadas durante las campañas de barrenación, con ellas se hace un análisis geoestadístico para asignar propiedades a cada bloque y así poder evaluar las

características del mineral y asignar valores de ley, densidad y tonelaje. Aunque estos valores se arrojan en automático con apoyo de un software, es importante conocer que los valores asignados a cada bloque se pueden obtener mediante diferentes métodos de estimación de recursos. De acuerdo con Mendoza (2021), los métodos clásicos se clasifican en:

1. Métodos de área y factores promedio.
2. Método de bloques minables.
3. Método de secciones.
4. Método de isolíneas.
5. Método de triángulos.
6. Método de polígonos.
7. Método de ponderación por el inverso de la distancia.

Dependiendo el autor, este último puede clasificarse dentro de los métodos estadísticos junto con el kriging ordinario, kriging de indicadores múltiples, etc.

En los métodos clásicos se utilizan principalmente valores medios o medias ponderadas para la estimación de bloques definidos convenientemente, por lo tanto, su uso presenta dificultades en temas de precisión. Además, no tienen en cuenta ninguna correlación entre muestras.

2.4.2. Métodos estadísticos

La estadística es una rama de las matemáticas dedicada al análisis de la variabilidad de los datos, tratando de obtener correlaciones, dependencias y patrones para explicar fenómenos tanto físicos como naturales. Derivado de esto, existe la geoestadística, la cual se centra en el análisis y la modelización de variables asociadas (ley, densidad) a información espacial (localizaciones específicas mediante coordenadas) con base a una serie de métodos cuyo objetivo es estimar los valores desconocidos a partir de otros ya conocidos (Asociación Geolnova, 2019).

El proceso de estimación utiliza las muestras dentro de cada dominio, para calcular valores correspondientes a todo el volumen del bloque. Para hacer esto, primero es necesario definir qué muestras se deben seleccionar y utilizar para la valoración de cada bloque.

La metodología de estimación se ha desarrollado con el tiempo debido a la necesidad de generar datos imparciales de la ley en un punto no muestreado dados los valores de puntos conocidos. Algunas técnicas de estimación geoestadística de valores desconocidos se basan principalmente en las muestras vecinas, su ubicación y la variabilidad espacial de la distribución que surge del variograma, el método más utilizado dentro de la minería es el Kriging (Maldonado, 2023).

Kriging

Este procedimiento se basa en la creación de una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con diferentes valores, por lo tanto, se crea a partir de modelos estadísticos como son la autocorrelación, definida como la relación estadística entre puntos medidos, estableciendo que la distancia entre los puntos de muestra refleja una correlación espacial (Maldonado, 2023).

La herramienta Kriging ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico, para determinar el valor de salida para cada ubicación. La estimación mediante este método implica una serie de pasos a seguir, por ejemplo: el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas y la creación de la superficie.

2.5 Evaluación del yacimiento

Durante el desarrollo de proyectos mineros, es necesario realizar una serie de evaluaciones económicas conforme se avanza en el conocimiento de las características del yacimiento con la exploración. El objetivo principal es contar con una base sólida que permita tomar decisiones sobre la viabilidad del proyecto.

Con los resultados que se obtienen en cada una de las etapas de la exploración, se debe hacer una evaluación económica del yacimiento tomando en cuenta diferentes factores que determinarán qué parte de los recursos se pueden extraer económicamente. Friedrich, et al., (2008) enlista estos factores de la siguiente manera:

- I. **Ritmo de producción.** Este parámetro considera el potencial de las reservas y la financiación de los proyectos. La financiación de los proyectos debe dividirse en los años que se requieren para cumplir con las obligaciones financieras. El resultado será la vida útil de la mina y a partir de esta se puede determinar la producción anual que debe tener el proyecto y la capacidad mínima con la que se debe contar.
- II. **Recuperación y pérdida de tonelajes.** Este factor también dependerá mucho del método de extracción empleado, puede que se requiera dejar pilares, utilizar parte del material para el relleno de las obras o dejar una cubierta del tajo en minería a cielo abierto, por lo tanto, es imposible que se tenga una recuperación del mineral del 100%. Para los diferentes cálculos se puede asumir una recuperación del 85-90%.
- III. **Dilución.** La dilución se produce cuando el mineral y la roca encajonante se mezclan, lo cual es producto de diversos factores geológicos, el método de

explotación y controles en la operación, por ejemplo: los métodos de extracción empleados, voladura, errores de cálculos, etc. Para la etapa de exploración la dilución se puede considerar del 10%, sin embargo, durante la etapa de producción puede variar entre el 5 y el 30%.

- IV. **Ley de corte.** Se refiere a contenido del elemento de interés por unidad de masa mínimo que debe tener un yacimiento para que su extracción sea económicamente rentable. Su valor depende de parámetros operativos como los antes mencionados (recuperación, dilución y otros) y de los costos de operación que se tengan.
- V. **Relación de concentración.** Este valor esté basado en el contenido metálico del mineral, en la composición mineralógica del yacimiento, y del proceso metalúrgico empleado, ya que se refiere a las toneladas que se necesitan extraer para producir una tonelada de concentrado.
- VI. **Costos operativos y de inversión.** Los valores se basan en estimaciones de costos indirectos o costos generales de extracción y beneficio. Los costos se pueden determinar a partir de datos del consumo de materiales, salarios, maquinaria, etc.
- VII. **Ingresos.** Son todas las entradas de dinero por la venta del producto terminado, algunos ejemplos pueden ser: barras de oro y plata, commodities, concentrados de cobre, plomo y zinc, cátodos de cobre, pellets, metales refinados, entre otros.
- VIII. **Precio futuro.** Los precios de la industria al momento de la evaluación del yacimiento no pueden ser considerados a largo plazo, ya que pueden pasar bastantes años antes de que la producción inicie. Se requiere hacer proyecciones por medio de la estadística para obtener resultados más certeros. En estas proyecciones se consideran diferentes parámetros, por ejemplo: moneda en la que se cotizan los metales, inflación, precios con medias móviles y gráficos de costos.
- IX. **Plazo de recuperación.** Se refiere al tiempo mínimo aceptable para la recuperación de la inversión.

3. MinePlan 3D (Paquete Geología)

Para la industria minera, Hexagon cuenta con una división que aporta soluciones en áreas de planeación, operación, seguridad, gestión operacional y de hardware. Dentro del portafolio de Planeación de Hexagon, se incluyen distintos paquetes relacionados con la Geología, Ingeniería, Producción y HxGN MinePlan 3D (MP3D). Este último se considera la base del portafolio, pues permite visualizar todos los resultados de los demás paquetes.

El paquete de Geología brinda las herramientas que se requieren en la etapa de exploración, permite almacenar, administrar y analizar datos de sondajes, realizar una interpolación geológica y generar un modelo de bloques. Cada uno de los paquetes antes mencionados, incluye una serie de programas que permitirán realizar proyectos más específicos y detallados. El paquete de geología cuenta con 3 programas adicionales:

HxGN MinePlan 3D Drillhole Manager (MS Torque). Es una aplicación de tipo cliente servidor, es decir, se puede trabajar con la base de datos de un proyecto guardada en un servidor, ya sea en un equipo de cómputo propio de la empresa o bien, desde una red local. MS Torque facilita el manejo de datos en la etapa de exploración, como son los sondeos a partir de tablas de datos.

HxGN MinePlan 3D Reserves (MS Reserve). Funciona como una herramienta de cálculo que permite obtener reportes de estimación de reservas a partir de sólidos y polígonos, un rango de coordenadas o un modelo de bloques. La interpretación y visualización de los resultados puede complementarse con gráficos y diagramas.

HxGN MinePlan 3D Sigma. Permite analizar y evaluar sondeos, barrenos de producción y datos de los modelos, desde un punto de vista estadístico y geoestadístico a través de herramientas y gráficos para el análisis univariado, bivariado y análisis de espacial de los datos.

4. Aplicación: Desarrollo de un modelo de bloques

En este capítulo se presenta un ejemplo práctico, de la aplicación del software MinePlan 3D en el desarrollo de un modelo de bloques.

El desarrollo del proyecto se compone de tres etapas diferentes, la primera se basa en el análisis e interpretación de una base de datos obtenida en una campaña de exploración, con esta se puede genera la proyección de los sondeos de exploración dentro del software. Una vez obtenida la proyección de los sondeos, se procede a generar un modelo geológico creado a partir de diferentes codificaciones de los datos previamente manipulados, al finalizar, se genera un modelo de bloques el cual incluye toda la información mineralógica y los parámetros técnicos y económicos (leyes, costos, recuperaciones, etc.) indispensables para la evaluación del proyecto.

4.1. Sondeos de exploración

Para comenzar la importación de datos dentro del software es importante verificar que, durante la campaña de exploración se obtuvo la información mínima requerida para el manejo de datos dentro del software. Esta información debe ser presentada en tablas de Excel clasificadas de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 3. Tablas de datos obtenidos en una campaña de exploración.

Tabla	Descripción	Datos
Collar	Información relacionada con la ubicación espacial del sondeo en superficie o frente de exploración.	Coordenadas Norte y Este y la elevación de los sondeos
Survey	Información de la geometría del sondeo, es decir, las medidas de las desviaciones que se producen en los sondeos a diferentes profundidades.	Profundidad, Azimut, inclinación y desviaciones.
Geology	Información de los diferentes intervalos de los sondeos: tipo de roca, zona de mineralización y datos geológicos extra que se lograron medir.	Inicio y fin de la presencia de los diferentes tipos de roca.
Assays	Son todos los datos geoquímicos que se lograron obtener, es decir, valores de los minerales encontrados	Intervalos (Desde y hasta), leyes.

Las tablas que se analizarán en este proyecto corresponden a datos proporcionados por la empresa Hexagon, dichos datos provienen de un yacimiento de pórfidos polimetálico, dentro del cual el cobre es la mena de interés principal. También incluye información sobre molibdeno y zinc. El tipo de mineralización (óxidos, sulfuros primarios y sulfuros secundarios) controla fuertemente la distribución de la ley. Los sulfuros consisten principalmente en pirita y calcopirita. Se observan zonas de alteraciones desde el centro hacia afuera; desde una zona fílica a un halo propilítico (Hexagón Mining, 2022). La descripción general puede observarse en la Figura 5.

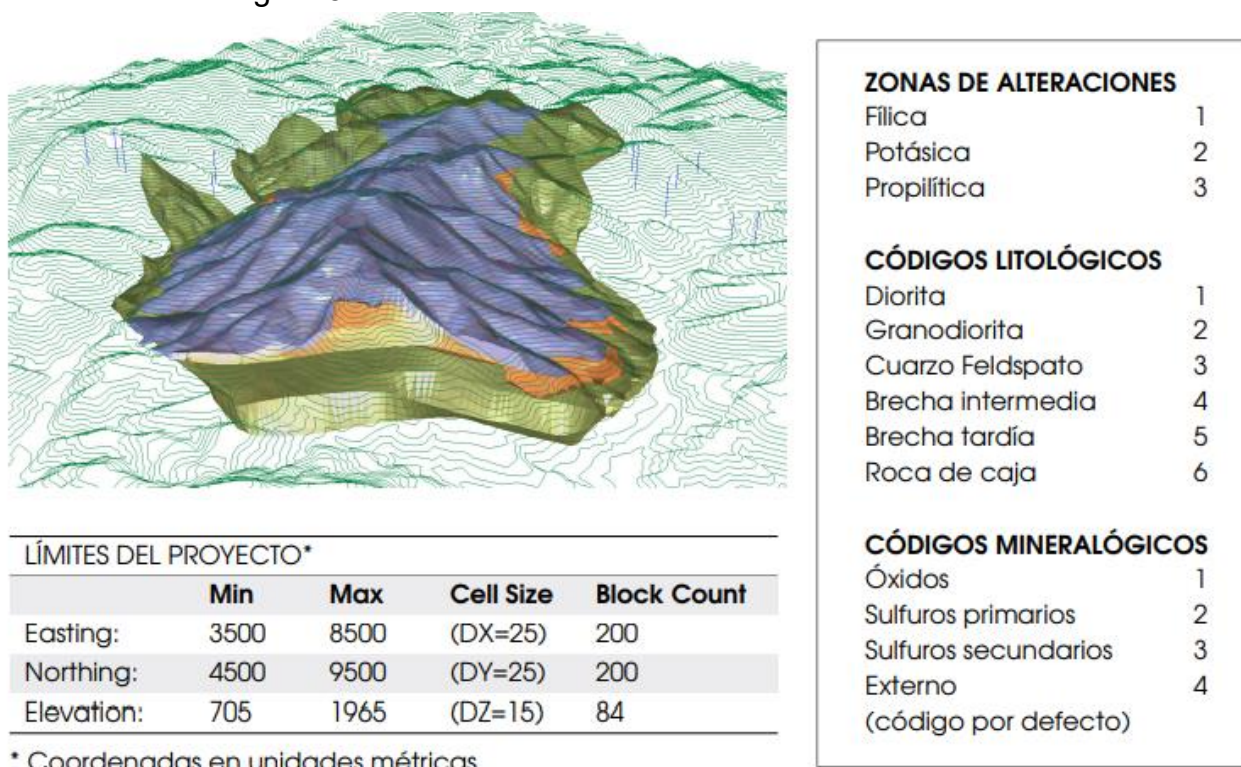


Figura 5. Descripción general del proyecto (Hexagon Mining, 2022).

El proceso de importación de datos dentro del software MinePlan 3D debe realizarse con especial atención por toda la información que se debe integrar ya que, si no se sigue el proceso correcto, la información no podrá ser visualizada correctamente. En el Apéndice A se describe a detalle los pasos que se deben seguir para obtener una correcta importación de datos y así obtener los resultados que se muestran en la Figura 6.

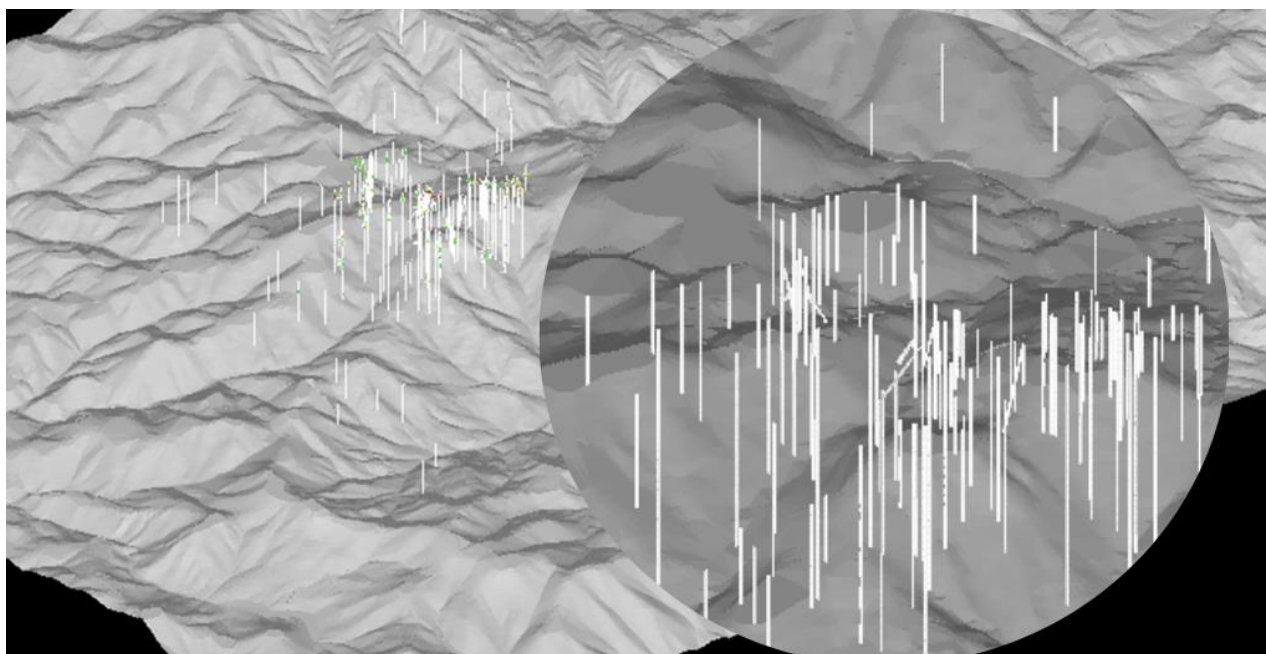


Figura 6. Importación de sondeos de exploración.

Como se observa en la imagen anterior los sondeos ya son visibles, sin embargo, solo se observa la caña del sondeo, es necesario asignarles sus características correspondientes en cuanto a la mineralización y litología. En el mismo Apéndice A se puede consultar a detalle las diferentes maneras de manipular los sondeos de exploración y darles el detalle que sea funcional para cada proyecto. La Figura 7 muestra una manera de personalizar la información visible para los sondeos de exploración. Estos incluyen sus valores de cobre, litología y mineralización, la etiqueta que se muestra en la parte superior del sondeo representa el nombre de este y la gama de colores se relaciona con las leyes de Cu de 0-0.5%.

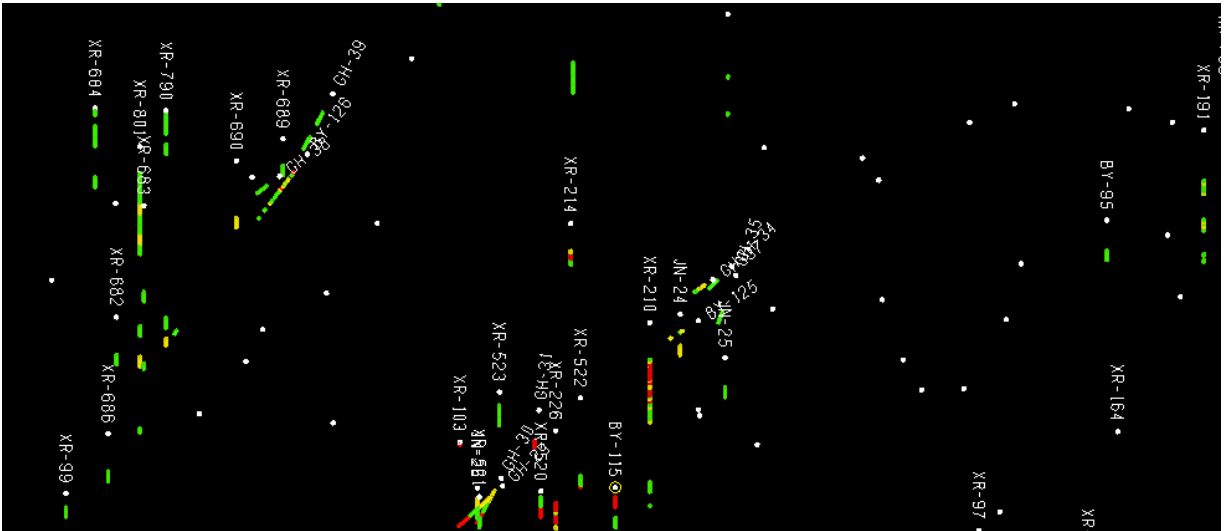


Figura 7. Sondeos de exploración en vista de planta.

En este proyecto se generó una caracterización especial que se muestra en la Figura 8, del lado izquierdo del sondeo se presenta la mineralización (cuarzo, feldespato etc.) y litología, la barra del sondeo muestra, en colores, una escala de los valores de cobre y del lado derecho del sondeo, se observa el valor exacto de la ley de cobre.

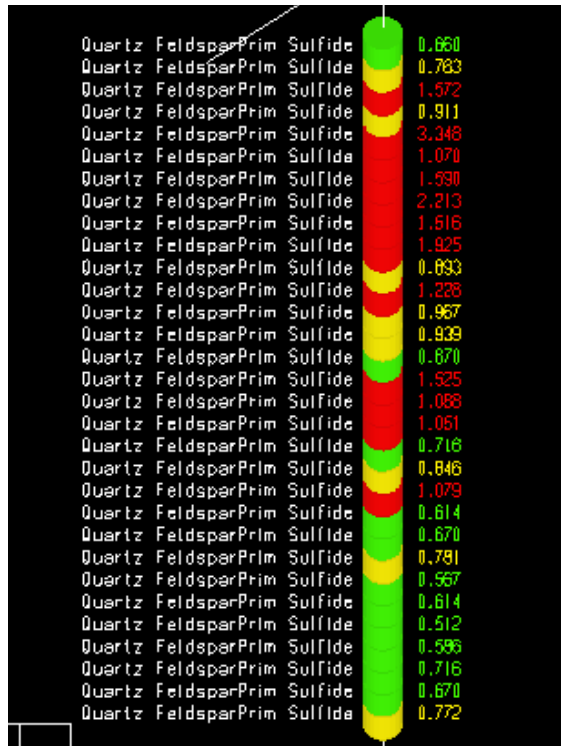


Figura 8. Caracterización del sondeo.

Tomando en cuenta los códigos litológicos y mineralógicos presentados en la Figura 5, es necesario que se realice una codificación que permita interpretar esta información dentro del software. En el Apéndice A se explica a detalle los pasos a seguir para lograr que cada uno de los códigos mencionados puedan ser asignados a los sondeos correspondientes.

La Figura 9 muestra a los sondeos de exploración y el código de mineralización que le corresponde a cada uno.

Tabla 4. Códigos litológicos y mineralógicos.

CÓDIGOS LITOLÓGICOS		CÓDIGOS MINERALÓGICOS	
Diorita	1	Óxidos	1
Granodiorita	2	Sulfuros primarios	2
Cuarzo feldespato	3	Sulfuros secundarios	3
Brecha intermedia	4	Externo	4
Brecha tardía	5		
Roca encajonante	6		

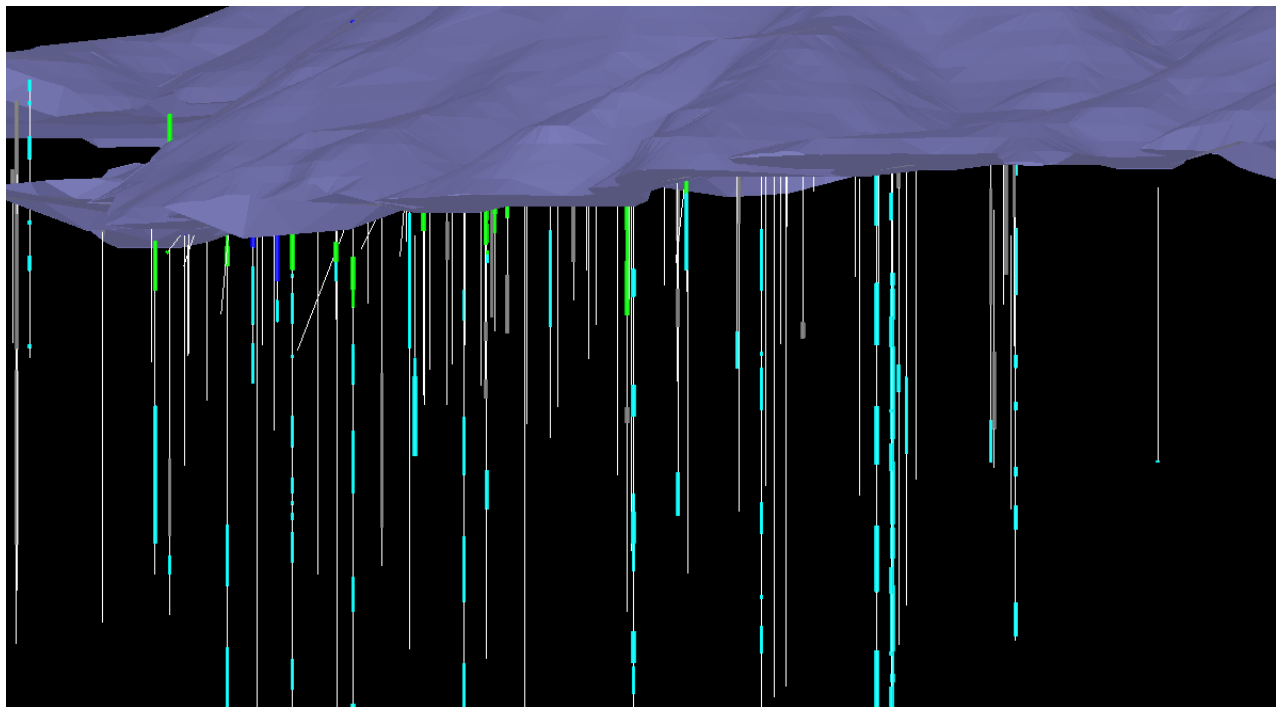


Figura 9. Sondeos de exploración y código de mineralización.

4.2. Modelo geológico

Una vez que se logra la interpretación y visualización de los sondeos de exploración, se puede generar un modelo geológico basado en toda la información que se importó en el apartado anterior. Crear un modelo geológico requiere de dos elementos clave, el primero es crear una correlación de los sondeos, esto quiere decir que se debe agrupar a los sondeos de acuerdo con la información que comparten. La descripción a detalle del procedimiento para generar la codificación se describe en el Apéndice B.

La Figura 10 muestra un ejemplo de codificación basada en las leyes de cobre. El color magenta representa los intervalos de leyes que van de 0.5 a 1%, por lo tanto, la codificación muestra la ley como una sola, sin importar el valor.

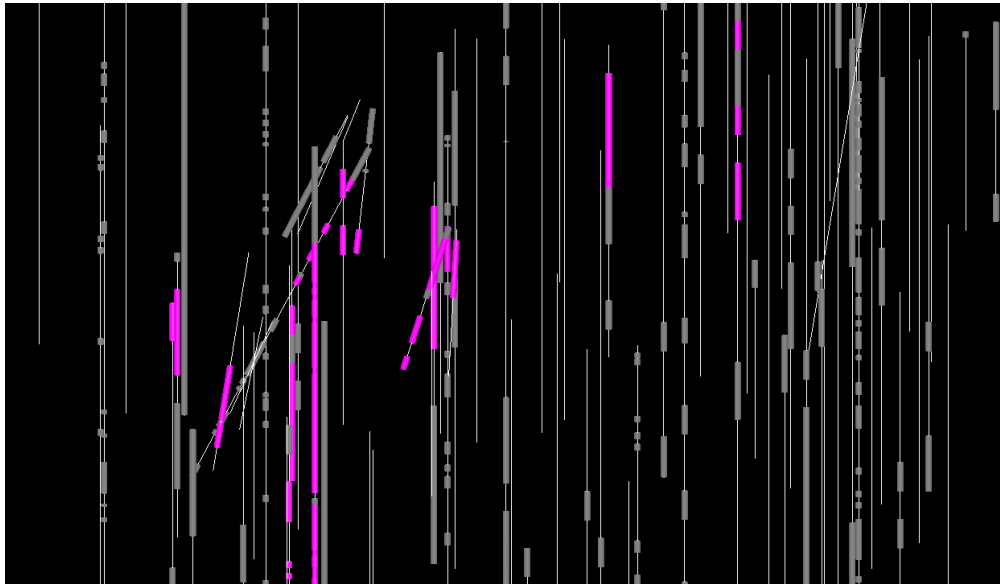


Figura 10. Correlación de leyes de cobre.

El segundo paso clave para crear un modelo geológico es generar el sólido que represente al modelo, siguiendo el resultado de la correlación. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de cómo mediante los distintos planos de una GridSet, se va trazando la forma más conveniente para el sólido. Al finalizar se genera el sólido 3D. El Apéndice B contiene la descripción a detalle de todo este proceso.

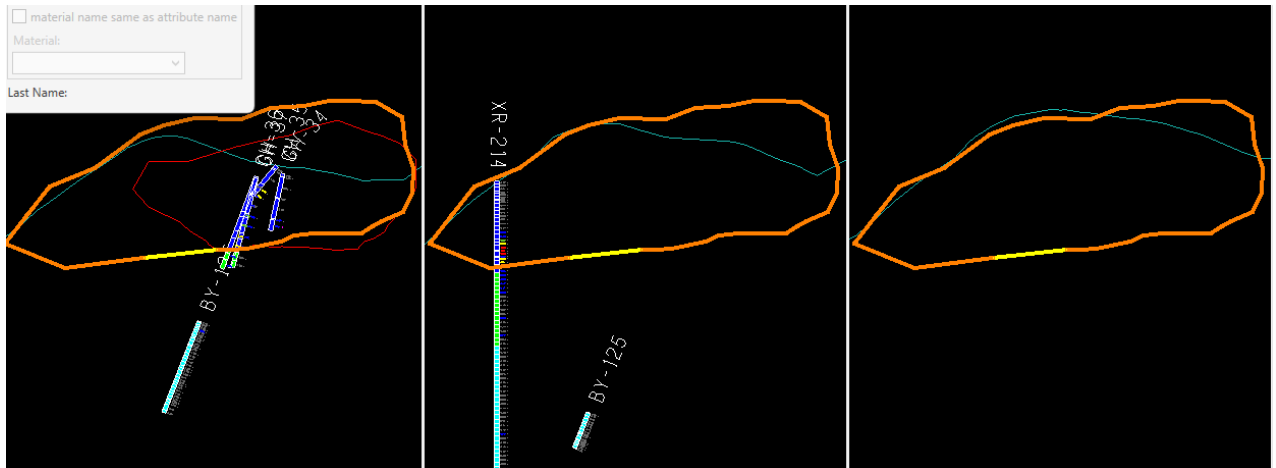


Figura 11. Avance del solido del modelo geológico.

Es importante mencionar que el resultado del modelo geológico dependerá de la interpretación y diseño propio, pues no hay un resultado preciso creado por el software. Para este proyecto se obtuvo el modelo geológico mostrado en la Figura 12.

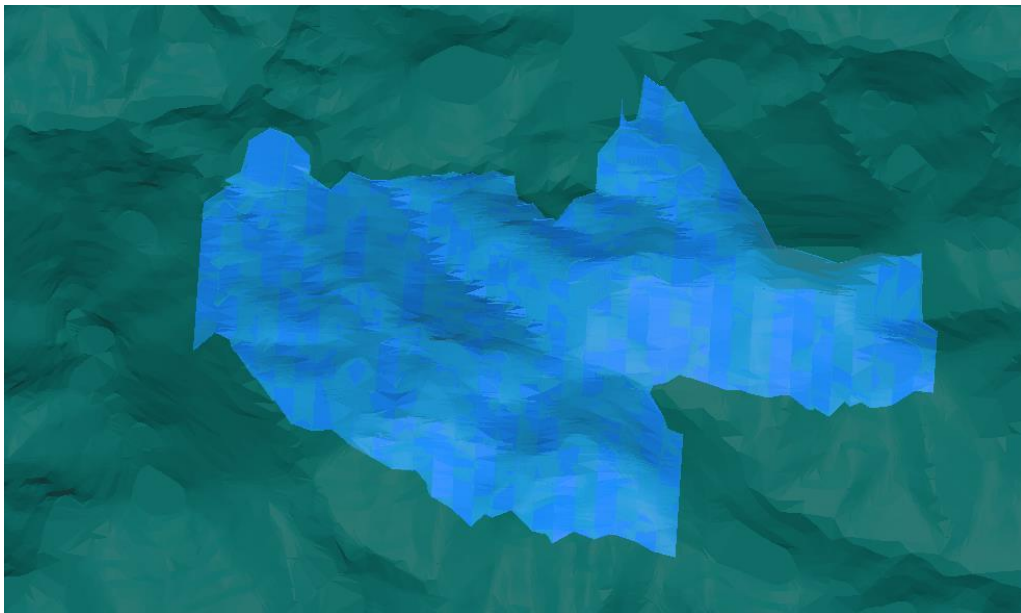


Figura 12. Modelo geológico.

4.3. Modelo de bloques

Como parte final de este ejercicio práctico, se debe crear un modelo de bloques con valores obtenidos a partir de distintas interpolaciones de la información manipulada en los apartados 4.1 y 4.2 de este escrito.

Para iniciar el proceso de la creación del modelo de bloques es necesario delimitar el área de trabajo para dicho modelo, esto incluye los límites del proyecto, las dimensiones de los bloques y los parámetros que se van a integrar, esto servirá para tener una cuadrícula base para posteriormente asignarle las propiedades que requiera el proyecto. En este proyecto el modelo contiene información relacionada con la topografía, litología, mineralización, densidad y leyes de cobre y molibdeno. El desarrollo de las codificaciones e interpolaciones creadas se muestra a detalle en el Apéndice C.

La topografía está representada por el valor porcentual del bloque que está por debajo de la superficie. En la Figura 13, se observa cómo los bloques presentan un color distinto principalmente en el límite de la topografía, estos colores representan una escala de porcentajes que van del 1-100% con intervalos de 10 en 10.

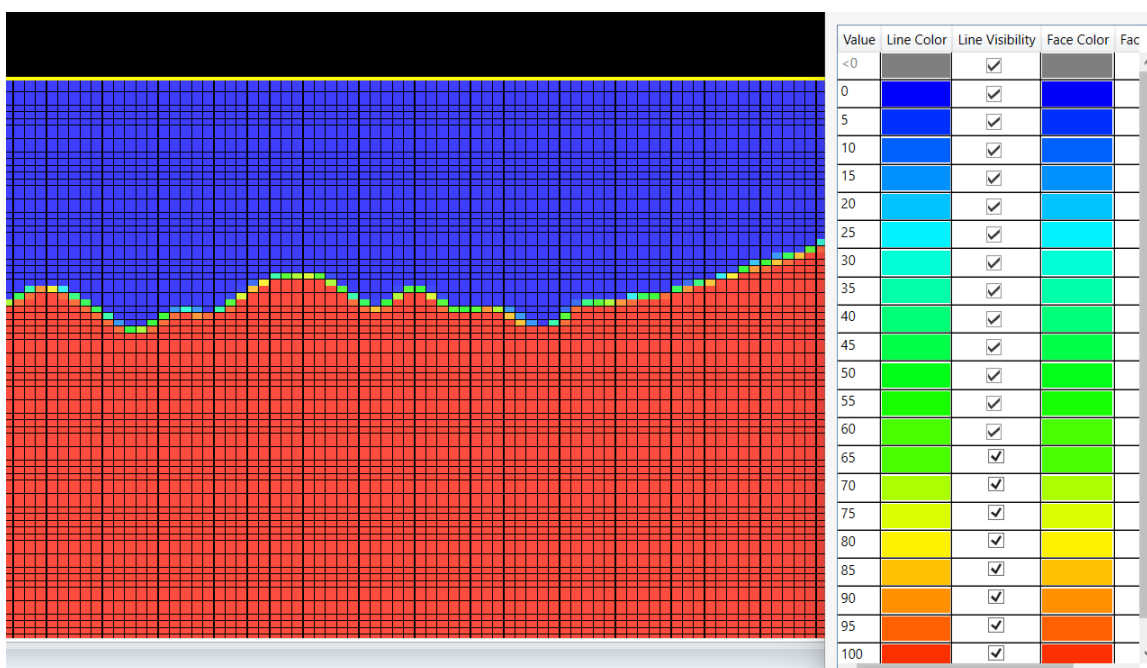


Figura 13. Topografía en el modelo de bloques.

Para el caso de la litología y la mineralización se contemplan los códigos del proyecto mostrados en la Figura 5. Por lo tanto, se realizó la asignación de estas dos propiedades al modelo de bloques, teniendo como resultado lo mostrado en las Figuras 14 (litología) y 15 (mineralización), las configuraciones del **numeric value** muestran el color que corresponde a cada código litológico y mineralógico del proyecto (Tabla 4).

Tabla 5. Códigos litológicos y mineralógicos.

CÓDIGOS LITOLÓGICOS		CÓDIGOS MINERALÓGICOS	
Diorita	1	Óxidos	1
Granodiorita	2	Sulfuros primarios	2
Cuarzo feldespato	3	Sulfuros secundarios	3
Brecha intermedia	4	Externo	4
Brecha tardía	5		
Roca encajonante	6		

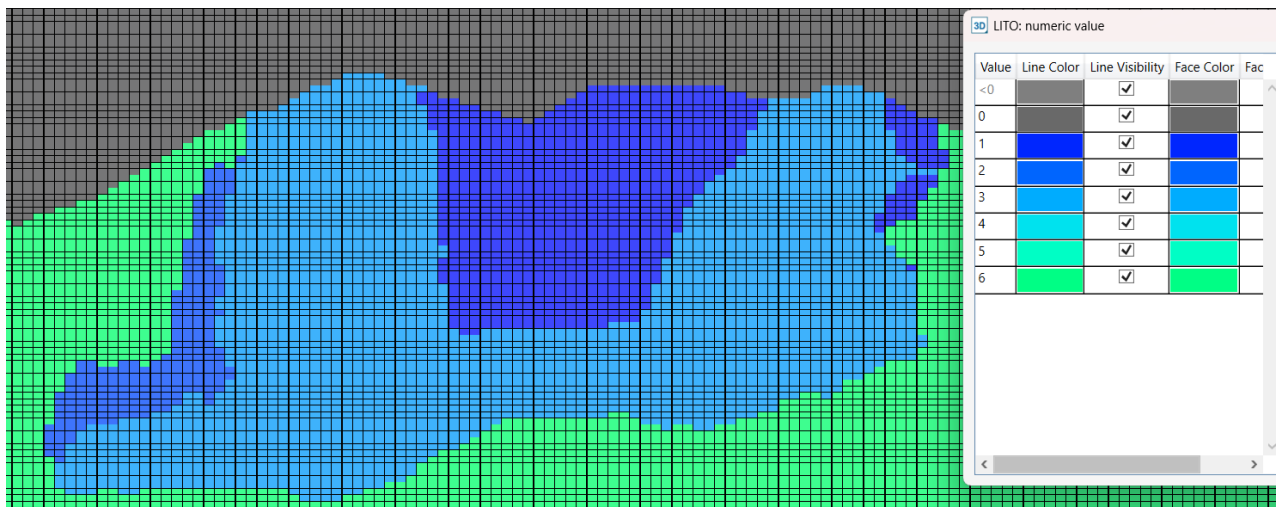


Figura 14. Litología en el modelo de bloques.

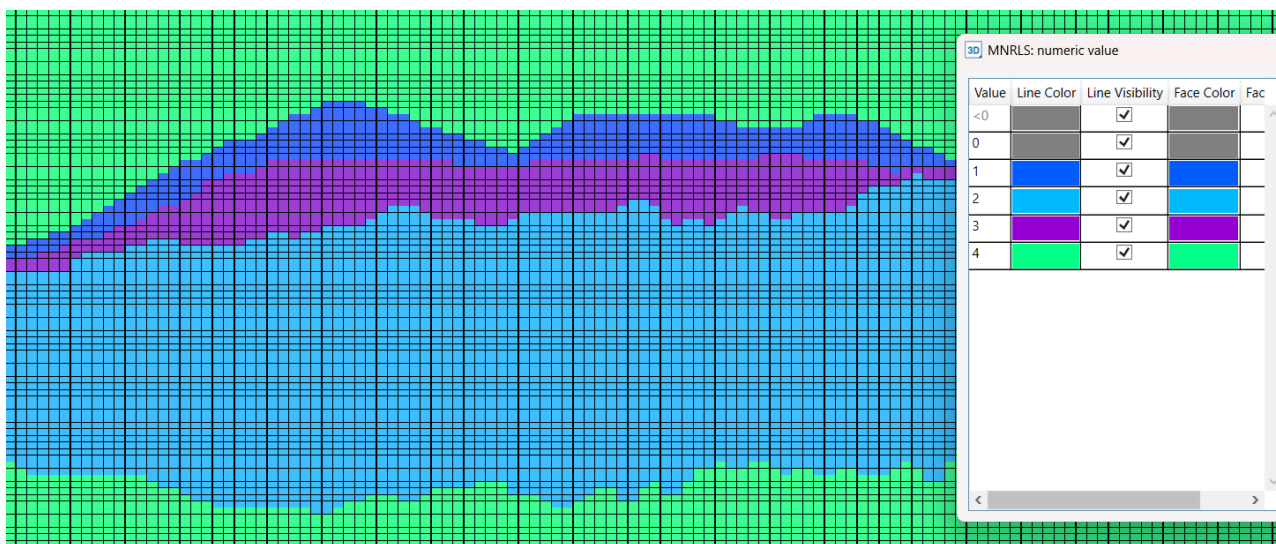


Figura 15. Mineralización en el modelo de bloques.

El resto de las interpolaciones requieren hacer uso de módulos de modelamiento avanzados del software, como son el **Model Calculation Tool** y el **Model Interpolation Tool** los cuales se basan en código de programación. Aunque no se requiere saber scripts complejos, se recomienda consultar el Apéndice C para obtener resultados más certeros.

El cálculo de densidad para el modelo de bloques se puede realizar a partir de la litología o de la mineralización, en este caso se propone hacerla por mineralización. Tomando en cuenta las siguientes condiciones:

1. Si el código de la mineralización es igual a 1, la densidad será de 2.8.
2. Si el código de la mineralización es igual a 2, la densidad será de 2.7.
3. Si el código de la mineralización es igual a 3, la densidad será de 2.6.

Esto quiere decir que, dependiendo del tipo de mineralización que contenga el bloque, se le asignará el valor de densidad que le corresponda. Los resultados se presentan en la Figura 16.

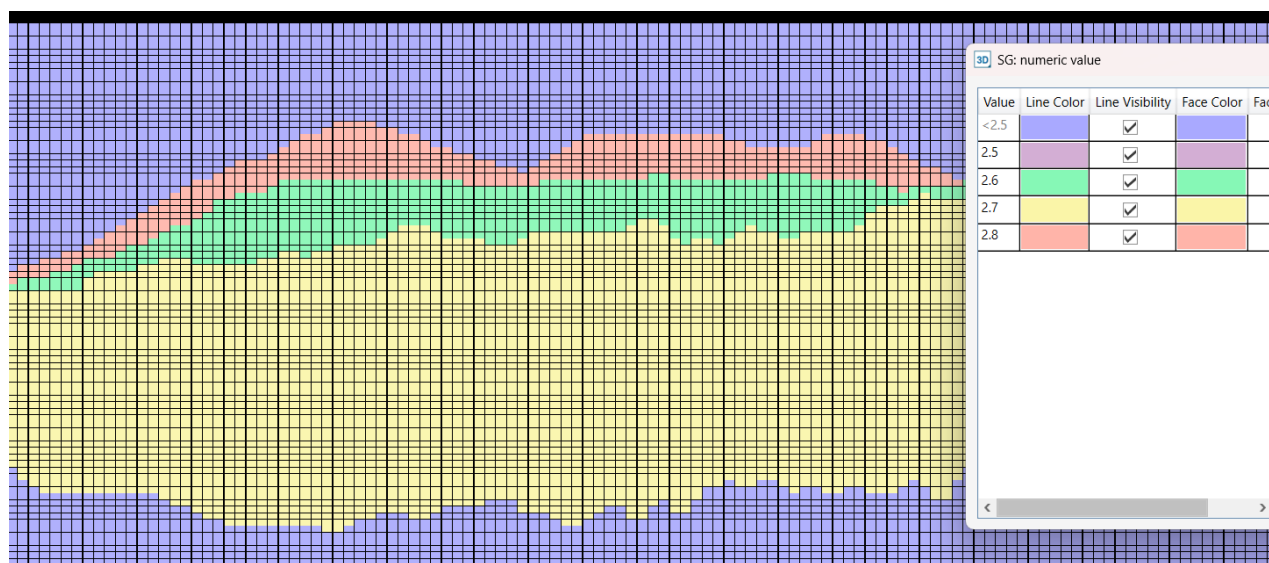


Figura 16. Densidad en el modelo de bloques.

Por último, se asignan los valores de las leyes de cobre y molibdeno mediante una interpolación, utilizando el método estadístico de ponderación de inverso a la distancia. En la cual, mediante una esfera, el software asigna valores a cada uno de los bloques a partir de los compósitos más cercanos, tal y como se muestra en la Figura 17.

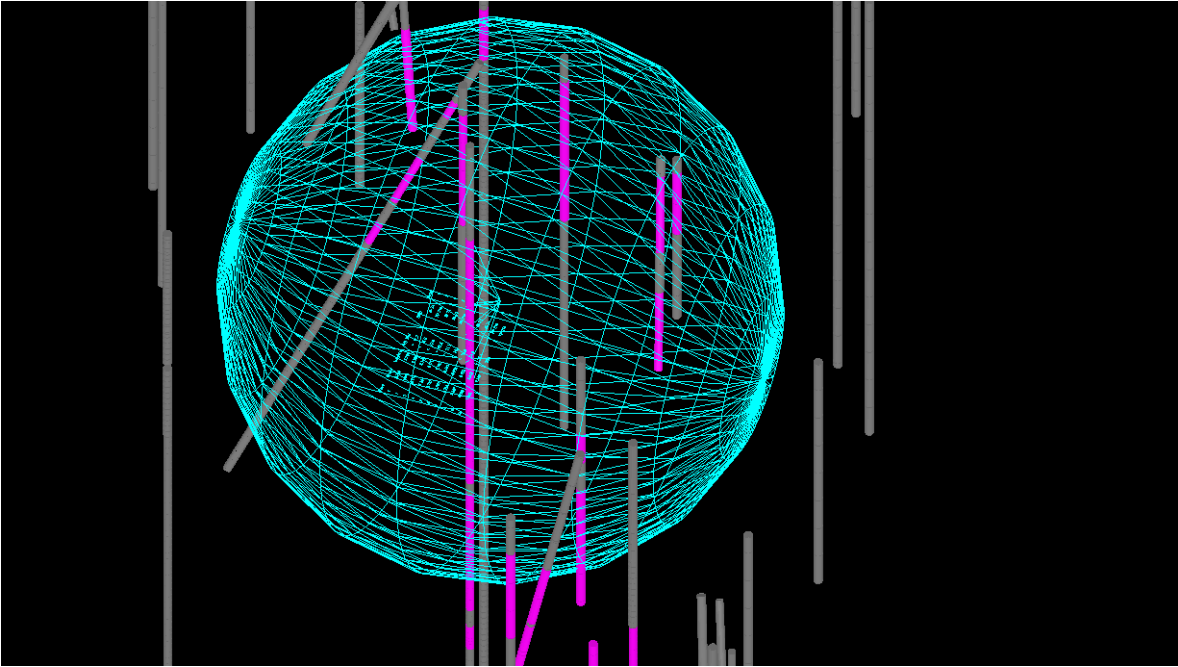


Figura 17. Interpolación para las leyes de cobre.

El modelo de bloques por leyes de cobre se muestra en la Figura 18.

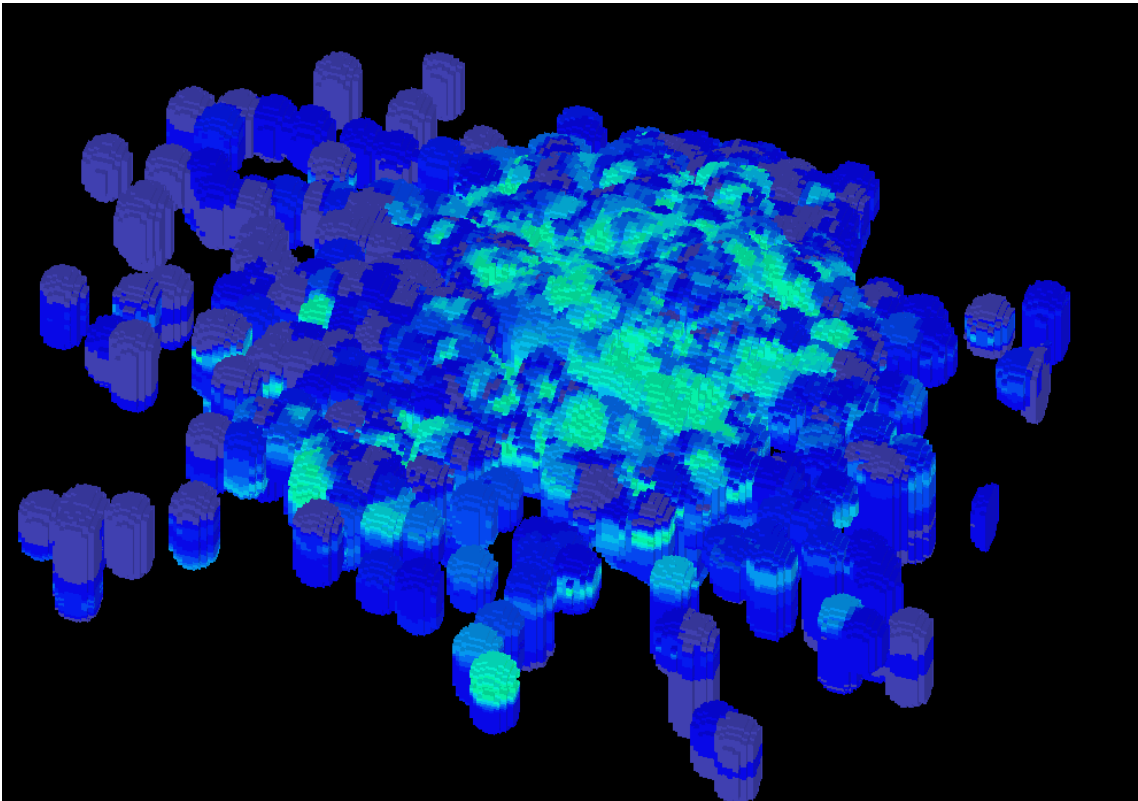


Figura 18. Modelo de bloques por leyes de cobre.

5.Resultados

Los resultados obtenidos dentro del software MinePlan 3D incluyen la visualización de los sondeos de exploración, un modelo geológico y un modelo de bloques basados en la información manipulada que se obtuvo en la campaña de exploración.

5.1. Sondeos de exploración

En la Figura 19 se observa a los sondeos de exploración y la topografía del sitio. Con este resultado se tiene la primera visualización de toda la información que se logró recabar en la campaña de exploración, desde la ubicación geográfica hasta valores asignados de acuerdo con las características de cada sondeo. El detalle de información presentada se logró con una correcta importación de los datos.

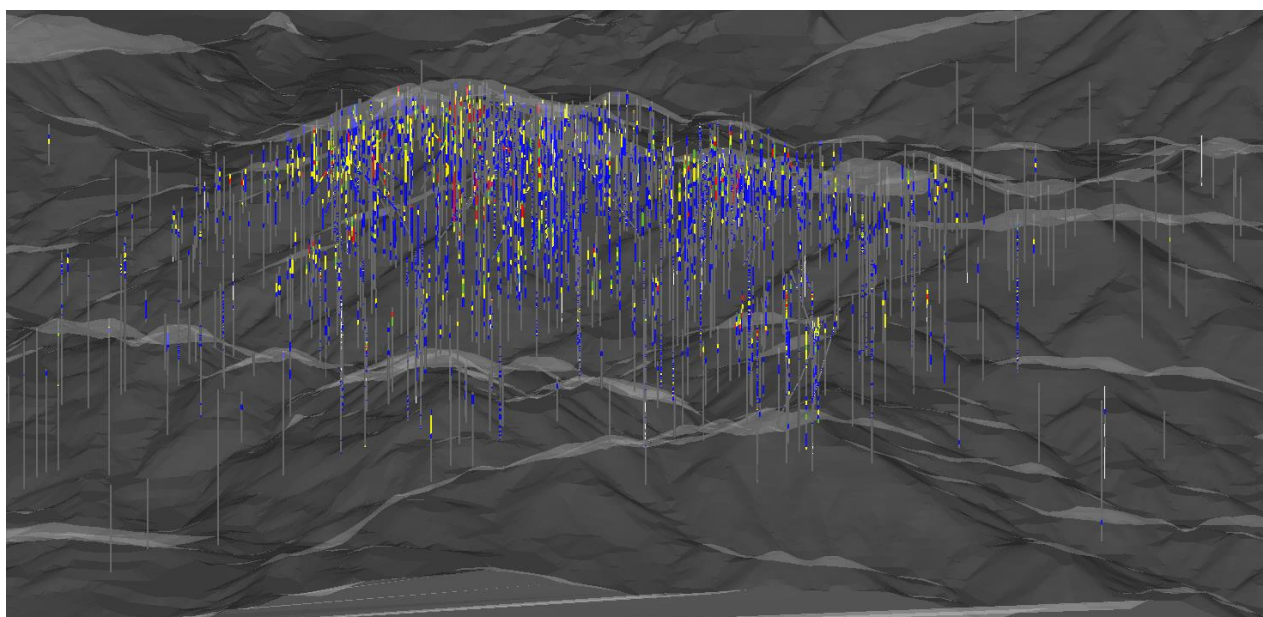


Figura 19. Sondeos de exploración.

5.2. Modelo geológico

El modelo geológico se obtuvo a partir de la codificación creada de las leyes de cobre, como se mencionó en el apartado 4.2. este modelo se crea en gran parte, por criterio propio, por lo que los resultados pueden variar en cada uno de los casos. Para este proyecto el resultado se muestra en la Figura 20. El sólido al que se logró llegar sirve para visualizar la ubicación y distribución de los minerales, tomando en cuenta un grupo de leyes alto y excluyendo leyes demasiado pequeñas.

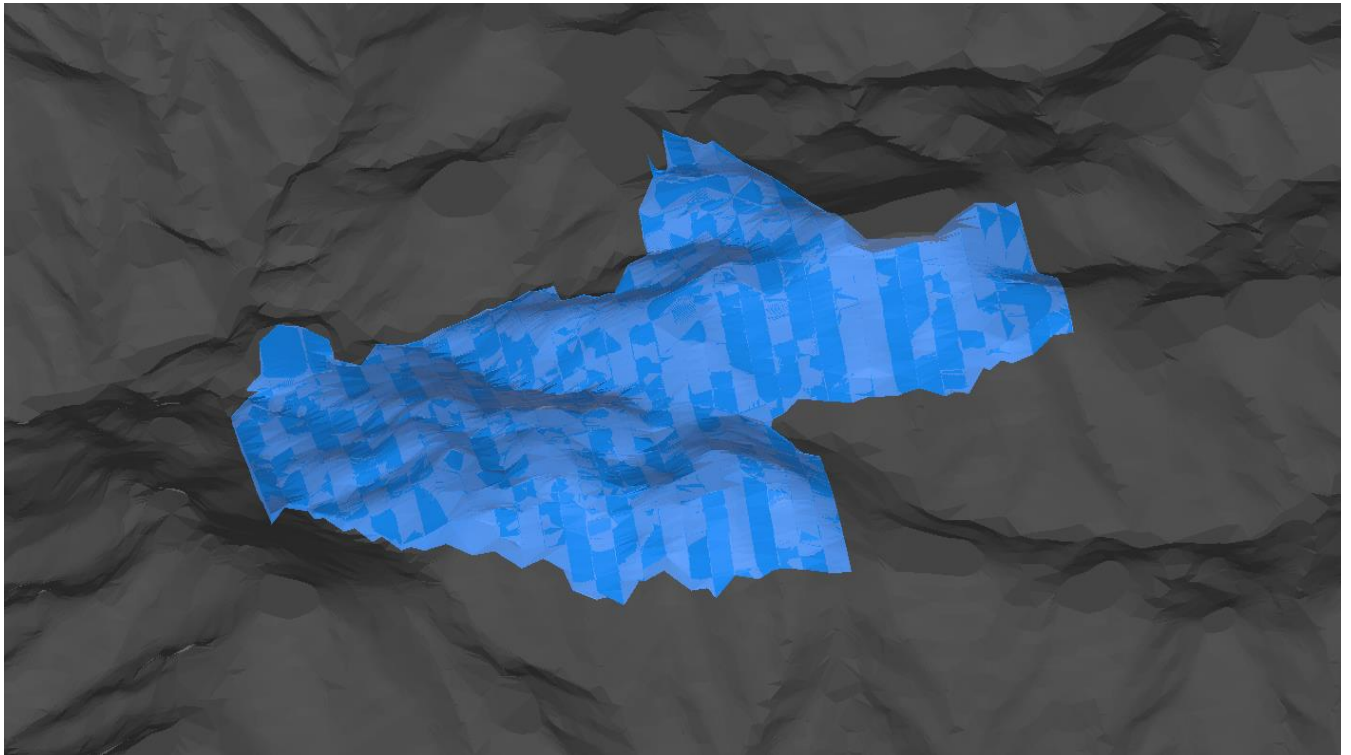


Figura 20. Modelo geológico.

5.3. Modelo de bloques

El resultado final del proyecto contempla una representación tridimensional en forma de modelo de bloques que contiene la información de la topografía, la litología, la mineralización, la densidad y las leyes de cobre y molibdeno. Este modelo permite tener una mayor certeza de la viabilidad del proyecto, pues a cada uno de los bloques se le puede realizar una evaluación para comprobar la rentabilidad de su extracción.

En la Figura 21 se puede observar el resultado del modelo de bloques a partir de las leyes de Cu presentes, la gama de colores que se maneja representa un rango de valores de 0% (azul oscuro) a 0.5% (verde) en intervalos de 0.05.

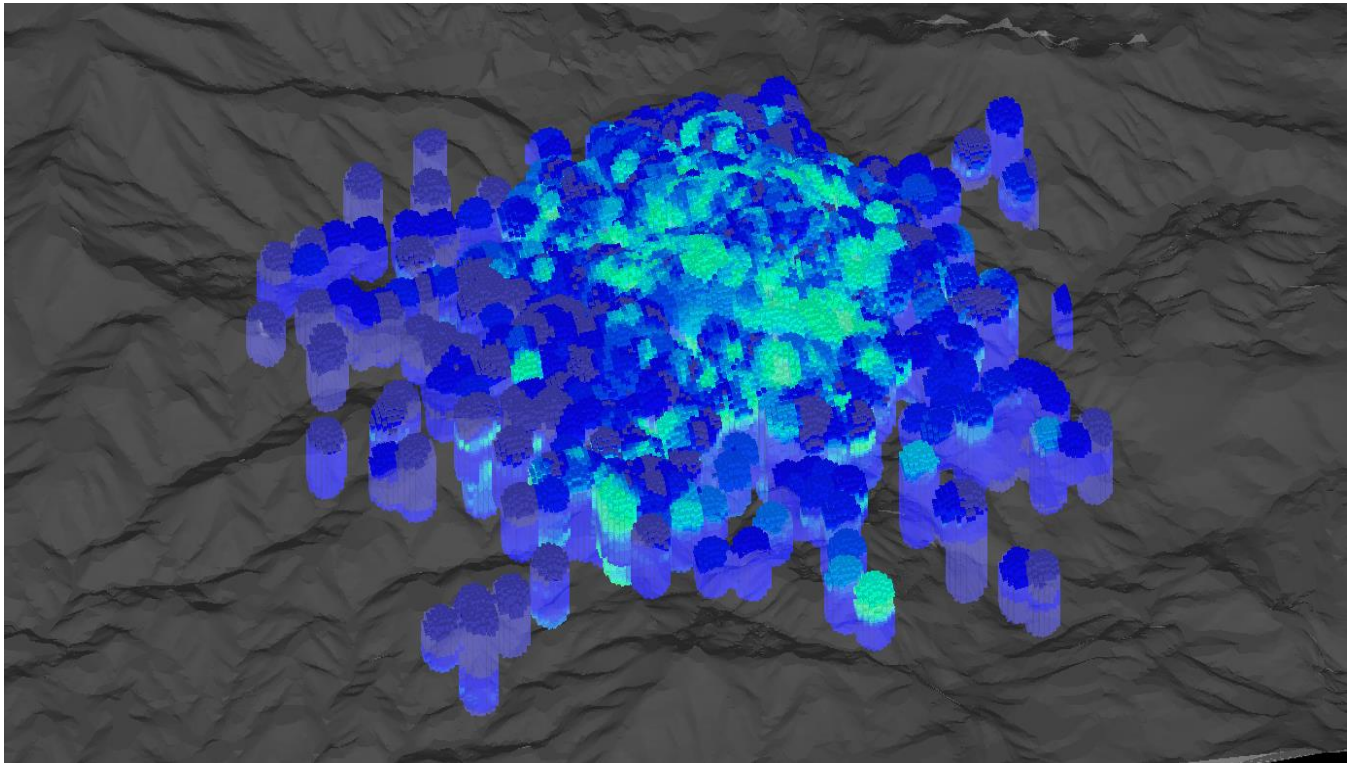


Figura 21. Modelo de bloques.

6. Conclusiones

Realizar proyectos mineros es sinónimo de un constante análisis y evaluación de las características del yacimiento mineral, principalmente cuando se trata de realizar una evaluación económica, pues tener un gran porcentaje de certeza de la viabilidad del proyecto, facilita las etapas posteriores y la toma de decisiones del proyecto.

El desarrollo de un modelo de bloques mediante el uso del software MinePlan 3D, permitió un manejo más rápido y eficiente de toda la información recabada en una campaña de exploración, pues al tener una correcta organización, validación e interpretación de los datos de las tablas geológicas, se logró tener una visualización precisa de los sondeos, generar un modelo geológico y un modelo de bloques esencial para la evaluación económica del proyecto.

El escrito logra ser una guía para el desarrollo de un modelo de bloques, así cualquiera de las y los estudiantes de la carrera de ingeniería de Minas y Metalurgia y de Ingeniería Geológica, que requiera hacer uso de este, podrá contar con un manual de apoyo que facilite el uso de software, resaltando que hoy en día es fundamental que durante la preparación académica se tenga conocimiento del uso de este o cualquier otro software de diseño minero.

7.Referencias

Asociación Geolnova. (2019). *¿Qué es la geoestadística y cuáles son los principales análisis geoestadísticos?* Geolnova.

Castilla, J. & Herrera, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Universidad Politécnica de Madrid.

Chamizo, J. (2010). *Una tipología de los modelos para la enseñanza de las ciencias*. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias.

García de Miguel, J. M. (2005). *Yacimientos minerales: Los tesoros de la Tierra*. Fundación Gómez Pardo.

Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2.^a ed.). John Wiley & Sons.

Hexagon Mining. (2022). *Primeros pasos con MinePlan*. Hexagon Mining.

López Aburto, V. M. (2013). *Diseño de operaciones mineras a cielo abierto*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Maldonado, C. (2023). *El método kriging ordinario para la estimación de recursos minerales del Proyecto Purple Hill, Tacna, Perú*. TESIS Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con mención en Recursos Mineros. Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). *Techniques of mineral characterization and their use in mining exploration and exploitation*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.

Mendoza, C. (2021). *Modelado y estimación de recursos uraníferos mediante el uso de técnicas geoestadísticas del Depósito La Coma, Nuevo León y Tamaulipas, México*. Tesis (Master), E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM).

Moon, C. J., Whateley, M. K. G., & Evans, A. M. (2006). *Introduction to mineral exploration* (2.^a ed.). Blackwell Publishing.

Polare, M. (2021). *Estratigrafía del subsuelo: Guía 9ª Edición*. UNR.

Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Manual de muestreo y control de calidad en exploración minera*. Servicio Geológico Mexicano.

Snowden Mining Industry Consultants. (s.f.). *Resource Estimation*. Snowden Mining Industry Consultants.

Vázquez, G. (s. f.). Columnas estratigráficas. Universidad Nacional Autónoma de México.

Wellmer, F.-W., Dalheimer, M., & Wagner, M. (2008). *Economic evaluations in exploration* (2nd ed.). Springer.

Apéndice A. Manejo de la base de datos de una campaña de exploración con MinePlan 3D

Este primer apéndice aborda el apartado de sondeos de exploración. Por lo tanto, se describe el procedimiento para importar una base de datos obtenida de una campaña exploración y poder visualizar la información con apoyo del software.

Todas las aplicaciones con las que cuenta MinePlan 3D, ya se incluyen dentro de sus módulos y estos se clasifican de acuerdo con el tipo de herramienta de dibujo que contienen. Para esta primera etapa del proyecto se utilizará el módulo de Geo Tools, el cual contiene todas las herramientas para el análisis de sondeos de exploración.

Dentro de la paquetería de Geo Tools, se utilizará la herramienta de Torque, la cual sirve para importar toda la información de las tablas de Excel de la campaña de exploración.

MS Torque puede abrirse desde **Geo Tools>Torque**, como se muestra en la Figura A1.

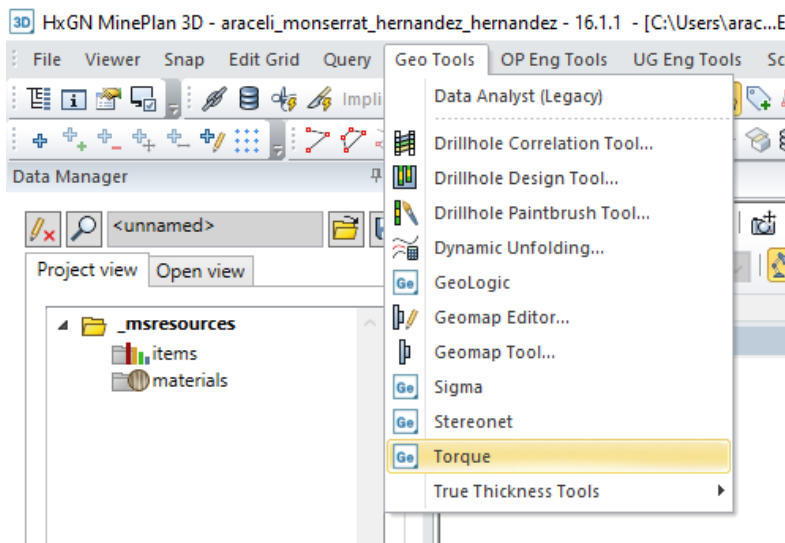


Figura A1. Aplicación MS Torque.

Para iniciar un nuevo proyecto se tiene la opción de **Project>New**, la cual arrojará una ventana en donde se podrán configurar las opciones para el nuevo proyecto. Se debe tener en cuenta que, para el nombre no se debe exceder los 10 caracteres y no se deben utilizar acentos ni espacios. En la Figura A2 muestra un ejemplo de configuración.

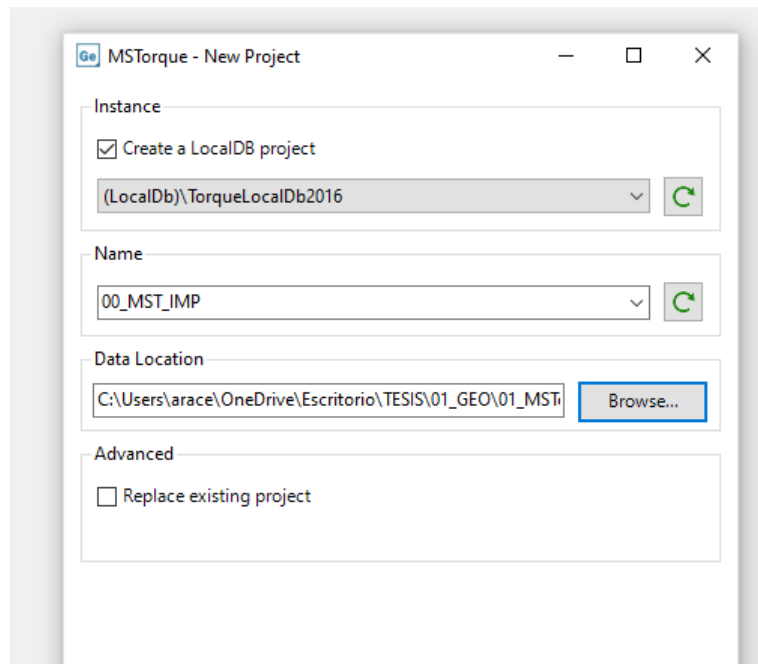


Figura A2. Configuración para crear un nuevo proyecto de MS Torque.

Dentro del explorador de archivos se generarán de manera automática una serie de carpetas y dos archivos tipo .mdf y .ldf en la carpeta asignada en el Data Location (Figura A3). Esta es una forma de verificar que el proyecto se creó correctamente. Además, se debe habilitar el comando **Setup** dentro del proyecto, el ejemplo se puede observar en la Figura A4.

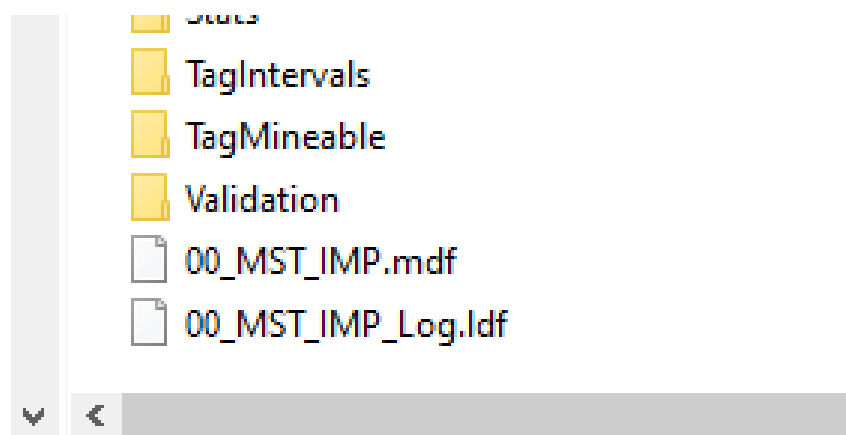


Figura A3. Archivos .mdf y .ldf creados.

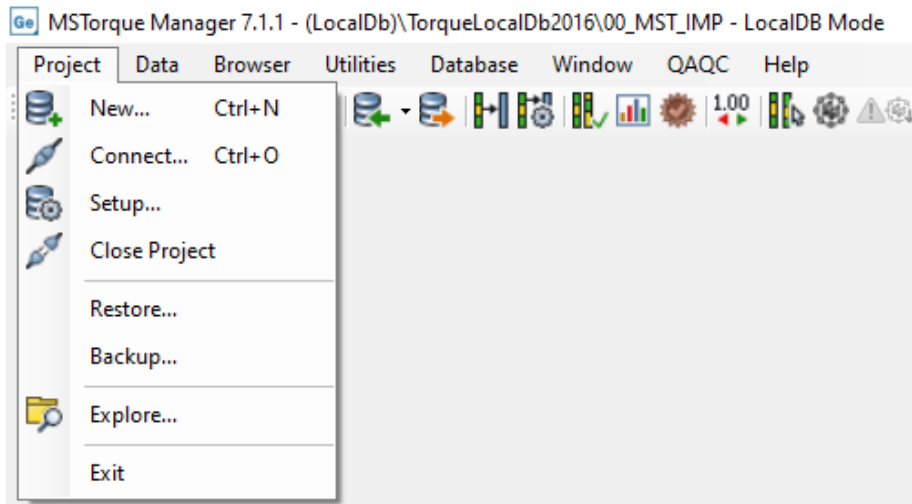


Figura A4. Comando Setup activado.

A.1. Importar base de datos

La opción de **Setup** permite realizar la configuración al momento de importar una base de datos.

Para este ejercicio se utilizará una base de datos en formato .xlsx proporcionada por la empresa Hexagon, la cual contiene las tablas de Assays, Collar, Geology y Survey (Figuras A5-A8). A continuación, se muestran las filas iniciales de cada una de ellas.

Sample Site N	From	To	Total Copper	Acid Sol CU	Moly	Zinc	DHTYPE
BY-21	0	15	0.001	0	0	0	DD
BY-21	15	30	0.844	0.366	0.007	0	DD
BY-21	30	45	0.958	0.257	0.006	0	DD
BY-21	45	60	0.693	0.375	0.011	0	DD
BY-21	60	75	0.188	0	0.011	0	DD
BY-21	75	90	0.221	0	0.006	0	DD
BY-21	90	105	0.175	0	0.009	0	DD
BY-21	105	120	0.192	0	0.011	0	DD
BY-21	120	135	0.199	0	0.007	0	DD
BY-21	135	150	0.232	0	0.007	0	DD
BY-21	150	165	0.148	0	0.006	0	DD
BY-62	0	15	0.029	0.007	0.004	0	DD

Figura A5. Datos de la tabla Assays.

Sample Site Name	Easting	Northing	Elevation	Length	Drillhole Type	Drill Program
BY-115	6165	6958.5	1509.58	119	DD	1
BY-116	6363.1	7121.6	1609.19	165	DD	1
BY-117	6321.3	7252.1	1622.54	135	DD	1
BY-125	6208.53	7103.58	1562.06	200.25	DD	1
BY-126	5851.68	7216.27	1552.53	360.27	DD	1
BY-21	6287.8	6497.7	1501.98	165	DD	1
BY-62	5809.4	7187.9	1547.35	285	DD	1
BY-82	5613.3	6868.3	1501.97	150	DD	1
BY-83	5608.2	7034.3	1524.35	236.7	DD	1
BY-84	5323.6	6786.2	1494.26	134	DD	1
BY-85	5472.9	6424.2	1489.78	142.5	DD	1

Figura A6. Datos de la tabla Collar.

Sample Site Name	From	To	Lito	Min	Alt
BY-115	0	59		-1	-1
BY-115	59	79	QZ-FEL	SEC	-1
BY-115	79	99		-1 PRI	-1
BY-115	99	119		-1	-1
BY-116	0	20	DI	OXI	-1
BY-116	20	40		-1 OXI	-1
BY-116	40	75		-1 SEC	PRO
BY-116	75	95	DI	SEC	-1
BY-116	95	165		-1 PRI	PRO
BY-117	0	20		-1 OXI	-1

Figura A7. Datos de la tabla Geology.

Sample Site Name	Azimuth	Dip	Depth
BY-21	0	-90	0
BY-62	0	-90	0
BY-82	0	-90	0
BY-83	0	-90	0
BY-84	0	-90	0
BY-85	0	-90	0
BY-86	0	-90	0
BY-88	0	-90	0

Figura A8. Datos de la tabla Survey.

- I. Para iniciar con la importación de los datos, se deben agregar todos los ítems contenidos en las tablas Assays y Geology que conforman la base de datos, en este caso son los elementos (cobre, molibdeno, zinc), la litología, mineralogía y

alteración, se puede tomar como ejemplo la Figura A9. Al finalizar, guardar la información con la opción **Save to database**.

Commit Action	DB	Name	Long Name	Abbr.	Data Type	Min	Max	Display Prec.	Unit	Enums	Coverages	Comments
None	✓	TCU	TCU	TCU	Small Real	0.00	10.00	2	None		Assays	
None	✓	MOLY	MOLY	MOLY	Small Real	0.00	1.00	2	None		Assays	
None	✓	ZINC	ZINC	ZINC	Small Real	0.00	3.00	2	None		Assays	
Update	✓	LITO	LITO	LITO	Small Integer						Geology	
Update	✓	MIN	MIN	MIN	Std. Integer						Geology	
None	✓	ALT	ALT	ALT	Small Integer						Geology	

Figura A9. Ítems creados.

- II. Para importar la información de la tabla Collar, debe seleccionarse la opción **Data>General importer** (Figura A10). En la ventana que se abre, seleccionar la opción **New importer>Sample sites**. Aquí se debe configurar la información relacionada con el tipo de archivo que se importara, se puede tomar de ejemplo la Figura A11.

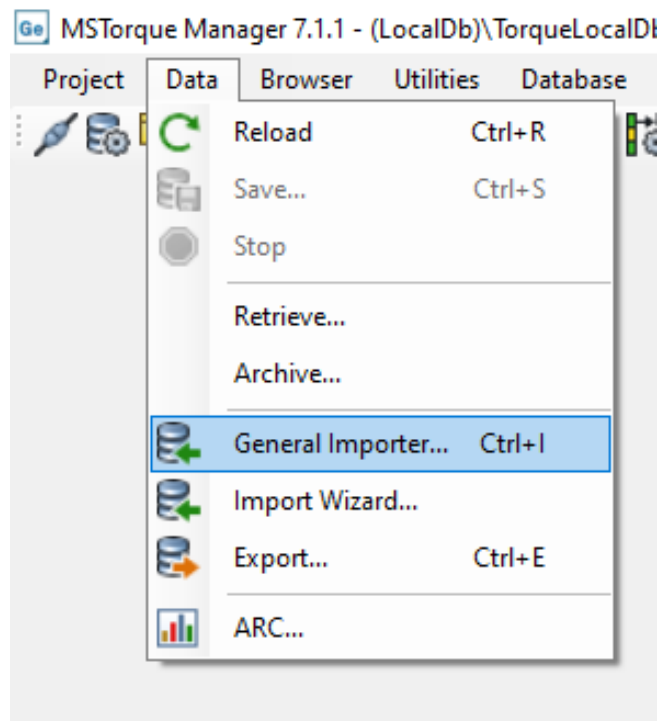


Figura A10. Comando General Importer.

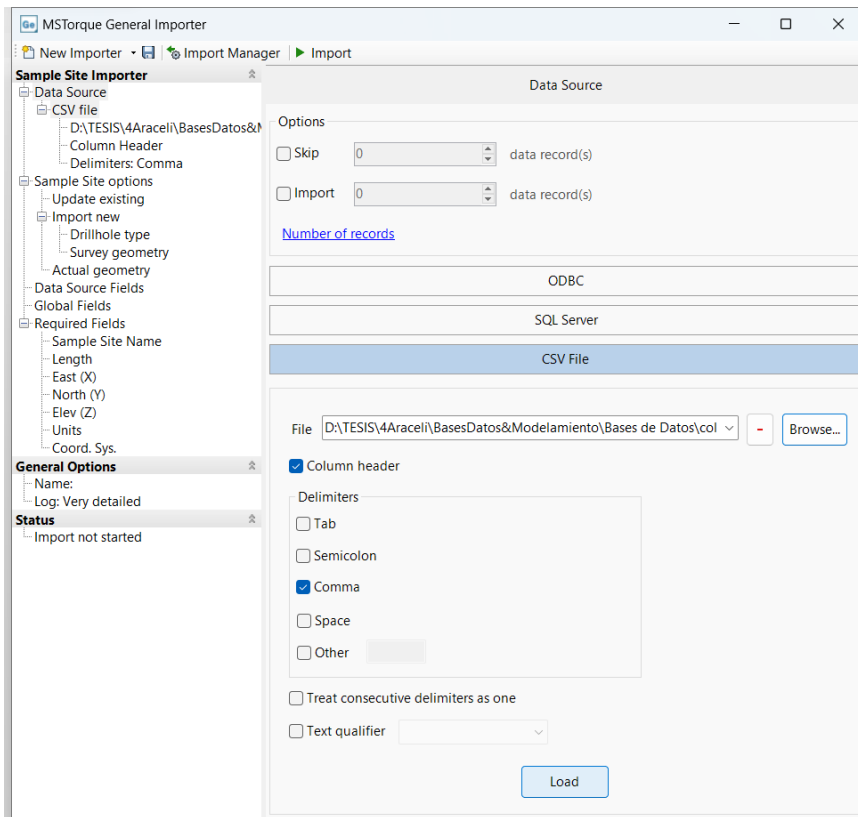


Figura A11. Configuración General importer.

- III. Para verificar que la información se importó de manera correcta, en la opción de **Data Source Fields** debe aparecer toda la información cargada. Ahí mismo seleccionar la opción **Refresh** y **Auto map** para que de manera automática se asignen los ítems correspondientes, tal y como se muestran en la Figura A12.

Sample Site Name	Easting	Northing	Elevation	Length	Drillhole Type	Drill Program
Sample Site Name	East (X)	North (Y)	Elev (Z)	Length	Dh Type	
BY-115	6165	6958.5	1509.58	119	DD	1
BY-116	6363.1	7121.6	1609.19	165	DD	1
BY-117	6321.3	7252.1	1622.54	135	DD	1
BY-125	6208.53	7103.58	1562.06	200.25	DD	1
BY-126	5851.68	7216.27	1552.53	360.27	DD	1
BY-21	6287.8	6497.7	1501.98	165	DD	1
BY-62	5809.4	7187.9	1547.35	285	DD	1
BY-82	5613.3	6868.3	1501.97	150	DD	1
BY-83	5608.2	7034.3	1524.35	236.7	DD	1
BY-84	5323.6	6786.2	1494.26	134	DD	1
BY-85	5472.9	6424.2	1489.78	142.5	DD	1
BY-86	5734.1	6088.4	1443.09	135	DD	1
BY-88	5271.72	6591.9	1553.21	203.9	DD	1
BY-89	5895.5	6541.9	1455.73	165	DD	1
BY-90	5678.1	6720.1	1464.98	150	DD	1
BY-91	6281.7	6985	1566.49	234.5	DD	1
BY-92	5586	5993.4	1517.38	164.1	DD	1
BY-93	6111.3	6696.2	1489.27	210	DD	1
BY-94	6279.9	6690.8	1547.02	180	DD	1
BY-95	6540.7	7200.4	1662.49	148.7	DD	1

Figura A12. Información cargada.

- IV. En el módulo **Global Fields> Add required**, ajustar las unidades correspondientes y en la ventana de **General Options**, agregar el nombre del archivo, la Figura A13 muestra un ejemplo de configuración.

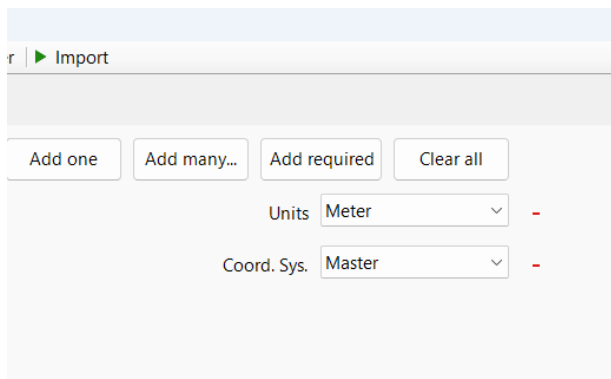


Figura A13. Configuración de unidades.

- V. Finalmente, en la opción de **Status>Import not started** dar clic en **Import**.
- VI. La segunda tabla de datos a importar será la de Survey, seleccionar el comando de **New Importer>Sample site geometry**, la secuencia se muestra en la Figura A14.

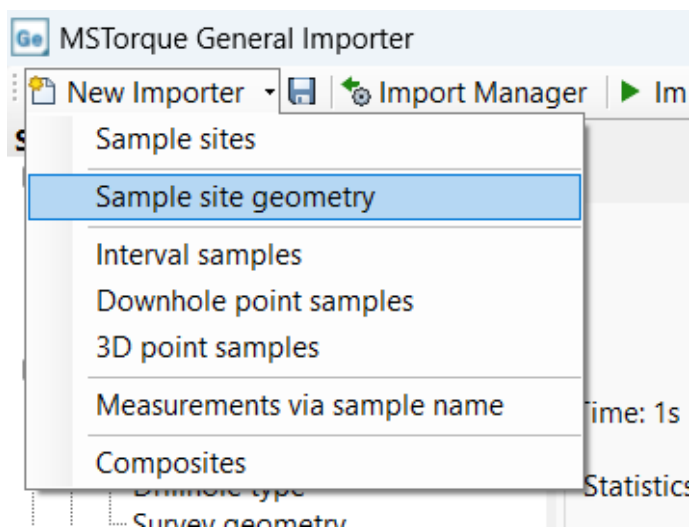


Figura A14. Comando Sample site geometry.

Las opciones que se configuran para esta tabla de datos son muy similares a las de la tabla de Collar, siguiendo los pasos de la tabla anterior, ajustar la información requerida dentro de los módulos **SS geometry options**, **Data Source Fields**, **Name** e **Import not started**

- VII. En el paso I de este apéndice se agregaron los ítems a utilizar para las tablas de Assays y Geology, sin embargo, la información requiere ser cargada desde el módulo **New Importer>Interval Samples** (Figura A15). Los pasos por seguir son los mismos que con las tablas anteriores.

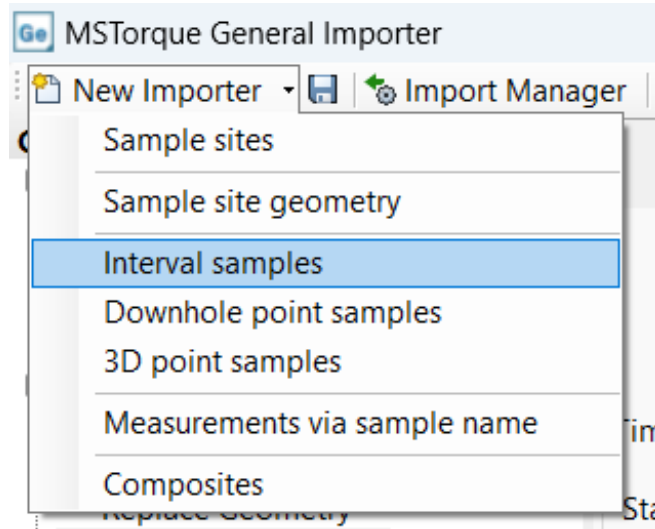


Figura A15. Modulo Interval Samples.

- VIII. Al finalizar la importación, guardar la información con la opción de **Save**. En la Figura A16 se puede observar la información guardada de los datos importados.

	Name	Legacy Name	Intervals	Downhole Points	Composite	Geometry	Geometry Type	Ac Lei
1	BY-115		12	0	0	A:1 D:-	Survey	
2	BY-116		16	0	0	A:1 D:-	Survey	
3	BY-117		13	0	0	A:1 D:-	Survey	
4	BY-125		102	0	0	A:2 D:-	Survey	
5	BY-126		149	0	0	A:4 D:-	Survey	
6	BY-21		18	0	0	A:1 D:-	Survey	
7	BY-62		28	0	0	A:1 D:-	Survey	
8	BY-82		12	0	0	A:1 D:-	Survey	
9	BY-83		21	0	0	A:1 D:-	Survey	

Figura A16. Opción Save para guardar la información importada.

Una vez importados los datos, dando clic en cualquiera de los sondeos, se podrá ver la información correspondiente a ese sondeo.

- IX. Si se desea consultar de nuevo la información que se importó, debe seleccionarse el módulo de **Data>General Importer> Import Manager**, en la Figura A17 se muestra que para este ejercicio se importaron de manera correcta las 4 tablas con la información de la campaña de exploración.

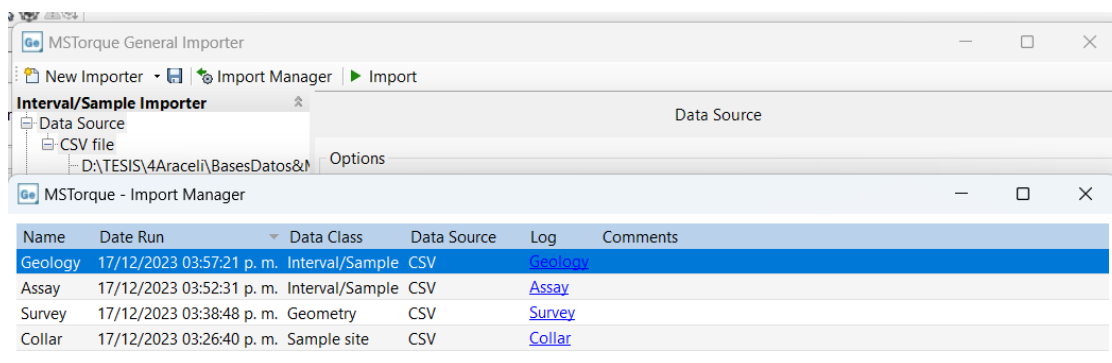


Figura A17. Tablas importadas.

A.2. Respaldo back up

Realizar una copia de respaldo de la base de datos de MS Torque es una tarea simple e importante. Es una manera sencilla de compartir datos con compañeros de trabajo o restablecer los datos al estado anterior, si fuera necesario.

Para generar un respaldo de la base de datos deben seguirse los siguientes pasos:

- I. Ingresar al módulo **Project>Backup**, dentro del paquete MS Torque (Figura A18).

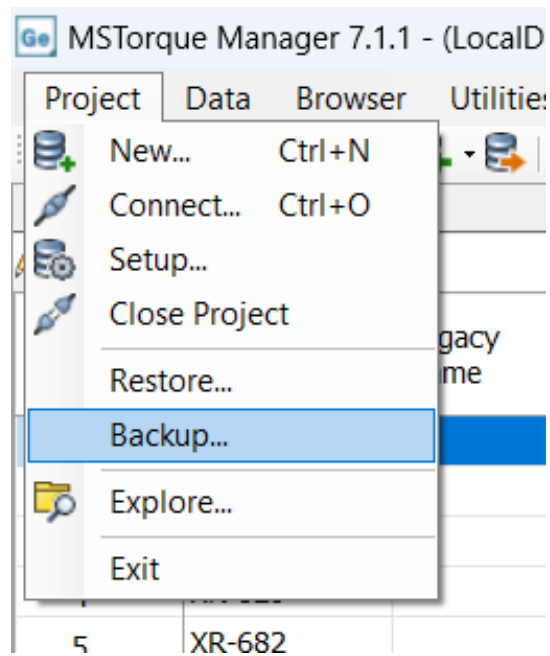


Figura A18. Módulo Backup.

- II. En la nueva ventana se debe asignar un nombre al respaldo. En este caso no hay un límite de caracteres. La Figura A19 muestra un ejemplo de nombre para el respaldo.

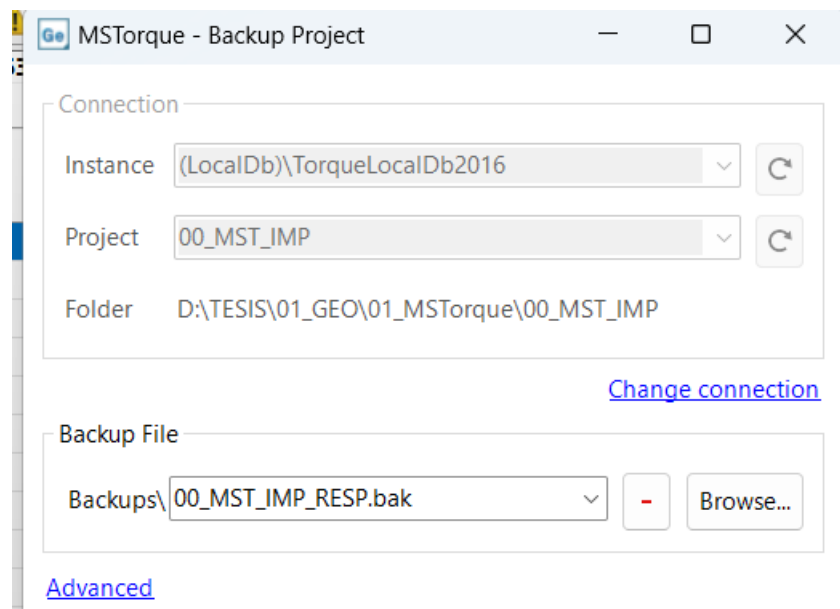


Figura A19. Crear un Backup.

- III. Para verificar que se creó de manera correcta, puede consultarse al archivo .bak desde los archivos personales (Figura A20).



Figura A20. Archivo .bak.

- IV. Si ya se cuenta con un respaldo y se requiera abrir desde el paquete de **MS Torque** para recuperar la información contenida, desde el módulo **Project>Restore** se podrá abrir el archivo .bak (Figura A21)

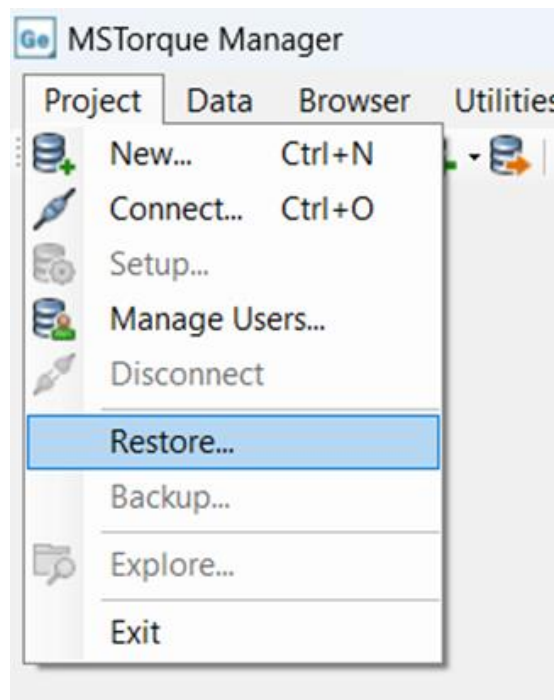


Figura A21. Módulo Restore.

A3. Visualización de sondeos

Una vez importada la información de la base de datos, no será posible visualizar los sondeos desde el paquete de **MSTorque**, esto solo se podrá hacer desde la ventana de dibujo general de **MinePlan 3D**. A continuación, se describen los pasos a seguir para generar la vida 3D de los sondeos.

- I. Al utilizar un software de diseño minero siempre se recomienda crear carpetas para separar la información de los dibujos creados y manejar todos los datos de una manera más sencilla.

En este caso, se recomienda crear una carpeta especial para la vista de los sondeos de exploración.

Dentro de la carpeta **_msresources> New> Folder**, crear una carpeta con el nombre de **01_Sondeos**, tal y como se observa en la Figura A22.

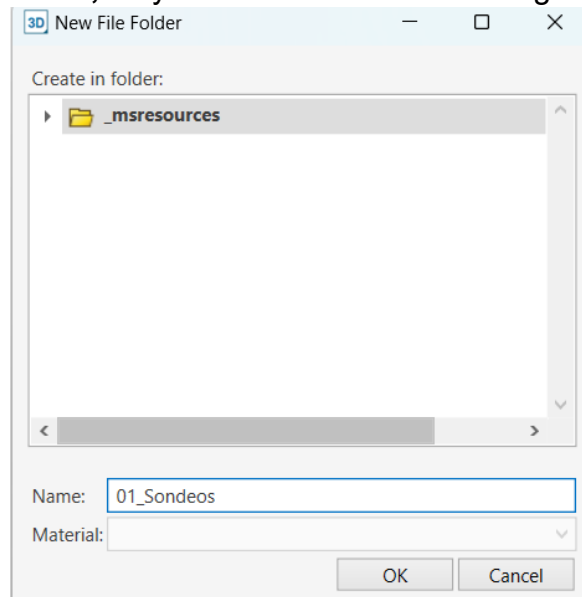


Figura A22. Crear nueva carpeta.

- II. Para crear un nuevo visor que permita analizar la información importada anteriormente, seleccionar la opción de **New>DrillholeView>Drillhole Manager Torque**, asignar un nombre y los ítems que se desean ver en los sondeos, las Figuras A23 y A24 muestran dicha secuencia.

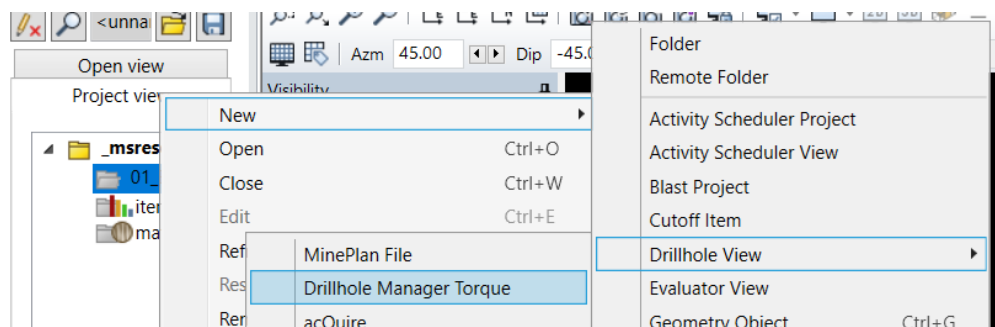


Figura A23. DM Torque.

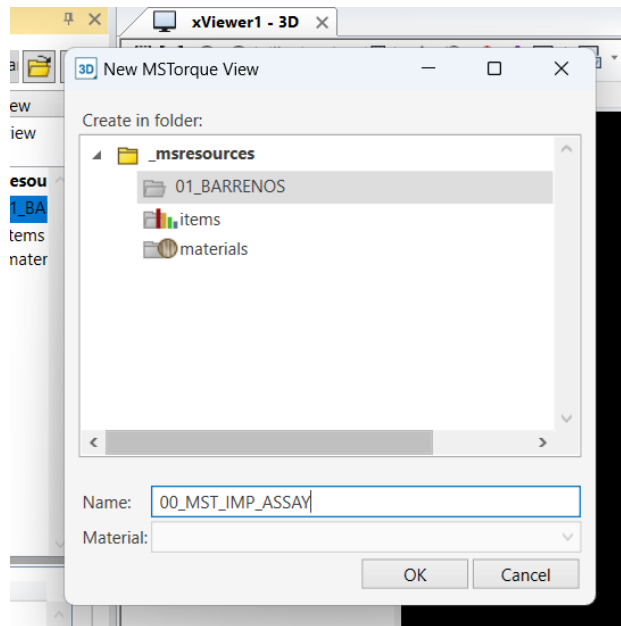


Figura A24. Crear nuevo visor.

III. Una vez terminada la configuración del punto anterior se abrirá una nueva ventana. En esta se realizarán los siguientes ajustes:

- a) El primer elemento que se configurará será el cobre, en la opción **Display options>Items**, seleccionar **TCU**.
- b) Si se desea se puede cambiar la gama de colores y los rangos de estos en la ventana que se abre de manera automática. Estos intervalos representan las leyes presentes a lo largo del sondeo.

En la figura A25 se muestra que, para este ejercicio, se asignaron intervalos de 0.25.

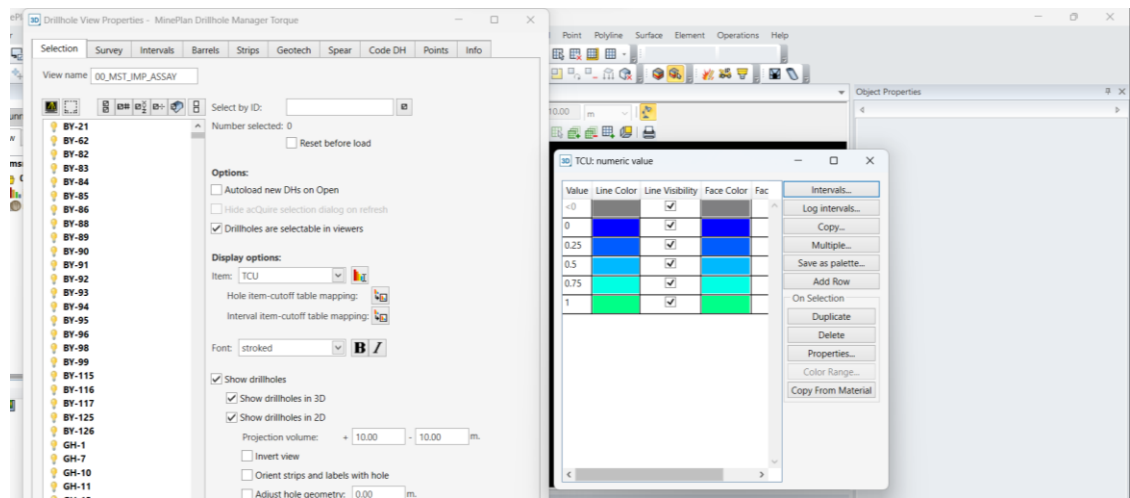


Figura A25. Rangos para TCU.

- c) En la opción de **Barrels**, se configura el diámetro de los sondeos, se recomienda un tamaño de 3-5 para tener una mejor visualización en 3D. Figura A26.

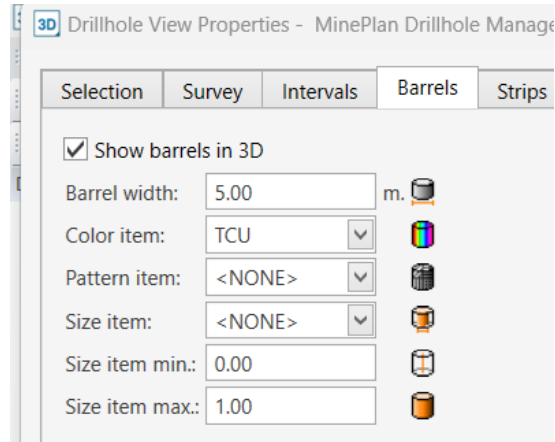


Figura A26. Diámetro de sondeos.

- d) En la opción de **Survey** se puede indicar el cómo se desea visualizar el trazo de los sondeos, por ejemplo: la vista 2D y 3D, el estilo de las etiquetas (Labels) y el orden en que se presentara. En la Figura A27 se muestra un ejemplo de configuración.

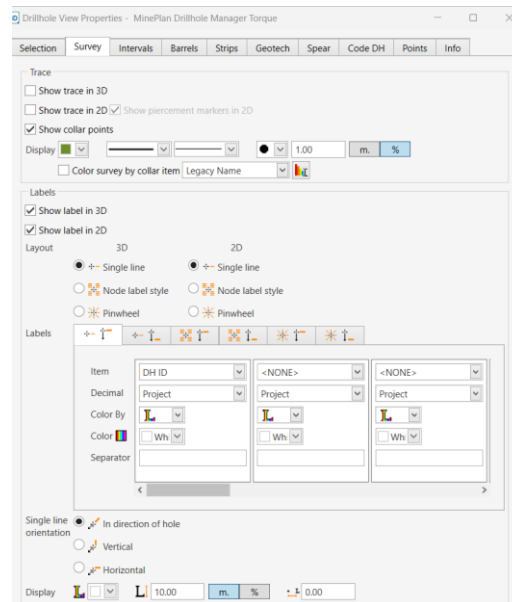


Figura A27. Configuración etiquetas en Survey.

- e) Dentro de la opción de **Intervals**, se pueden crear diferentes tipos de filtros, la escritura requerida es la siguiente: \$(elemento)filtro. Ejemplo: \$(TCU)>1 (Figura A28).

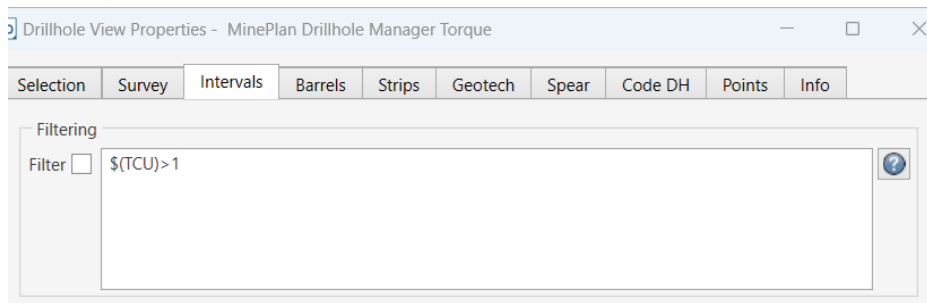


Figura A28. Crear filtro.

- f) En esta misma ventana se puede agregar información de los sondeos en forma de etiquetas (Figura A29), para que sean visibles a los costados de la traza de estos. A diferencia de las etiquetas de la venta de **Survey**, estas aparecerán durante toda la proyección del sondeo y no en un solo punto, tal y como se muestra en la Figura A30.

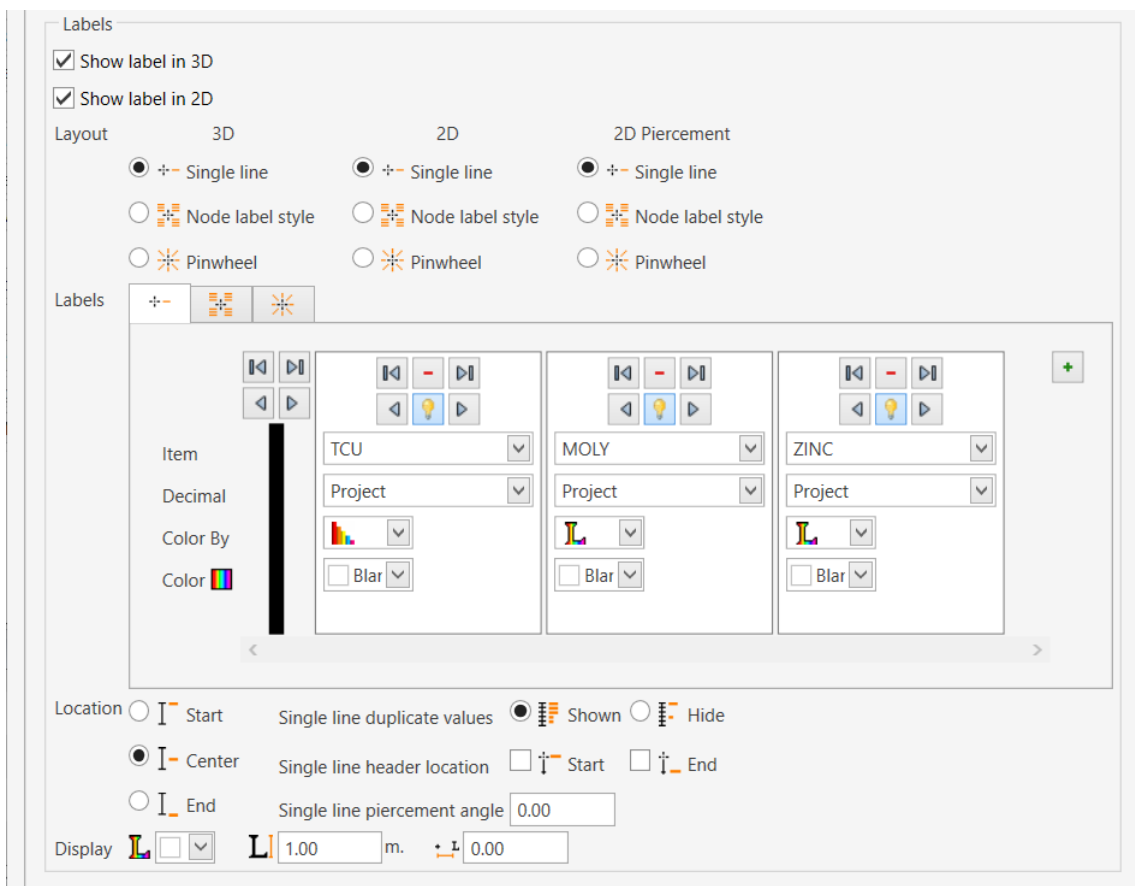


Figura A29. Configuración de etiquetas en Intervals.

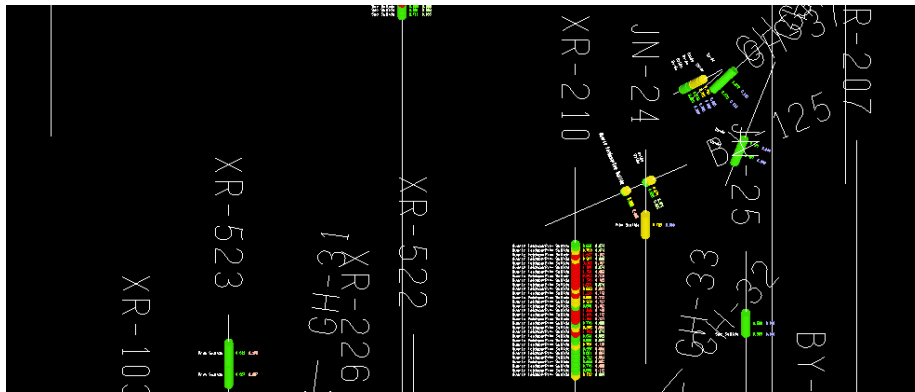


Figura A30. Visualización de etiquetas.

Otra herramienta muy importante con la que cuenta el software es la de **Query**, la cual permite visualizar la información de la zona seleccionada. En la Figura A31 se muestra un ejemplo de la ventana que aparece al dar clic en un punto específico de un sondeo.

Los campos vacíos se irán integrando en los apéndices siguientes a este.

	From	To	Length	Interval Date	Interval Comments	Sample Name	Sample Date	Sample Comments	TCU	MOLY	ZINC
1	0.00	1.31	1.31	-	-	-	-	-	0.29	0.02	0.01
2	1.31	16.31	15.00	-	-	-	-	-	0.15	0.02	0.01
3	16.31	31.31	15.00	-	-	-	-	-	0.78	0.02	0.00
4	31.31	46.31	15.00	-	-	-	-	-	0.25	0.01	0.01
5	46.31	61.31	15.00	-	-	-	-	-	0.13	0.02	0.00
6	61.31	76.31	15.00	-	-	-	-	-	0.16	0.01	0.01
7	76.31	91.31	15.00	-	-	-	-	-	0.11	0.00	0.02
8	91.31	106.31	15.00	-	-	-	-	-	0.11	0.01	0.02
9	106.31	121.31	15.00	-	-	-	-	-	0.08	0.01	0.01
10	121.31	136.31	15.00	-	-	-	-	-	0.10	0.01	0.01
11	136.31	151.31	15.00	-	-	-	-	-	0.14	0.01	0.01
12	151.31	166.31	15.00	-	-	-	-	-	0.15	0.01	0.02
13	166.31	181.31	15.00	-	-	-	-	-	0.17	0.01	0.01
14	181.31	196.31	15.00	-	-	-	-	-	0.18	0.01	0.02
15	196.31	211.31	15.00	-	-	-	-	-	0.19	0.01	0.01
16	211.31	226.31	15.00	-	-	-	-	-	0.18	0.04	0.01
17	226.31	241.31	15.00	-	-	-	-	-	0.15	0.01	0.01
18	241.31	256.31	15.00	-	-	-	-	-	0.16	0.01	0.01
19	256.31	271.31	15.00	-	-	-	-	-	0.18	0.01	0.01
20	271.31	286.31	15.00	-	-	-	-	-	0.13	0.00	0.02
21	286.31	301.31	15.00	-	-	-	-	-	0.17	0.00	0.01
22	301.31	316.31	15.00	-	-	-	-	-	0.13	0.01	0.01
23	316.31	331.31	15.00	-	-	-	-	-	0.14	0.01	0.01
24	331.31	346.31	15.00	-	-	-	-	-	0.10	0.01	0.01

Figura A31. Herramienta Query.

- IV. Finalmente, si se desea, se puede agregar la topografía para tener una visualización completa del avance obtenido.
 Se recomienda crear una nueva carpeta con el nombre de topografía y dentro de ella importar el archivo. msr con la opción: **Import> MinePlan 3D object** (Figura A32).

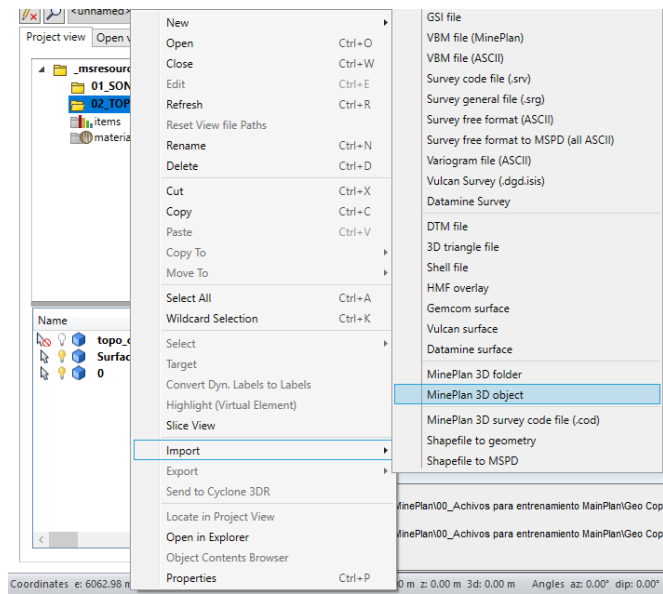


Figura A32. Importar topografía.

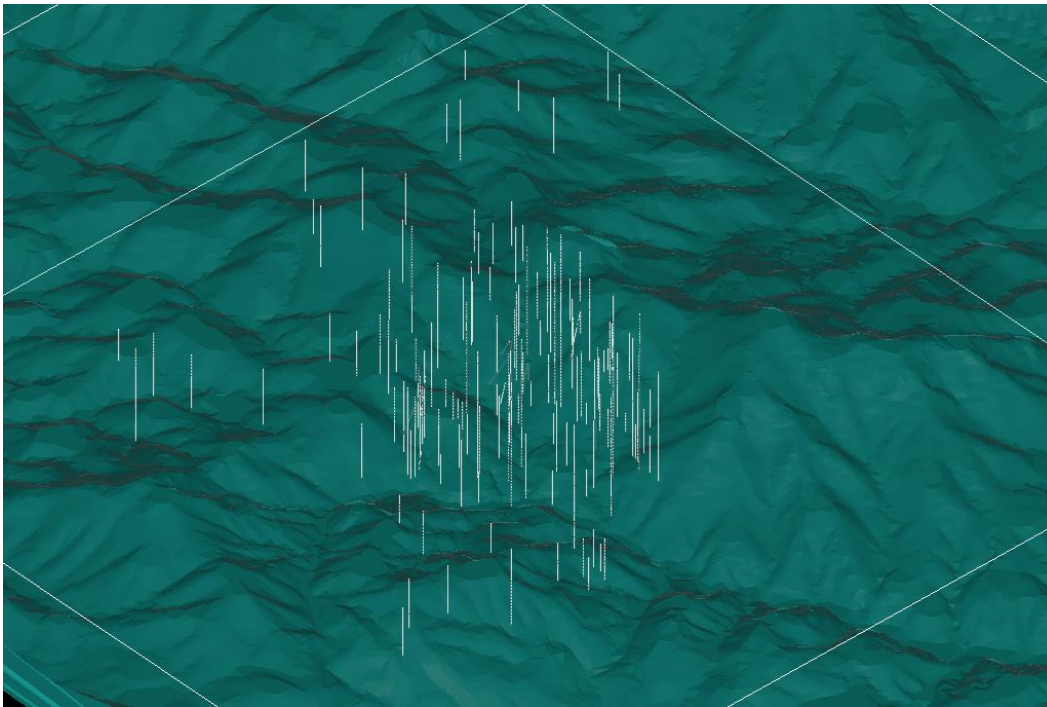


Figura A33. Topografía y sondeos de exploración.

A4. Codificación de litología y mineralización.

Para iniciar se recomienda crear una nueva carpeta con el nombre de Geología, en esta se guardará la información de la litología y la mineralización conforme se vaya requiriendo.

Es importante mencionar que este proyecto cuenta con los datos litológicos y mineralógicos que se muestran en la Figura A34.

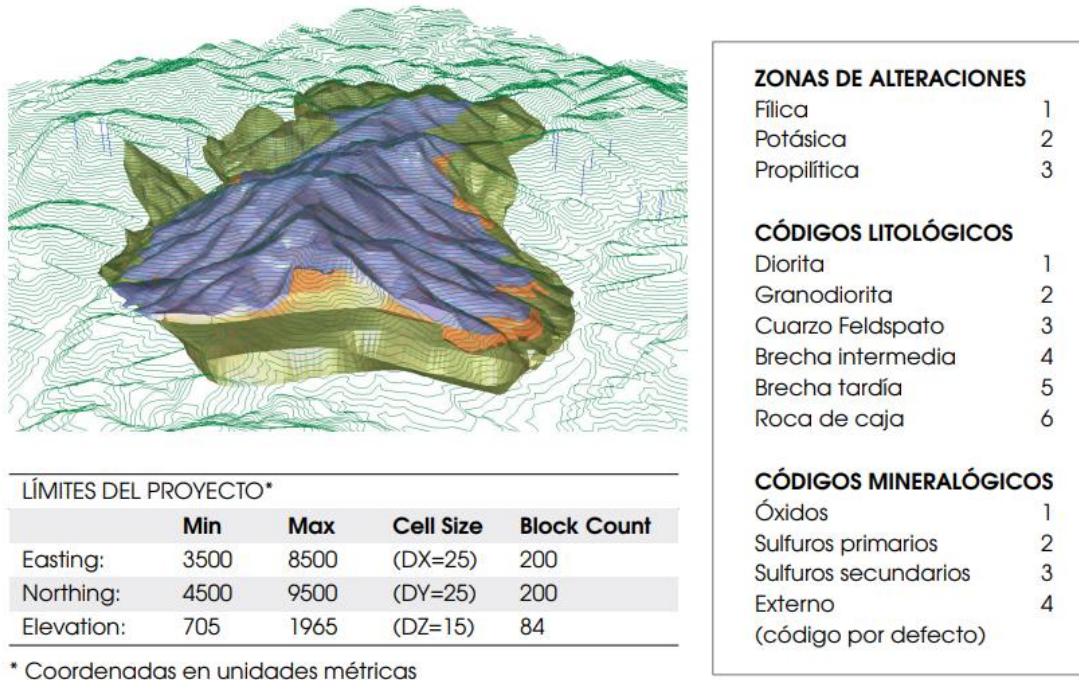


Figura A34. Datos del proyecto asignado por Hexagon.

Para este ejercicio, se cuenta con sólidos ya establecidos que interpretan a la litología de acuerdo con su ubicación geográfica. Sin embargo, es necesario asignarles códigos litológicos para que puedan ser observados en los sondeos de exploración. Para ello se requiere hacer una codificación siguiendo los siguientes pasos.

- I. Dentro de la carpeta de Litología, importar los sólidos de la base de datos de este proyecto, la visualización se muestra es la Figura A35.

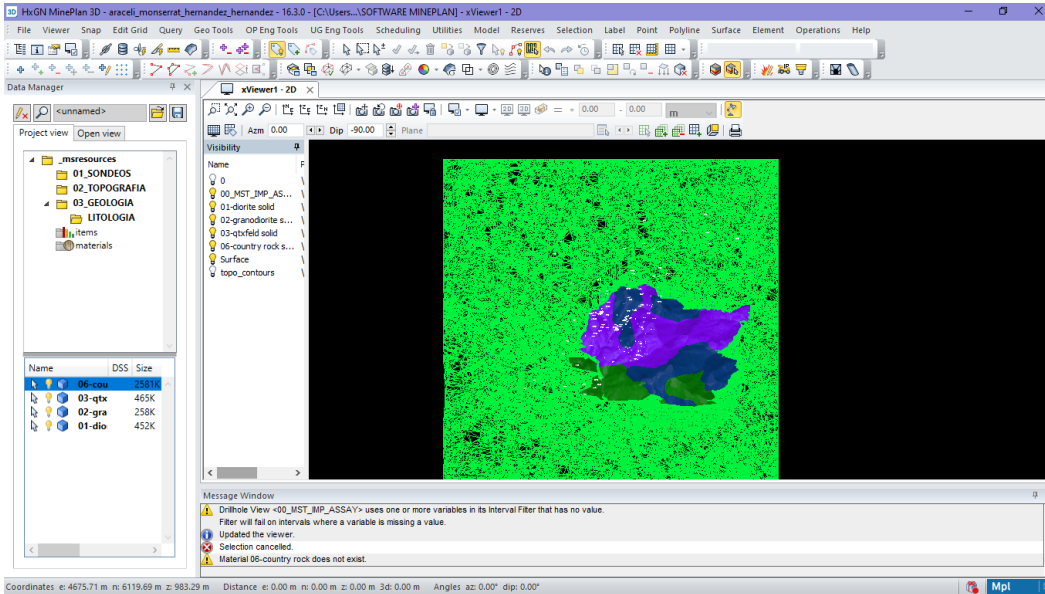


Figura A35. Solidos litológicos.

- II. En la pestaña de Open view, seleccionar la vista de barrenos. En la opción de **Selection> Display option> Item y Barrels> Color Item** asignar **Lith Code**. La configuración se puede observar en las Figuras A36 y A37.

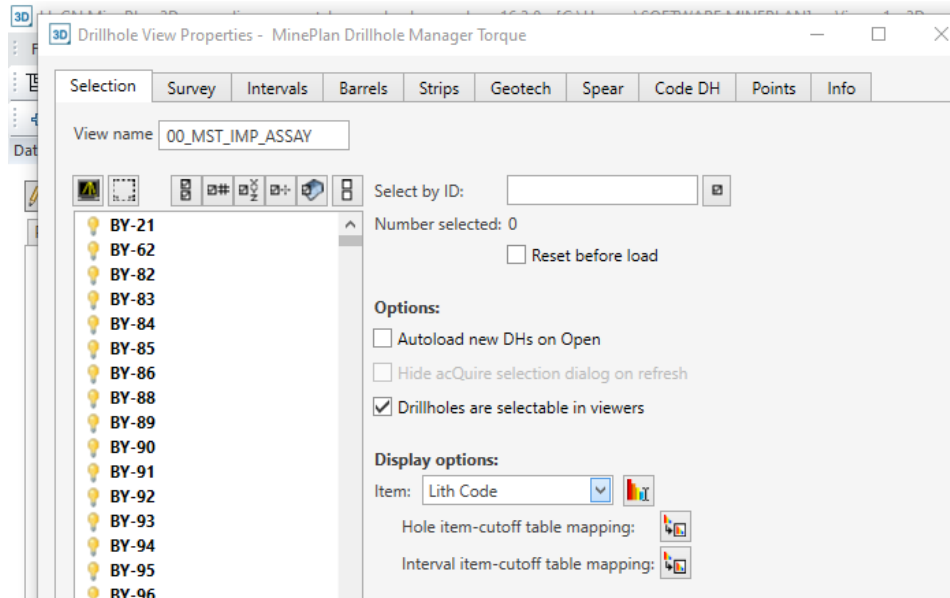


Figura A36. Item Lith Code.

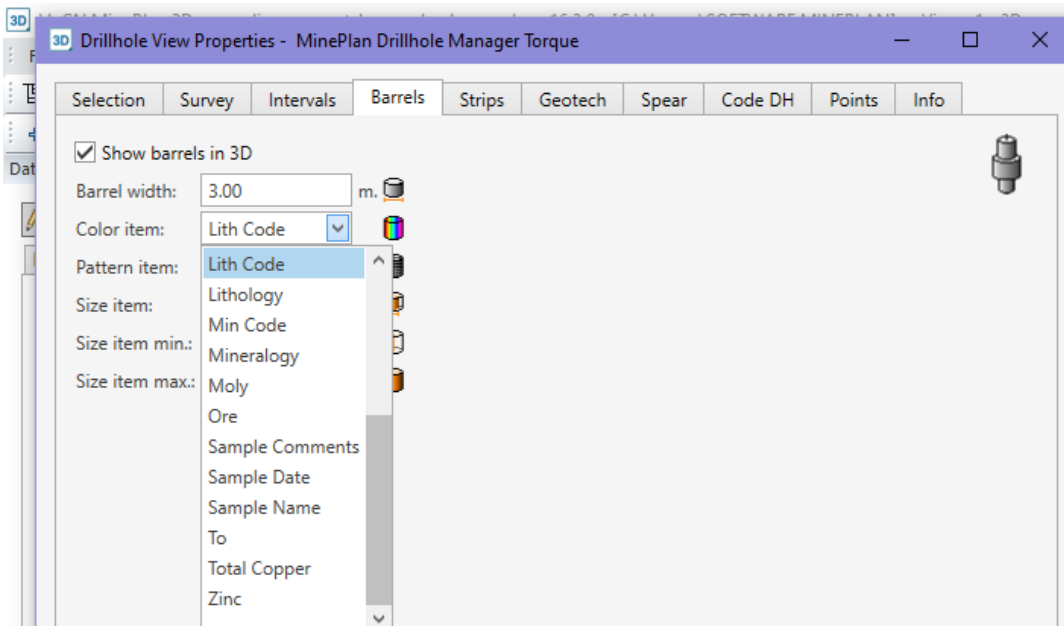


Figura A37. Color Lith Code.

- III. A continuación, se generará un conjunto geométrico con el cual se hará la codificación, seleccionar la opción de **Code DH> Geometry Set** (Figura A38).

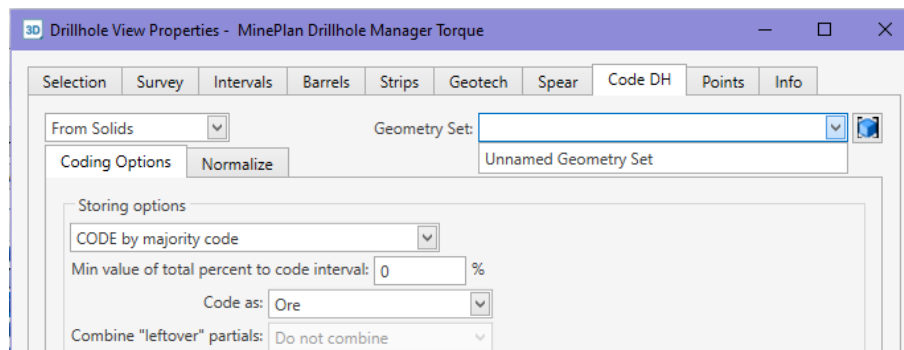


Figura A38. Opción Geometry Set.

- IV. En la nueva pestaña, agregar los sólidos litológicos con la opción de **Folder selection> Litología**. Una vez que se enlistan dichos sólidos, asignar el código correspondiente, tomando en cuenta los datos del proyecto. El ejemplo se observa en la Figura A39.
 Guardar la información como **DH_LITOLOGIA**.

Object	Name	Elements	Material	Code	Override Code
03_GEOLOGIA\LITOLOGIA\01-diorite solid	Diorite	Surfaces (1)	Geometry	1	<input checked="" type="checkbox"/>
03_GEOLOGIA\LITOLOGIA\02-granodiorite solid	Granodiorite	Surfaces (1)	Geometry	2	<input checked="" type="checkbox"/>
03_GEOLOGIA\LITOLOGIA\03-qtzfeld solid	Quartz Feldspar	Surfaces (1)	Geometry	3	<input checked="" type="checkbox"/>
03_GEOLOGIA\LITOLOGIA\06-country rock solid	06-country rock	Surfaces (1)	06-country rock	6	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura A39. DH_Litologia.

- V. Regresando a la ventana **Code DH**, hacer la configuración que muestra la Figura A40.
Si se requiere guardar la información para un uso posterior, se puede exportar a los archivos con la opción de **Export**.
- VI. Finalizar la codificación con la opción de **Code> Yes**. Los resultados se muestran en la figura A41.
Con la herramienta **Query** se puede verificar que el procedimiento se realizó de manera correcta, deberá estar completada la columna de **Lith Code**.

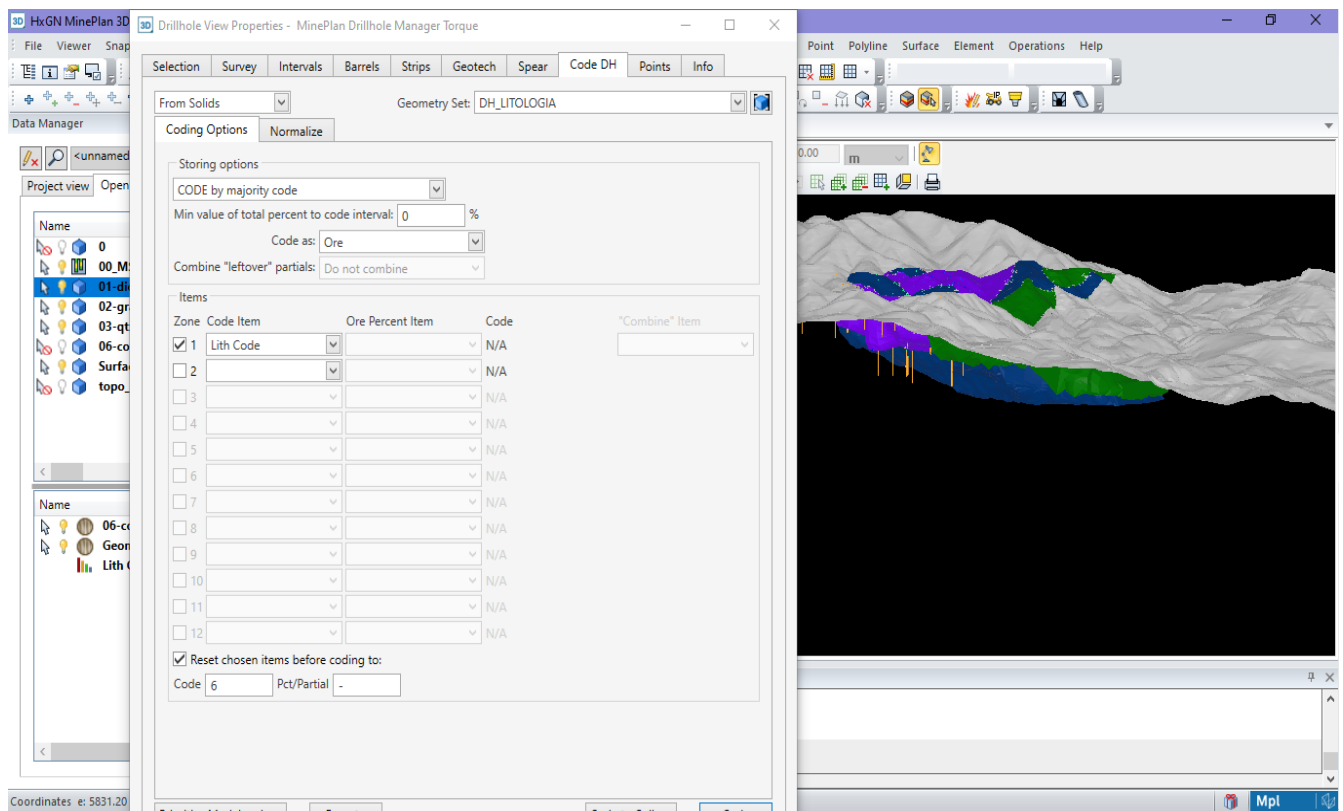


Figura A40. Configuración final Code DH.

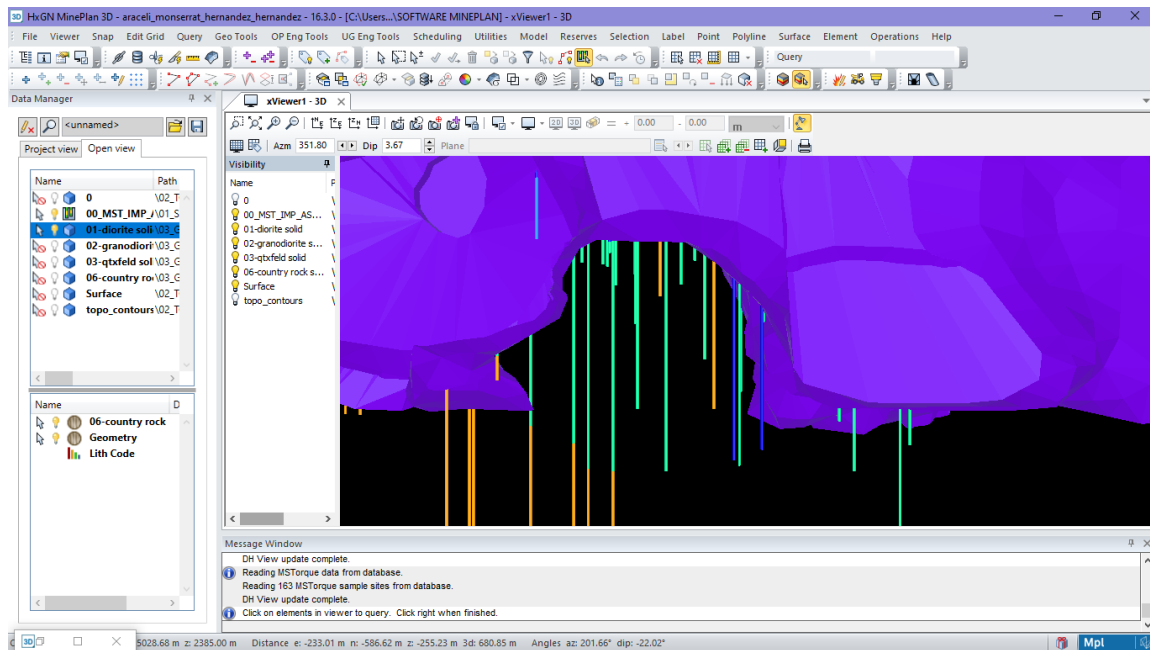


Figura A41. Codificación de litología.

VII. Realizar el mismo procedimiento para la mineralización.

A.5. Puntos de contacto

Otra de las herramientas de gran utilidad del software es la de puntos de contacto, pues esta ayudará a identificar los puntos exactos donde se presenta un cambio de información, en este caso servirá para visualizar los cambios en las diferentes litologías y mineralizaciones.

- I. Crear una nueva carpeta para identificar a los diferentes puntos de contacto que se creen y dentro de esta, crear un nuevo objeto geométrico para hacer las modificaciones correspondientes. El ejemplo se puede visualizar en la Figura A42.

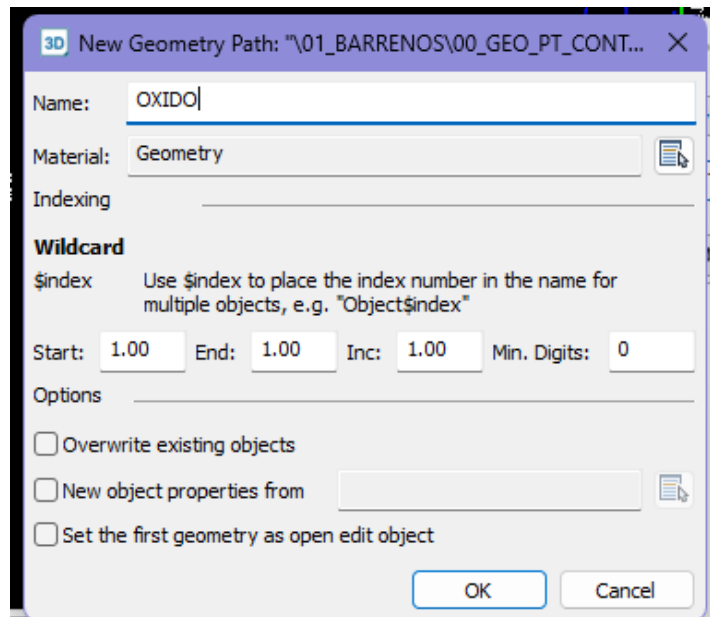


Figura A42. Objeto geométrico para puntos de contacto.

- II. Dentro de las propiedades de los sondeos, en la ventana **Points**, activar la opción de **Attribute points with**, en términos generales, será la forma en la que se irán enlistando los diferentes puntos.
- III. Como se puede observar en la Figura A43 existen diferentes opciones para el diseño de los puntos de contacto. Se puede seleccionar la que más convenga de acuerdo con las necesidades del proyecto. También seleccionar los parámetros requeridos.

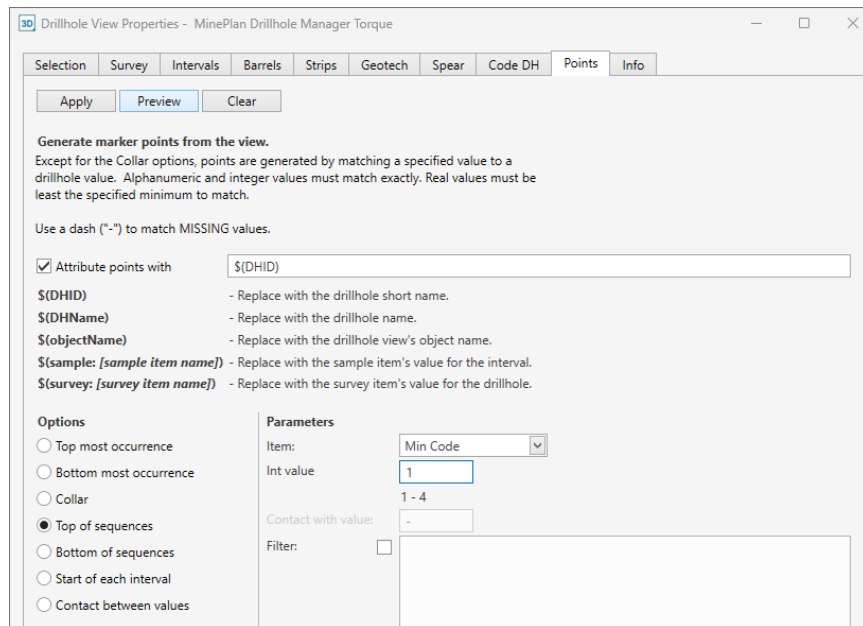


Figura A43. Configuración puntos.

Para este proyecto se crearon puntos de contacto para los óxidos, sulfuros primarios, sulfuros secundarios y collares, tal y como se muestra en la Figura A44.

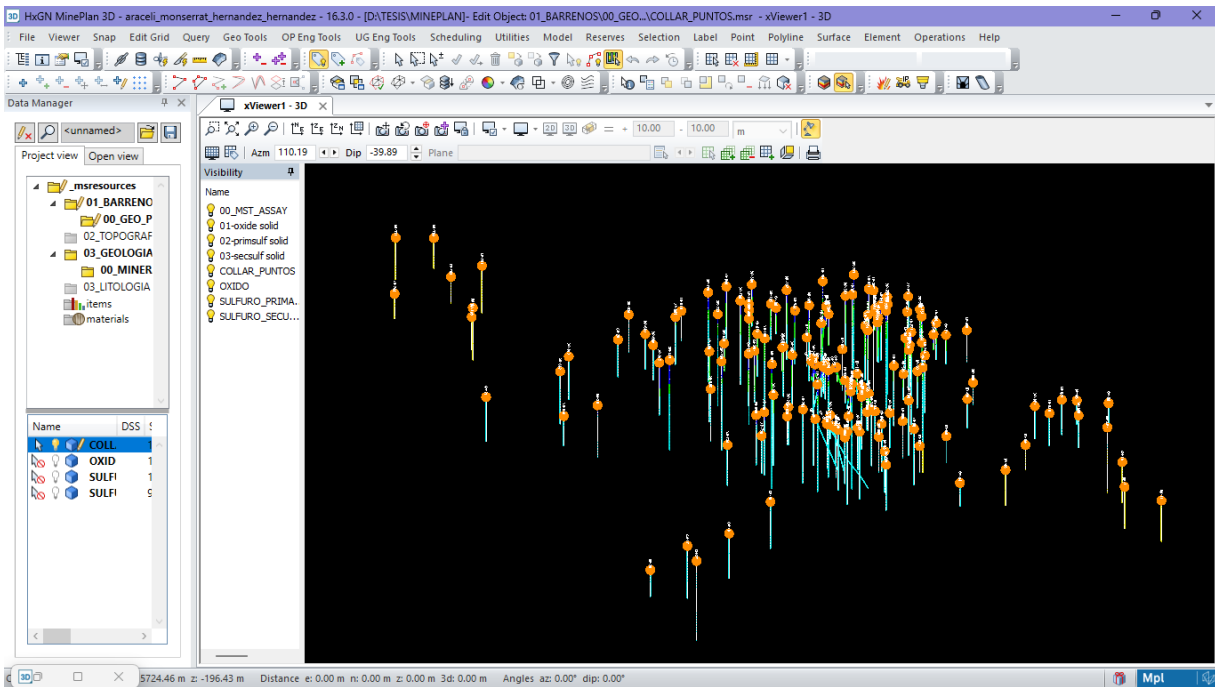


Figura A44. Puntos de contacto creados.

Apéndice B. Diseño de un modelo geológico con MinePlan 3D

Dentro de este apartado, se describen los pasos a seguir para poder obtener una interpretación geológica a partir de los datos trabajados en el Apéndice A.

B.1. GRID SET

Una grid set es una herramienta que ayuda a manipular los objetos geométricos de mejor manera ya que, divide el área de trabajo en un número determinado de planos para posteriormente trabajar sobre una sola.

Para poder continuar con el proyecto, es necesario crear una grid set que nos servirá para realizar los pasos siguientes al modelo geológico. Los pasos para crearla se describen a continuación.

- I. Crear una carpeta para guardar todas las grid set creadas.
- II. En el módulo **File>Project Settings**, configurar los límites del proyecto, para este caso, se utilizarán los límites mostrados en la Figura B1.

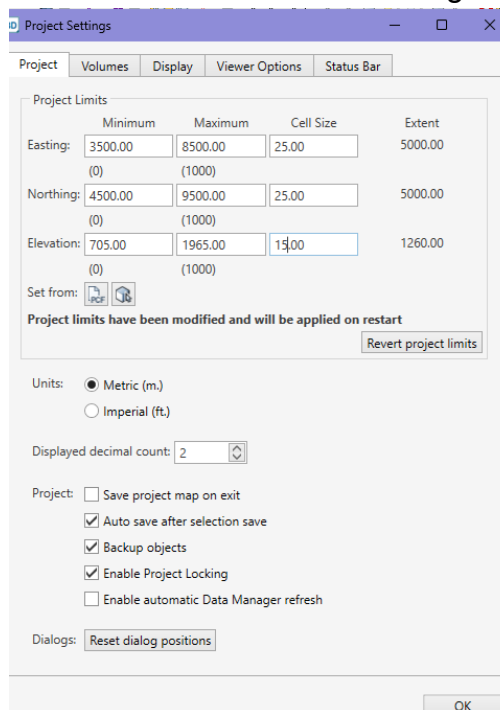


Figura B1. Configuración límites del proyecto.

- III. En la carpeta creada, seleccionar la opción **New> Grid Set** y asignarle un nombre. Figura B2.

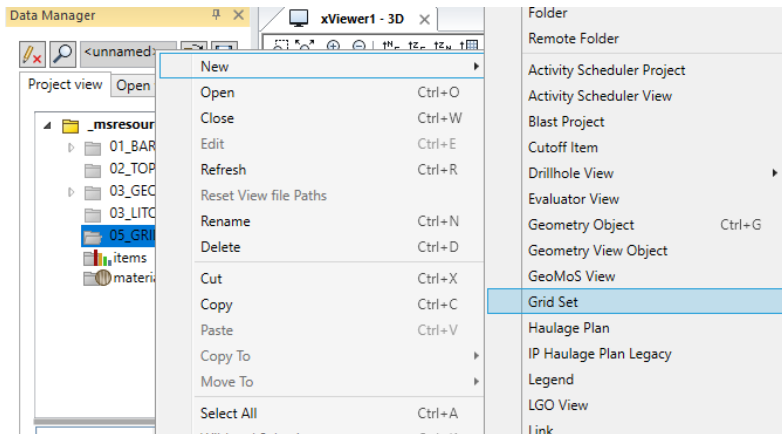


Figura B2. Herramienta Grid set.

En la nueva ventana se tienen varias opciones para los tipos de grid set, para este ejercicio se utilizará el modo **Parallel from PCF**, en las diferentes orientaciones que aparecen. El ejemplo se puede observar en la Figura B3.

Al seleccionar Ok, se mostrará una lista de los planos creados, es importante que en esa ventana se guarden los cambios generados con la opción **Save the current changes**.

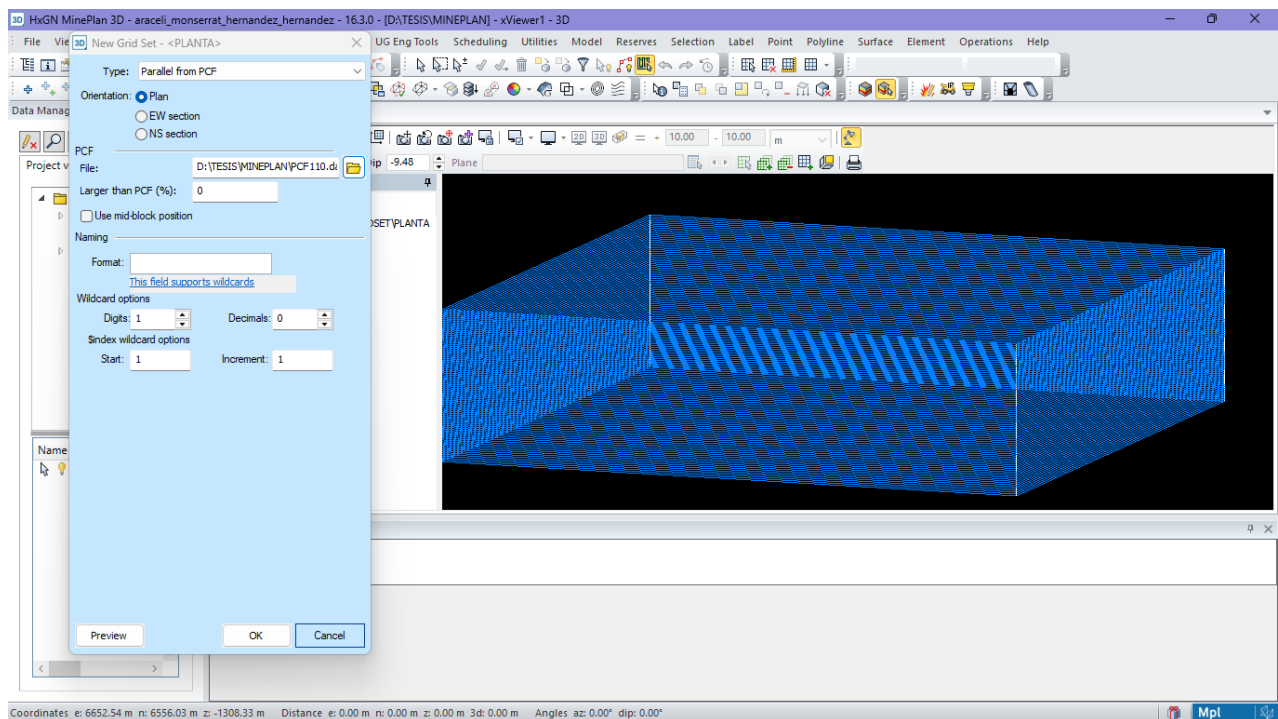


Figura B3. Configuración grid set.

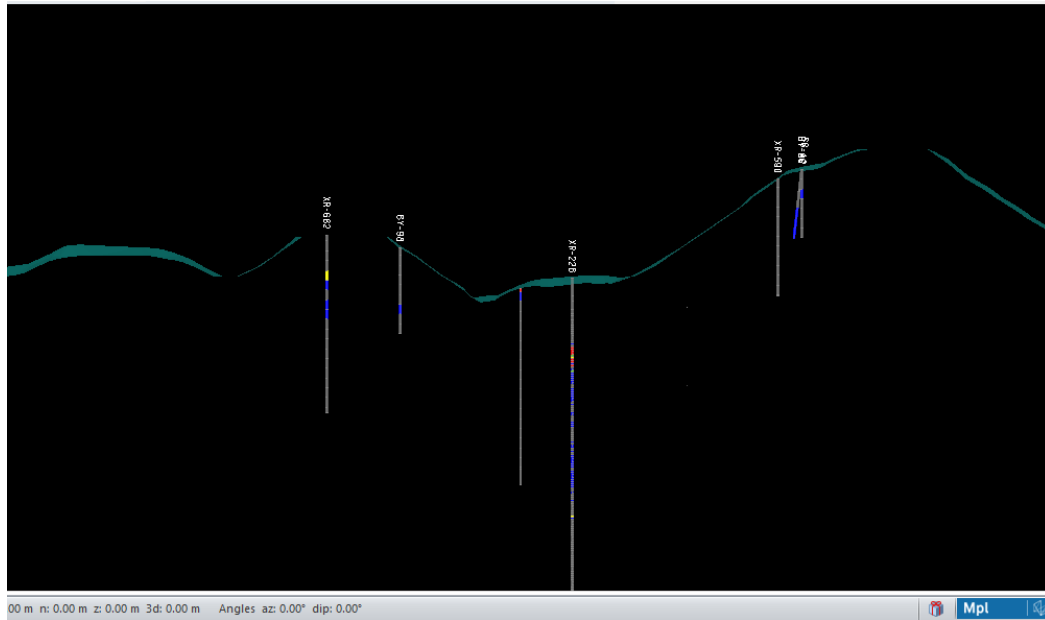


Figura B6. Plano coordenada 7000.00.

- III. Asignar un **Clipping** de 12.5 por lado de la sección. Esto quiere decir que al seleccionar una grid, se podrá visualizar 12.5m hacia enfrente y 12.5m hacia atrás. Los ajustes se pueden observar en la Figura B7 y la Figura B8 muestra el grosor del recorte.

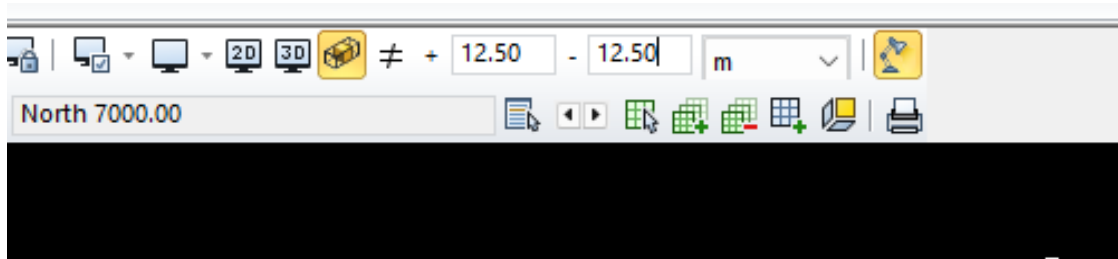


Figura B7. Configuración de Clipping.

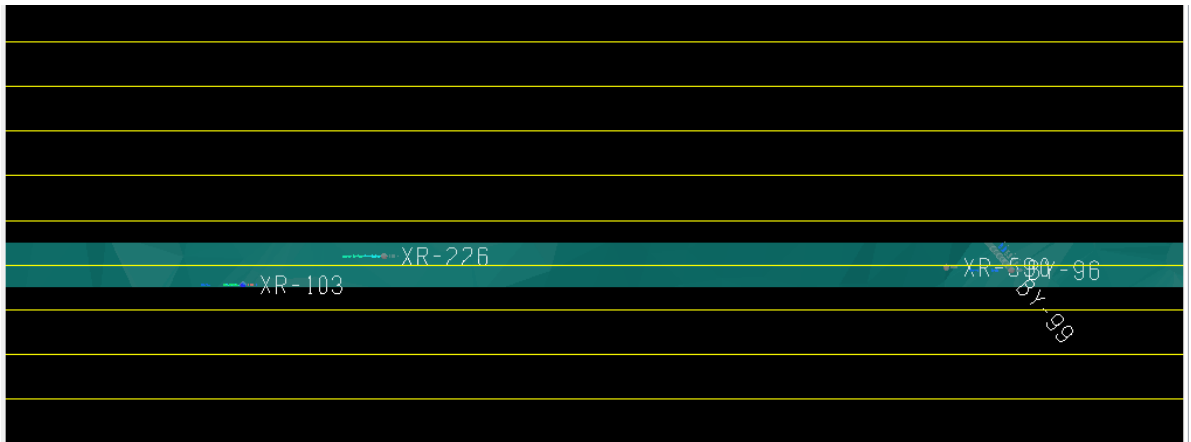


Figura B8. Resultado de Clipping a 12.5m

- IV. En la ventana de **DVP> Labels** apagar las etiquetas de Lithology y agregar el Item de “INT” el cual servirá para mostrar la interpretación que se vaya creando, tal y como se muestra en la Figura B9.
 Crear la misma configuración para el caso de los Strips (Figura B10).

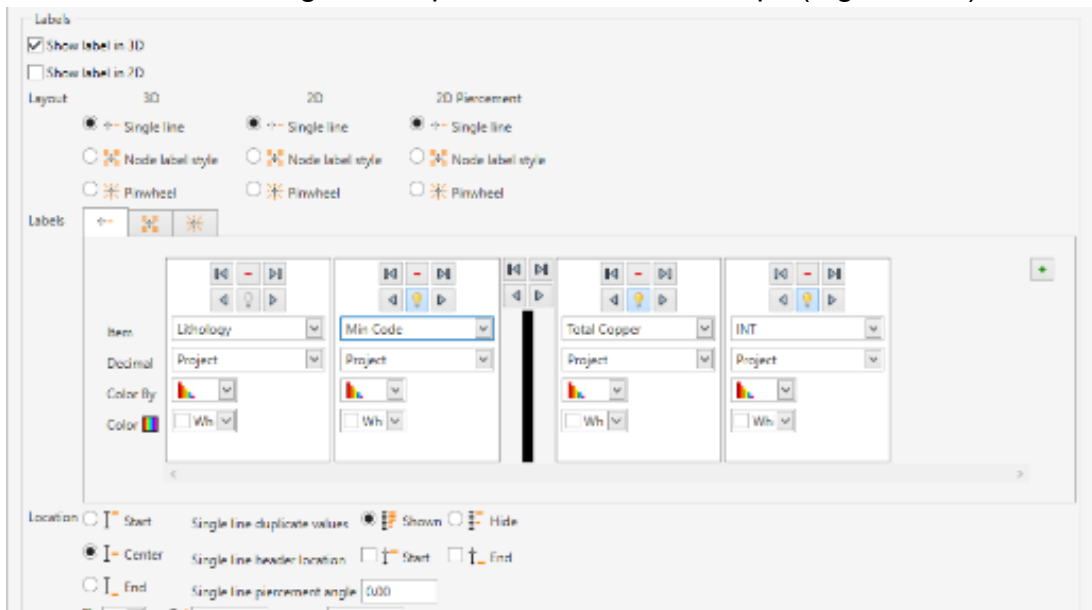


Figura B9. Configuración de Labels.

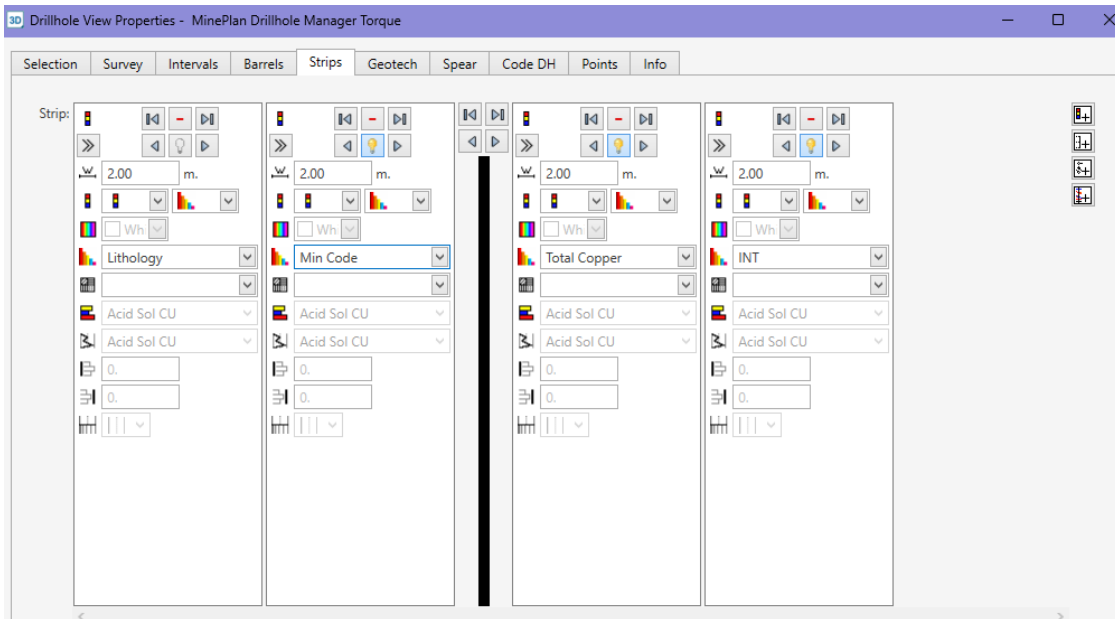


Figura B10. Configuración de Strips.

V. Seleccionar el módulo de **Geo Tools> Drillhole Paintbrush Tool**.

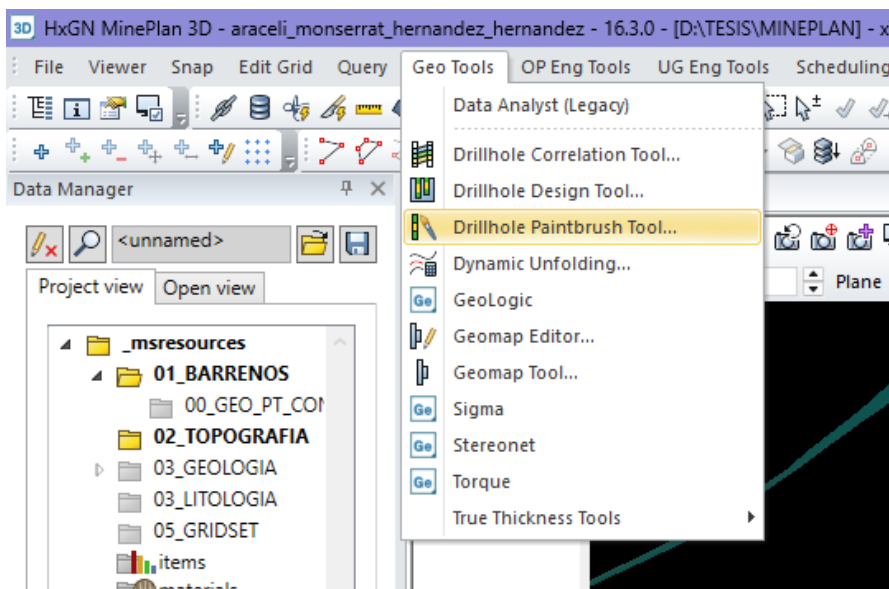


Figura B11. Herramienta Drillhole Paintbrush Tool.

Una vez habilitada esta opción se realizará una codificación con el ítem INT. Este ítem se encuentra vacío, por lo tanto, servirá para que los cambios no afecten algunos otros ítems con información.

Seleccionar todos los valores que superen la ley deseada en este caso toda la superior a 0.25, será tomada en cuenta para la codificación. Se puede usar de guía a las etiquetas o la gama de colores. Se puede observar en la Figura B12 que los segmentos seleccionados se marcan de color amarillo.

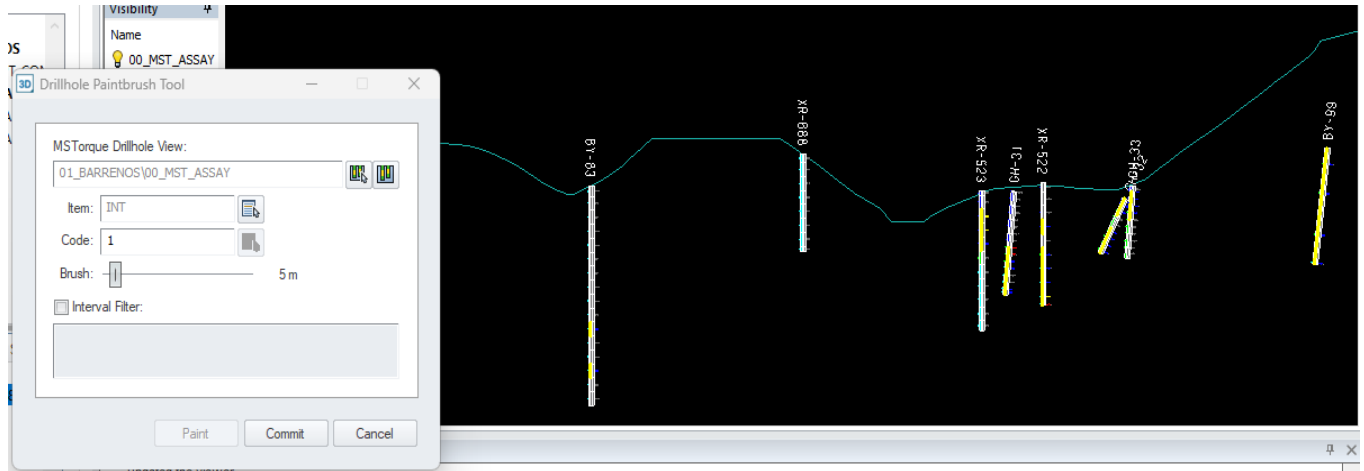


Figura B12. Uso de DPT.

- VI. Una vez seleccionados todos los rangos de interés de la sección, cambiar de sección y repetir el proceso.
- VII. Al finalizar la selección de segmentos, dar clic en **Commit**>**Commit int to the MSTorque Database** (Figura B13).

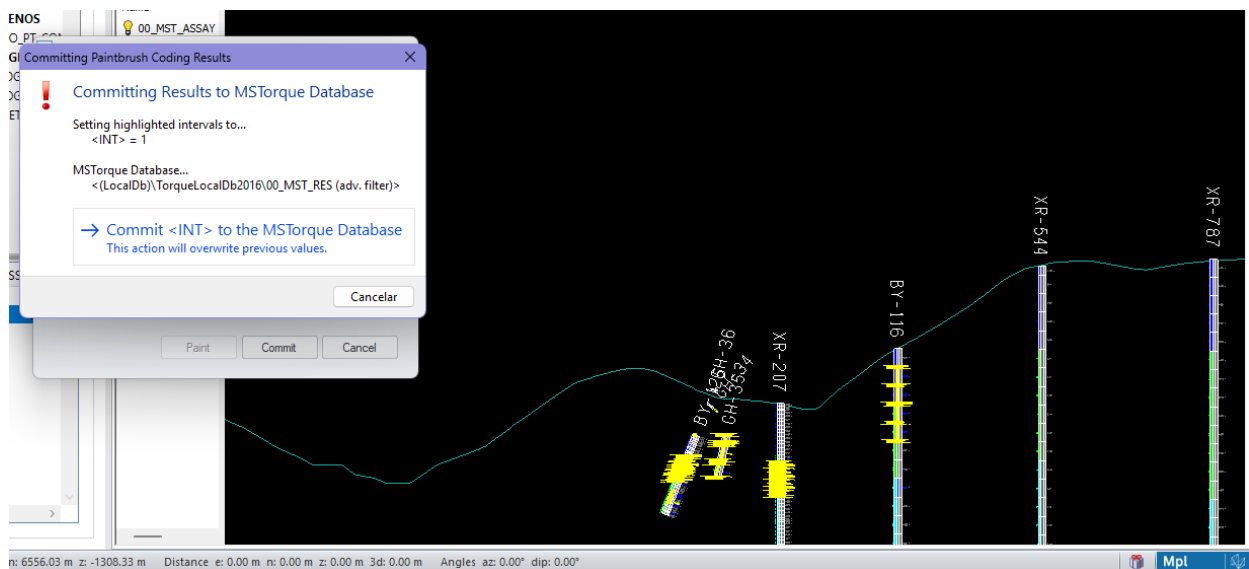


Figura B13. Opción Commit.

- VIII. Desde el editor de sondeos se pueden observar los cambios al activar las barras de INT. En la Figura B14 se observa la nueva interpretación en color magenta.

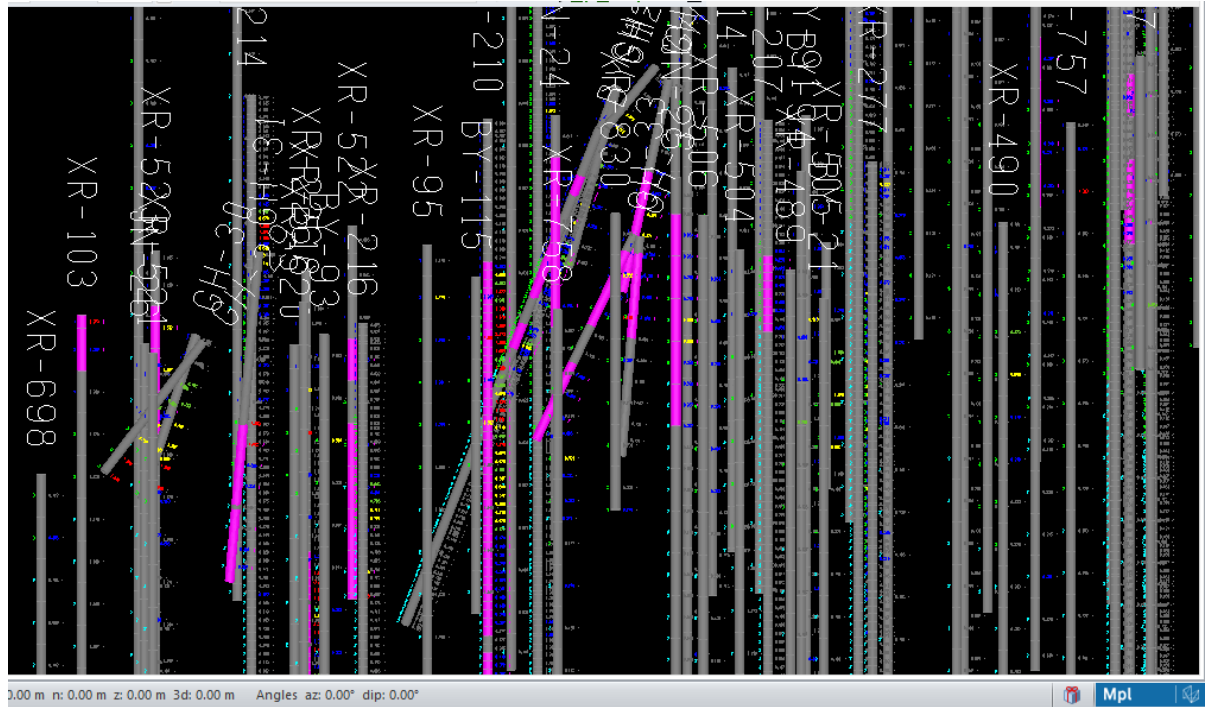


Figura B14. Resultados de INT.

B5. Modelo geológico

Una vez analizada e interpretada toda la información de los apartados anteriores, se debe crear un sólido que represente al modelo geológico del proyecto. Los pasos por seguir se describen a continuación:

- I. Crear una nueva carpeta para guardar toda la información referente al modelo geológico y dentro de esta un objeto geométrico llamado Oxido.

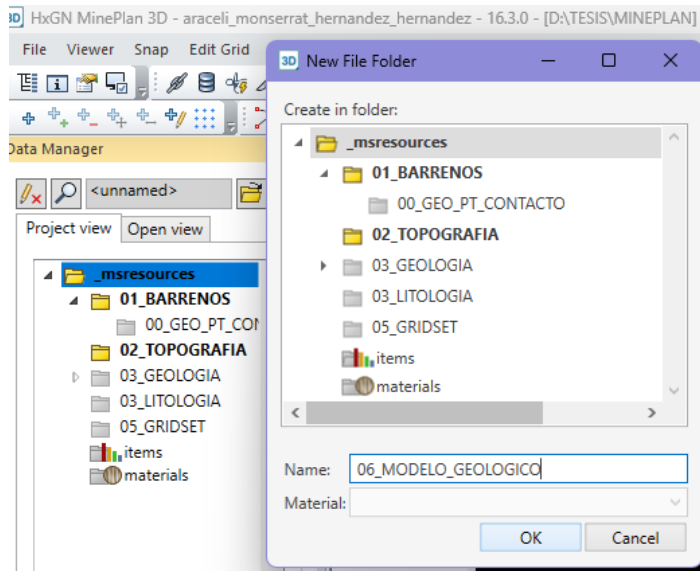


Figura B15. Carpeta Modelo Geológico.

- II. Activar las barrels de mineralización dentro de las propiedades de los sondeos.
- III. Con la vista en planta, crear un **clipping** de una grid en la que se aprecie una población mayor de sondeos con presencia de óxidos.
- IV. En la opción de **Full Properties>Presentation**, habilitar el modo **Vertical Tri Viewer**. Esta opción habilitara tres ventanas de dibujo al mismo tiempo. El módulo a seleccionar se muestra en la Figura B16.

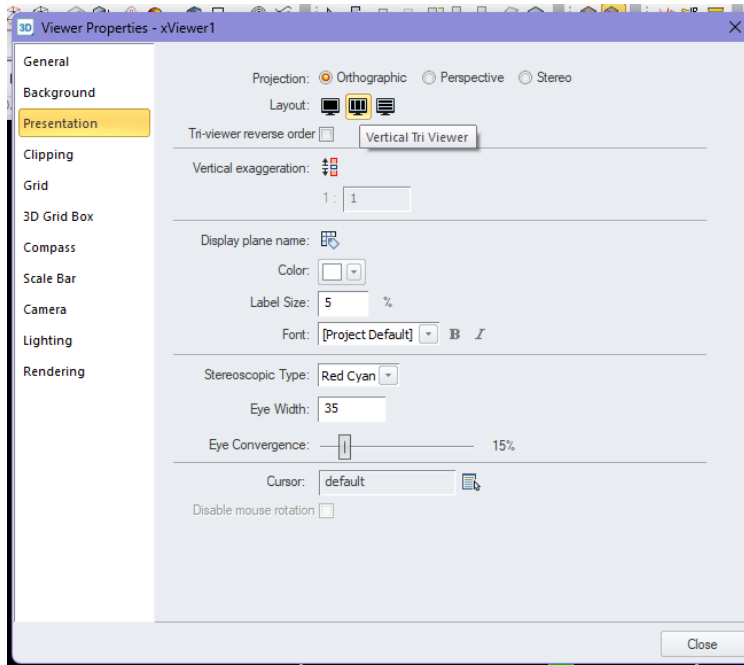


Figura B16. Modo Vertical Tri Viewer.

- V. Con la herramienta **Polyline>Create>Polygon** crear un polígono que encierre todas las zonas que tengan presencia de óxidos, tal y como se muestra en la Figura B17, esto se hará en cada una de las secciones que sea necesario. Es importante mencionar que los trazos deben ir en un solo sentido para todas las secciones, se recomienda que sea de izquierda a derecha. Los trazos deben superar a la topografía, ya que al final se hará un recorte con respecto a esta. La Figura B18 muestra un avance de trazos y la Figura B19 muestra el resultado de todas las grids con presencia de óxidos juntas.

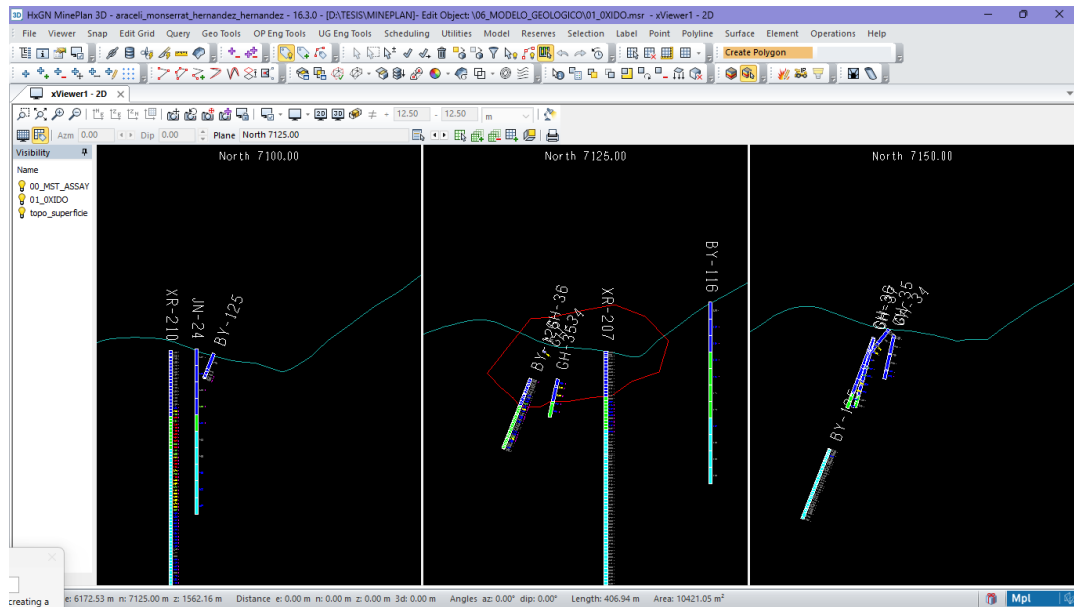


Figura B17. Área con presencia de sólidos.

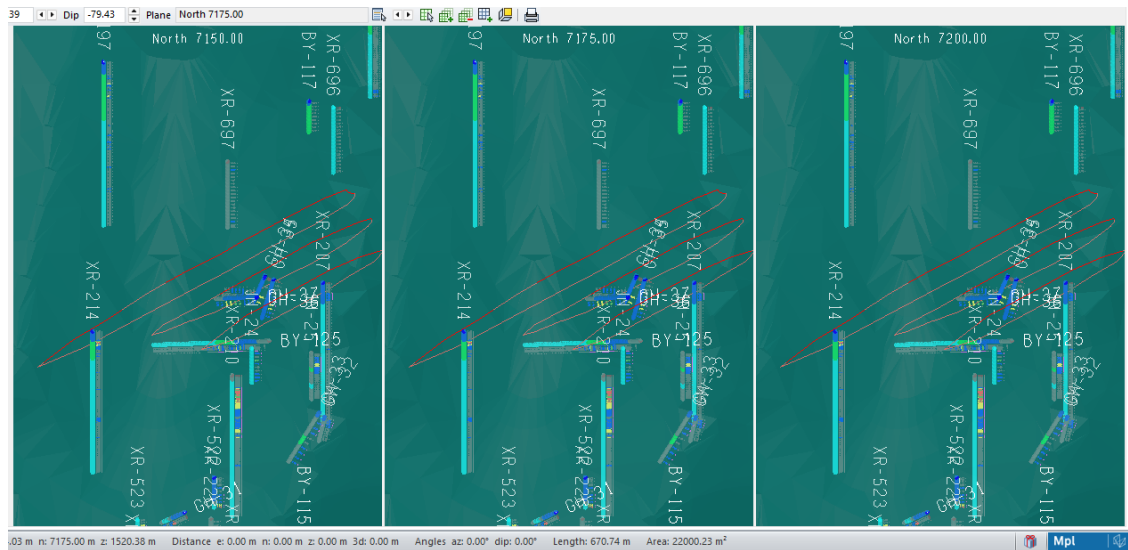


Figura B18. Óxidos en tres grids diferentes.

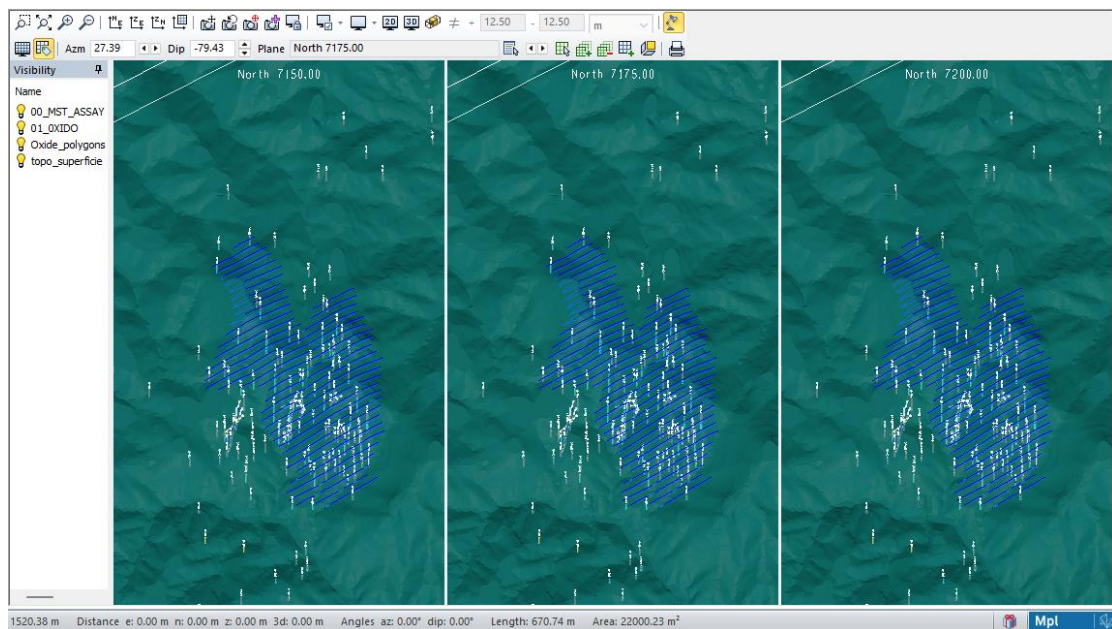


Figura B19. Resultado final de polígonos.

- VI. Para unir y cerrar las secciones y obtener un sólido completo, seleccionar la opción de **Surface>Create>Linker Tool**, este módulo es especial para crear todo tipo de modelamiento explícito.
- VII. Con la opción de **Select Polylines** (Figura B20), seleccionar todos los polígonos creados.

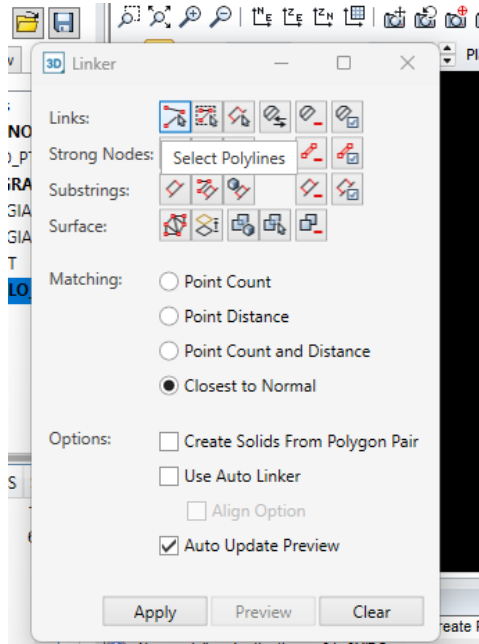


Figura B20. Select Polylines.

- VIII. Hasta este paso los sólidos estarán unidos, sin embargo, aún no es una figura cerrada. Con la opción **Triangulate Polyline**, seleccionar las áreas donde se requiera cerrar el sólido.

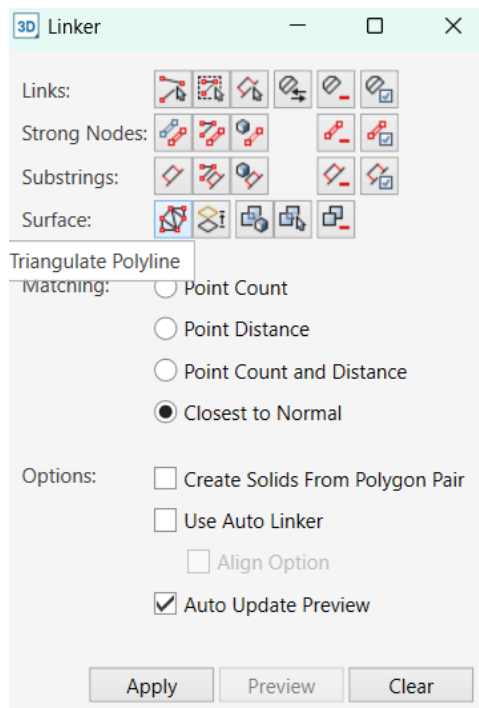


Figura B21. Triangulate Polyline.

- IX. Aunque los poligonos ya han sido unidos el solido sigue seccionado. En el modulo **Object Contents Browser** mostrado en la Figura B22, se puede observar la lista de secciones tal y como se muestra en la Figura B23. Para unirlos seleccionar la opcion **Surface>Merge Selected**.

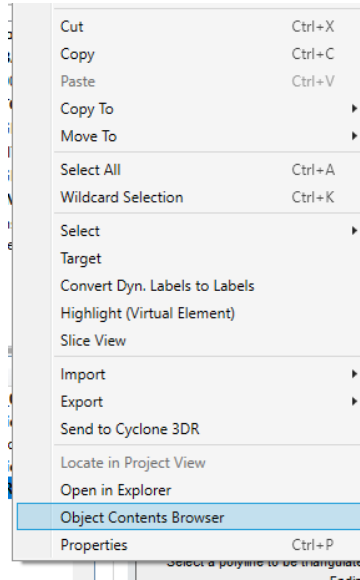


Figura B22. Object Contents Browser.

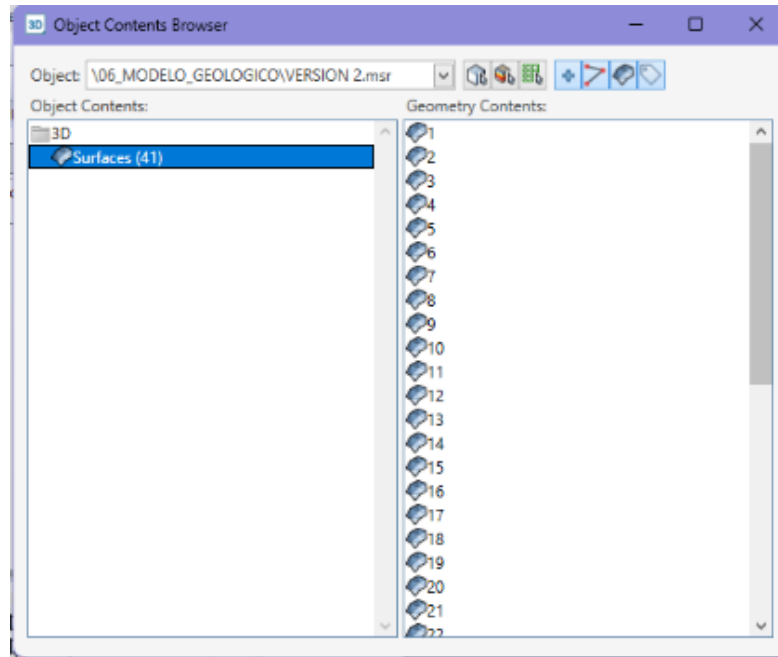


Figura B23. Lista de objetos.

Para finalizar el diseño del sólido se hará un recorte con la topografía. Se recomienda hacerlo en una nueva carpeta.

- X. Seleccionar la herramienta **Surface> Intersect Surfaces Tool** y generar la configuración de la Figura B24. El resultado puede observarse en la Figura B25.

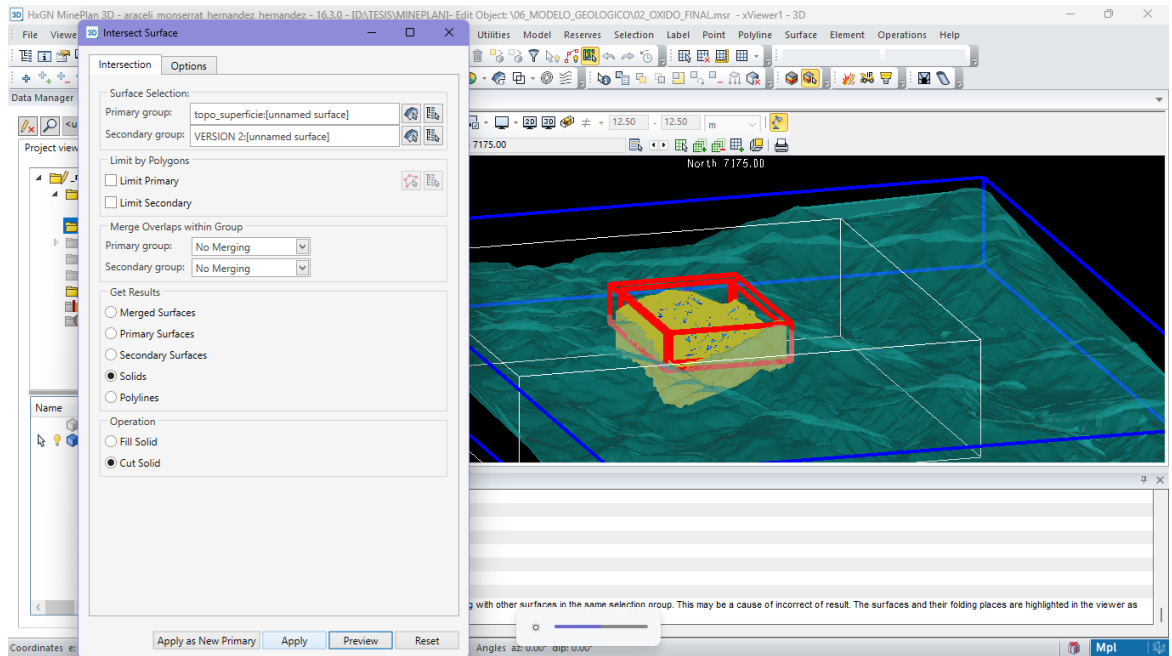


Figura B24. Configuración Intersect Surfaces Tool.

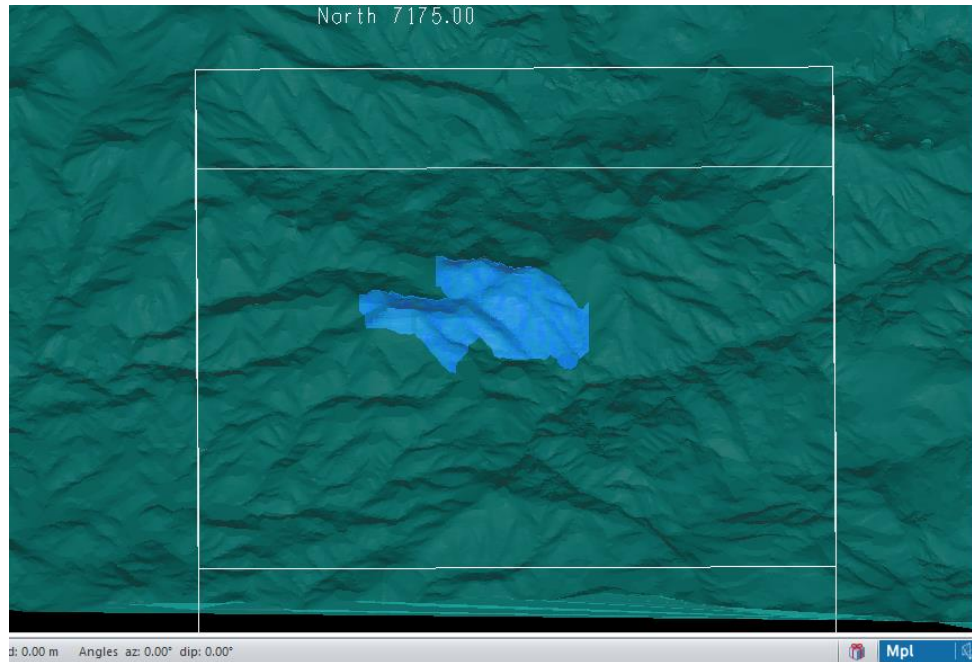


Figura B25. Sólido y topografía.

Apéndice C. Diseño de un modelo de bloques con MinePlan 3D

Una vez que se tiene la interpretación geológica de los datos analizados en este proyecto, se requiere hacer una interpretación por medio de un modelo de bloques. En este apéndice se describirá con detalle el desarrollo para crear dicho modelo.

C1. Archivo 3DBM

Para comenzar se utilizará la herramienta **Model> Model Manger**, esta sirve para crear diferentes tipos de archivos, pueden ser archivos PCF, GSF y 3DBM.

- I. Aunque no es necesario, se sugiere crear un archivo PCF, el cual es un archivo de control del proyecto, para que dentro de este se guarden todas las propiedades y modificaciones que se vayan creando. Dentro del Model Manager, seleccionar la opción **Project>New PCF**.
- II. En la nueva ventana asignar un nombre, la ubicación del archivo y los límites del proyecto. El ejemplo se muestra en la Figura C1.

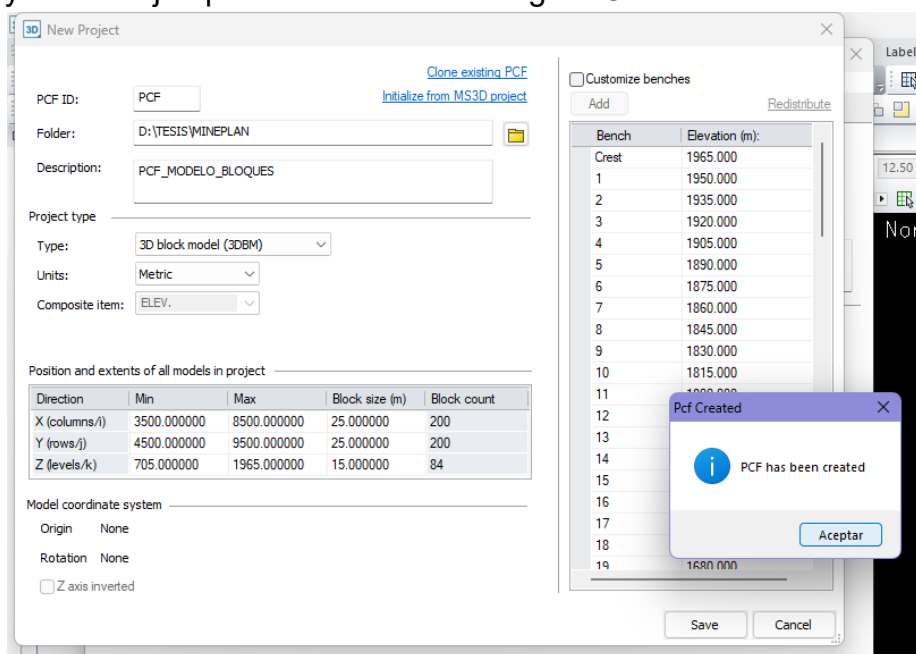


Figura C1. Crear PCF.

- III. Para crear el archivo para el modelo de bloques, seleccionar la herramienta **Model>New>3DBM-File 15** y asignarle un nombre con terminación .dat (Figura C2).

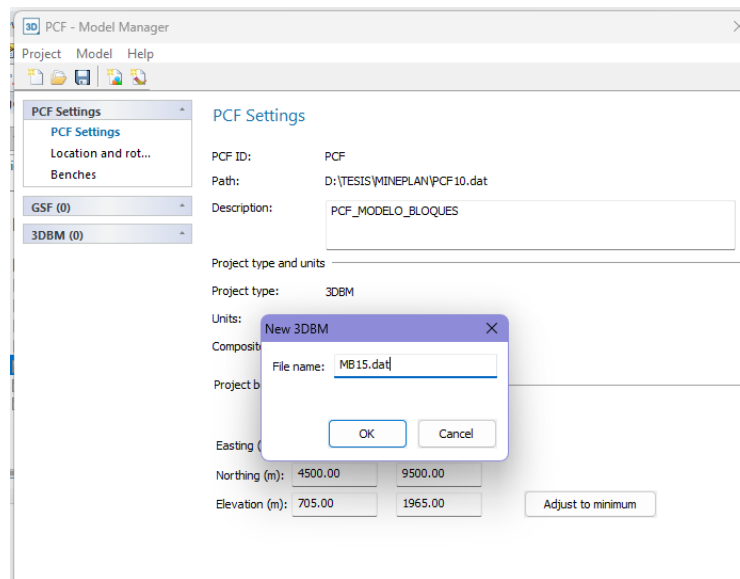


Figura C2. Nuevo MB15.

- IV. Crear un archivo **SMB15** repitiendo los pasos del punto III.
- V. Generar para ambos archivos los diferentes ítems que se muestran en la Figura C3.

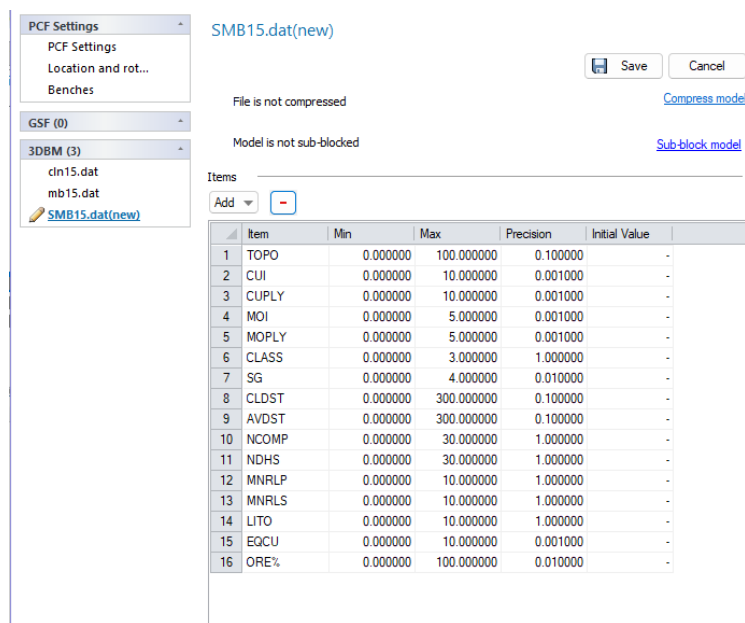


Figura C3. ítems modelo de bloques.

- VI. En la opción **Sub-block model** activar la opción de **Create sub-block file** y asignarle las subdivisiones que se requiera. Se recomienda que para esta configuración se consideren las medidas mas convenientes para las

características del proyecto y que a su vez no sea un tamaño demasiado pequeño que cause problemas al software. El ejemplo se muestra en la figura C4.

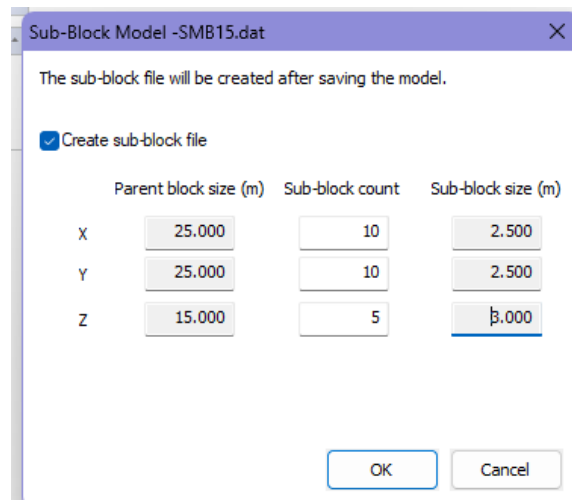


Figura C4. Configuración de sub-bloques.

- VII. Incluir los ítems que se asignaran al modelo de bloques, la Figura C5 muestra una serie de ítems sugeridos por la base de datos proporcionada por la empresa, sin embargo, los que más destacan para este tipo de proyecto son: la topografía, las leyes, la litología, la mineralización, la dilución y los costos. Habilitar la opción de **Include item in sub-block file** para cada uno de los ítems (Figura C5).

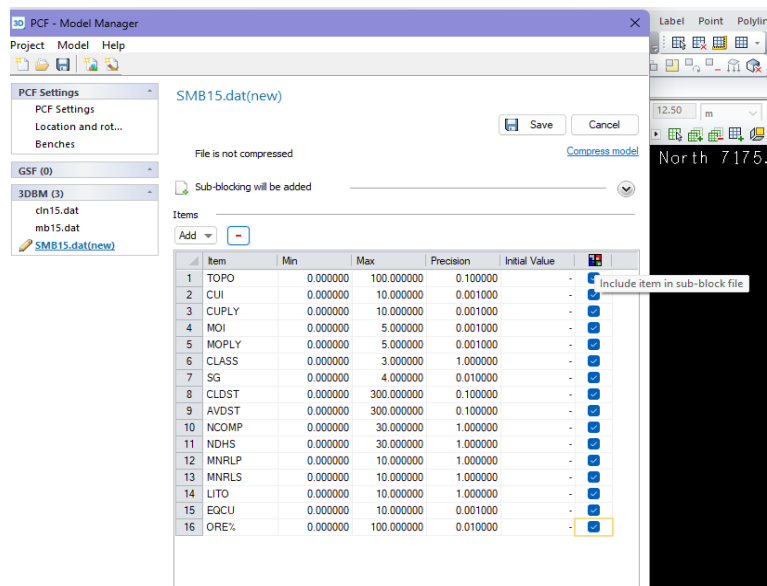


Figura C5. Incluir ítems.

C2. Vista modelo de bloques

Como se ha visto a lo largo del proyecto, aunque se generen archivos en los diferentes paquetes de MinePlan 3D, se debe crear un visor independiente en la ventana de dibujo.

- I. Crear una nueva carpeta para el modelo de bloques, y dentro de esta seleccionar la opción **New>New Model View**. Asignar un nombre como en la Figura C6.

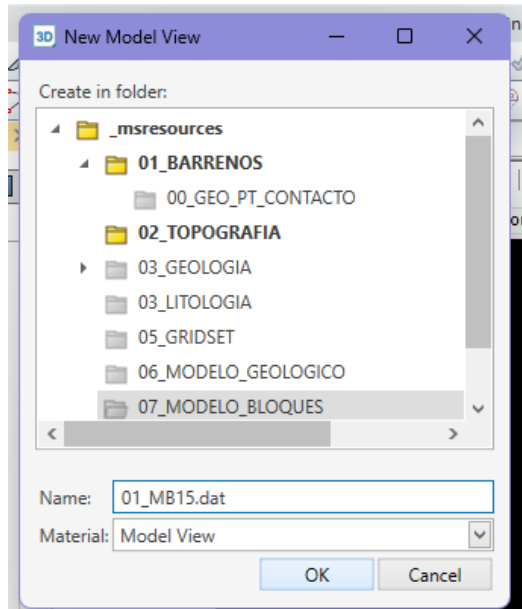


Figura C6. New Model View.

- II. Seleccionar el PCF que se creó en el apartado C1 y por último abrir el archivo mb15.dat (Figura C7). El visor aun no contiene información, la asignación de datos se configurará en los pasos siguientes.

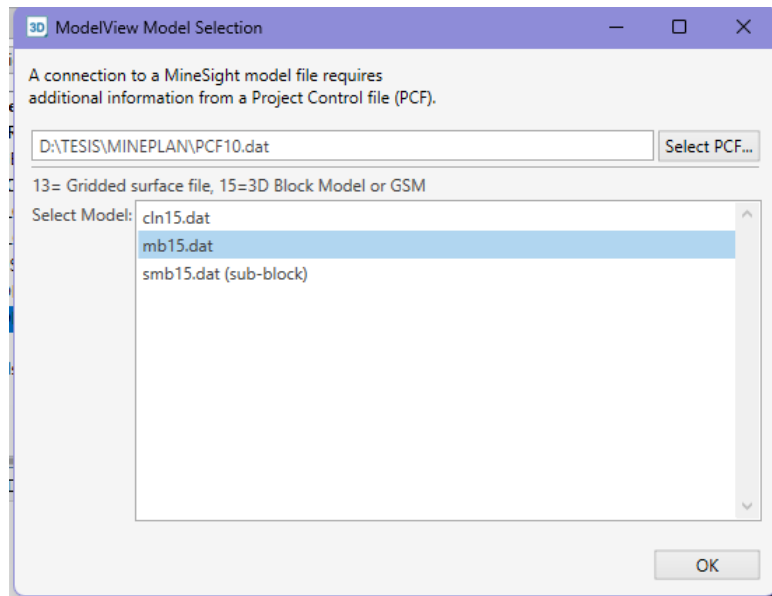


Figura C7. Seleccionar archivo para el ModelView.

C3. Propiedades de un modelo de bloques

Una vez creado el archivo para el modelo de bloques, se deben asignar las diferentes características que se requiera para cada proyecto. A continuación, se describen los pasos que servirán de ejemplo para personalizar un proyecto propio.

- I. Dentro del **Model View Editor**, en la pestaña **Display**, seleccionar los estilos de modelo de bloques y **Filled Polygons**. Esto hará que en automático el área de los limites se muestren en cuadrícula como se observa en la Figura C8.

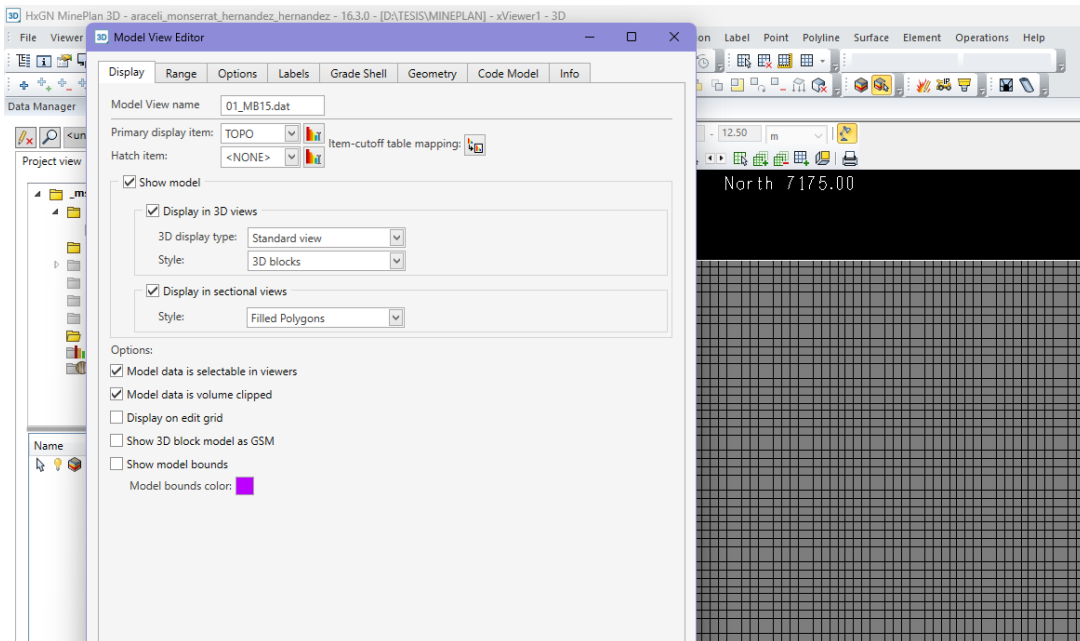


Figura C8. Cuadrícula modelo de bloques.

- II. En la pestaña **Range**, se puede seleccionar el área que se desea abarcar dentro de los límites del proyecto, si se desea se puede trabajar sobre el 100% (Figura C9).

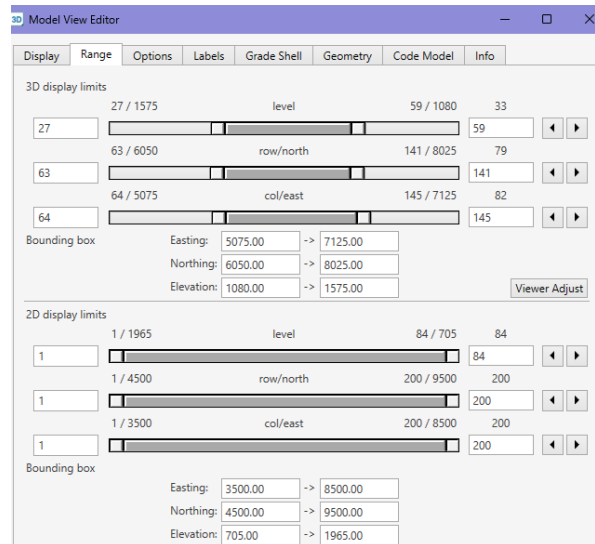


Figura C9. Área del modelo de bloques.

- III. Hasta este paso, el modelo de bloques se muestra en blanco porque no se le ha asignado ningún ítem en particular.

La primera característica por configurar será la topografía. La topografía es el valor porcentual del bloque que está por debajo de la superficie.

Para codificar el valor de la topografía, seleccionar la opción **Geometry> New>New> Set> Geometry Selection**, en la nueva ventana seleccionar la superficie de la topografía (Figura C10) y guardar.

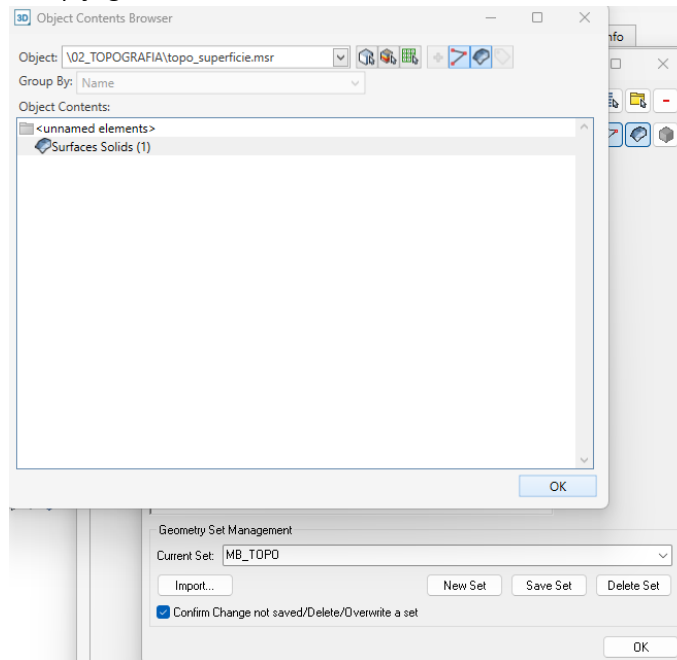


Figura C10. Configuración de Geometry Set Editor.

- IV. Para finalizar la codificación de la topografía, se debe generar, dentro de la pestaña **Code Model**, la configuración mostrada en la Figura C11.

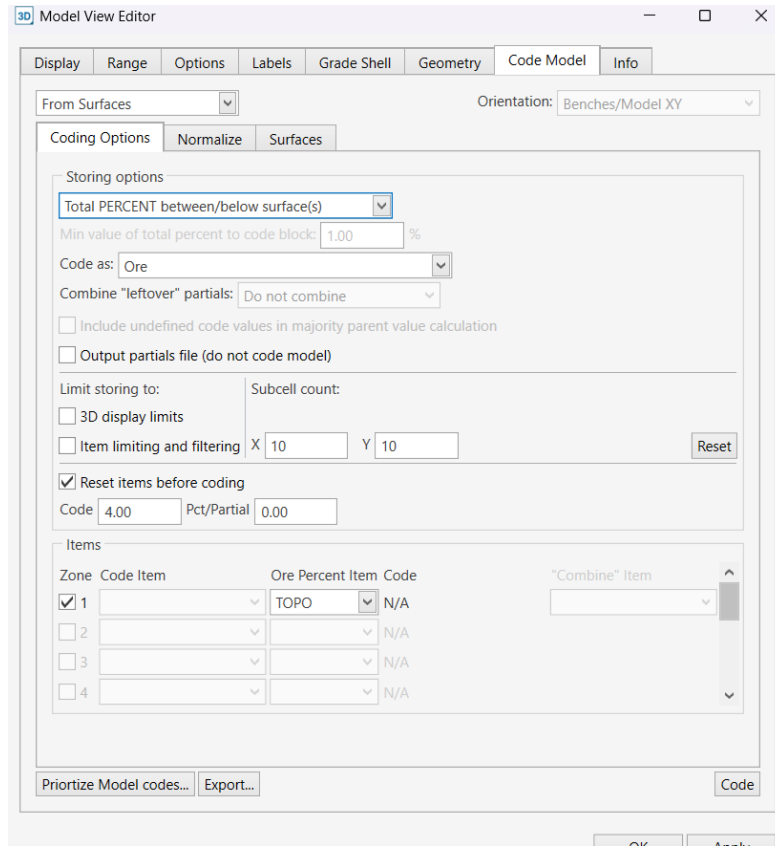


Figura C11. Codificación topografía.

V. Dentro del MVE, exportar el archivo (Figura C12).

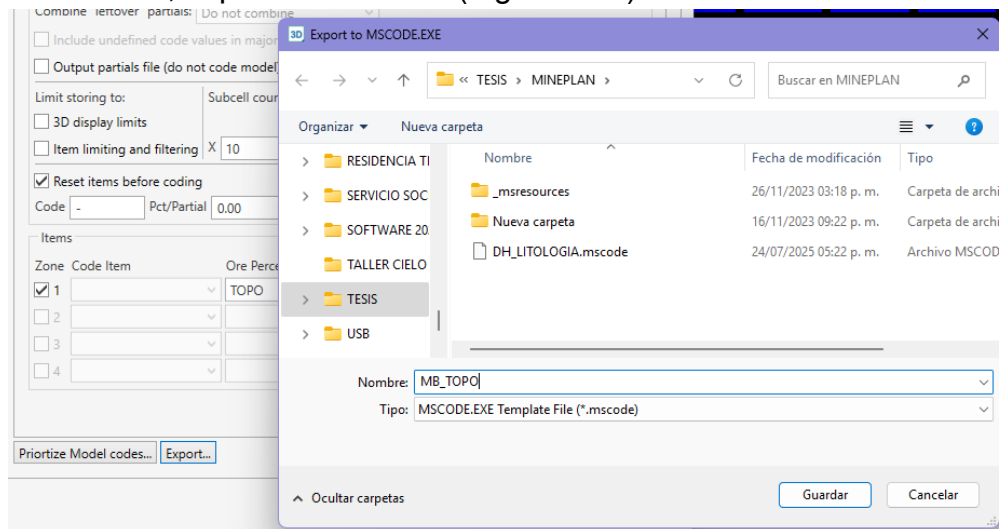


Figura C12. Exportar codificación.

VI. La siguiente codificación será la litología, los pasos a seguir son muy similares a los de la topografía. En la pestaña **Display** seleccionar el item LITO y aplicar.

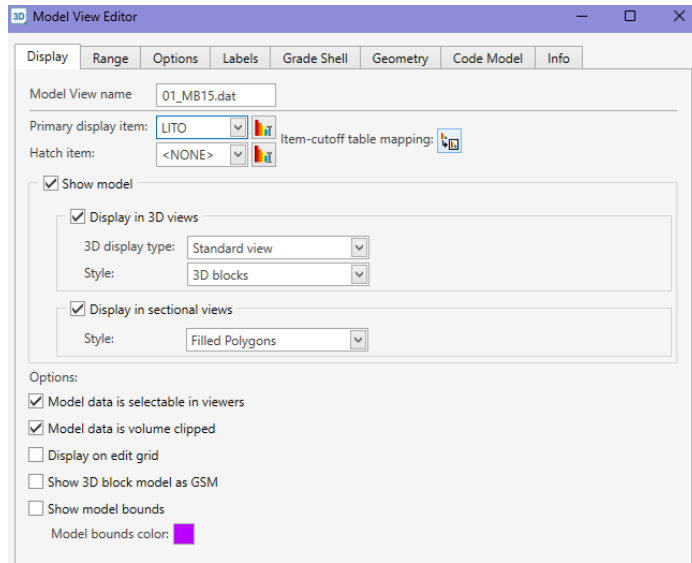


Figura C13. Selección de ítem LITO.

- VII. Repetir los mismos pasos para el caso del **Geometry Set Editor**, en este caso se debe seleccionar la carpeta de litología. Los objetos deben mostrarse como en la Figura C14.

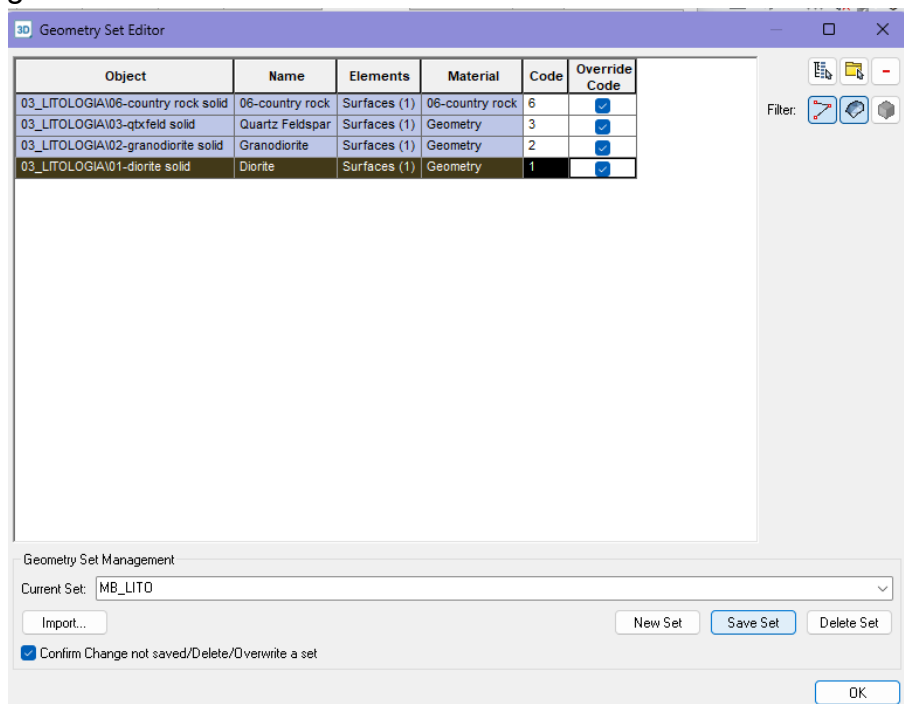


Figura C14. Objetos litología.

- VIII. En la pestaña **Code Model** realizar los cambios mostrados en la Figura C15 y codificar.

- IX. Exportar la codificación. Los resultados de la codificación se muestran en la Figura C16.

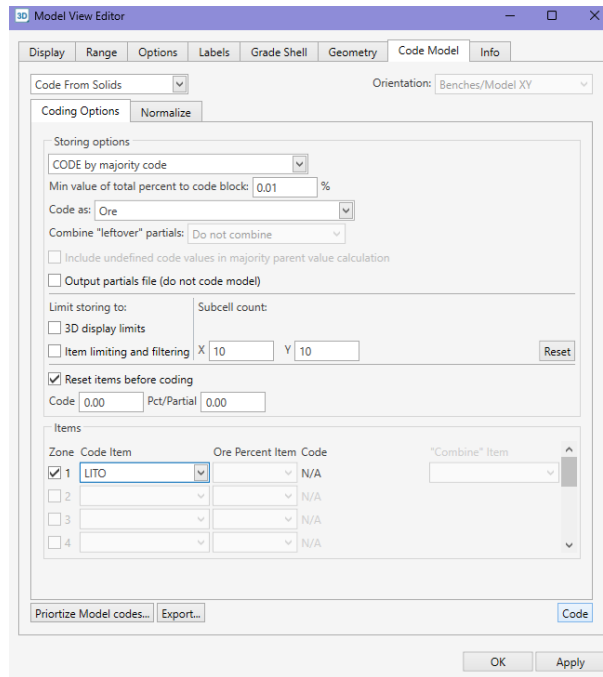


Figura C15. Codificación de litología.

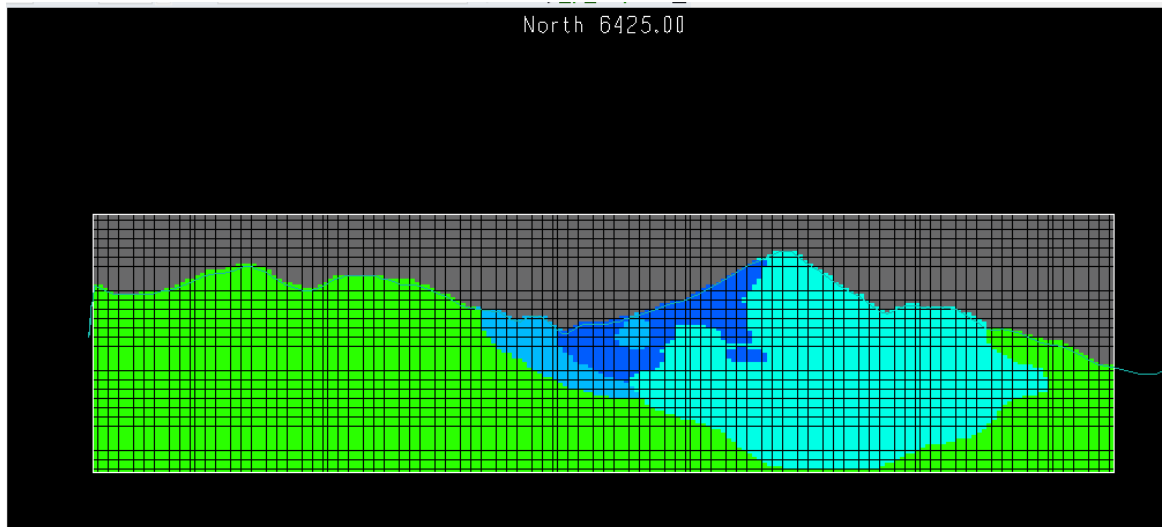


Figura C16. Resultados de la codificación de litología.

- X. Repetir los pasos anteriores para la mineralización.

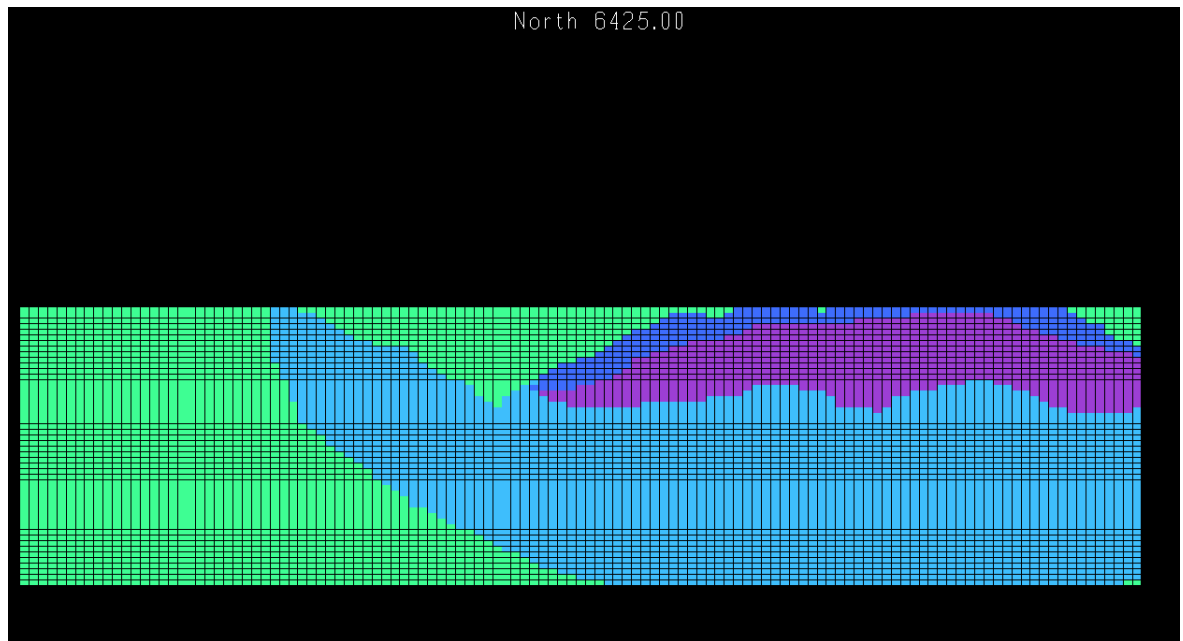


Figura C17. Resultados de la codificación de mineralización.

C4. Cálculo de densidad por mineralización

Las siguientes interpolaciones que se requieren para completar el modelo de bloques se harán a través de scripts dentro del módulo **Model > Model Calculation Tool** (Figura C18). Aunque la configuración dentro del módulo requiere de programación Python, los ajustes que se deben realizar para este proyecto no requieren de una programación avanzada y los códigos indispensables se incluyen en los siguientes pasos.

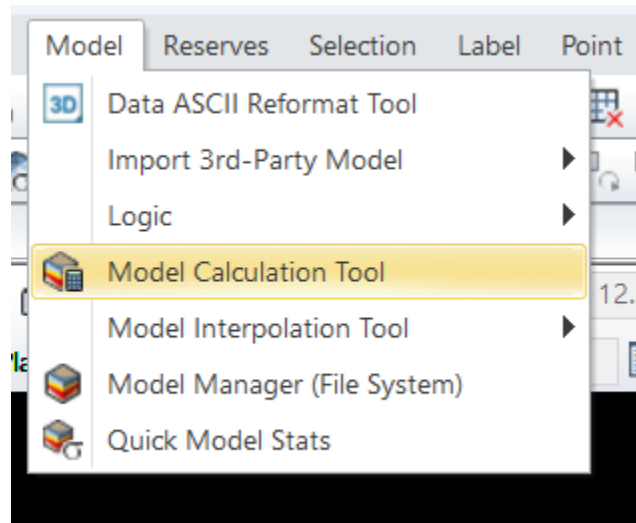


Figura C18. Model Calculation Tool.

Para iniciar el cálculo de densidad a partir de la mineralización se contemplan los pasos siguientes:

- I. Abrir un nuevo proyecto dentro del **Model Calculation Tool** y seleccionar el archivo PCF y el 3DBM del proyecto, el ejemplo se muestra en la Figura C19.

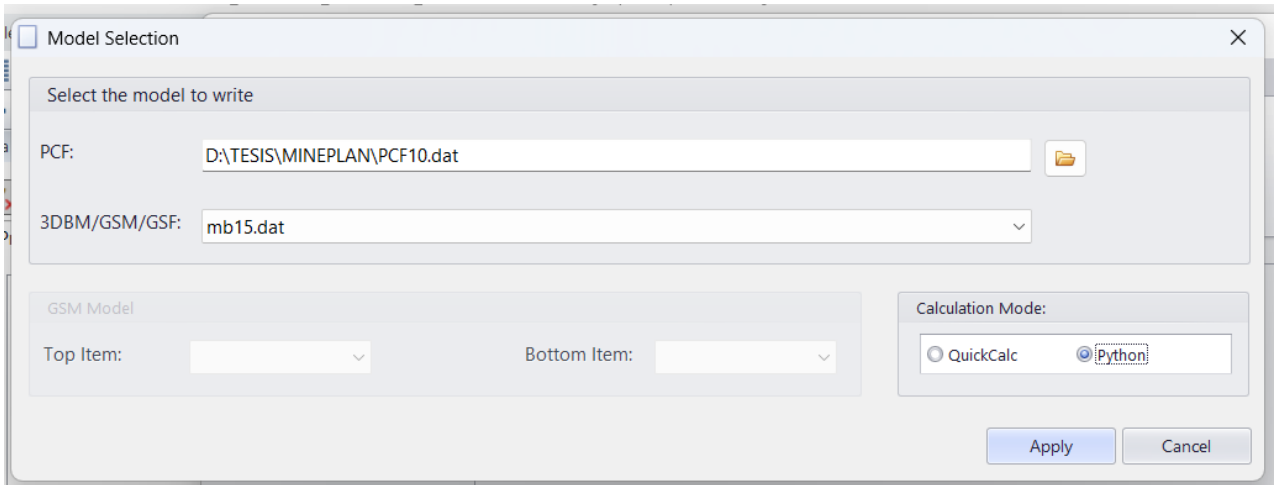


Figura C19. Configuración Model Selection.

- II. En la ventana **ítem Selection**, seleccionar los ítems con los que se va a realizar la interpolación, en este caso es la densidad (SG) a partir de la mineralización (MNRLS) como se observa en la Figura C20.

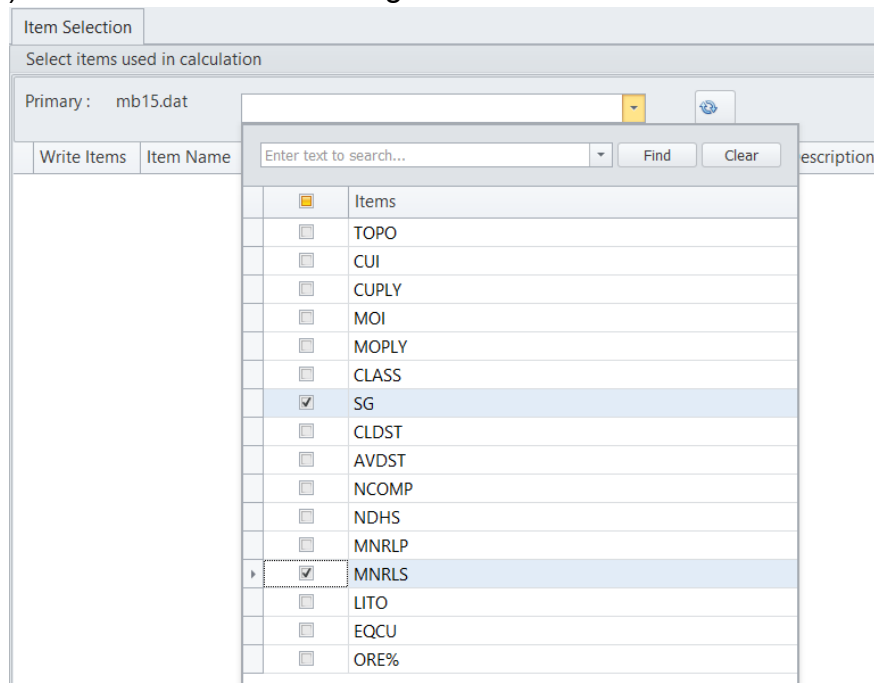


Figura C 20. ítems seleccionados para la interpolación.

- III. Una vez seleccionados los ítems, en la columna **Write items**, seleccionar los ítems de escritura, el resto solo será de lectura (Figura C21).

Item Selection								
Select items used in calculation								
Primary :		mb15.dat		SG,MNRLS				
	Write Items	Item Name	Sub-Blocked	Parent Block	Item Mini...	Item Maxi...	Undefined	Description
I	<input checked="" type="checkbox"/>	SG	No		0	4		
	<input type="checkbox"/>	MNRLS	No		0	10		

Figura C 21. Ítems de escritura y de lectura

- IV. La opción **Python Script** esta dedicada a los códigos de programación que se necesiten generar. Es importante tomar en cuenta que, la única ventana que leerá el código Python será la de **Main Script**, el resto solo sirven para anotaciones.

El código de programación de este proyecto se basa en decisiones que dependen de la mineralización. En la figura C22 se muestran las tres decisiones que debe considerar el programa.

4. Si el código de la mineralización es igual a 1, la densidad será de 2.8.
5. Si el código de la mineralización es igual a 2, la densidad será de 2.7.
6. Si el código de la mineralización es igual a 3, la densidad será de 2.6.

```

1 # Densidad por mineralizacion
2 #MNRLS = 1: Sulfuros -> SG = 2.8
3 #MNRLS = 2: Oxidos -> SG = 2.7
4 #MNRLS = 3: Transición -> SG = 2.6
5 #MNRLS = 4: Waste -> SG= 2.5
6
7 #SG para Sulfuros
8
9 if $MNRLS == 1:
10 $SG=2.8
11
12 #SG para Oxidos:
13
14 elif $MNRLS == 2:
15 $SG = 2.7
16
17 #SG para Trans:
18
19 elif $MNRLS == 3:
20 $SG = 2.6
  
```

Figura C 22. Código Python.

CODIGO PYTHON

```
# Densidad por mineralizacion

#MNRLS = 1: Sulfuros --> SG = 2.8

#MNRLS = 2: Oxidos --> SG = 2.7

#MNRLS = 3: Transicion --> SG = 2.6

#MNRLS = 4: Waste --> SG= 2.5

#SG para Sulfuros

if $(MNRLS)== 1:

    $(SG)= 2.8

#SG para Oxidos:

elif $(MNRLS) == 2:

    $(SG)= 2.7

#SG para Trans:

elif $(MNRLS) == 3:

    $(SG) =2.6
```

- V. Si antes de correr el código se desea tener una visualización previa de la interpolación, abrir la ventana **Test one block** y seleccionar el bloque que desee verificar, como ejemplo se puede observar la Figura C23.

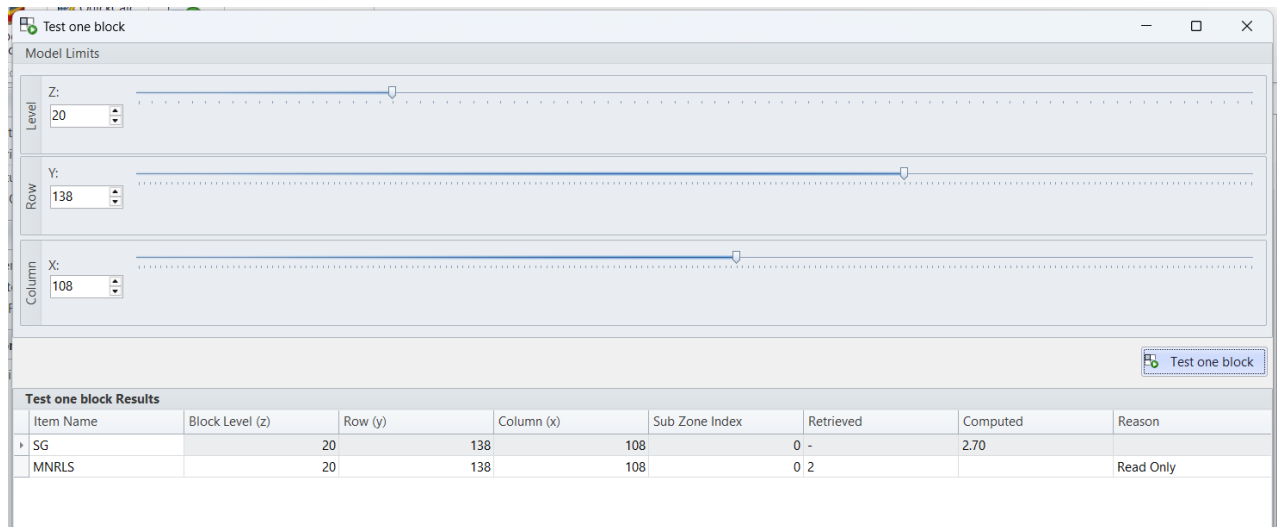


Figura C23. Test one block.

- VI. Antes de correr el código, verificar que no presente errores con la opción **Verify Syntax**, cuando todo este correcto, dar clic en la opción **Run**.

Al finalizar, el software de manera automática muestra un reporte de la información del código, este se puede guardar en PDF si se requiere.

- VII. Para visualizar la interpolación en el modelo de bloques, basta con seleccionar el ítem de densidad en el visualizador primario del **Model Viewer Editor** (Figura C24).

Los resultados se muestran en la Figura C25.

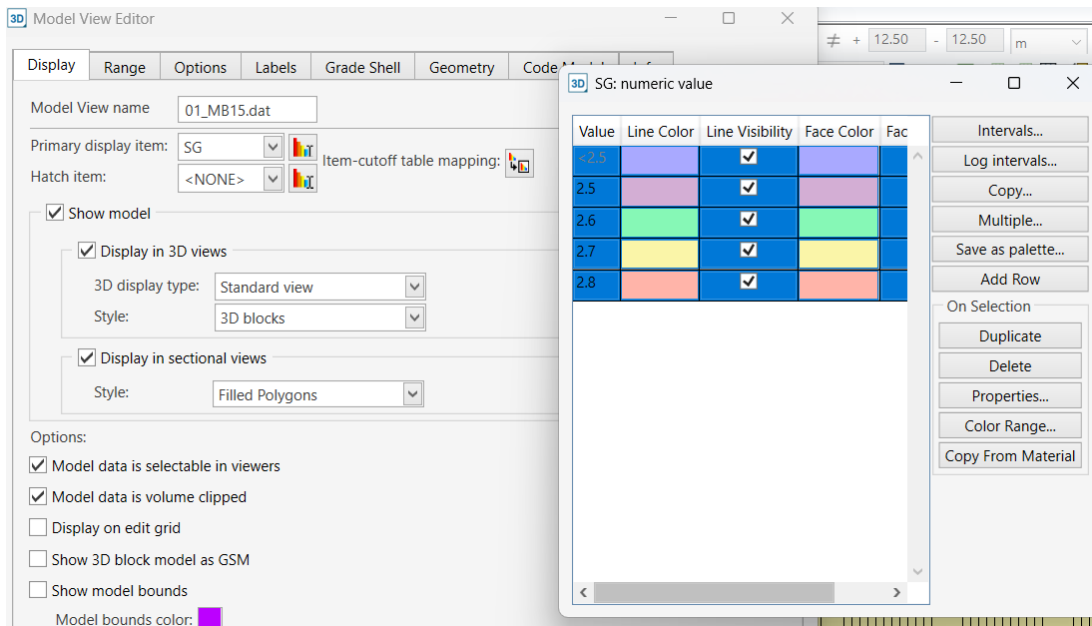


Figura C24. Configuración de intervalos de densidad.

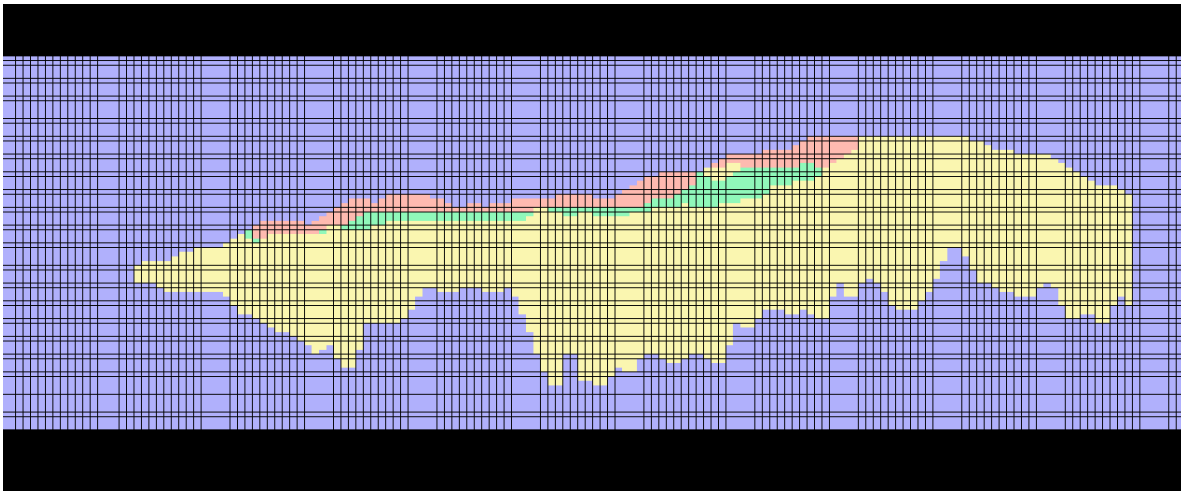


Figura C25. Densidad por mineralización.

C5. Leyes de cobre y molibdeno

Como ultima caracterización que se le asignara al modelo de bloques serán los valores de las leyes presentes del cobre y el molibdeno. Si bien durante todo el desarrollo de este proyecto se ha estado trabajando con las leyes obtenidas en la campaña de exploración, ahora se hará una interpolación para el cálculo de leyes para cada uno de los bloques del modelo. Los pasos por seguir se describen a continuación.

- I. Seleccionar el módulo **Model> Model Interpolation Tool> New**, abrir los archivos PCF, 3DBM y Torque correspondientes al proyecto (Figura C26).

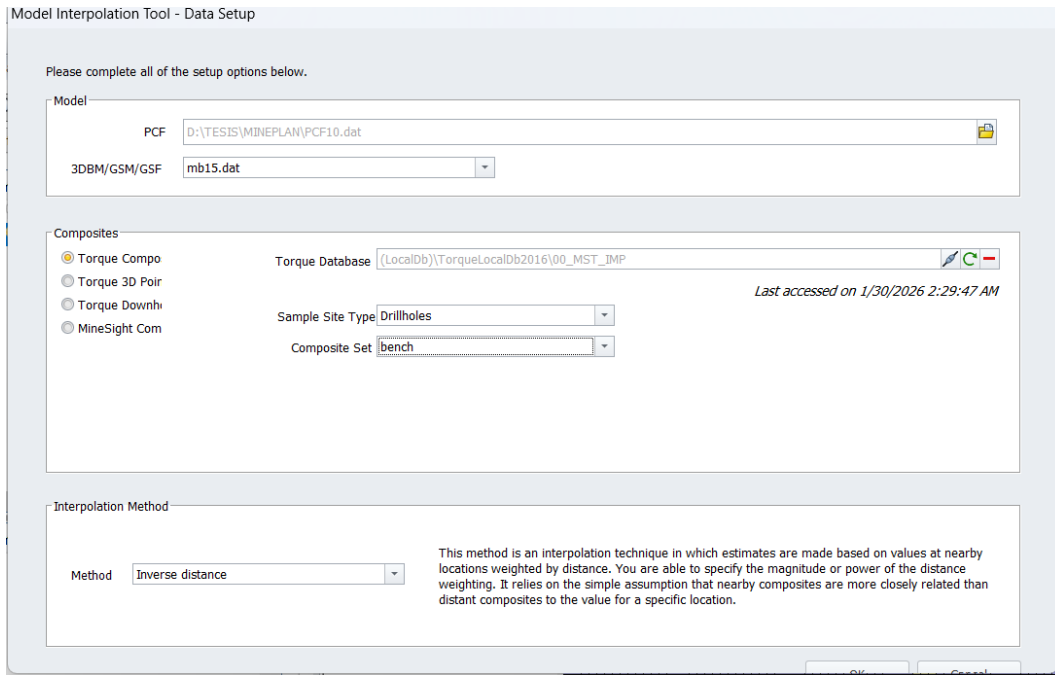


Figura C26. Nuevo Model interpolation Tool.

- II. El método de interpolación que se utilizará será el de Inverso a la distancia (se recomienda consultar el apartado 3.4.1). Dentro de la ventana **Primary Search**, seleccionar el método **Inverse distance** en forma **Spherical Search** y un radio de 100 metros (Figura C27), es decir que, a partir del centro de la esfera, tomara los datos de las muestras que estén a un máximo de 100 metros.

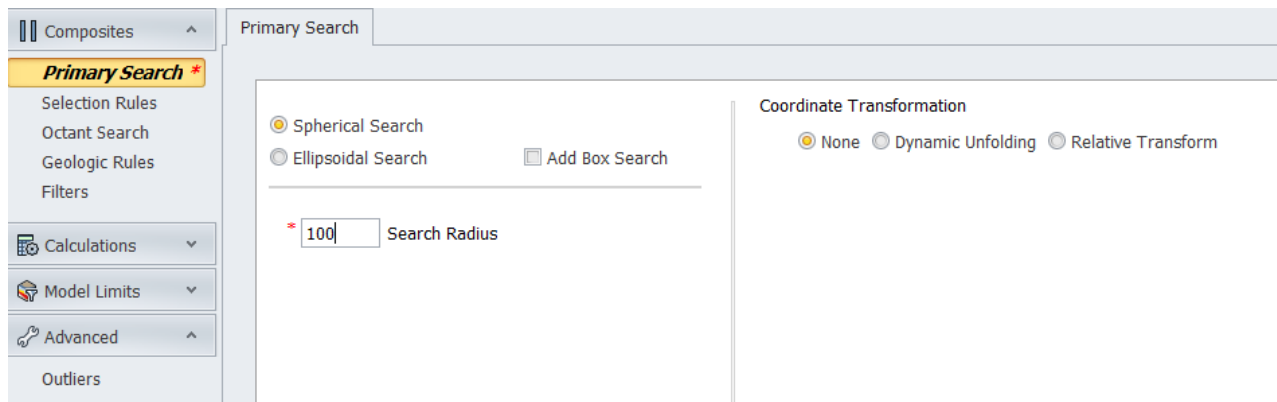


Figura C27. Configuración Primary Search.

- III. La ventana **Selection Rules**, permite seleccionar la cantidad de compósitos mínimos, máximos por bloque y máximos por sondeos para realizar la interpolación del bloque. En la Figura C28 se muestra un ejemplo de

configuración, pero esta puede variar de acuerdo con la precisión que se desea obtener.

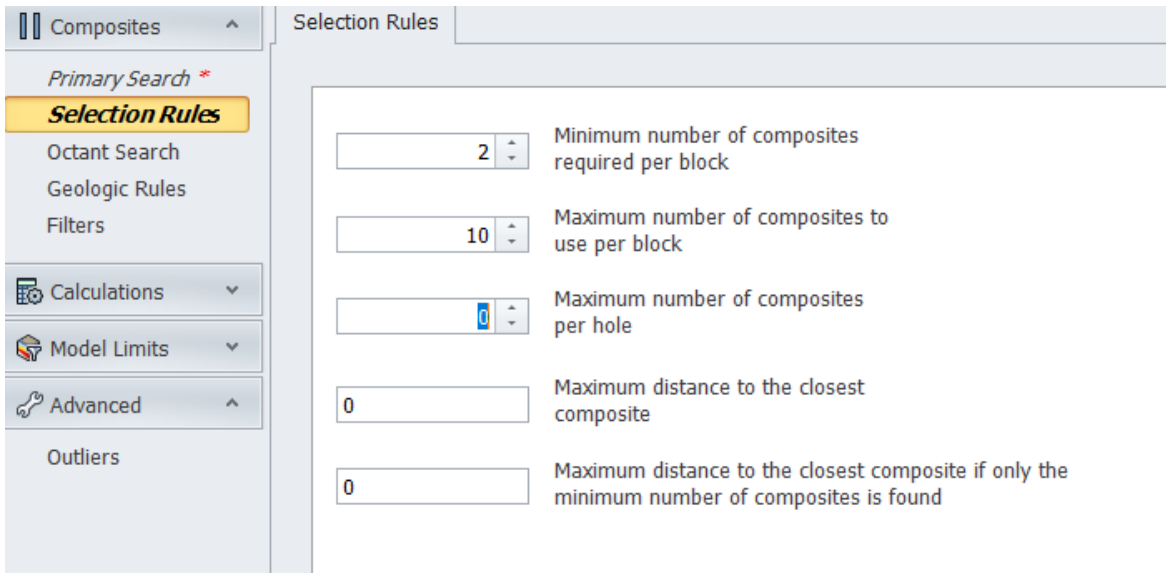


Figura C28. Configuración Selection Rules.

- IV. Otra de las ventanas indispensable es la de **Item Mapping**, esta sirve para indicarle al software los ítems que se deben interpolar y en donde debe guardarse dentro del modelo de bloques. En la Figura C29 se muestra la selección del cobre y molibdeno.

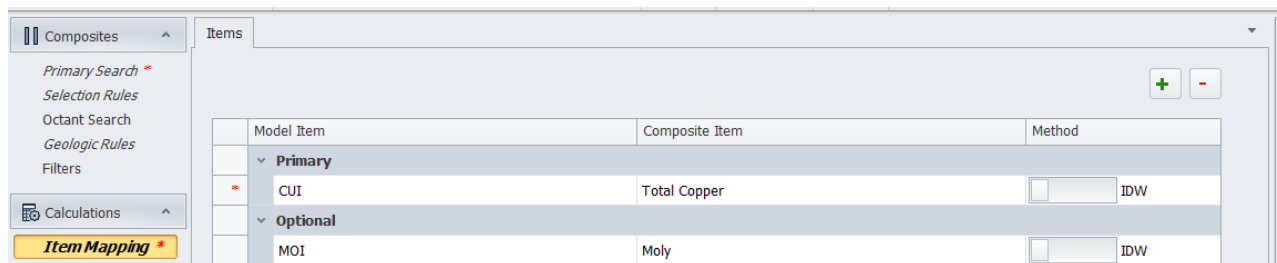


Figura C29. Configuración Item Mapping.

- V. Para el caso de la ventana Store Ítems, se puede seleccionar la distancia al sondeo más cercano (CLDST) y la distancia promedio (AVDST); el número de compósitos (NCOMP) y el número de sondeos (NDHS) utilizados.

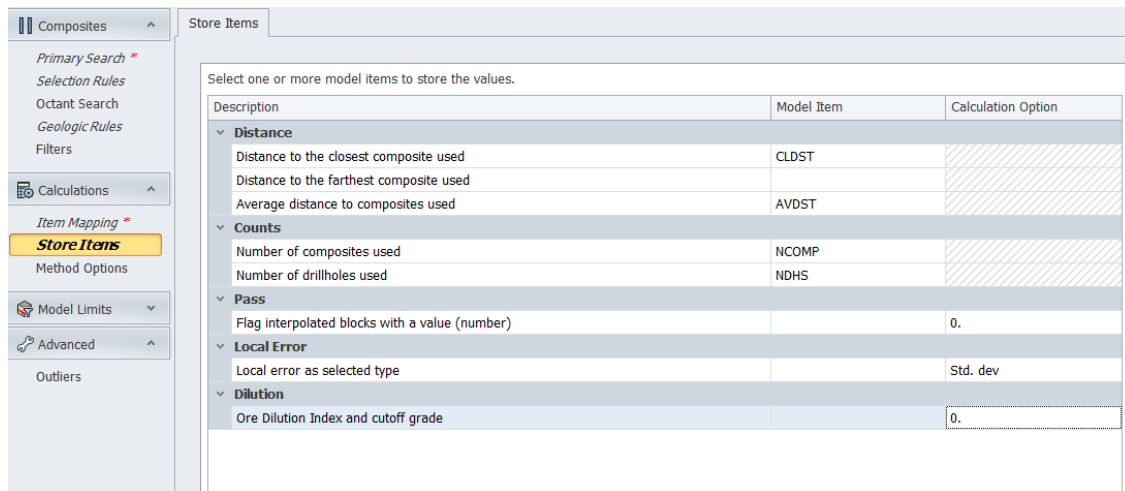


Figura C30. Configuración Store Items.

- VI. Una vez terminada la configuración de todos los parámetros, se sugiere realizar la opción de **Run One Block** para verificar que el programa funcione correctamente.
- VII. Una vez verificada la información, seleccionar la opción Run.

En la Figura C31 se muestra el resultado de la interpolación representada por una esfera, los valores que se muestran son los puntos, leyes, los valores de la interpolación, la distancia al centroide y los sondeos que se están considerando.

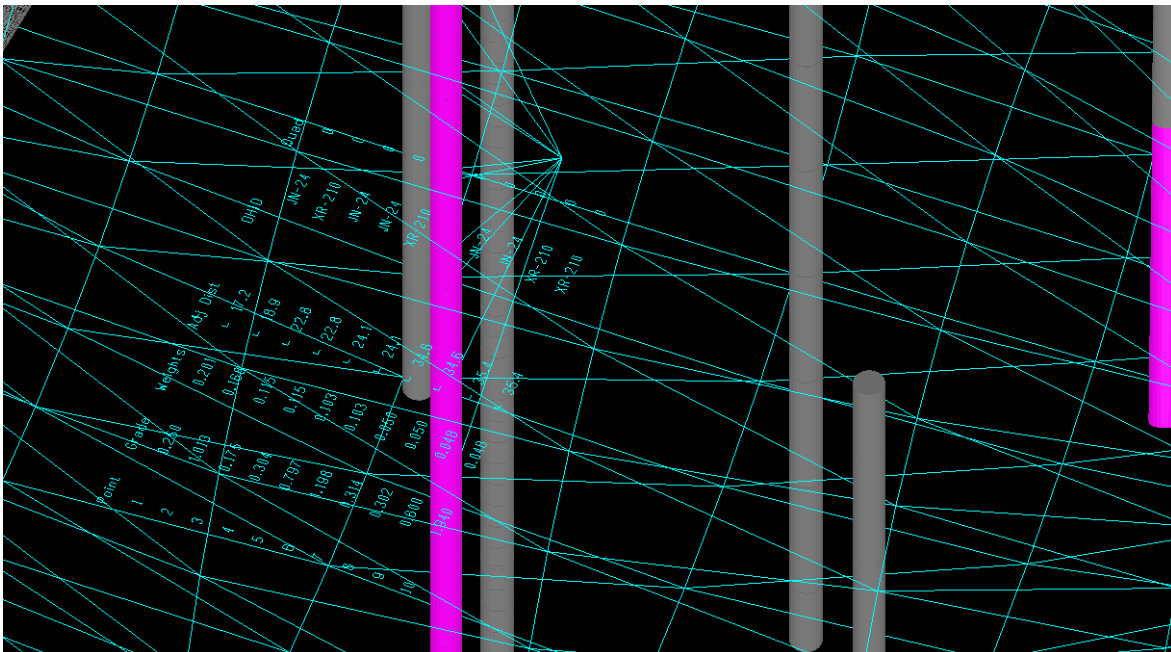


Figura C31. Resultado de la ponderación.

VIII. Para visualizar los resultados de la interpolación en el modelo de bloques, seleccionar el ítem de cobre en el visualizador primario del **Model Viewer Editor**.

Los resultados se muestran en la Figura C33.

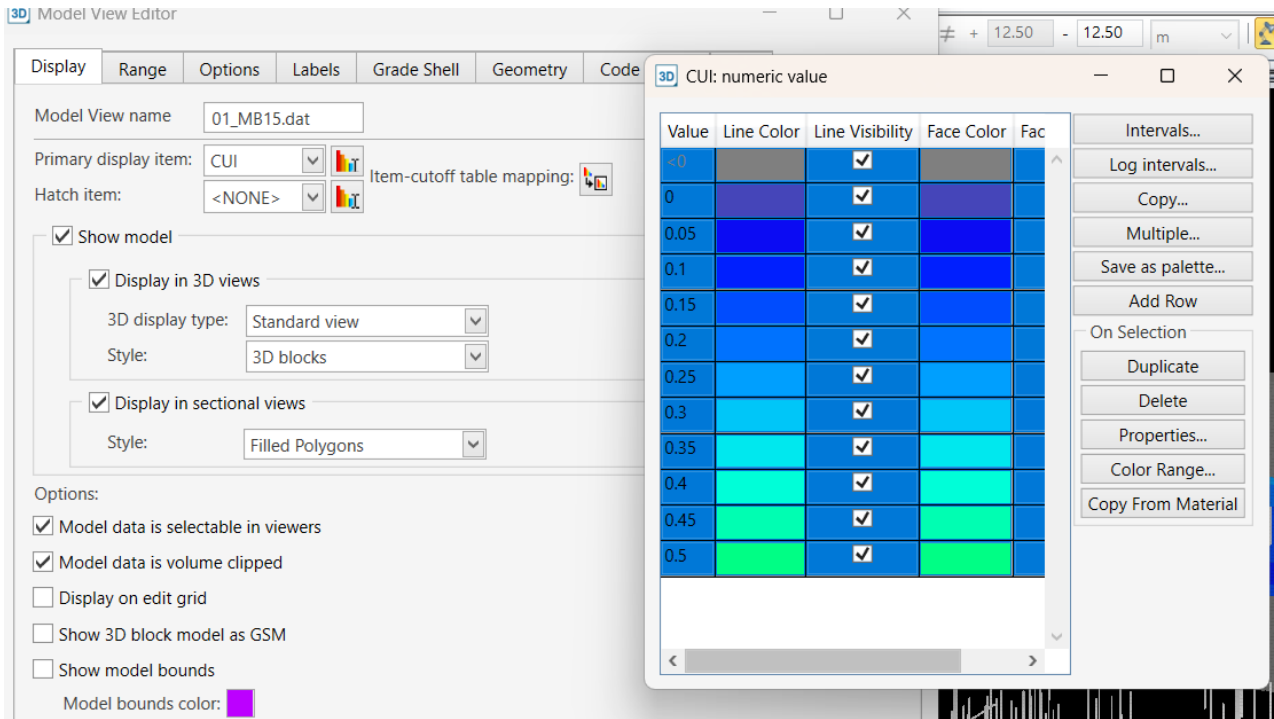


Figura C32. Configuración de intervalos de la ley de cobre.

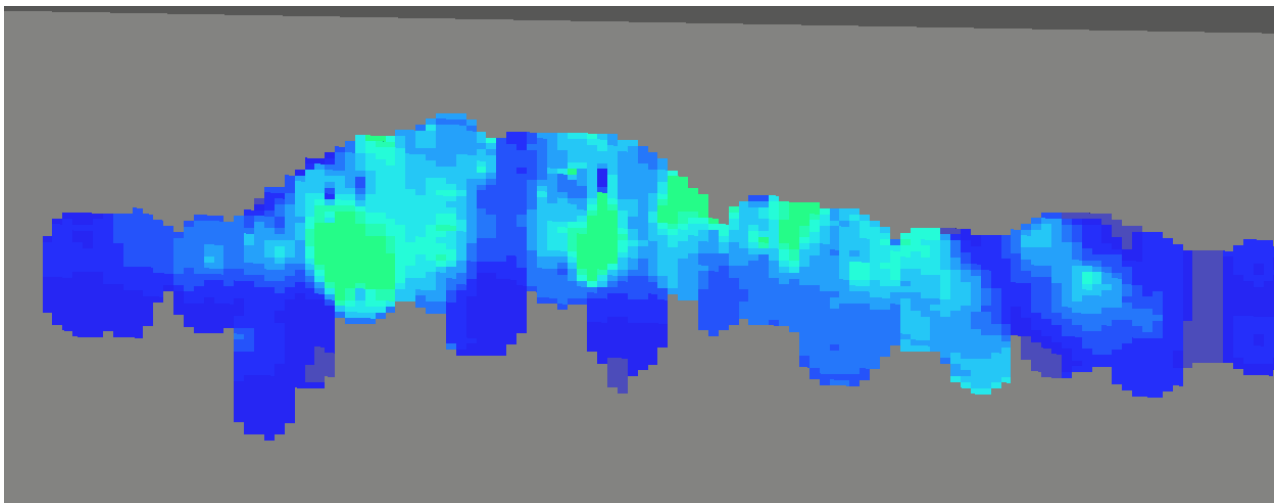


Figura C 33. Resultado del modelo de bloques.