

**UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Ramón Díaz Noriega

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE INUNDACIÓN DE UNA MINA SUBTERRÁNEA
MEDIANTE MODELOS NUMÉRICOS.**

Sebastián Antonio Zamora Risco

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Enero 2025

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a mi madre, una viejita mañosa. Siempre ha estado en los momentos clave, apoyándome en los momentos difíciles. Para mí, ella encarna los valores originales del feminismo: una mujer de mentalidad firme, inteligente y trabajadora, que se hace respetar y enfrenta cada desafío con determinación, mientras protege a sus hijos con todo su corazón. Me siento profundamente orgulloso y de que sea mi madre.

Agradezco a todos mis hermanos por su apoyo. En especial, a mi hermano menor Daniel, quien, a pesar de su enfermedad, acudía constantemente a verme al enterarse de los problemas que estaba pasando. También a mi hermano mayor Gustavo, que siempre buscó estar presente, visitándome siempre que podía, incluso enfrentando la gran distancia entre regiones. Mi gratitud hacia mi hermano Esteban, cuyo entusiasmo por el aprendizaje fue clave para que decidiera estudiar en la universidad; el despertó mi interés desafiándome con acertijos y problemas matemáticos cuando era adolescente. Agradezco a mi hermano Gabriel, quien estuvo a mi lado en los momentos más difíciles en Concepción, alegrándome con su capacidad de hacerme reír. Finalmente, agradezco a mi hermana Francisca, que durante mi etapa en Concepción me ayudaba en lo cotidiano y encontraba la manera de sacarme una sonrisa con su carácter bromista y cercano. A todos ellos, mi agradecimiento no solo por su compañía, sino también por compartir sus pensamientos, sentimientos y experiencias mientras buscaba respuestas sobre lo que habíamos vivido juntos.

Agradezco a mi hija Agatha, mi reina, quien en su momento fue mi única motivación para mantenerme aquí. Su sonrisa a pesar de las dificultades y su sentido del humor, siempre lograron alegrarme. Aún recuerdas y me pides que te cante y te envuelva como un sushi para dormir, como lo hacíamos cuando eras bebé. A veces no entiendo cómo puedes quererme tanto, pero sé que, gracias a ti, miraré hacia adelante y trabajaré para estar a la altura de ese cariño, para que, cuando llegues a mi edad, puedas sentirte orgullosa de mí, tal como yo lo estoy de mi madre.

Agradezco a mi amigo Sebastián Bustos, quien me acompañó en mis momentos más complicados, me escucho en los momentos más difíciles de mi vida hasta ahora. Siempre estuvo ahí sin esperar nada a cambio, solo ofreciendo su apoyo. De no ser por ti, no habría podido levantarme a tiempo. También te agradezco el conocimiento que aportaste a esta memoria y el tiempo que compartimos debatiendo ideas. Pero, sobre todo, gracias por tu amistad incondicional.

Geraldine gracias por tu comprensión, motivación y flexibilidad, pero, sobre todo, por cuidar de mi Agatha en los momentos que la vida me derribó.

A mis amigos de infancia Diego, Paolo y Bastián, quienes, al enterarse de mi situación, viajaron desde regiones lejanas para apoyarme y ayudarme a mantenerme a flote en la vida.

Profesor Ramón Díaz, agradezco su comprensión, paciencia, y ánimo. En usted vi la verdadera vocación de su profesión, no solo como profesional en el área de minería, sino también como docente, motivando a sus alumnos, ofreciéndoles retos en la búsqueda y generación de soluciones, siendo estricto y flexible cuando es necesario. Muchas gracias, y espero que esta memoria le sea, al menos en algo, de utilidad.

Agradezco desde lo más profundo de mi ser a cada una de las personas mencionadas. Ustedes son la razón por la que deseo seguir mejorando, tanto como persona como profesional, especialmente mi madre y mi reina, Agatha.

Gracias a la Universidad de Concepción por la oportunidad de estudiar y gracias a todos los profesores que me encontré durante mis años de estudiante, especialmente a los profesores de la carrera, siempre fueron muy amables y respetuosos, y obviamente excelentes profesionales.

Valoro y agradezco a DHI por proporcionarme la licencia de FEFLOW y FePEST, así como a su equipo, especialmente al Dr. Carlos Rivera, por su disposición para resolver dudas de un estudiante.

Estoy profundamente agradecido con todos y me siento afortunado por las personas que me han acompañado desde que ingresé a la universidad.

Finalmente, un mensaje para quienes atraviesan momentos difíciles, de esos que te derriban y no te dejan levantar: recuerda que no estás solo, se inteligente, deja de lado tu orgullo y busca ayuda con tu familia y amistades, no es necesario que resuelvas todo solo, pedir ayuda no es una debilidad.

Resumen

En esta memoria se desarrollaron modelos numéricos desestructurados en FEFLOW para simular el fenómeno de inundación de dos minas subterráneas de carbón, denominadas confidencialmente Mina 1 y Mina 2, las cuales presentan interdependencia hidrogeológica. Ambas minas, actualmente cerradas e inundadas, cuentan con drenaje constante debido al riesgo de rebalse durante su proceso de inundación, como resultado de la recuperación del nivel freático o rebote de agua.

La metodología incluyó la contextualización del caso, generación del modelo conceptual, construcción de las mallas, creación de modelos numéricos, simulaciones en régimen estacionario y transitorio, y la calibración manual de parámetros hidráulicos para un periodo de cinco años.

El modelo conceptual hidrogeológico abarcó un dominio espacial de 26.8 [km²], definido por la topografía, hidrogeología y geología estructural, e incluyó cuatro unidades hidrogeológicas: macizo no fracturado, macizo fracturado, labores subterráneas y talleres de explotación de Mina 1.

Con base en este modelo conceptual, se generó el modelo numérico desestructurado en FEFLOW, lo que implicó diseñar una malla que representara el dominio, límites internos y externos, cumpliendo criterios topológicos y capturando la complejidad tridimensional de las labores subterráneas.

Finalmente, el modelo fue resuelto en régimen estacionario y transitorio, calibrando manualmente los parámetros y simulando el proceso de inundación con un error aproximado de 20 metros, atribuible a las simplificaciones y consideraciones detalladas en el desarrollo de la memoria. A pesar de las limitaciones de precisión, el modelo logra reproducir de forma adecuada el fenómeno de rebalse de las minas y la interacción hidráulica entre los niveles piezométricos de ambas minas.

Para este trabajo se emplearon los softwares AutoCAD 2021, Civil 3D 2021 y ArcGIS Desktop (10.8) en distintas etapas del proceso, adaptándose a las necesidades específicas de cada fase.

Palabras clave: FEFLOW, inundación de minas, interdependencia hidrogeológica, minas subterráneas, modelo numérico desestructurado, recuperación del nivel freático, régimen transitorio.

Abstract

This thesis developed unstructured numerical models in FEFLOW to simulate the flooding phenomenon of two underground coal mines, confidentially referred to as Mine 1 and Mine 2, which exhibit hydrogeological interdependence. Both mines, currently closed and flooded, have constant drainage due to the risk of overflow during the flooding process, as a result of the recovery of the groundwater level or water rebound.

The methodology included the contextualization of the case study, development of the conceptual model, mesh construction, creation of numerical models, simulations under steady-state and transient regimes, and manual calibration of hydraulic parameters over a five-year period.

The hydrogeological conceptual model covered a spatial domain of 26.8 [km²], defined by the topography, hydrogeology, and structural geology, and included four hydrogeological units: unfractured rock mass, fractured rock mass, underground workings, and the mining workshops of Mine 1.

Based on this conceptual model, an unstructured numerical model was developed in FEFLOW, which involved designing a mesh that represented the domain, internal and external boundaries, while meeting topological criteria and capturing the three-dimensional complexity of the underground workings.

Finally, the model was solved under steady-state and transient regimes, manually calibrating the parameters and simulating the flooding process with an approximate error of 20 meters, attributed to the simplifications and considerations detailed in the thesis. Despite the precision limitations, the model adequately reproduces the overflow phenomenon of the mines and the hydraulic interaction between the piezometric levels of both mines.

For this work, the software AutoCAD 2021, Civil 3D 2021, and ArcGIS Desktop (10.8) were used at various stages of the process, adapting to the specific needs of each phase.

Keywords: FEFLOW, hydrogeological interdependence, mining flooding, numerical model, transient regime, underground mines, water rebound.

Índice

Índice de figuras	xii
Índice de tablas	xiv
Nomenclatura	xv
1. Introducción	1
1.1. Estudio de los fenómenos de inundación en minas subterráneas	1
1.2. Hipótesis de trabajo	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4. Metodología	3
1.5. Alcances y limitaciones.....	5
2. Marco teórico	6
2.1. Conceptos básicos de hidrología subterránea.....	6
2.1.1. <i>Unidades hidrogeológicas y Ley de Darcy</i>	6
2.1.2. <i>Parámetros hidrológicos</i>	6
2.1.3. <i>Régimen permanente y transitorio</i>	7
2.1.4. <i>Ecuaciones fundamentales del movimiento de aguas subterráneas</i>	7
2.1.5. <i>Condiciones de borde</i>	8

2.2. Conceptos básicos de modelización hidrogeológica	10
2.3. Método de elementos finitos	11
2.4. Simulador FEFLOW	12
2.5. Algoritmo generador de mallas TetGen	14
2.6. Triangulación de mallas superficiales de AutoCAD	16
3. Caso de estudio.....	17
3.1. Topografía	17
3.2. Red hidrográfica.....	18
3.3. Climatología.....	19
3.4. Geología y Geomorfología.....	19
3.5. Hidrogeología.....	22
3.6. Minería subterránea.....	24
3.6.1. Método de explotación	24
3.6.2. Descripción general de labores.	24
3.6.3. Conexiones entre minas	28
4. Desarrollo	30
4.1. Recopilación, análisis y tratamiento de la información.	30
4.2. Modelo Conceptual	32

4.2.1. Hipótesis conceptuales.....	32
4.2.2. Dominio espacial y condiciones de contorno	33
4.2.3. Modelo Conceptual 3D	37
4.3. Modelo Numérico	38
4.3.1. Discretización del dominio espacial.	38
4.3.2. Malla de entrada.	38
4.3.3. Malla de elementos finitos.....	39
4.3.4. Asignación de parámetros hidráulicos	40
4.3.5. Condiciones de contorno.....	42
4.3.6. Pozos de observación.....	46
5. Resultados	47
5.1. Modelos en régimen estacionario.....	47
5.1.1. Características generales y balance hídrico: Modelo 1- k_1 -A y Modelo 1- k_1 -B.....	47
5.1.2. Nivel freático: Modelo 1- k_1 -B	49
5.1.3. Isosuperficies de piezometría: Modelo 1- k_1 -B	49
5.1.4. Isolíneas y franjas de piezometría: Modelo 1- k_1 -B.....	50
5.1.5. Seguimiento de datos de piezometría: Modelo 1- k_1 -B	50
5.1.6. Análisis del flujo en el complejo minero: Modelo 1- k_1 -B	51

5.1.7. Balance de labores subterráneas: Modelo 1-k ₁ -B	52
5.2. Modelos en régimen transitorio.....	52
5.2.1. Calibración manual	53
5.2.2. Resultados de calibración manual	54
5.2.3. Resultados de simulación en régimen transitorio calibrado	55
5.2.4. Fenómeno de inundación real v/s inundación simulada.....	57
6. Conclusiones y recomendaciones.....	59
7. Referencias	61
8. Anexos.....	67
8.1. Índice de figuras de anexos	67
8.2. Índice de tablas de anexo.....	78
Anexo A Conceptos básicos hidrología de subterránea.....	79
<i>Anexo A1. Definición y clasificación de unidades hidrogeológicas fundamentales</i>	79
<i>Anexo A2. Ley de Darcy</i>	80
<i>Anexo A3. Parámetros hidrológicos fundamentales</i>	81
<i>Anexo A4. Principio de conservación de masa y supuesto de continuidad</i>	83
Anexo B Conceptos básicos de modelización hidrogeológica subterránea	85
<i>Anexo B1. Modelo conceptual</i>	85

<i>Anexo B2. Modelo matemático</i>	86
<i>Anexo B3. Modelo numérico</i>	86
Anexo C Métodos de elementos finitos	86
Anexo D TetGen	91
<i>Anexo D1. Opciones de mallado de FEM</i>	91
<i>Anexo D2. Parámetros de calidad de malla</i>	95
Anexo E Parámetros de triangulación de mallas superficiales de AutoCAD	96
Anexo F Topografía	98
Anexo G Climatología	98
Anexo H Método de explotación por testeros	100
Anexo I Descripción general de las labores	100
Anexo J Recopilación y análisis de información	101
Anexo K Contextualización del caso de estudio	103
Anexo L Proyección en planta de los límites del modelo conceptual.....	110
Anexo M Direcciones de flujo superficial	111
Anexo N Malla del complejo minero	111
Anexo O Malla del dominio del modelo y acoplado de mallas	128
Anexo P Parámetros de entrada de mallas FEM, modelos serie A y B	136

Anexo Q Modelos Serie A	137
Anexo R Modelos Serie B.....	144
Anexo S Análisis comparativo Modelos Serie A y Serie B	149
Anexo T Asignación de parámetros hidráulicos	151
<i>Anexo T1. Precipitación útil.....</i>	<i>151</i>
<i>Anexo T2. Conductividad hidráulica</i>	<i>152</i>
<i>Anexo T3. Porosidad.....</i>	<i>153</i>
Anexo U Asignación de Fluid transfer BC	154
<i>Anexo U1. Conductancia.....</i>	<i>156</i>
Anexo V Nomenclatura de modelos	156
Anexo W Resultados régimen estacionario	157
<i>Anexo W1. Características generales y balances hídricos</i>	<i>157</i>
<i>Anexo W2. Nivel freático.....</i>	<i>159</i>
<i>Anexo W3. Isosuperficies de piezometría.....</i>	<i>161</i>
<i>Anexo W4. Isolíneas y franjas de piezometrías.....</i>	<i>164</i>
<i>Anexo W5. Seguimiento de datos de piezometría.....</i>	<i>171</i>
<i>Anexo W6. Análisis del flujo en el complejo minero.....</i>	<i>178</i>
<i>Anexo W7. Flujo saliente de labores subterráneas del Complejo Minero.....</i>	<i>213</i>

Anexo X Calibración manual.....	216
<i>Anexo X1. Niveles piezométricos del proceso de inundación real.....</i>	<i>216</i>
<i>Anexo X2. Análisis de la sensibilidad de los parámetros a calibrar</i>	<i>216</i>
<i>Anexo X3. Velocidades de ascenso de datos reales y zonas de subdivisión de zona fracturada (radio de 10 metros alrededor de labores)</i>	<i>219</i>
<i>Anexo X4. Parámetros hidráulicos resultantes de calibración manual.....</i>	<i>220</i>
Anexo Y Resultados régimen transitorio calibrado	222
<i>Anexo Y1. Balance hídrico.....</i>	<i>222</i>
<i>Anexo Y2. Nivel piezométrico simulado en función del tiempo</i>	<i>223</i>
<i>Anexo Y3. Time steps.....</i>	<i>224</i>
<i>Anexo Y4. Piezometría de la inundación de las minas modeladas.</i>	<i>224</i>
<i>Anexo Y5. Comparación con datos reales</i>	<i>228</i>

Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema metodológico de memoria.....	5
Figura 2.1 Proceso de modelización hidrogeológica subterránea	11
Figura 2.2 Malla estructurada. a) Malla inicial. b) Malla estructurada y sus componentes (vista isométrica). c) Vista lateral de malla estructurada. d) Elemento de una malla estructurada.....	13
Figura 2.3 PLC; a) Ejemplo de PLC. b) y c) Ejemplos de no PLCs. d) y e) Ejemplos de PLCs dependientes de tolerancias fijadas por el modelador.....	15
Figura 3.1 Red hidrográfica de la zona de estudio.....	18
Figura 3.2 Geología y geología estructural de la zona de estudio.....	21
Figura 3.3 Perfiles geológicos caso de estudio.	22
Figura 3.4 Labores de Mina 1 y sus zonas de explotación (entidades de superficie AutoCAD). a) Vista en planta b) Vista frontal c) Vista isométrica.....	26
Figura 3.5 Vista isométrica S-O del complejo minero (se omiten las zonas de explotación en la visualización).	27
Figura 3.6 Vista en planta de complejo minero formado por M1 y M2. Se incluye la vista en el mapa geológico de la zona de estudio.....	28
Figura 3.7 Esquema de conexiones entre las minas objetivo.....	29
Figura 4.1 Caso de estudio, información integrada.....	30
Figura 4.2 Esquema general del proceso de contextualización del caso de estudio. El cuadro naranja y el cuadro amarillo delimitan los procesos llevados a cabo en ArcGIS Desktop y AutoCAD respectivamente.....	31

Figura 4.3 Límites diferenciados de la proyección en planta del modelo conceptual.	35
Figura 4.4 Proyección en planta de los límites del modelo conceptual y de la zona fracturada (incluyendo el complejo minero).	36
Figura 4.5 Modelo conceptual de la zona de estudio.	37
Figura 4.6 Proceso de generación de malla de elementos finitos a partir de una malla inicial en formato *.dxf.....	38
Figura 4.7 Resultado de acoplado de mallas y ajuste manual en cercanías de la intersección de piques con topografía del modelo (AutoCAD). a) Vista isométrica de las mallas finales (complejo minero y dominio del modelo). b) Vista isométrica de la zona de ajuste manual de M1. c) Vista isométrica de las zonas de ajuste manual de M2.	39
Figura 4.8 Conductividades hidráulicas del Modelo 1 Serie B.....	41
Figura 4.9 Vista en planta (a) e isométrica (b) de las condiciones Fluid Transfer BC impuestas en el modelo. Modelo 1 Serie B.....	44
Figura 4.10 Vista en planta de las seepage face activadas en el complejo minero (exceptuando ZE). Modelo 1 Serie B.....	45
Figura 4.11 Ubicación de pozos de observación (localizados en los piques del complejo minero). .	46
Figura 5.1 Aumento progresivo de la piezometría (plano de presión cero) y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación. Vista interior.	56
Figura 5.2 Aumento progresivo del nivel freático y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación. Vista interior en eje X (Oeste).....	56
Figura 5.3 Comparación de datos reales v/s simulados en Mina 1 y Mina 2.....	57

Índice de tablas

Tabla 3.1 Longitud total labores de minas.	25
Tabla 4.1 Conductividades hidráulicas por zona modelada.	41
Tabla 4.2 Porosidad por zona modelada.	42
Tabla 4.3 Coeficiente de almacenamiento por zona modelada.	42
Tabla 4.4 Ubicación geométrica de los pozos de observación.	46
Tabla 5.1 Modelos Finales (después de filtro)	48

Nomenclatura

Relacionados con ecuaciones

α Compresibilidad vertical del medio

β Compresibilidad del agua

ρ Densidad

μ Viscosidad dinámica

b Espesor del medio

C Conductancia

d Tamaño medio de partículas, anchura de la fractura, cambios macroscópicos

e Ancho de la fisura

F Fuente por unidad de tiempo y unidad de volumen

g Aceleración de gravedad

$grad$ Gradiente numérico

h Nivel piezométrico

i Gradiente Hidráulico

k Conductividad hidráulica

k_0 Coeficiente de permeabilidad

l Distancia entre posiciones de los niveles piezométricos en el cálculo de la conductancia

m Porosidad, porosidad efectiva

n Vector unitario normal a la superficie de integración

p Presión

Q Caudal

Re Número de Reynolds

S Coeficiente de almacenamiento

S' Coeficiente de almacenamiento específico

T Transmisibilidad

v Velocidad de Darcy

Ω Dominio topológico/matemático

Γ Frontera topológica/matemática

Δ Cambio o variación

∇ Operador Nabla/Gradiente

$\nabla \cdot$ Operador Divergencia

∇^2 Operador Laplaciano

Abreviaciones y acrónimos

BC Condición de borde/contorno

CVT Teselación centroidal de Voronoi

FDM Método de diferencias finitas

FEM Método de elementos finitos

PLC Complejo lineal por partes

REV Volumen elemental representativo

SAMG Método de resolución numérica ofrecido en las opciones de FEFLOW

TIN Red irregular de triángulos

WRM Método de los residuos ponderados

1. Introducción

1.1. Estudio de los fenómenos de inundación en minas subterráneas

Cuando una labor minera se encuentra bajo el nivel freático, el agua subterránea se puede infiltrar al interior de las labores generando problemas de inundación ^[1]. Cuando esto ocurre durante la actividad minera se requiere el drenaje del agua subterránea de las labores ^[2]. Por otra parte, todas las minas tienen una vida útil limitada, por lo que eventualmente deben cerrar y si durante el cierre de mina cesa el drenaje, el nivel del agua en las labores aumentará, dando lugar a la inundación de esta ^[2,3]. La inundación de las minas puede generar riesgos para las personas o problemas medio ambientales, entre ellos la contaminación de aguas superficiales o acuíferos ^[4,5]. Debido a lo anterior, los procesos de cierre de mina deben cumplir ciertos requisitos establecidos por los gobiernos y agencias regulatorias ^[3,6]. Específicamente desde el punto de vista de la inundación de las minas, se deben presentar estudios hidrogeológicos que contemplen la dinámica de los procesos de inundación y el estado final del sistema en términos físicos y químicos ^[2,7]. El cierre de minas supone, además, una serie de oportunidades asociadas a la inundación de los huecos mineros subterráneos, como son el uso del agua almacenada en esas minas para la obtención de energía geotérmica e hidráulica o como suministro de agua para consumo humano, agrícola o industrial ^[2,7-9].

Sumado a lo anterior, en las últimas décadas se han cerrado numerosas minas de carbón en el continente europeo, tanto por motivos medio ambientales como económicos, que presentan la problemática de la inundación natural, ^[7,10-12] lo que acrecienta el interés en esta materia.

A pesar de que los estudios hidrogeológicos que se deben proponer en este tipo de minas incluyen fenómenos químicos y físicos ^[13], en el presente trabajo se abordarán solamente los procesos físicos asociadas a la inundación de una mina de carbón, con un enfoque basado en la modelización conceptual y numérica del problema, todo ello a través del análisis de un caso de estudio.

Los estudios que se centran solamente en la hidrodinámica del flujo de agua subterránea han sido planteados por diferentes autores ^[14-16]. Una de las maneras de abordar el problema de la modelización de los procesos de inundación de minas parte como premisa de asumir comportamiento darciano del flujo de agua subterránea ^[13], donde la física del problema está gobernada por ecuaciones que describen el flujo en medios porosos y están expresadas en forma de ecuaciones diferenciales de difícil resolución ^[13,16].

Para resolver los modelos basados en estas ecuaciones hay diferentes métodos que permiten obtener aproximaciones, entre los cuales destacan los métodos de tipo numérico por su versatilidad y rapidez ^[16]. Dentro de los métodos de resolución numéricos los más utilizados son los basados en diferencias finitas (FDM abreviación del inglés) y elementos finitos (FEM abreviación del inglés) ^[16,17], siendo este último el abordado en la presente investigación, a través de la utilización del código de simulación FEFLOW. Herramienta que ha sido utilizada por diversos autores ^[3,11,12,16,18]. Donde, los modelos numéricos asociados al ámbito minero subterráneo comúnmente simplifican las labores subterráneas considerándolas como entidades bidimensionales, tales como, líneas para las galerías y planos para las fallas ^[19]. Sin embargo, el propósito de la presente memoria va más allá de estos supuestos e interpreta las labores subterráneas como entidades tridimensionales incorporadas como tal en el modelo numérico con objetivo de tener un control integro de cada zona de la mina modelada, lo cual es posible a través de las metodologías presentadas en la memoria. Así y de forma resumida la presente memoria busca resolver cuantificar y predecir los parámetros y características físicas del flujo asociados al proceso de inundación de una mina de carbón subterránea a través de la herramienta de resolución numérica FEFLOW, con un modelo numérico que incorpore las labores subterráneas asociadas al caso de estudio a través de entidades tridimensionales.

1.2. Hipótesis de trabajo

Si existe un flujo de agua subterránea en un área determinada en las cercanías de una labor minera subterránea, entonces, este flujo puede ser tratado como un medio continuo y el sistema puede ser conceptualizado y posteriormente modelado, a través del Software FEFLOW, respetando la tridimensionalidad de las entidades asociadas a las labores subterráneas y logrando resolver, cuantificar y predecir los parámetros y características del flujo en el área estudiada, bajo distintas situaciones y condiciones geométricas e hidráulicas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Construcción de un modelo numérico que permita representar la complejidad geométrica de una mina subterránea y simular el proceso de inundación de la misma.

1.3.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las características relevantes de la mina y el área de estudio:
2. Formular un modelo conceptual hidrogeológico que represente las complejidades asociadas a la minería subterránea.
3. Generar un modelo de malla desestructurada que integre las labores mineras y permita representar su complejidad geométrica.
4. Diseñar modelos numéricos basados en el modelo conceptual y de malla previamente desarrollados.
5. Resolver el modelo numérico en régimen estacionario, para simular el estado inicial de las labores subterráneas previo al fenómeno de inundación.
6. Resolver y calibrar un modelo numérico en régimen transitorio, que permita reproducir el proceso de inundación de las minas a lo largo del tiempo.

1.4. Metodología

En orden de lograr los objetivos generales y específicos propuestos se sigue un procedimiento en concreto el cual de forma general consta de:

1. *Contextualización del caso de estudio:* Se recopila e identifica información relevante del caso de estudio para determinar las características mineras, geológicas e hidrogeológicas de la zona circundante a las minas. Esta etapa permite establecer los límites iniciales del área de estudio y sus atributos esenciales para la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico y la comprensión general del caso. Las principales fuentes de información incluyen documentación digital escrita, cartas geológicas, planos digitales de las minas y mapas de características relevantes (curvas de nivel, red hidrográfica, entre otros). La información se clasifica y procesa mediante ArcGIS Desktop, lo que permite contextualizar adecuadamente el área de estudio.
2. *Elaboración del modelo conceptual:* Se construye el modelo conceptual hidrogeológico a partir de la información recopilada. Este proceso incluye la definición de hipótesis conceptuales, la identificación de condiciones de contorno, la delimitación de unidades hidrogeológicas y la

asignación de parámetros hidráulicos iniciales, entre otras características. Los límites y el dominio espacial del área de estudio se ajustan de forma iterativa a medida que se refina el modelo conceptual.

3. *Generación de modelo de mallas:* Se discretiza el dominio espacial del modelo conceptual en una malla creada en AutoCAD, que incluye las labores subterráneas como entidades tridimensionales, respetando la complejidad geométrica de las mismas. La malla cumple con los criterios topológicos requeridos para las etapas posteriores y recibe el nombre de "malla de entrada", ya que es importada a FEFLOW para la generación del modelo numérico. Esta malla resulta del acoplamiento de dos componentes: la malla del dominio espacial del modelo y la malla de las labores subterráneas (incluidas las zonas de explotación). Cada una de estas mallas requiere soluciones específicas durante su desarrollo, las cuales se detallan en los capítulos pertinentes.
4. *Generación de modelo numérico en FEFLOW:* Se exporta la malla de entrada a FEFLOW, donde se establecen los parámetros necesarios para la correcta aplicación del algoritmo TetGen, el cual permite generar el modelo numérico a partir de las características topológicas de la malla. Se definen condiciones de contorno, dinámica temporal, horizonte de simulación y otras variables relevantes. Dada la complejidad geométrica del área de estudio y las restricciones topológicas, se desarrollan diversas series de modelos numéricos, los cuales se analizan y comparan con base en criterios de calidad de malla, como el número de condición. La etapa finaliza con la selección de un modelo numérico que cumpla con criterios de convergencia aceptables en diferentes situaciones geométricas e hidráulicas, logrando un equilibrio hídrico adecuado y optimizando tanto el tiempo de generación de la malla como el tiempo de resolución en régimen estacionario y transitorio.
5. *Resolución de modelo numérico en régimen estacionario y transitorio en FEFLOW:* Una vez generado el modelo numérico, se configuran las características del problema y se resuelve en régimen estacionario para simular el estado previo al inicio del fenómeno de inundación, es decir, cuando la mina se encuentra seca con drenaje constante. La solución en régimen estacionario se utiliza como condición inicial para el régimen transitorio, lo que permite simular el proceso de inundación de las minas en un horizonte de tiempo determinado.
6. *Calibración del modelo:* Se definen los procedimientos de calibración y se identifican los parámetros hidráulicos más sensibles. Estos parámetros se ajustan para calibrar el modelo. Finalmente se resuelve el modelo numérico con los parámetros calibrados.

7. *Análisis de resultados:* Se interpretan y analizan los resultados obtenidos del modelo numérico. Este análisis permite evaluar el error de la simulación y determinar si los comportamientos físicos observados en la realidad, así estableciendo conclusiones sobre la calidad y precisión del modelo desarrollado.

El siguiente esquema (Figura 1.1) ilustra y resume la metodología descrita.

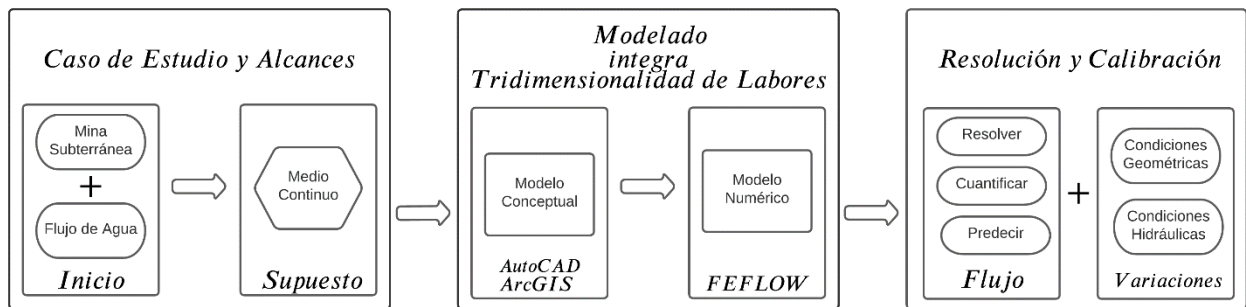


Figura 1.1 Esquema metodológico de memoria.

1.5. Alcances y limitaciones

La presente memoria se realiza a partir de información real de una mina subterránea de carbón y debido a la confidencialidad de esta, se excluyen los nombres reales y cualquier contenido que referencie o permita identificar la mina. La memoria se realiza dentro de un contexto académico y por lo tanto los resultados obtenidos podrían no reflejar la realidad del caso de estudio y por ende no se recomienda su aplicación como solución real. Por el contrario, la metodología en términos generales puede ser aplicable a gran diversidad de casos similares en los que se requiera la modelación hidrogeológica de estructuras subterráneas complejas.

2. Marco teórico

2.1. Conceptos básicos de hidrología subterránea.

2.1.1. Unidades hidrogeológicas y Ley de Darcy

Las unidades hidrogeológicas son sistemas físicos que poseen cierto funcionamiento, regulado por las extracciones, recargas, etc. Se pueden clasificar según su capacidad para almacenar y transmitir agua a través de esta ^[13,20]. Así surgen las definiciones de acuífero, acuicludo, acuitardo y acuífugo (Anexo A1).

El movimiento de agua en medios porosos (flujo de agua subterráneo) viene determinado por la Ley de Darcy (ley macroscópica) ^[13,21], la cual establece una proporcionalidad entre el gradiente hidráulico y la velocidad de Darcy de un flujo, ecuación (1). De esta forma la ley define un coeficiente de proporcionalidad denominado conductividad hidráulica como una propiedad macroscópica del medio cuando interviene un gran número de poros ^[13,20,21] (Más detalle en Anexo A2).

$$\mathbf{v} = -\mathbf{i} \cdot k \quad (1)$$

Donde, i = gradiente hidráulico [adimensional], k = conductividad hidráulica [LT^{-1}] y \mathbf{v} = velocidad de Darcy [LT^{-1}] ^[13,20] (Anexo A2).

La ley de Darcy solo es válida para régimen laminar ^[13,20] (régimen gobernado por las fuerzas viscosas ^[22]). El régimen es determinado por el número de Reynolds (Re) (Anexo A2), así en este estudio solo se abordan flujos subterráneos con $Re < 4$ lo que corresponde a un régimen laminar ^[13].

Se dice que un fluido es Newtoniano si la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es lineal, de lo contrario es un flujo no Newtoniano ^[22]. En el presente documento solo se tratará con fluidos Newtonianos.

2.1.2. Parámetros hidrológicos

Son parámetros que permiten definir y predecir el funcionamiento o respuesta de la unidad geológica frente a determinadas condiciones exteriores. Estos son; porosidad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento ^[13,20]. Estos se detallan en el Anexo A3.

2.1.3. Régimen permanente y transitorio

El movimiento del flujo puede estar gobernado por un régimen permanente (estacionario) o un régimen variable (transitorio). En régimen permanente la masa que entra es igual a la masa que sale en un volumen elemental representativo (definido en el Anexo A4) del sistema, independiente de si existen manantiales (fuentes) o pozos (pérdidas), o lo que es lo mismo, la altura piezométrica no varía con el tiempo ^[13,23]. Si esta variación es distinta de cero se habla de régimen transitorio, lo cual da origen a una reacción elástica del medio poroso (debido a una variación de presión) de modo que el agua contenida en dV varía ^[13,23], por lo que toma vital importancia el coeficiente de almacenamiento específico (ecuación (19) del Anexo A3). Otra forma de interpretar esto, es que dado un tiempo dt las entradas menos las salidas serán iguales a la variación de agua “almacenada” en el volumen dV , con el volumen de agua almacenada distinto de cero para régimen transitorio, y con valor cero para régimen permanente, según la ecuación (21) del Anexo A4 ^[13,16]. Notar que siempre se respeta el principio de conservación de masa y el supuesto de continuidad (Anexo A4).

2.1.4. Ecuaciones fundamentales del movimiento de aguas subterráneas

A través de la definición del volumen elemental representativo (Anexo A4) y a través del principio de conservación de masa (Anexo A4) se puede obtener la ecuación de conservación de masa para régimen estacionario, ecuación (2) ^[13,23].

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v}) - F \cdot \rho = 0 \quad (2)$$

Donde, $\nabla \cdot$ es el operador divergencia y F es el volumen de fluido generado por unidad de tiempo y unidad de volumen $[T^{-1}]$, representa una fuente dentro del volumen dV .

Con densidad y permeabilidad constante, y al aplicar la ley de Darcy, ecuación (1), se obtiene ^[13],

$$\nabla^2 h + \frac{F}{k} = 0 \quad (3)$$

Donde, ∇^2 es el operador laplaciano.

Una vez definido el concepto de S' y S , (ecuación (19) y ecuación (20) del Anexo A3, respectivamente), la ecuación que gobierna el movimiento para régimen transitorio se puede expresar como ^[13,23];

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v}) - F \cdot \rho = -S' \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

Lo cual, con densidad y permeabilidad constante, y al aplicar ley de Darcy, ecuación (1), permite obtener ^[13];

$$\nabla^2 h + \frac{F}{k} = \frac{S'}{k} \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

Mediante las ecuaciones (18) y (20) del Anexo A3, la ecuación (5) se puede expresar como ^[13];

$$\nabla^2 h + \frac{F}{k} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

A partir de las ecuaciones presentadas es posible determinar el movimiento del flujo laminar en el medio poroso para distintas condiciones iniciales y de borde ^[13,16,20,23].

2.1.5. Condiciones de borde

A diferencia de las ecuaciones fundamentales del movimiento de agua subterráneas, las cuales describen el comportamiento del flujo dentro del área del dominio, las condiciones de borde describen el comportamiento del flujo de agua subterránea en los contornos del dominio y en los límites internos de este ^[13,16,17]. Matemáticamente se clasifican en 3 tipos ^[16,17];

Tipo 1 - Condición de Dirichlet o de carga impuesta.

Nivel piezométrico específico conocido en el nodo de la frontera. Puede ser variable o constante. ^[16,17,24]. De esta forma se tiene;

$$h = h_c \quad (7)$$

Donde, h_c corresponde a los valores de nivel piezométricos conocidos en la frontera de interés [16,17,24].

FEFLOW ofrece un caso particular de condición de Dirichlet el cual corresponde al seepage face [24,25]. Esta condición impone que el nivel piezométrico de los nodos de la frontera igual a su cota de elevación, con la restricción de que el flujo máximo sea igual $0 \left[\frac{m^3}{d} \right]$, es decir no se permite un flujo hacia dentro de la condición de borde mencionada, solo se permite un flujo hacia fuera de la condición de borde (FEFLOW considera que los flujos hacia dentro son positivos y flujos hacia fuera son negativos). En los nodos en los que la restricción de flujo esta activa, la condición de contorno de piezometría es convertida a una condición de contorno que simula un pozo con una restricción de flujo máximo de $0 \left[\frac{m^3}{d} \right]$ [24,25].

Tipo 2 – Condición de Neumann o de flujo impuesto.

El gradiente hidráulico es conocido en la frontera. Puede ser variable o constante. [16,17,24]. Lo que se expresa como [16,17,24];

$$\nabla h = i_c \quad (8)$$

Donde i_c corresponde a los valores del gradiente hidráulico conocidos en la frontera de interés. Aplicando la ley de Darcy, ecuación (1), se determina la velocidad de Darcy en la frontera, según como indica la ecuación (9) [17];

$$-i_c \cdot k = v_{calculado} \quad (9)$$

Luego, es posible obtener el flujo ($Q_{calculado}$) a través de la ecuación (13) del Anexo A2, resultando en [17];

$$Q_{calculado} = v_{calculado} \cdot A \quad (10)$$

Es utilizada con frecuencia sobre el modelo para representar el flujo vertical asociado a la recarga y para representar extracciones o fuentes de agua tales como pozos cuando se tiene un valor conocido de extracción o inyección [17,24].

Tipo 3 – Condición tipo Cauchy o de flujo inducido.

Conocida como condición mixta ya que relaciona un nivel piezométrico conocido con un flujo en la frontera o sus cercanías ^[16,17,24]. El flujo en la frontera es calculado a partir de la ley de Darcy utilizando un gradiente calculado como la diferencia entre un nivel piezométrico fuera de la frontera de valor conocido h_c y un valor de nivel piezométrico en la frontera calculado por el modelo h_m ^[17,24,26].

Para ello se define el concepto de conductancia, el cual mide la facilidad con la que el fluido fluye a través de un medio poroso. Así el flujo es calculado como sigue ^[17,26,27];

$$Q = C \cdot A \cdot (h_c - h_m) \quad (11)$$

Donde, C es la conductancia [T^{-1}], y su expresión matemática corresponde a ^[17,26];

$$C = \frac{k}{l} \quad (12)$$

Donde l = distancia [L] entre las posiciones de los niveles piezométricos utilizados en el cálculo descrito ^[17,26].

FEFLOW recomienda este tipo de condición para la simulación de ríos, lagos u otros cuerpos de agua en particular para casos en los que se requiera aplicar propiedades de transferencia entre un valor de referencia (piezometría del río) y el flujo de agua subterránea ^[24].

2.2. Conceptos básicos de modelización hidrogeológica

Un modelo es una representación simplificada de la realidad ^[17] y en particular la modelización hidrogeológica subterránea es un término genérico que describe la suma de los componentes usados para describir un sistema de aguas subterráneas, incluyendo el modelo conceptual y el modelo matemático ^[28]. De esta forma el proceso de modelización hidrogeológica subterránea comienza con la simplificación de la realidad con lo que se genera un modelo conceptual, el cual a partir de expresiones matemáticas que definan el sistema físico puede ser modelado a través de un método

numérico (FEM) y posteriormente resuelto para su aplicación a la realidad ^[16,17,28]. Esto es ejemplificado de forma general en la Figura 2.1. Más detalles en Anexo B.

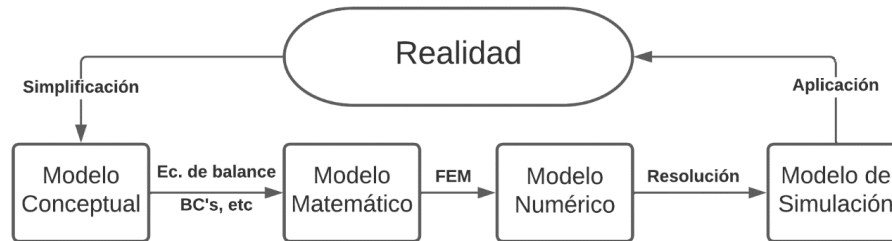


Figura 2.1 Proceso de modelización hidrogeológica subterránea

Se vuelve de suma importancia definir el propósito del modelo lo que permite direccionar y dar contexto al proyecto. El propósito a su vez permite realizar supuestos y simplificaciones apropiados y ayuda al modelador a decidir si el modelo calibrado produce resultados aceptables en relación con los datos de campo ^[16,17,28].

2.3. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF o FEM) obtiene una representación aproximada de la realidad, mediante la transformación de las ecuaciones diferenciales del dominio, con sus respectivas condiciones de borde (BCs, por su abreviación del inglés), en sistemas de ecuaciones lineales y la posterior resolución de este sistema ^[16,17,29].

Es decir, se determina una aproximación de las ecuaciones diferenciales y BCs a través de la solución de ecuaciones asociadas a la discretización del problema continuo ^[16,17,29]. Esta discretización del continuo recibe el nombre de mallado ^[16,17,29], proceso por el cual se divide el dominio en subdominios llamados elementos, los cuales están definidos por puntos discretos que tienen una localización designada por sus coordenadas espaciales dentro de la malla, a estos puntos se les conoce con el nombre de nodos ^[16,17,29]. Las rectas que conectan un nodo con sus nodos vecinos son denominadas segmentos ^[16,17,30] y el área delimitada por estos son llamadas caras ^[16,17].

Los elementos se pueden clasificar según sus dimensiones en el espacio, en 1-D los elementos son líneas, en 2-D los elementos son planos (polígonos) y en 3-D los elementos son polígonos volumétricos (poliedros) ^[16,17]. Existe gran variedad de formas, pero las más usadas son las triangulares y cuadradas, donde se prefieren las triangulares por su capacidad de representar mejor los dominios irregulares ^[16,17]. En el Anexo C se realiza una demostración de la obtención del sistema de ecuaciones lineales a través del FEM en el campo de la hidrogeología.

2.4. Simulador FEFLOW

FEFLOW es un software escrito en lenguaje C/C++ que resuelve las ecuaciones que gobiernan el flujo, transporte de masa y calor en medios poros y fracturados bajo distintos tipos de condiciones a través del FEM ^[16]. Dado que en su código está incorporado el FEM se pueden obtener representaciones de geometrías complejas, como por ejemplo estratigrafías, fallas, ríos, excavaciones subterráneas, entre otros ^[16,17].

El software tiene capacidad de integración con otros programas a través de la exportación o importación de archivos, de entre estos el autor de la presente destaca las extensiones *.dxf, *.shp y *.xlsx los cuales permiten vinculación con AutoCAD (incluyendo Civil 3D), ArcGIS y Microsoft Excel respectivamente ^[19,26].

Además de incorporar el FEM en su código, este también tiene incorporado una librería de subrutinas llamada SAMG que permite solucionar sistemas de ecuaciones lineales de gran tamaño ^[25,31]. Sin embargo, no es la única librería incorporada, puesto que también tiene incorporado el código TetGen ^[19,26], el cual permite generar mallas de elementos tetraédricas desestructuradas o semidesestructuradas a partir de dominios poliédricos, logrando generar en la mayoría de los casos mallas de buena calidad para distintos tipos de complejidades ^[30].

De forma más específica y con gran relevancia para el presente texto se describen los tipos de mallado FEM que FEFLOW provee.

Mallas estructuradas: Este tipo de malla introduce los conceptos de capa (layer del inglés) y lámina (slice del inglés), donde una capa corresponde a la agrupación de elementos 3D horizontalmente adyacentes y una lámina se refiere tanto a la interfaz entre 2 capas como a los límites superiores e inferiores del dominio del modelo [24]. En una malla estructurada todos los nodos se encuentran en sus láminas. En la mayoría de los casos la malla estructurada es generada a partir de una malla 2D (Figura 2.2-a) la cual es verticalmente extruida a una distancia z conocida, lo que genera una capa (Figura 2.2-b), la cual contiene 2 láminas, una que corresponde a la malla 2D inicial y otra que corresponde a la generada a una distancia z de la original. Esto se ilustra en la Figura 2.2, la cual señala los componentes mencionados y la forma que adquiere el elemento 3D generado (Figura 2.2-d). A pesar de que FEFLOW provee ciertas herramientas para otorgar flexibilidad a estas mallas, estas son recomendables solo para modelos de geometrías simples, ya que no toda representación geométrica puede ser obtenida a partir de extrusiones verticales [30].

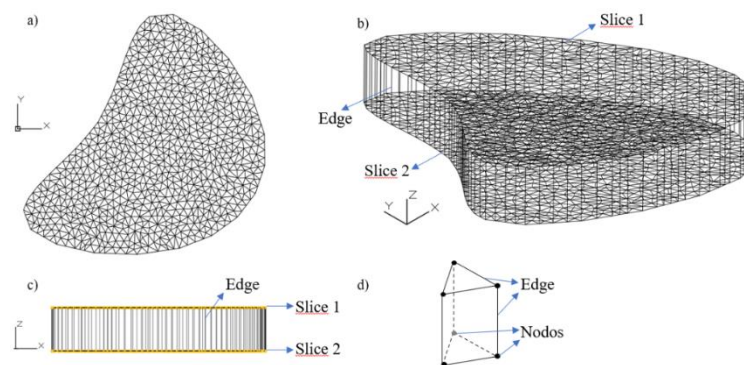


Figura 2.2 Malla estructurada. a) Malla inicial. b) Malla estructurada y sus componentes (vista isométrica). c) Vista lateral de malla estructurada. d) Elemento de una malla estructurada.

Malla desestructurada: Corresponde a aquella malla en la cual los elementos no necesariamente tienen una estructura regular o uniforme y la disposición de sus elementos puede ser irregular, por lo que sus nodos pueden estar distribuidos de forma irregular [24]. Todo lo anterior permite una mayor flexibilidad en el modelo, permitiendo representar geometrías complejas [24,30], de ahí a que sea el tipo de malla utilizada en el presente documento.

Malla semidesestructurada: Corresponde a una mezcla entre las 2 anteriores. Para ello se requiere de entrada una malla estructurada y posteriormente remallar zonas a través de TetGen [24].

Los 3 tipos de mallas previos presentan restricciones en las zonas a remallar, en particular, no es posible remallar zonas que incluyan los límites (fronteras) de la malla inicial (sea estructurada o desestructurada), lo cual implica que modelos con geometrías complejas que incluyan estos límites no se pueden representar a través de un remallado ^[30].

2.5. Algoritmo generador de mallas TetGen

Las mallas desestructuradas de FEFLOW son generadas a partir del código TetGen ^[19,26], por lo que se requieren ciertos conocimientos base para su correcta utilización, particularmente dada la complejidad geométrica del modelo a realizar en la presente memoria.

El algoritmo requiere de entrada una malla la cual es utilizada como límite superficial (cascarón cerrado) el cual determina el dominio de la malla de elementos finitos generada por TetGen ^[30], es decir, se genera un remallado de la malla inicial, donde esta última debe satisfacer criterios topológicos asociados a un complejo lineal por partes (PLC por su abreviación en inglés) ^[30].

Toda malla es un conjunto de celdas (término general análogo a un elemento) ^[30], siendo estas últimas las unidades básicas que compone la malla ^[30] y así un PLC se define como un conjunto de celdas X , que satisfacen ^[30]:

- 1) La frontera de cada celda en X es una unión de celdas en X .
- 2) Sean dos celdas $f, g \in X$, si estas se intersecan su intersección es una unión de celdas en X .

De esta forma, la frontera de un PLC 3D corresponde a un conjunto de celdas cuya dimensión es menor o igual a 2 ^[30]. Cada cara (celda 2D) de un PLC es un PLC 2D, el cual puede contener agujeros o vértices en su interior ^[30]. La definición de un PLC no permite intersecciones de celdas, es así como dos segmentos solo pueden intersectarse en un vértice común que pertenece a X y a su vez dos caras de X solo pueden intersectarse en la unión de vértices y segmentos que también están en X [30]. Así, TetGen genera una malla superficial (celdas 2D) para representar un PLC 3D ^[30].

Para ilustrar un PLC se presenta la Figura 2.3-a, donde se puede dar cuenta de posibles usos en la modelización minera subterránea, por ejemplo, A y B podrían representar (de forma muy

simplificada) una excavación vertical (pozo, pique, etc.) y una galería o excavación horizontal respectivamente, C y D un plano de falla y fracturas (1D) respectivamente, ambas suponiendo un espaciamiento pequeño en relación con el modelo y con dependencia de los objetivos del modelador. Por otro lado, las Figura 2.3-b y Figura 2.3-c ilustran topologías que por definición no son PLC, en particular se refieren a intersecciones de celdas, sin embargo, la intersección de celdas es un término genérico que no solo depende de la definición formal de una PLC, sino que también depende de las tolerancias fijadas por el modelador a través de TetGen. Por ejemplo, TetGen permite al modelador fijar un ángulo diédrico θ tal que según el valor de este las caras cercanas (por ejemplo, A y B en la Figura 2.3-d) pueden ser interpretadas como intersecciones, como superposiciones (con lo cual el código une ambas caras en una) o como PLCs 2D independientes. De forma similar también se puede fijar la tolerancia para el tamaño de características pequeñas, por ejemplo, en la Figura 2.3-e las longitudes δz y δy son pequeñas en comparación con las longitudes dx_1 y dx_2 y el modelador puede ejercer cierto nivel de control, determinando una tolerancia que acepte o rechace estas pequeñas características interpretándolas como intersecciones.

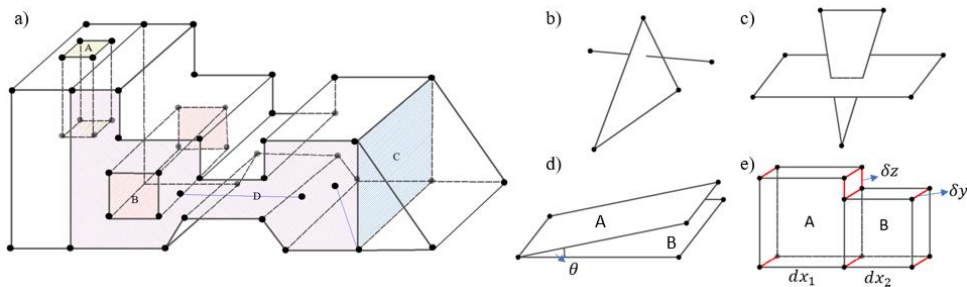


Figura 2.3 PLC; a) Ejemplo de PLC. b) y c) Ejemplos de no PLCs. d) y e) Ejemplos de PLCs dependientes de tolerancias fijadas por el modelador.

El código permite elegir entre subdividir la PLC 3D inicial o conservar esta ^[19,26,30]. La subdivisión es posible a través de la generación de puntos de Steiner ^[30], los cuales son puntos que se agregan a la malla inicial, lo que permite mejorar la calidad de la malla FEM ^[30]. El conservar la PLC 3D implica que esta será igual que la malla superficial y por lo tanto su calidad estará determinada por la PLC 3D inicial (malla inicial) ^[30]. Además, existen casos en que la complejidad de la geometría no permite la generación de la malla superficial sin la generación de puntos de Steiner ^[30].

Las principales opciones de mallado y los parámetros de calidad de malla utilizados en la memoria son explicados y detallados en el Anexo D.

2.6. Triangulación de mallas superficiales de AutoCAD

AutoCAD es un software de diseño asistido por computadora escrito en lenguaje C/CC+ que se utiliza para dibujar, diseñar y modelar en 2D y 3D ^[32]. Incluye características para optimizar tareas y aumentar la productividad, como su compatibilidad con el lenguaje de programación Lisp, el que permite crear scripts para la personalización y automatización de tareas ^[32].

La triangulación de mallas (generación de mallas) de AutoCAD se basa en una colección de objetos de forma plana (caras 3D o 3D faces del inglés) que aproximan la forma original de la entidad triangulada ^[32]. Todos los objetos de dibujo en AutoCAD reciben el nombre de entidad, existiendo diversas entidades, por ejemplo, entidades lineales, superficiales, solidas, mallas, etc. ^[32] En particular las entidades del tipo malla, están compuestas por entidades denominadas caras 3D, estas por lo tanto son la unidad fundamental de las mallas en AutoCAD ^[32]. Es importante resaltar la baja capacidad de edición y opciones que AutoCAD ofrece al tratar con entidades de malla y caras 3D en comparación con otros softwares (por ejemplo, Rhinoceros 3D). Sin embargo, se ha elegido este software por dos motivos. El primero es la gran popularidad y baja curva de aprendizaje en relación con otros softwares de mallado. El segundo motivo radica en la minimización de la variedad de softwares utilizados, esto se hace para prevenir problemas y errores de compatibilidad entre programas, así como cambios de formatos de archivos.

El proceso de triangulación de malla requiere de entrada una entidad, ya sea un sólido, superficie, entre otras, y el ingreso de la configuración deseada para la triangulación ^[32]. Es importante notar que la triangulación es aplicada en el cascarón (periferia) de las entidades ^[32], esto quiere decir que no se realiza una triangulación del volumen total de la entidad, por lo tanto, se puede referir a esta triangulación como una superficial. La discretización requerida y otras variables pueden controlarse en cierta medida a través de las opciones que se definen en el Anexo E.

3. Caso de estudio

El presente caso de estudio se realiza con datos reales de un complejo minero y debido a la confidencialidad de estos, se excluyen los nombres reales y se evita el uso de información de referencia, tales como, ubicación geográfica, información técnica, planos, etc. Sumado a esto la información proporcionada por la empresa minera (información primaria) y la información recopilada por otros medios (información secundaria), junto con los supuestos utilizados, no permiten desarrollar un estudio a nivel profesional, sin embargo, es suficiente para motivos académicos.

El caso de estudio corresponde a la mina subterránea de carbón Mina 1 (abreviada en adelante como M1), la cual se encuentra en fase de cierre y se ubica en un complejo minero que consta de diversas minas (subterráneas y a cielo abierto), donde estudios previos de diversos autores han demostrado que existe suficiente evidencia para suponer que el conjunto formado por M1 y una segunda mina subterránea de carbón en fase de cierre, llamada Mina 2 (M2 de forma abreviada), son hidrológicamente independientes de las demás minas del complejo minero, pero no entre ellas mismas. Por lo tanto, el conjunto M1 y M2 forman un sistema hidrogeológico a modo de embalse subterráneo^[3,5] siendo este conjunto el analizado en el presente proyecto, con un énfasis en M1.

3.1. Topografía

La zona de estudio se caracteriza por altas pendientes y mancha de forma general hacia el Oeste en el Valle 1, esto es, las alturas aumentan hacia el Este. Existen dos montes bastante marcados, uno ubicado al Norte respecto del otro y que se localiza entre los Valles 2 y 3. El monte del Sur se encuentra entre los Valles 3 y 4. La dirección de las divisorias de agua de los montes corresponde en términos generales a una dirección Este-Oeste. Las entradas de ambas minas (M1 y M2) se encuentran en valles, con M1 ubicada en el Valle 1 y M2 ubicada en el Valle 3. Lo anterior se aprecia en la Figura 8.5 (Anexo F), la cual corresponde a una topografía TIN (siglas en inglés de red triangular irregular) del caso de estudio, señalando los pozos de las minas de interés.

3.2. Red hidrográfica

La zona de estudio consta de 4 ríos, de los cuales el Río 2,3 y 4 son afluentes del Río 1 el cual corresponde a la principal corriente fluvial de la zona y desemboca en el Noroeste a lejanía del área de estudio. La disposición espacial de la red hidrográfica es presentada en la Figura 3.1.

No se cuenta con información asociada al valor numérico de los caudales de los ríos, sin embargo, se sabe que estos dependen prácticamente en su totalidad de la precipitación de la zona. Existe pérdida del Río 3 hacia M2, la cual se da a través de las fracturas generadas por la alteración del macizo producto de la actividad minera.

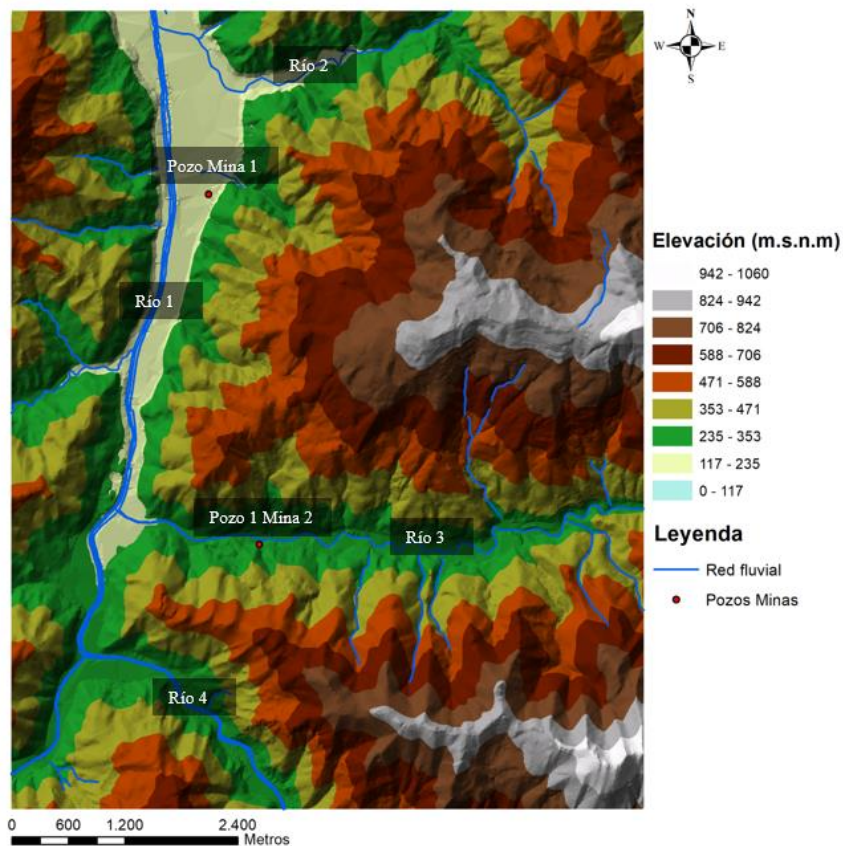


Figura 3.1 Red hidrográfica de la zona de estudio.

3.3. Climatología

El clima de la zona es en general oceánico, con precipitaciones abundantes a lo largo de casi todo el año y temperaturas suaves tanto en verano como invierno.

Los antecedentes del caso indican una precipitación media de 1086.5 $[\frac{mm}{año}]$ y una evapotranspiración cercana al 60%, resultando en una lluvia útil de 444.2 $[\frac{mm}{año}]$. Se debe tener en cuenta que los datos presentes corresponden a estudios previos recopilados (no tratados por el autor de la presente memoria), así estos fueron el resultado de diversos procesos matemáticos y provenientes de dos o más estaciones termopluviométricas, para un periodo de 40 años aproximadamente. La Tabla 8.1 (Anexo G) contiene los valores climatológicos para un año hidrológico medio en la zona de estudio, incluyendo precipitación media (P_m), evapotranspiración real (E_r) y precipitación útil (P_u). A su vez la Figura 8.6 (Anexo G) corresponde al gráfico de dicha tabla.

3.4. Geología y Geomorfología

La zona de estudio corresponde a una estratigrafía monótona de pizarras, areniscas, y carbón, con intercalaciones de calizas y conglomerados silíceos y calcáreos, donde, las pizarras son de varios tipos y tienen escaso metamorfismo (lutitas). De la misma manera las areniscas también presentan diferentes composiciones, cemento y tamaño de grano. Respecto a los conglomerados presentes se destacan los de cantos silíceos denominados pudingas y los de cantos calcáreos denominadas gonfolitas, ambos con matriz arenosa.

La información obtenida zonifica la geología en distintos grupos los cuales se identificarán como G1, G2, G3, G4, G5, G6 y Otros. Todos los grupos geológicos pertenecen al Paleozoico (Carbonífero Superior), exceptuando G1 cuya edad corresponde al Cuaternario. La sucesión sedimentaria de techo a muro es: G1, G2, G3, G5 con intrusiones e intercalaciones de G4 y finalmente G6. La composición de cada grupo se describe a continuación:

G1: Único grupo perteneciente al Cuaternario, corresponden a depósitos aluviales de gravas y lutitas de los Valles 1 y 4. Forman acuíferos superficiales con interacciones río-acuífero que pueden

influir en el drenaje hacia las minas estudiadas. Su espesor es mínimo, llegando a un máximo de 10 [m].

G2: Formado principalmente por pizarras, areniscas, intercalaciones de carbón y gonfolitas. Posee un espesor de entre 200 [m] y 300 [m]. Su presencia en la zona de estudio corresponde a la primera sección de un sinclinal inclinado, el cual luego es seguido por *G3*.

G3: Capa con espesor de 300 [m], los cuales constan en su mayoría de pizarras areniscas y carbón, correspondiendo a la capa con mayor cantidad de carbón explotable.

G4: Calizas con un espesor máximo de 10 [m]. Se disponen como intrusión en *G5*.

G5: Posee un espesor de 600 [m] y está formada principalmente por pizarras, areniscas, carbón y pudingas en menor medida. Su muro (base) corresponde al límite entre *G5* y *G6*.

G6: Capa contigua al muro de *G5*, tiene un espesor de 950 [m] y está formada principalmente por lutitas, limolitas y en menor proporción areniscas y cuarcitas. No aflora en superficie.

Otros: Corresponde a un conjunto de grupos de composición similar a *G2* y *G5*.

El área de estudio se encuentra en una zona con gran cantidad de accidentes geológicos (fallas, pliegues, etc.) que condicionan el laboreo de *M1* y *M2* (Figura 3.2). Se destacan las Fallas 1-4, donde Falla 1 y Falla 2 corresponden fallas inversas, Falla 3 es una falla de desgarre dextral con movimiento vertical normal y Falla 4 es una falla de desgarre levógira. La zona cuenta con diversos pliegues, donde el principal corresponde un sinclinal tumbado con vergencia hacia el este.

La Figura 3.2 corresponde al mapa geológico de la zona, incluyendo lo mencionado en el presente capítulo, indicando además a modo de referenciación los pozos de las minas objetivos.

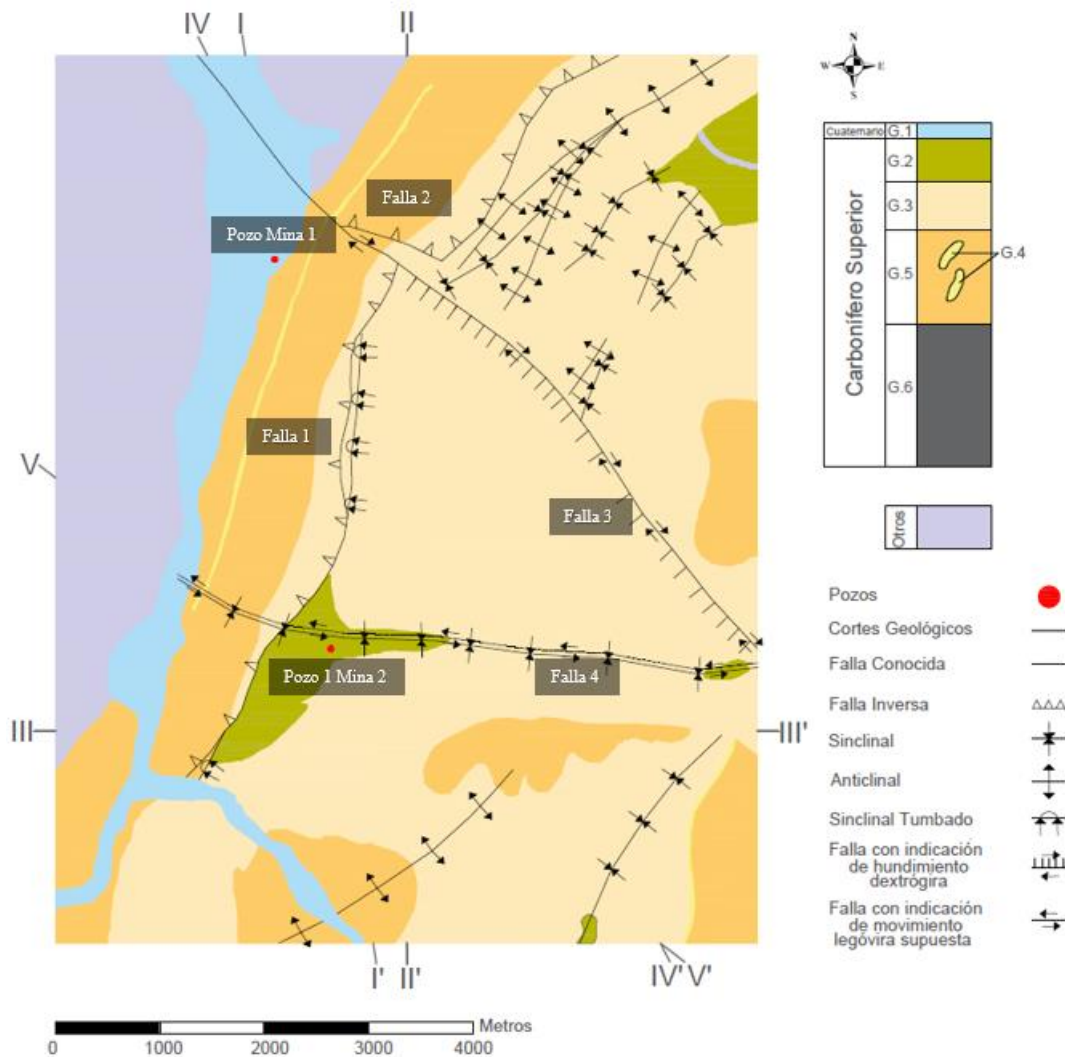


Figura 3.2 Geología y geología estructural de la zona de estudio.

A través del mapa anterior (Figura 3.2) se realizaron 5 cortes geológicos (Figura 3.3), los cuales fueron limitados espacialmente según el modelo conceptual por motivos de confidencialidad. La creación de los perfiles requirió de supuestos debido a la falta de información, así se han supuesto condiciones ideales y por lo tanto las fallas inversas tienen un manteo de 30° y las fallas normales un dip (real) de 60° [33], además, el desplazamiento relativo de los bloques se ha supuesto despreciable y las profundidades de las fallas como infinitas (para efectos demostrativos). Se da énfasis al Corte I-I', ya que este pasa a través de los pozos indicados en la Figura 3.2 y además el perfil contiene las minas objeto de estudio (detalladas en capítulos posteriores). Notar que los perfiles III-III' y V-V' indican

el pliegue sinclinal tumbado con vergencia hacia el este característico de la zona, lo que es evidencia de que los perfiles representan con cierta precisión la zona de estudio.

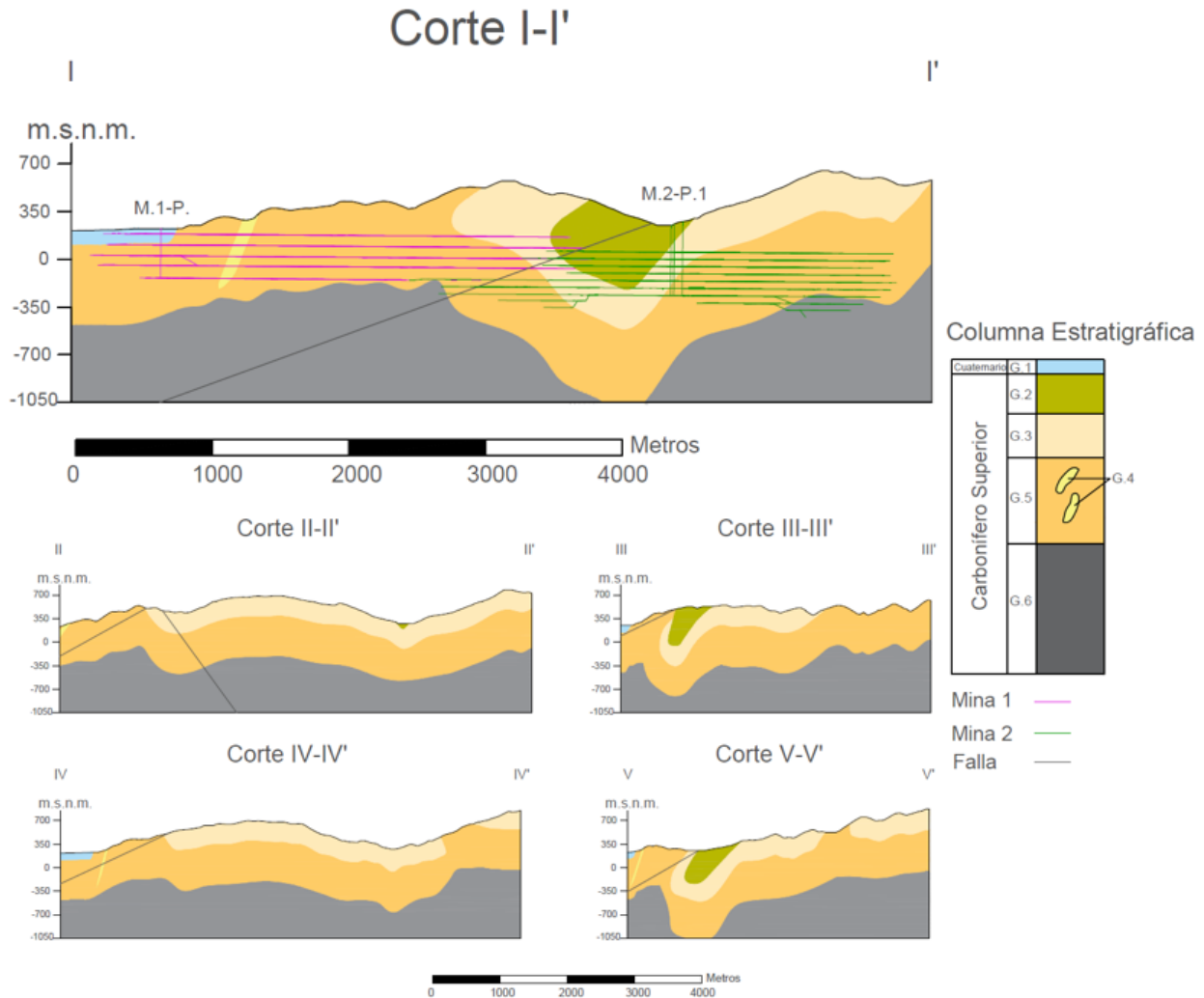


Figura 3.3 Perfiles geológicos caso de estudio.

3.5. Hidrogeología

Los estudios previos en la zona de estudio indican que esta se constituye mayoritariamente por materiales impermeables o de muy baja permeabilidad (lutitas, limolitas, pizarras, carbón) y aunque es posible que formen pequeños acuíferos, estos no tendrán gran influencia. Por otro lado, las calizas de la zona no han sido caracterizadas a nivel hidrogeológico, sin embargo, se ha descartado su influencia a nivel hidrogeológico debido a que no forman potencias influyentes en la zona minera, lo

mismo ocurre con los depósitos aluviales de la zona, los cuales fueron clasificados con una conductividad hidráulica variable por porosidad intergranular.

Dada la impermeabilidad primaria de la zona y las altas pendientes, se permite inferir que las precipitaciones alcanzarían los valles en forma de escorrentía superficial, incorporándose al río respectivo, con una mínima porción del agua lluvia infiltrada a través de la red fisural de la zona. No obstante, se debe tener en cuenta el efecto de la actividad minera en los parámetros hidrogeológicos, puesto que esto aumenta la permeabilidad en las cercanías de las labores^[3-5]. Lo anterior implica que la circulación de agua se da predominantemente en las fisuras de carácter antrópico y sus respectivas labores^[3-5].

El área ha sido previamente clasificada según la permeabilidad de los materiales presentes, agrupándolos en 4 conjuntos detallados a continuación;

Conductividad hidráulica muy baja: Asociado a pizarras, lutitas y limolitas, por lo que incluye los grupos geológicos G2, G3, G5 y G6. Es la conductividad principal de la zona. El valor de la conductividad es de $2.96 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m}{s}\right]$ hasta $1 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m}{s}\right]$ para macizo inalterado (conductividad primaria) y de $5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m}{s}\right]$ hasta $1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m}{s}\right]$ para macizo alterado o fracturado (conductividad secundaria).

Conductividad hidráulica baja por fisuración: Corresponde a cuarcitas, pudingas, areniscas calcáreas y arcillosas, por lo que se incluye los grupos geológicos G3 y G5. El valor de la conductividad es de $1.5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m}{s}\right]$ hasta $3.92 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m}{s}\right]$. Su influencia a nivel hidrogeológico es despreciable debido a la baja potencia de los cuerpos geológicos.

Conductividad hidráulica variable por fisuración y/o karstificación: Corresponde a las calizas de la zona, es decir, G4. Su conductividad es media a baja. No hay datos numéricos de estudios previos. Su influencia es despreciable debido a la baja potencia de las calizas en la zona.

Conductividad hidráulica variable por porosidad intergranular: Litologías de arenas arcillosas, arcillas arenosas y gravas, por lo que se asocian al grupo geológico G1. El valor de la conductividad

es de $1 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m}{s}\right]$ hasta $1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m}{s}\right]$. Su influencia es despreciable debido a potencias no influyentes en la zona de estudio.

3.6. Minería subterránea.

La mina subterránea objetivo corresponde a Mina 1 (M1), la que se encuentra en un complejo minero con múltiples minas, de las cuales los antecedentes indican una dependencia hidrogeológica con Mina 2 (M2). El conjunto de M1 y M2 presenta independencia hidrogeológica de las demás labores de la zona. Lo anterior hace necesario la modelación de ambas minas, recordando que el énfasis está en M1, la cual es la mina objetivo del estudio.

3.6.1. Método de explotación

El método de explotación utilizado en ambas minas es el método de testers con arranque manual a martillo. Este método es utilizado en capas de carbón inclinadas ^[34,35] y consiste en la división de la corrida de carbón a explotar en paneles definidos geoméricamente por la longitud de los subniveles, la altura total y la altura entre niveles ^[34]. El espesor de las zonas de explotación varía generalmente entre 2 a 8 metros. Para lograr la explotación se utilizan galerías horizontales con separación variable dependiente de las características de la capa a explotar ^[34]. La explotación se realiza de forma ascendente desde las guías de base hacia las guías de cabeza permitiendo que el material baje por gravedad ^[34,35]. Donde las guías de base y las guías de cabeza son las galerías que limitan la zona de explotación bajo y sobre esta respectivamente ^[34,35]. El tratamiento de la zona explotada generalmente implica relleno ^[34,35]. La Figura 8.7 (Anexo H) ejemplifica de forma simple el método empleado.

3.6.2. Descripción general de labores.

Las minas de estudio constan de piques que conectan a superficie, galerías, zonas de explotación y conexiones verticales (rampas) que no afloran en superficie y que conectan distintos niveles de las minas.

Los planos recopilados indican que M1 cuenta con 5 niveles subterráneos y un pozo vertical que corresponde a un pique utilizado como acceso único a la mina previo al cierre de esta. Este pozo se denominará PM1. Los 5 niveles de M1 convergen en PM1. La M2 cuenta con 10 niveles subterráneos y 3 piques verticales de los cuales 2 son utilizados actualmente como pozos, estos se denominarán P1M2 y P2M2, los cuales se encuentran a no más de 50 metros de distancia en planta y se utiliza P1M2 como referencia geográfica para M2. A su vez, el tercer pique de M2 (que no es utilizado como pozo) se denominara P3M2. Los primeros 7 niveles de M2 convergen en cada uno de los piques de esta mina y los últimos 3 niveles están unidos a las demás labores a través de rampas. Se resalta que los piques de ambas minas afloran en superficie según lo indicado previamente en el corte geológico I-I' de la Figura 3.3.

Los 2 pozos de referencia geográfica, PM1 y P1M2 tienen un diámetro de 6 [m], con una cota máxima de 220 [m] y 253 [m] respectivamente. La cota mínima para PM1 y P1M2 es de -142 [m] y -241 [m] respectivamente. Los piques P2M2 y P3M2 tienen una cota máxima 278 [m] y una cota mínima de -241 [m].

Las cotas de los niveles de cada mina (medidas desde la base de sus galerías) y la longitud total de las galerías por nivel se presentan en la Tabla 8.2 (Anexo I), indicando con n/a los casos donde no aplican las características.

De esta forma la Tabla 3.1 presenta la longitud total de las labores de ambas minas (no incluye zonas de explotación)

Tabla 3.1 Longitud total labores de minas.

	Galerías (km)	Piques (km)	Conexiones verticales (km)	Total (km)
M1	119.614	0.362	0.280	120.256
M2	246.523	1.534	2.362	250.419

Ambas minas tienen la misma forma y dimensiones tanto para sus galerías como para sus conexiones verticales, de esta forma, las labores mencionadas tienen forma de herradura con

dimensiones de 3.6 [m] de base y 2.935 [m] de alto, generando una superficie de 9 [m²] aproximadamente.

Las zonas de explotación pueden estar con relleno o sin relleno. En términos hidrogeológicos son la principal comunicación vertical (en conjunto con los piques) entre los diferentes niveles de las minas. Las labores de explotación de M1 se dividen en 11 grupos compuestos por una o más zonas de explotación de distintas dimensiones y volúmenes. Las zonas explotadas han tenido que ser reconstruidas a partir de los planos e información recopilada, lo que es detallado en el Anexo N (Figura 8.23). La Figura 3.4 presenta la Mina 1 con sus respectivas zonas de explotación, agrupadas según la información disponible.

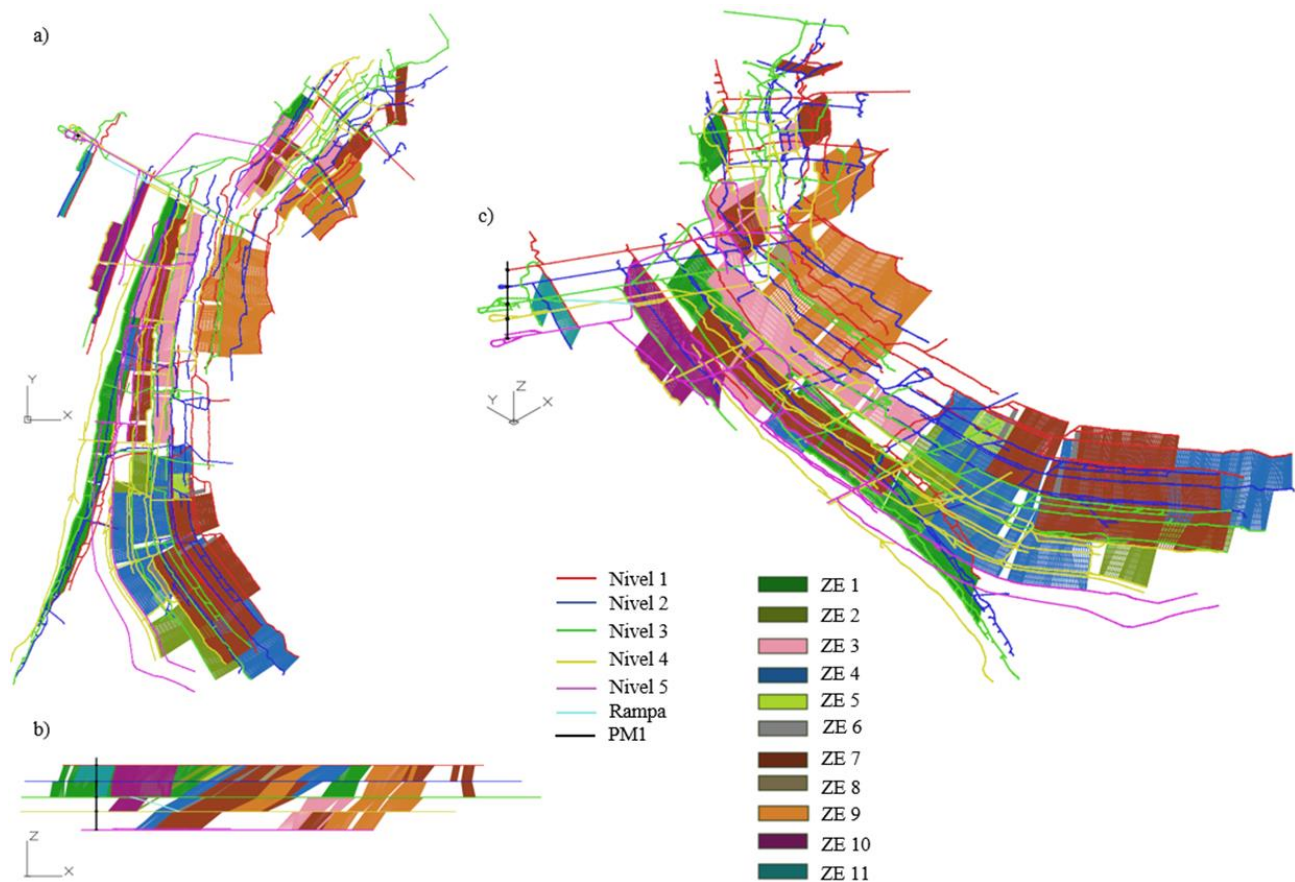


Figura 3.4 Labores de Mina 1 y sus zonas de explotación (entidades de superficie AutoCAD). a)

Vista en planta b) Vista frontal c) Vista isométrica.

La Figura 3.5 corresponde a una vista isométrica Suroeste del complejo minero, a su vez la Figura 3.6 corresponde a la vista en planta del complejo minero en el contexto geológico del caso de estudio.

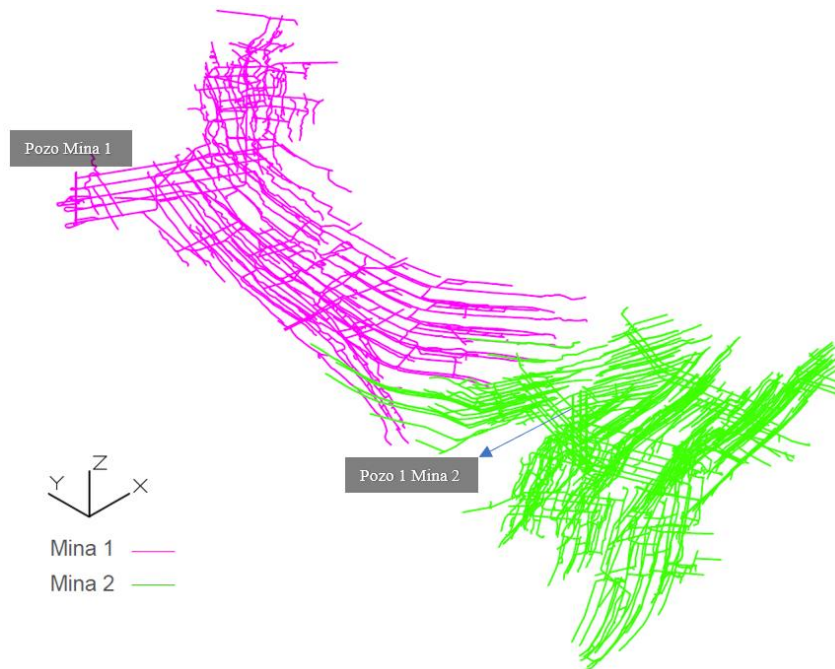


Figura 3.5 Vista isométrica S-O del complejo minero (se omiten las zonas de explotación en la visualización).

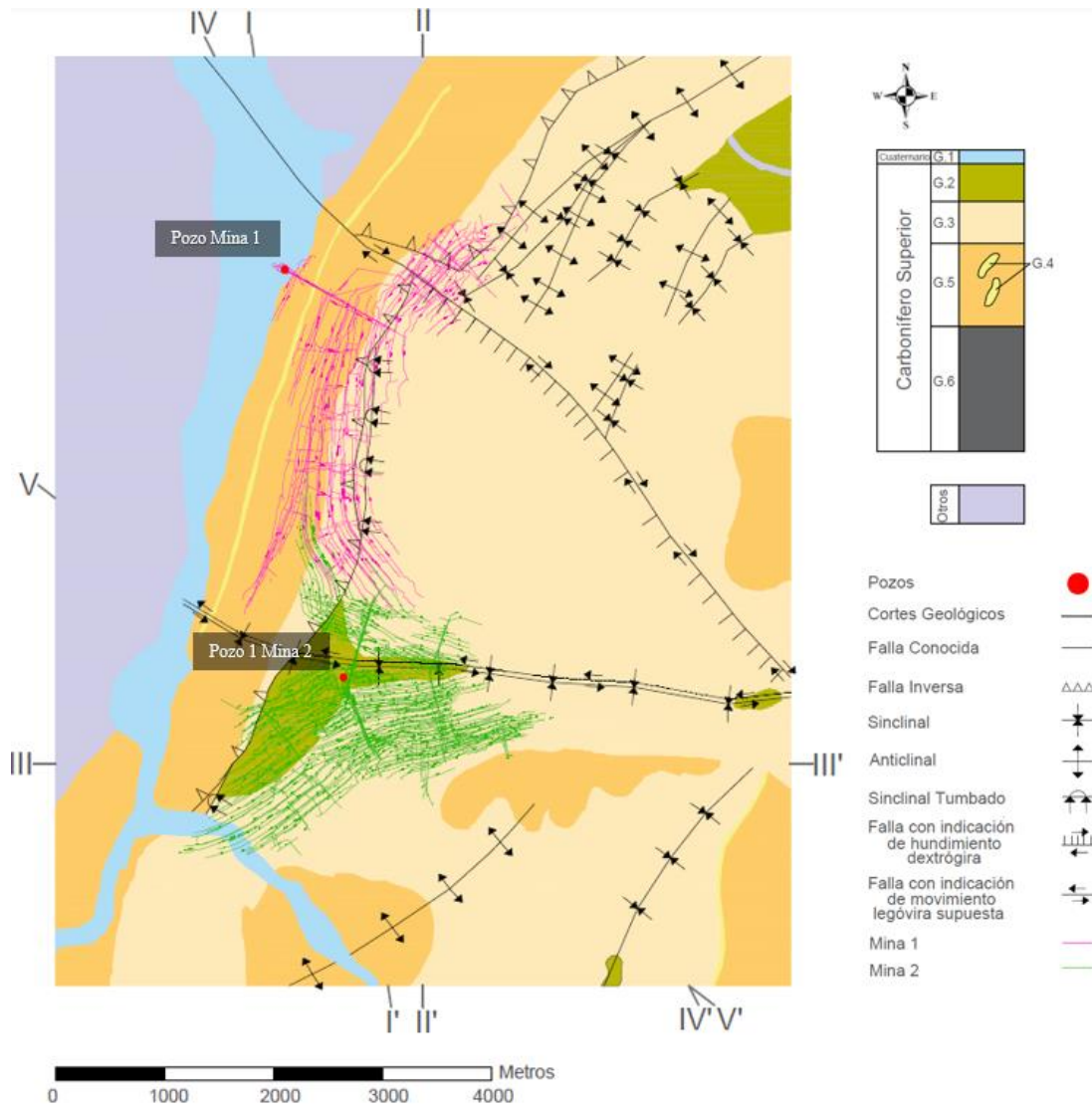


Figura 3.6 Vista en planta de complejo minero formado por M1 y M2. Se incluye la vista en el mapa geológico de la zona de estudio.

3.6.3. Conexiones entre minas

La dependencia hidrogeológica entre ambas minas se da debido a las conexiones entre estas. Existen 3 conexiones entre ambas minas, las cuales se dividen en:

Conexión directa: Es la conexión que se da directamente entre las galerías de las minas. Así las minas tienen 2 conexiones directas, la primera, a través de la intersección de las galerías del nivel 3

de M1 con las galerías del nivel 2 de M2 y la segunda es la intersección de las galerías de los niveles 5 de ambas minas.

Conexión indirecta: Es la conexión que se da entre las galerías del nivel 3 de M2 con las labores de explotación de M1, de esta forma el nivel 3 de M2 es conectado con el nivel 4 de M1.

Cabe resaltar que cierta bibliografía indica que la conexión entre el nivel 3 de M1 con el nivel 2 de M2 es una conexión indirecta por macizo rocoso, sin embargo, los planos utilizados indican una conexión directa como la ya mencionada, por ende, se utiliza esta última.

De esta forma la Figura 3.7 indica las conexiones ya mencionadas, tomando como referencias PM1 y P1M2. En verde se indican las conexiones justificadas tanto por estudios previos como por los planos de labores y en azul las conexiones justificadas solo por los planos de labores facilitados y no por los estudios previos.

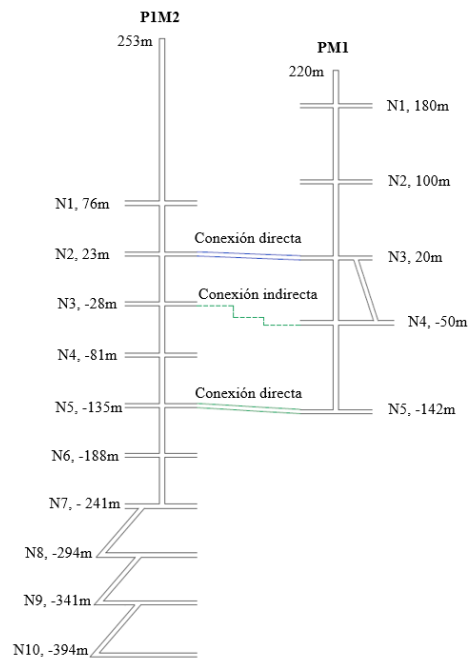


Figura 3.7 Esquema de conexiones entre las minas objetivo.

4. Desarrollo

4.1. Recopilación, análisis y tratamiento de la información.

Debido a la cantidad de información, es que se hace necesario mantener un orden para visualizar y comprender la zona de estudio y así generar un análisis íntegro de esta. En el Anexo J se procede a detallar los principales archivos utilizados de base para la contextualización del caso de estudio.

La Figura 4.1 esquematiza a modo resumen la información recopilada según corresponda a fuentes primarias (proporcionada por la empresa minera) o secundarias (recopilada por otros medios) e indicando los tipos de archivos y el contenido principal de estos.

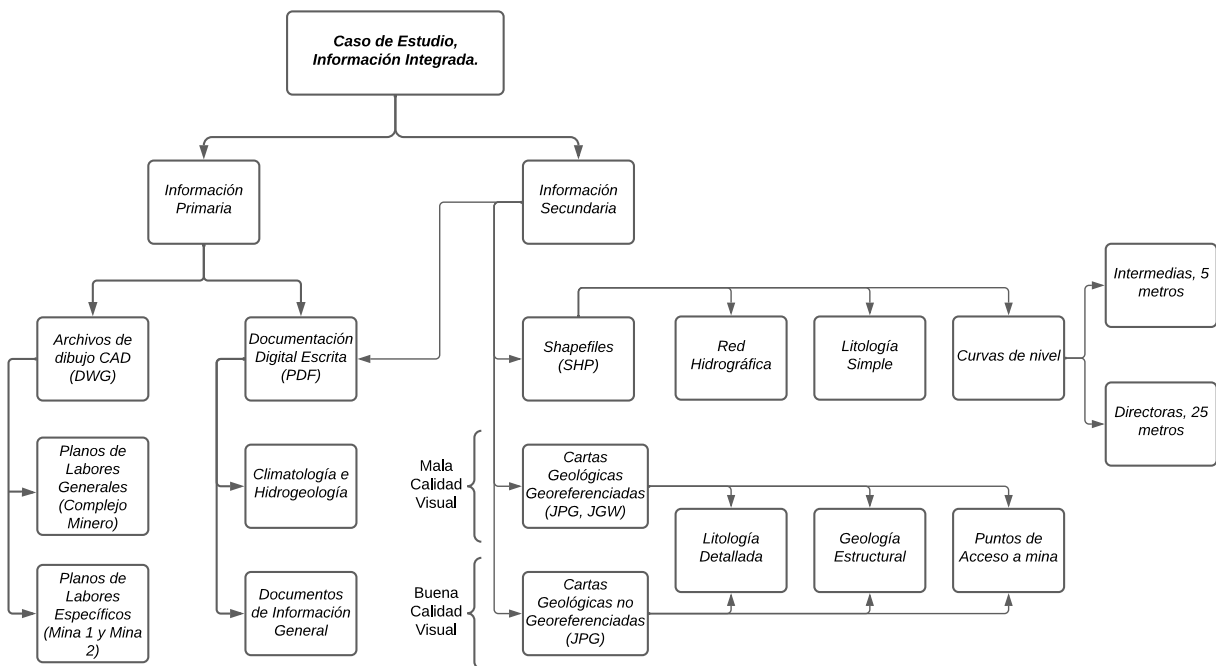


Figura 4.1 Caso de estudio, información integrada.

Una vez organizada la información disponible, esta es procesada y filtrada, con motivo de contextualizar la zona de estudio de forma íntegra y ordenada (Anexo K). De esta forma la Figura 4.2 presenta un esquema general del proceso de contextualización del caso de estudio.

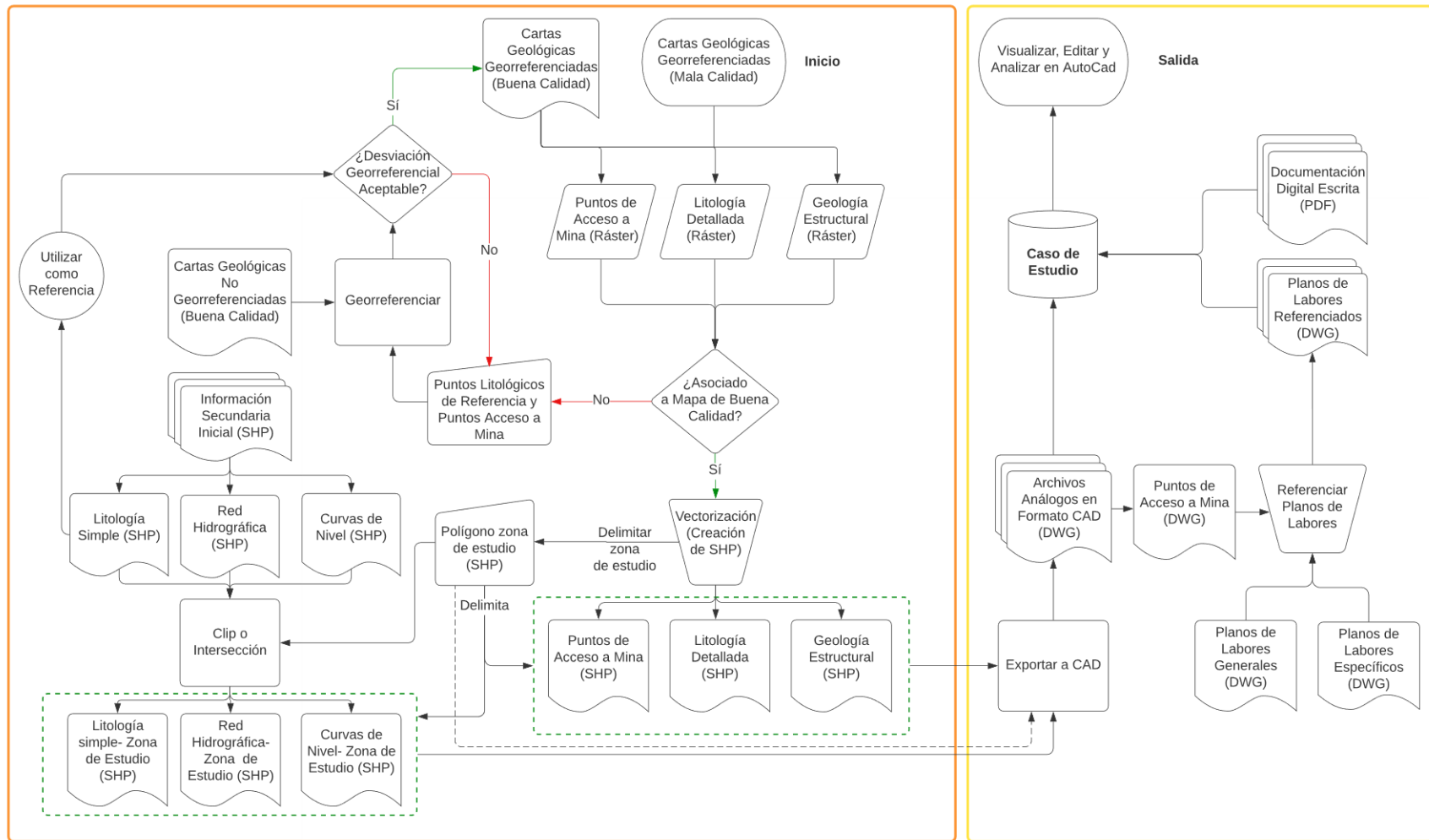


Figura 4.2 Esquema general del proceso de contextualización del caso de estudio. El cuadro naranja y el cuadro amarillo delimitan los procesos llevados a cabo en ArcGIS Desktop y AutoCAD respectivamente.

4.2. Modelo Conceptual

4.2.1. Hipótesis conceptuales

El modelo conceptual se realiza en base a hipótesis conceptuales, las cuales simplifican la realidad del problema y dan un marco de referencia para el modelo numérico. Así las hipótesis conceptuales son las que siguen:

- El dominio del modelo es un medio poroso heterogéneo e isótropo saturado y el flujo en dicho dominio es gobernado por la ley de Darcy (flujos laminares). Se asume el fluido como Newtoniano (viscosidad constante) y densidad constante. El único fluido presente es el agua subterránea, no existiendo flujo multifase.
- Se asume el flujo en régimen estacionario y sus resultados corresponden a los valores iniciales para la determinación del flujo en régimen transitorio, donde este último permite evaluar la inundación temporal del complejo minero.
- Las labores mineras correspondientes a galerías, rampas y piques se consideran como un medio de conductividad hidráulica muy alta.
- Las zonas de explotación de M1 y M2 se suponen completamente rellenas, de tal forma que el material de relleno para M2 tiene una conductividad hidráulica igual a la del macizo fracturado, no así para M1, cuyo material de relleno tiene conductividad hidráulica diferente a la del macizo fracturado.
- Se asume una zona de alteración mecánica del medio rocoso de 200 [m] horizontales alrededor de las labores del complejo. La alteración mecánica vertical toma como referencia cada nivel del complejo minero e inicia 50 [m] bajo y 200 [m] sobre el nivel respectivo, resultando en una zona de alteración vertical que alcanza la superficie topográfica. La alteración mecánica mencionada implica un cambio en la conductividad de la zona.
- La precipitación es la única fuente de recarga del modelo y las divisorias de aguas en superficie coinciden con la divisoria de aguas subterráneas, de tal forma que el plano delimitado por estas divisorias impide el flujo con zonas fuera del modelo.
- Las fallas geológicas son consideradas para definir los límites del modelo, pero dentro del dominio espacial son hidrogeológicamente despreciables, por lo que se excluyen del modelo conceptual. Lo anterior se justifica según los estudios previos de la zona, los cuales indican que el flujo de agua subterránea se da predominantemente en las fallas asociadas a la

actividad minera. Además, no se cuenta con información suficiente para generar un modelo que permita determinar correctamente la interacción hidrogeológica de las fallas con el medio.

- Los límites del modelo se definen a través de las divisorias de agua, las propiedades hidrogeológicas y la geología estructural.

4.2.2. Dominio espacial y condiciones de contorno

La proyección en planta del modelo conceptual consta de un área de 26.8 [km²] y perímetro de 24.1 [km]. A continuación, se indican las justificaciones y las BCs asociadas a cada límite del modelo conceptual.

Límite superior: Definido por la topografía dentro del área asociada a la proyección en planta del modelo conceptual. La BC asociada es la condición tipo 2, cuyo valor corresponde a la recarga del sistema en forma de lluvia útil ($444.2 \left[\frac{mm}{año} \right]$)

Límite inferior: Definido por la hidrogeología de la zona, la extensión vertical del complejo minero y los límites inferiores de su zona de alteración mecánica del macizo. Corresponde a un plano horizontal que alcanza una profundidad de -700 [m.s.n.m.], lo que se justifica por la continua presencia del grupo G6, el cual dada su baja permeabilidad permite el supuesto de impermeabilidad, a lo que se suma la no influencia de la redistribución de esfuerzos producto de la actividad minera en la cota señalada. La BC asociada es de tipo 2 con valor de caudal nulo.

Los siguientes límites corresponden rectas cuya extensión vertical permite definir los planos laterales que delimitan el modelo conceptual. En todos los casos se ha supuesto una extensión vertical recta.

Límite Oeste (\overline{AB}): Definido por la hidrogeología de la zona. Los estudios previos indican que G6 aflora en el límite señalado (incluida su extensión vertical), por lo que se puede suponer una condición de tipo 2 con valor de caudal nulo, a lo que se suma que el límite está fuera del rango de alteración geomecánica producto de la actividad minera.

Límite Norte (\overline{BC}): Plano vertical definido por la geología estructural de la zona. Los estudios previos indican que los desplazamientos de la Falla 2 producen una desconexión de posibles acuíferos subterráneos en el límite señalado, lo que permite suponer un flujo de valor nulo a través de una condición tipo 2 para el plano definido por este límite. Al mismo tiempo el supuesto se refuerza con la baja permeabilidad de los materiales de la zona.

Límite Este (\overline{CD}): Definido por divisoria de aguas. La topografía de la zona permite asumir la existencia de una divisoria de aguas superficial, la cual se ha supuesto igual a la divisoria de aguas subterránea, formando un plano vertical recto con límite impermeable, permitiendo suponer una condición tipo 2 de con valor de caudal nulo, lo que se ve respaldado con la baja permeabilidad de la geología de la zona.

Límite Sur (\overline{DE} , \overline{EF} y \overline{FA}): Definido por las divisorias de agua y por la geología. La topografía permite asumir divisorias de aguas en los tramos \overline{DE} y \overline{FA} . De forma análoga al caso del límite Este, se establece una condición de tipo 2 con valor de caudal nulo para el plano limitante. El tramo \overline{EF} se justifica por la baja conductividad de la litología de la zona, lo cual se mantiene hasta la profundidad definida para el modelo conceptual, generando un plano limitante vertical y recto, el cual tiene asociado una condición de tipo 2 de valor de caudal nulo.

La Figura 4.3 contiene la proyección en planta de los límites diferenciados (según lo previamente señalado) del modelo conceptual, además se incluyen las curvas directoras para apreciar de mejor manera los límites asociados a divisorias de agua. De forma similar se presenta la Figura 8.15 (Anexo L) la cual contiene la proyección en planta de los límites del modelo conceptual, incluyendo el complejo minero objeto de estudio y las estructuras geológicas de la zona. Por otro lado, la Figura 4.4 presenta una vista en planta de los límites del modelo conceptual y los límites de la zona fracturada supuesta en conjunto con el complejo minero.

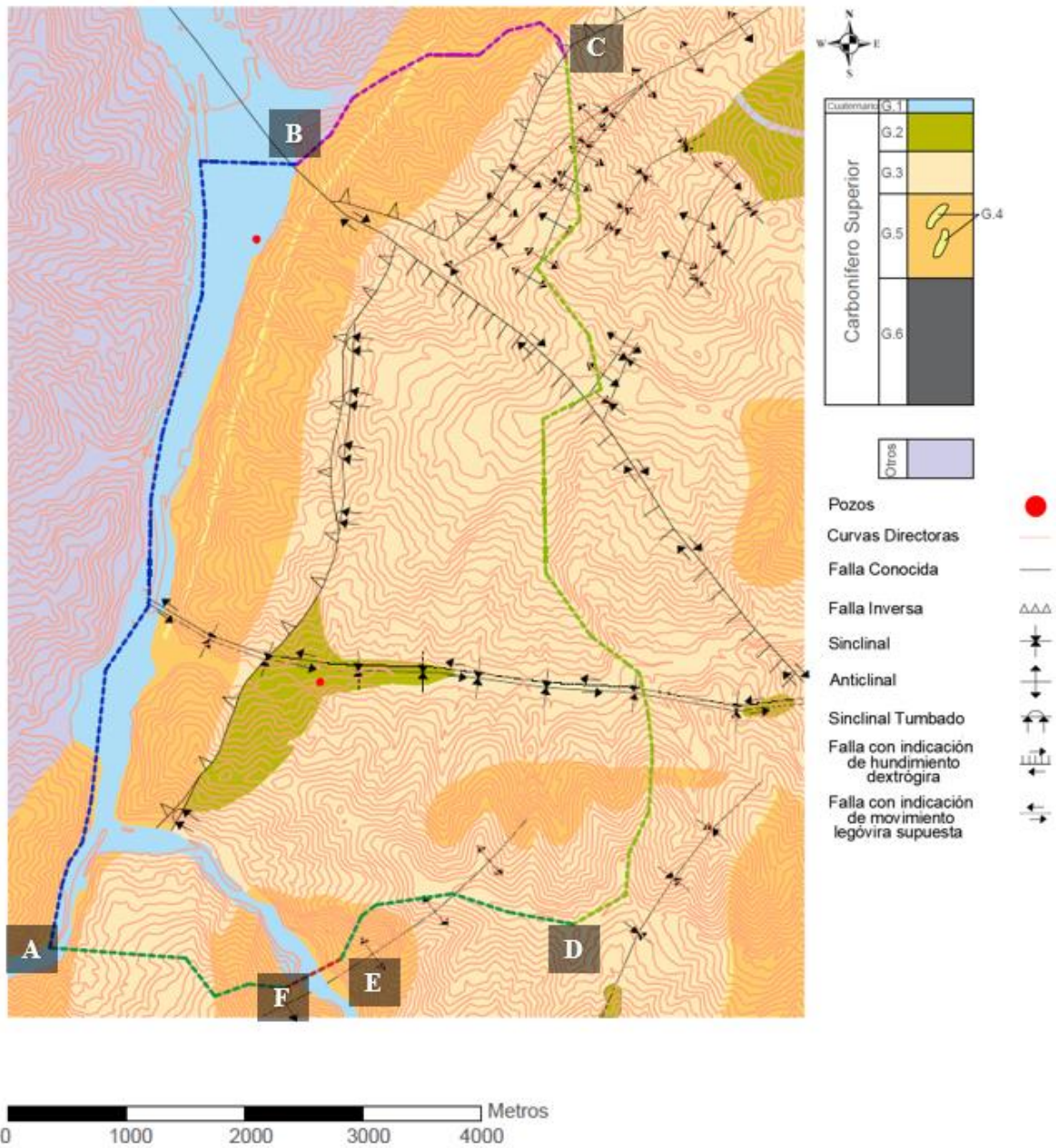


Figura 4.3 Límites diferenciados de la proyección en planta del modelo conceptual.

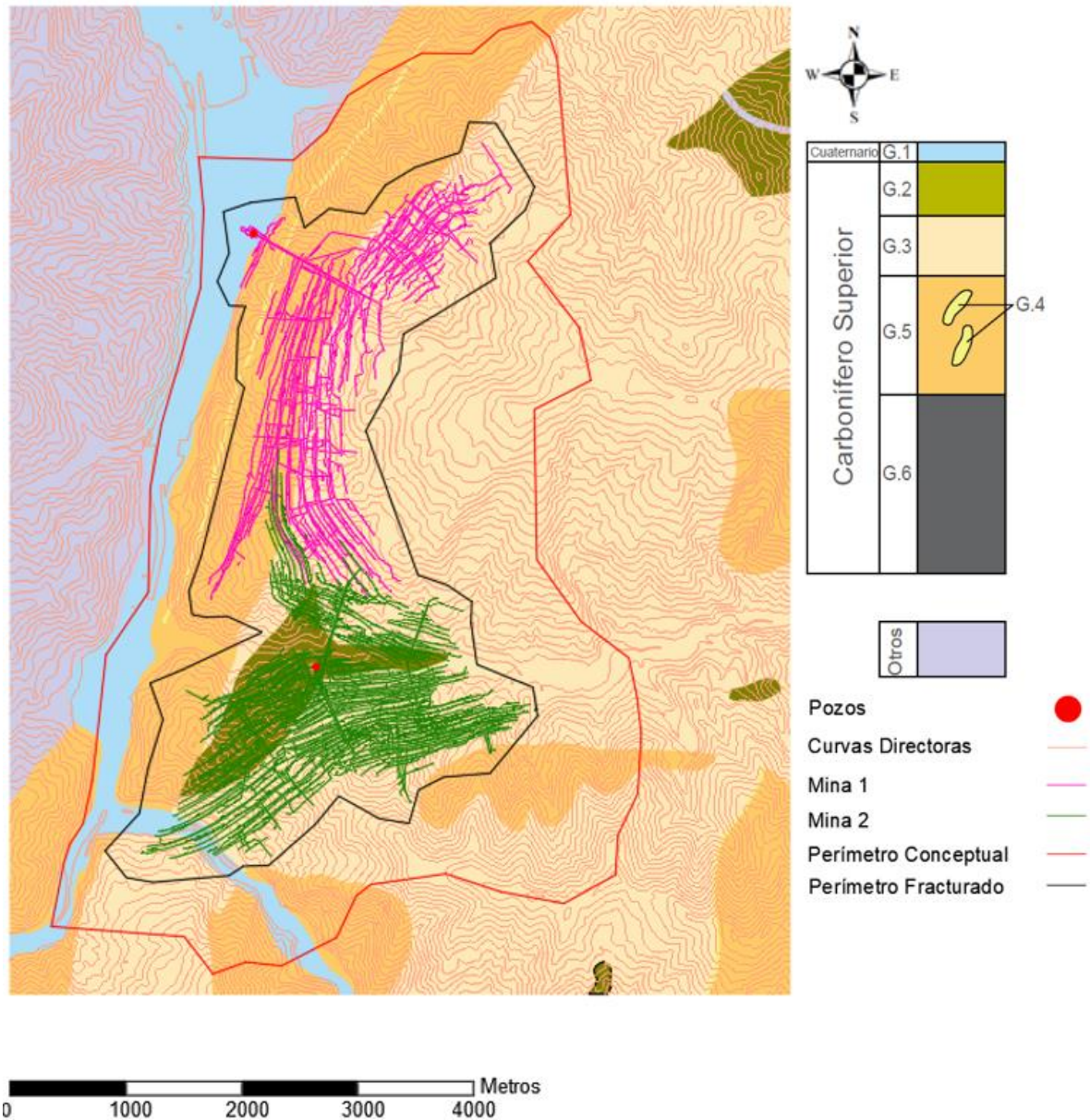


Figura 4.4 Proyección en planta de los límites del modelo conceptual y de la zona fracturada (incluyendo el complejo minero).

Con el objetivo de corroborar el modelo conceptual y en particular las divisorias de aguas superficiales se ha generado un mapa de direcciones de flujo en ArcGIS Desktop ^[36,37], el cual complementa la información obtenida de las curvas de nivel de la zona. Así, la Figura 8.16 (Anexo M) presenta las direcciones de flujo superficial de la zona de estudio, donde se puede apreciar que se cumple con lo mencionado acerca de las divisorias de agua superficiales en los párrafos predecesores.

4.2.3. Modelo Conceptual 3D

A partir de las hipótesis conceptuales y de la definición del dominio espacial y sus condiciones de contorno, es posible obtener un modelo conceptual 3D de la zona de estudio, el cual se presenta en la Figura 4.5. Se aprecia que la única fuente de recarga corresponde a la lluvia útil, además se presenta la red hidrográfica. Se incluye el complejo minero y se distingue entre zona de macizo alterado debido a la actividad minera y zona no alterada.

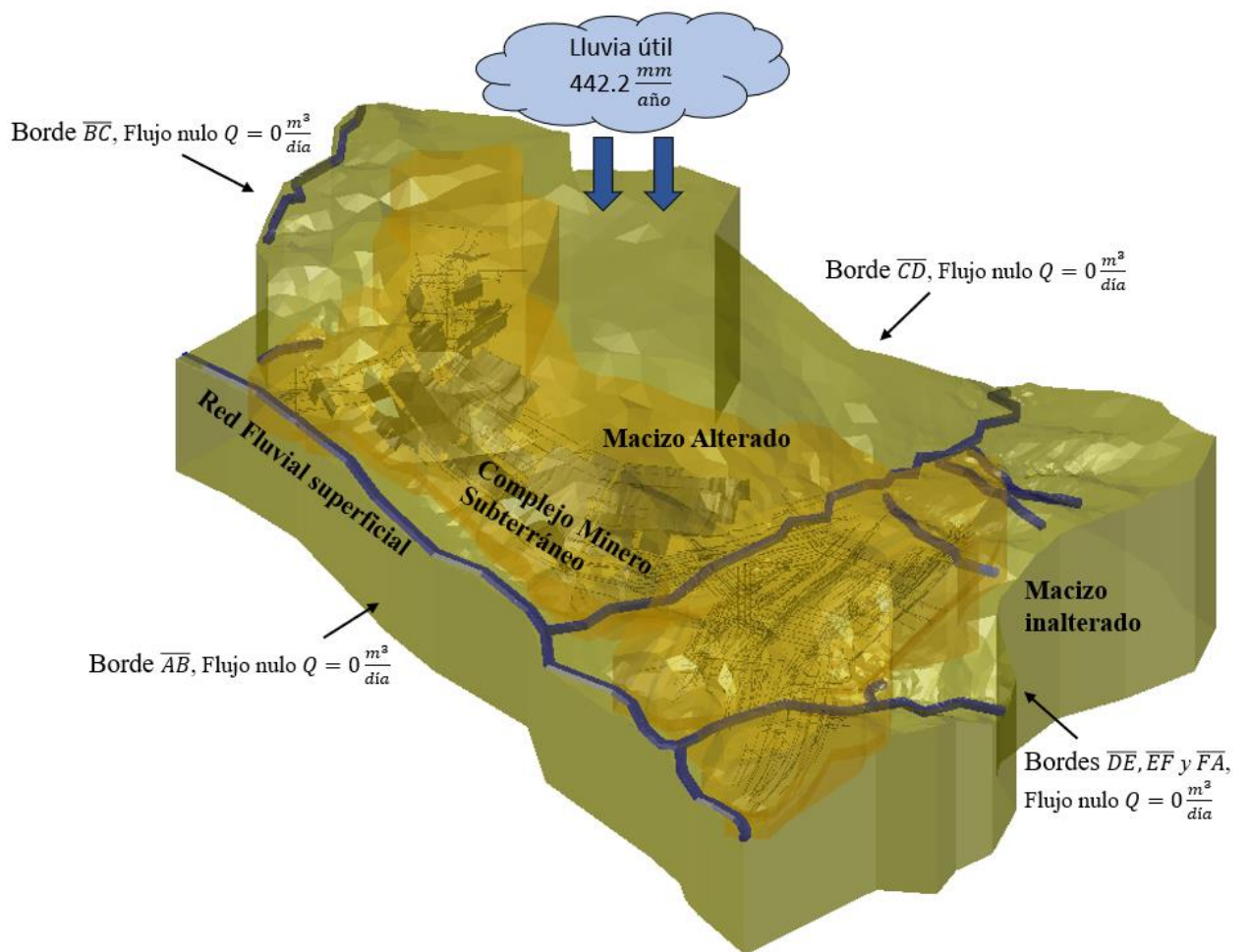


Figura 4.5 Modelo conceptual de la zona de estudio.

4.3. Modelo Numérico

El modelo se ha construido, simulado y calibrado en un equipo OMEN Laptop 15-ek0xxx, I5-10300H CPU 2.50 [GHz], GPU NVIDIA GeForce RTX 2060 y RAM 16GB y 2933 [MHz]

Respecto a las configuraciones generales, se fija la simulación del flujo en medio saturado, lo cual será resuelto a través del método SAMG tanto para régimen estacionario como régimen transitorio.

4.3.1. Discretización del dominio espacial.

La generación del modelo numérico requiere una malla de entrada la cual es incorporada a FEFLOW a través de TetGen, el cual genera una malla denominada supermesh, esta malla reutiliza la información geométrica de la malla inicial y posteriormente actúa como referente para generar una malla de elementos finitos. Lo anterior se resume en la Figura 4.6.

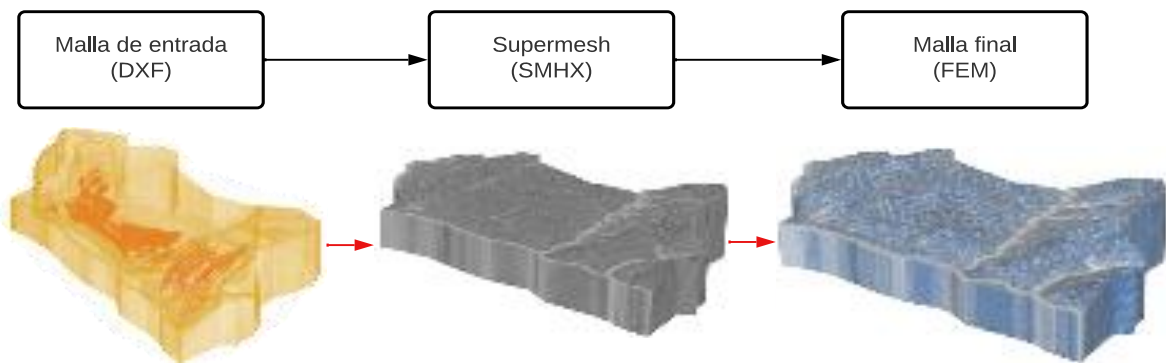


Figura 4.6 Proceso de generación de malla de elementos finitos a partir de una malla inicial en formato *.dxf.

4.3.2. Malla de entrada.

Las mallas desestructuradas de FEFLOW requieren de entrada una malla que cumpla los criterios topológicos y geométricos de TetGen, debido a esto, el Anexo N (Malla del complejo minero) y el Anexo O (Malla del dominio del modelo y acoplado de mallas) se centran en la generación de

estas mallas. En particular se ha decidido generar 2 mallas, una correspondiente al complejo minero y otra correspondiente al dominio del modelo. El objetivo de generar 2 mallas independientes es obtener un mayor control en el equilibrio entre carga computacional y calidad de la malla, puesto que de esta forma se permite generar una malla del complejo minero más fina con relación a la malla del dominio del modelo. Posteriormente las mallas son acopladas, manteniendo sus características topológicas y geométricas iniciales el resultado se presenta en la Figura 4.7.

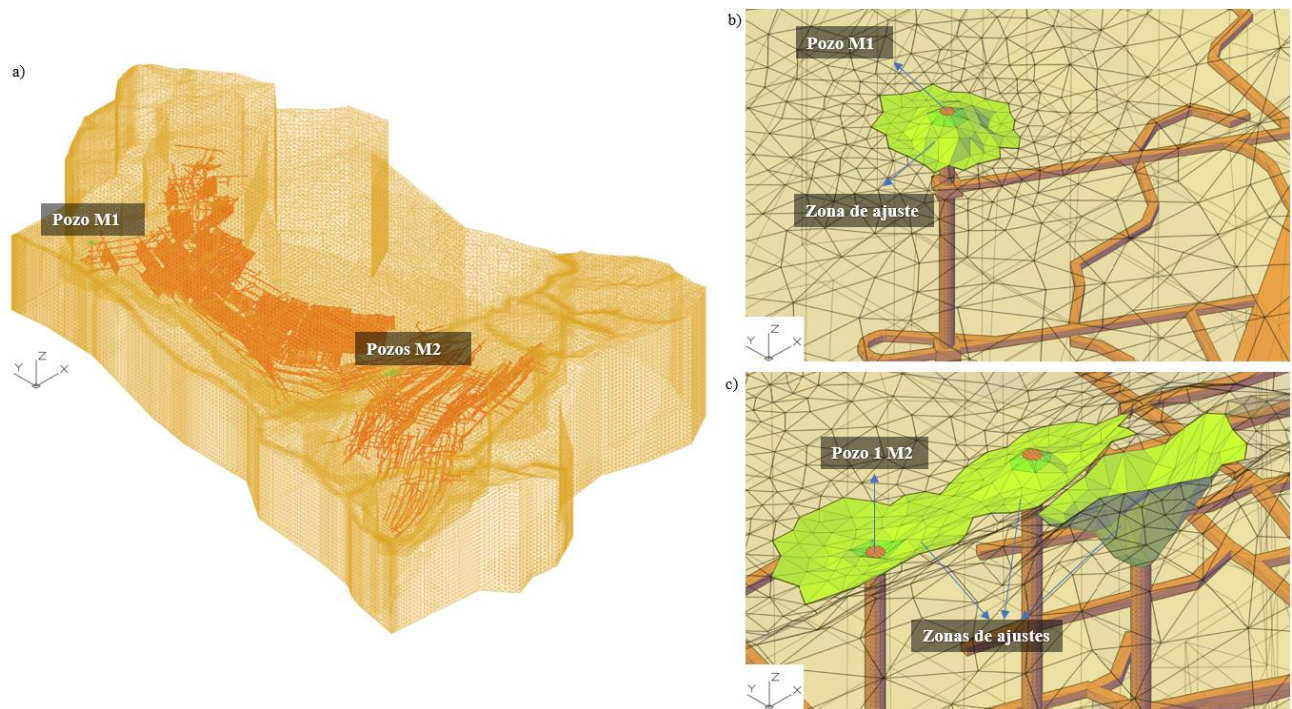


Figura 4.7 Resultado de acoplado de mallas y ajuste manual en cercanías de la intersección de piques con topografía del modelo (AutoCAD). a) Vista isométrica de las mallas finales (complejo minero y dominio del modelo). b) Vista isométrica de la zona de ajuste manual de M1. c) Vista isométrica de las zonas de ajuste manual de M2.

4.3.3. Malla de elementos finitos

Ya generada la malla de entrada, esta es incorporada a FEFLOW según se indicó previamente en la Figura 4.6. De esta forma se generan diversas mallas FEM, de las cuales se seleccionan 2 para su posterior simulación, obteniéndose 2 series de modelos, Serie A y Serie B con modelos análogos en sus parámetros hidráulicos y condiciones de contorno, pero de diferentes mallas FEM. Los parámetros

de entrada de ambas series de modelos son presentadas y justificadas en el Anexo P. A su vez el Anexo Q y el Anexo R presentan un análisis de la calidad de malla para las series de modelos A y B respectivamente. A través de un análisis comparativo entre las series de modelos A y B (Anexo S) se ha decidido dar un mayor énfasis a la serie de modelos B, por lo que será la tratada en capítulos posteriores. Los criterios utilizados para la selección de mallas FEM se basan en parámetros de calidad y de tiempo de cómputo, según señalado en los anexos mencionados. La Tabla 8.7 (Anexo S) resume los principales resultados de las mallas FEM generadas, indicando, para la Serie B un tiempo de generación de 50 minutos, resultando en $3.3 \cdot 10^6$ nodos y $19.7 \cdot 10^6$ elementos.

4.3.4. Asignación de parámetros hidráulicos

Conductividad hidráulica: Los modelos cuentan con 4 conductividades hidráulicas diferentes. Estas corresponden a la zona de macizo inalterado, zona de macizo alterado, complejo minero (galerías, rampas, piques) y las zonas de explotación (ZE). La simulación debe tener en cuenta el vacío existente en el complejo minero, por lo tanto, la conductividad asociada es una muy alta ^[38] y se determina según testeos de convergencia, puesto que valores muy altos tienden a generar una diferencia muy abrupta de conductividades, lo que conlleva a errores de cálculo o convergencia de los modelos, llegando incluso a impedir la resolución de estos. De esta forma la conductividad para el complejo minero (exceptuando las ZE) determinara una subserie de modelos, denominados Serie k_1 y k_2 , los que corresponden a $300 \left[\frac{m}{s} \right]$ y $10 \left[\frac{m}{s} \right]$ respectivamente. Los valores de conductividad para macizo inalterado y alterado se han determinado a partir de informes previos de la zona y corresponden respectivamente a $1 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m}{s} \right]$ y $1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m}{s} \right]$. Las ZE de Mina 2 han sido omitidas en la malla de entrada y por lo tanto también del modelo, esto a modo de simplificación, lo anterior se justifica ya que la conductividad hidráulica de su material de relleno se supone igual a la del macizo alterado. La conductividad del material de relleno de las ZE de M1 ha sido determinado a través de estudios previos y es de $5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m}{s} \right]$. Lo anterior se resume en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Conductividades hidráulicas por zona modelada.

Zona	Conductividad hidráulica [$\frac{m}{s}$]
Macizo inalterado	$1 \cdot 10^{-7}$
Macizo alterado	$1 \cdot 10^{-6}$
Zonas de explotación de M1	$5 \cdot 10^{-6}$
Complejo minero (no incluye ZE)	300-10

La Figura 4.8 presenta las conductividades hidráulicas y su disposición en el Modelo 1 Serie B, esto es análogo para los diferentes modelos y series. Véase Anexo T2.

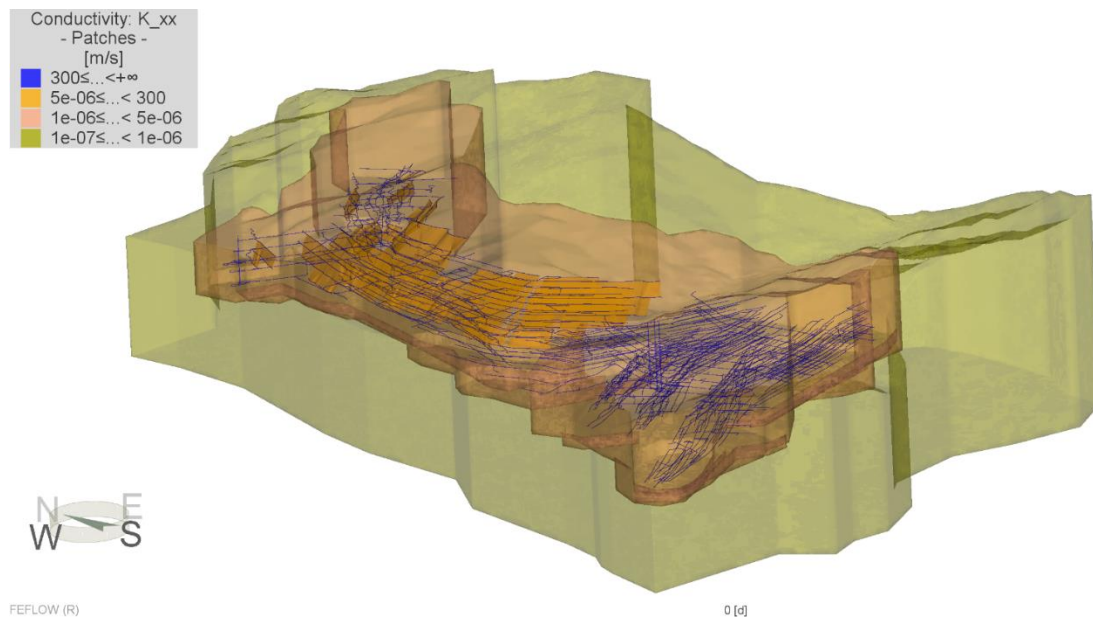


Figura 4.8 Conductividades hidráulicas del Modelo 1 Serie B.

Porosidad: Los modelos cuentan con 4 porosidades diferentes. Estas corresponden a la zona de macizo inalterado, zona de macizo alterado, complejo minero (galerías, rampas, piques) y las zonas de explotación (ZE). La porosidad del complejo minero se supone de valor 1, es decir el volumen de poros (vacío) es igual al volumen total ^[38]. Los demás valores de porosidad se justifican en estudios

previos de la zona. Así, la Tabla 4.2 presenta los valores de porosidad de las zonas modeladas. Véase Anexo T3.

Tabla 4.2 Porosidad por zona modelada.

Zona	Porosidad
Macizo inalterado	0.01
Macizo alterado	0.1
Zonas de explotación de M1	0.2
Complejo minero (no incluye ZE)	1

Coefficiente de almacenamiento: Los valores de coeficiente de almacenamiento se justifican por estudios previos, además se ha supuesto el coeficiente de almacenamiento del macizo alterado igual al de las zonas de explotación (ZE). Por otro lado, el valor asignado al complejo minero es cercano a cero, a modo de simular un vacío ^[38]. Los valores se indican en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Coeficiente de almacenamiento por zona modelada.

Zona	Coeficiente de almacenamiento $[\frac{1}{m}]$
Macizo inalterado	$1 \cdot 10^{-4}$
Macizo alterado	0.1
Zonas de explotación de M1	0.1
Complejo minero (no incluye ZE)	$1 \cdot 10^{-8}$

4.3.5. Condiciones de contorno

El estudio se centra en el proceso de inundación del complejo minero, en particular de M1 por lo que se requiere una simulación en régimen estacionario la cual corresponderá a las condiciones iniciales de la simulación en régimen transitorio, una vez cesa el drenaje del complejo minero. Las condiciones de contorno varían según los modelos utilizados. De esta forma las condiciones se agrupan según el tipo de régimen a resolver y el modelo utilizado.

Las siguientes condiciones de contorno son comunes en todos los modelos y se encuentran activas tanto en régimen estacionario como transitorio.

Precipitación útil: Es asignada en los elementos de la cara superior del modelo (topografía). Se asigna el valor de $444.2 \left[\frac{mm}{año} \right]$ a través de la herramienta “in/outflow on top/bottom”. Véase Anexo T1.

Fluid Flux BC: Correspondiente a una condición de Neumann. Es utilizada para representar los límites impermeables. Los límites impermeables ($Q = 0 \left[\frac{m^3}{d} \right]$) corresponden a los límites \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} , \overline{DE} , \overline{EF} , \overline{FA} y la cara inferior del modelo. FEFLOW asigna estas condiciones automáticamente.

Fluid Transfer BC: Corresponde a una condición de Cauchy. Es usada para representar los ríos y para ello, se debe asignar la condición a los nodos que definen los ríos de tal forma, que $h_{Conocido} = z [m]$, siendo z la coordenada de elevación del nodo. La Figura 4.9 presenta el modelo con estas condiciones impuestas.

El parámetro de conductancia es establecido a través de las propiedades de in/out transfer rate, lo que se asigna a todos los elementos del modelo. El valor de la conductancia es calculado suponiendo 10 [m] de distancia entre las posiciones de los niveles piezométricos conocidos y los calculados. Además, se utiliza para su cálculo la conductividad asociada al grupo geológico G1 ($1 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m}{s} \right]$), por lo que, a través de la (, el valor de conductancia resultante es de $1 \cdot 10^{-5} [s^{-1}]$. El Anexo U1 muestra el Modelo 1, con las conductancias asignadas.

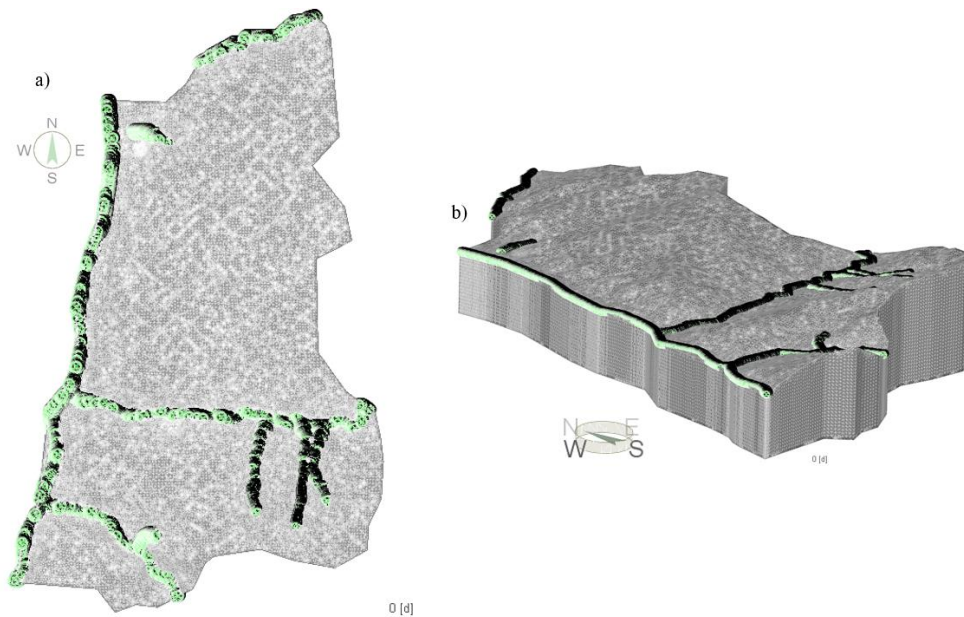


Figura 4.9 Vista en planta (a) e isométrica (b) de las condiciones Fluid Transfer BC impuestas en el modelo. Modelo 1 Serie B.

Condiciones de contorno en régimen estacionario.

Las siguientes son condiciones de contorno que definen los diferentes modelos de las Series k_1 y k_2 . Estas condiciones se encuentran activas solo en régimen estacionario y su objetivo es mantener el drenaje de las labores subterráneas, es decir, mantienen las labores subterráneas secas. Estas condiciones de contorno son desactivadas en régimen transitorio con el objetivo de simular la inundación natural del complejo minero.

Modelo 1

Hydraulic Head BC: Condición de seepage face. Es asignada a los nodos que delimitan al complejo minero (excluyendo las ZE), es decir los nodos externos del complejo minero, de tal forma que $h = Elevación [m]$, con $Q_{max} = 0 \left[\frac{m^3}{d} \right]$. La Figura 4.10 muestra la activación de las seepage en el complejo minero (exceptuando las ZEs), se hace además un zoom en las zonas de los piques, a su vez que se activa la visualización de las caras de los elementos, esto para chequear si la condición se ha activado efectivamente en toda la extensión de los piques.

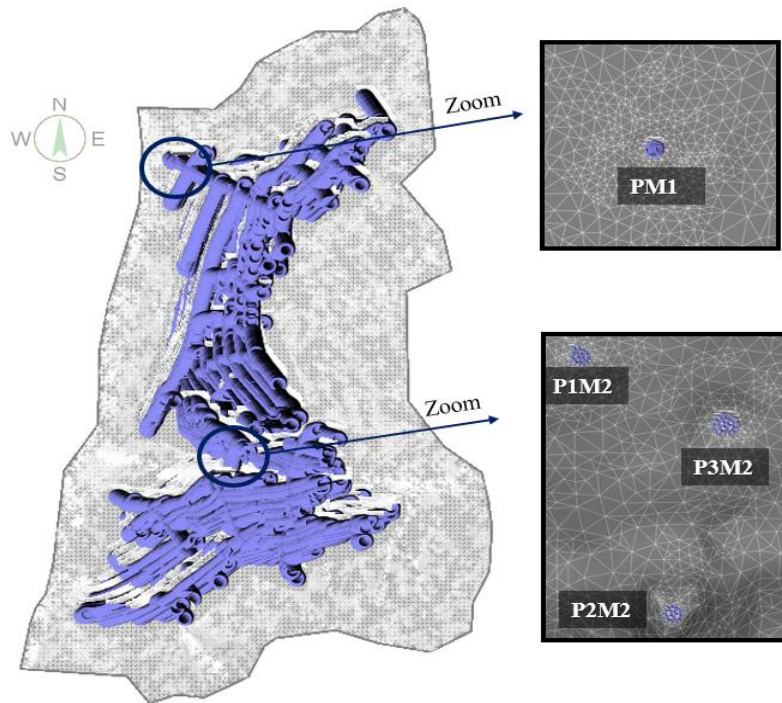


Figura 4.10 Vista en planta de las seepage face activadas en el complejo minero (exceptuando ZE).

Modelo 1 Serie B.

Modelo 2

Hydraulic Head BC: Es asignada a los nodos que delimitan al complejo minero (exceptuando las ZEs). Su valor es igual a la elevación mínima del complejo minero, correspondiente al Nivel 10 de Mina 2, por lo tanto, se tiene que $h = z_{\min} [m] = -394.5 [m]$.

Modelo 3

Hydraulic Head BC: Es asignada a los nodos que delimitan al complejo minero (exceptuando las ZEs) Su valor es igual a la elevación del nodo respectivo del complejo minero, por lo tanto, se tiene que $h = \text{Elevación} [m]$.

4.3.6. Pozos de observación

Se han generado 4 pozos de observación correspondientes a los 4 piques del complejo minero. Estos se ubican en lo más profundo de cada pique su ubicación en coordenadas cartesianas se da en la Tabla 4.4, además la Figura 4.11 ilustra su ubicación desde una vista en planta del modelo FEM.

Tabla 4.4 Ubicación geométrica de los pozos de observación.

Pozo de observación	X[km]	Y [km]	Z [m]
PM1	274.668	4791.480	-142
P1M2	275.094	4787.740	-241
P2M2	275.122	4787.654	-241
P3M2	275.138	4787.717	-241,

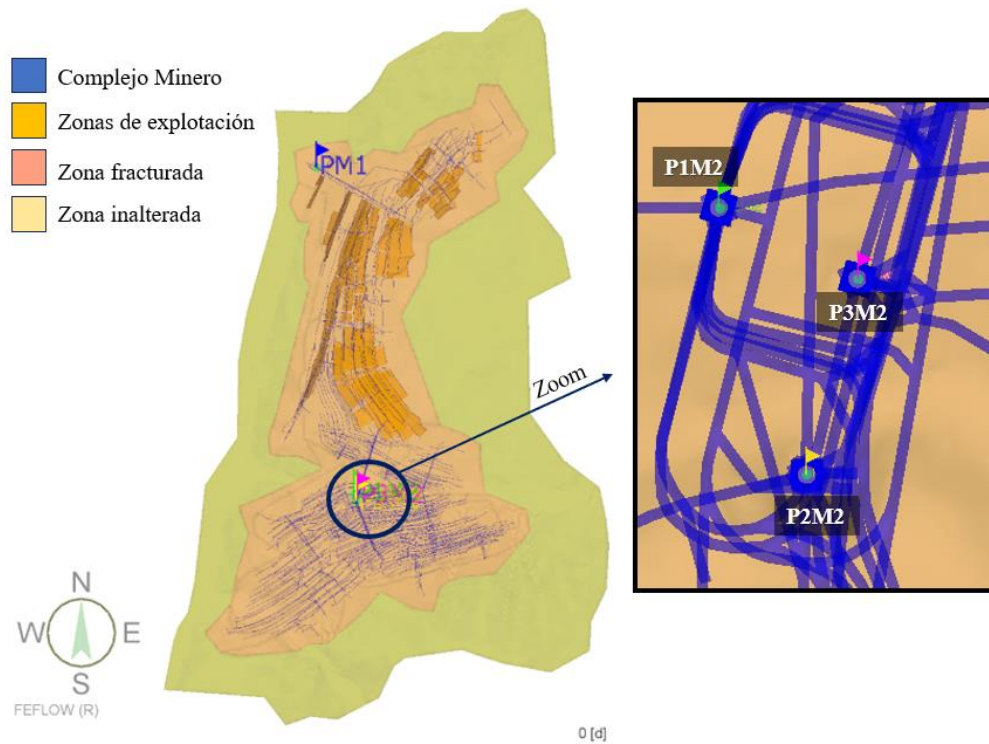


Figura 4.11 Ubicación de pozos de observación (localizados en los piques del complejo minero).

5. Resultados

Los modelos son clasificados según la condición de contorno utilizada en el régimen estacionario, a su vez estos se agrupan en Series k_1 ($300 \left[\frac{m}{s}\right]$) y Series k_2 ($10 \left[\frac{m}{s}\right]$) según la conductividad asociada al complejo minero. Finalmente, estas son clasificadas en Series A y Series B según las características de la malla FEM utilizada. Así, la nomenclatura es indicada en el Anexo V. En capítulos previos se ha justificado el uso de los modelos de serie B por sobre la serie A. De esta forma los modelos restantes corresponden a los modelos de serie B.

5.1. Modelos en régimen estacionario

Debido a la extensión de la memoria de título se ha decidido reportar exclusivamente los resultados asociados a los modelos de serie 1. En particular el Modelo 1- k_1 -B. La elección de los Modelos de serie 1 por sobre los demás se fundamenta en que la condición de seepage face impuesta en las labores mineras representa de manera más precisa la realidad del problema, ya que los resultados de los modelos 2 y 3 carecen de ciertos compartimientos físicos esperables (tales como los obtenidos en el Anexo W2 al Anexo W6) en estos tipos de problemas. Sin embargo, los resultados cuantificables de los demás modelos son similares, variando ligeramente en sus valores finales.

5.1.1. Características generales y balance hídrico: Modelo 1- k_1 -A y Modelo 1- k_1 -B

A modo de ejemplo se realizará una comparación entre modelos de variante 1. Así, El Modelo 1- k_1 -A y Modelo 1- k_1 -B tienen tiempo de resolución de 35 y 40 minutos, respectivamente, lo que contrasta con los 5 minutos que tardan los modelos de variante 2 y 3. Estos altos tiempos de cómputo en los Modelo 1, es causado por la iteración entre condiciones de contorno a causa de la configuración de seepage face en nodos separados verticalmente ^[39]. Esta iteración entre condiciones de contorno está determinada a nivel del código de FEFLOW por lo que es inevitable ^[39]. Debido a la iteración mencionada el problema puede no converger según la conductividad del complejo minero utilizada, en particular conductividades bajas hacen que los cálculos no converjan, es por ello que los Modelo 1- k_2 -A y Modelo 1- k_2 -B no convergen y son descartados.

Existe un desequilibrio en el balance hídrico de $-902.84 \left[\frac{m^3}{d}\right]$ correspondiente al 0.22% del total del balance hídrico para el Modelo 1-k₁-A. El desequilibrio en el balance hídrico para el Modelo 1-k₁-B es de $-204.65 \left[\frac{m^3}{d}\right]$ correspondientes a un 0.05% del total del balance hídrico.

Dado que la simulación es en régimen estacionario, se observa un nivel piezométrico constante a medida que avanza el tiempo. El nivel de agua para el pique de Mina 1 se encuentra en la cota aproximada de $-390.8 [m]$ lo que corresponde a $248 [m]$ bajo el punto de observación fijado en la base del pique de Mina 1. El nivel de agua para los piques de Mina 2 se encuentra en la cota aproximada de $-391.22 [m]$ lo que corresponde a $150 [m]$ por debajo de la base de los piques más profundos de Mina 2. Los balances hídricos y los gráficos de nivel piezométrico v/s tiempo se presentan en el Anexo W1.

Notar que la diferencia entre los resultados de los modelos de Serie A y B es mínima, además el aumento de calidad de malla en los modelos de Serie B se traduce en un menor error (desequilibrio en balance hídrico) en la solución. El aumento de tiempo en los modelos Serie B es mínimo (5 minutos) en relación con la disminución del error en la solución. Esto ratifica el continuar el estudio solo con los modelos de Serie B, así los modelos Serie A serán descartados. La Tabla 5.1 muestra los modelos restantes después de los filtros realizados.

Tabla 5.1 Modelos Finales (después de filtro)

Nombre del Modelo	Malla	FEM	Conductividad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Condición de contorno
Modelo 1-k ₁ -B	B		300	Seepage face
Modelo 2-k ₁ -B	B		300	$h = z_{\text{mín}} [m]$
Modelo 2-k ₂ -B	B		10	$h = z_{\text{mín}} [m]$
Modelo 3-k ₁ -B	B		300	$h = \text{Elevación} [m]$
Modelo 3-k ₂ -B	B		10	$h = \text{Elevación} [m]$

5.1.2. Nivel freático: Modelo 1-k₁-B

En la Figura 8.61 (Anexo W2) se aprecia que el nivel freático (superficie de presión cero) se encuentra bajo el complejo minero, lo que ocurre debido a las condiciones seepage face asignadas al modelo (véase Figura 8.62) ^[39]. El mínimo valor de piezometría corresponde a -394.48 [m], lo que sugiere un nivel freático casi horizontal, puesto que los valores en los pozos de observación de Mina 1 y 2 son cercanos al mínimo valor de piezometría, esto se ratifica en la Figura 8.61 (Anexo W2).

El modelo extrae agua a través de la condición de seepage face impuesta, donde el estado final (post-estacionario) de las condiciones de contorno es el indicado en la Figura 8.62 (Anexo W2). Esto ocurre debido a que la seepage face realiza un proceso iterativo entre cambios de condición de contorno del tipo Well BC e Hydraulic Head BC ^[39], resultando en que todos los nodos sobre el nivel freático son asignados a Well BCs y los nodos en el nivel freático son asignados a un Hydraulic Head BC ^[39], en este caso, la base del Nivel 10 de M2 se encuentra en el nivel freático y la condición de Hydraulic Head BC en estos nodos extrae el agua suficiente para mantener el nivel freático en el nivel correspondiente. Así los nodos del Nivel 10 de M2 extraen un valor de 412,530 [$\frac{m^3}{a}$], a través de las Hydraulic Head BC.

5.1.3. Isosuperficies de piezometría: Modelo 1-k₁-B

La Figura 8.63 junto con la Figura 8.65 (Anexo W3) presentan el resultado de la generación de 30 isosuperficies de piezometría y la Figura 8.64 junto con la Figura 8.66 (Anexo W3) de 52 isosuperficies de piezometría. Se percibe que el nivel piezométrico disminuye a medida que las superficies se acercan a las labores del complejo, a su vez los ríos actúan como limitantes de este efecto, por ejemplo, el Río 3 separa las isosuperficies generando 2 zonas, una asociada a Mina 1 y otra a Mina 2. Las figuras también indican el estado de los piques, donde se aprecia en estos un efecto envolvente de las isosuperficies, lo cual ocurre en todo el complejo minero. Este efecto envolvente se aprecia de mejor manera al ver la Figura 8.63 y a continuación la Figura 8.64. Lo mismo ocurre para la Figura 8.65 y la Figura 8.66. Este efecto envolvente se ve justificado por la acción en conjunto de la conductividad del complejo minero y de las seepage faces, puesto que la baja conductividad de las galerías hace que el flujo tienda a entrar al modelo y por ello las isosuperficies disminuyen en valor

al acercarse a las labores, y por otro lado las seepage faces mantienen estas labores secas, así generando un efecto envolvente en el complejo minero.

5.1.4. Isolíneas y franjas de piezometría: Modelo 1-k₁-B

La Figura 8.67 junto con la Figura 8.68 (Anexo W4) corresponden a las isolíneas y franjas de piezometría en las caras exteriores del Modelo 1-k₁-B. Reafirman lo expuesto en los párrafos anteriores, notándose 2 zonas de baja piezometría completamente marcadas en la superficie topográfica, estas zonas corresponden a las cercanías de Mina 1 y Mina 2 y están separadas en topografía por el Río 3. Rápidamente y en profundidad estas 2 zonas se unen a medida que la influencia del Río 3 disminuye. Esto último se ratifica en la Figura 8.69 (Anexo W4), la cual corresponde a una vista interior del Modelo 1-k₁-B en régimen estacionario. Se observa que efectivamente las labores subterráneas generan a su alrededor una amplia zona de baja piezometría. La zona de bajas piezometrías sigue hasta llegar a la cara inferior del modelo (Figura 8.68, Anexo W4).

La Figura 8.70 (Anexo W4) indica un corte de un plano en el eje X en PM1 para el Modelo 1-k₁-B en régimen estacionario, de forma similar la Figura 8.71 (Anexo W4) indica un plano de corte a lo largo de las galerías principales de Mina 1, en ambas figuras se aprecia una concordancia con lo expuesto párrafos previos.

La Figura 8.72 a la Figura 8.75 (Anexo W4) indican una sucesión de cortes a través de planos en el eje Z. A través de esta sucesión de cortes es fácil notar la continuidad de la zona de baja piezometría que rodea al complejo minero, lo que aumenta la concordancia con los argumentos de los párrafos predecesores.

5.1.5. Seguimiento de datos de piezometría: Modelo 1-k₁-B

Los gráficos resultantes del seguimiento de datos de piezometría se presentan en el (Anexo W5). Se observa el comportamiento descrito en párrafos anteriores, es decir, se genera una zona de baja piezometría en los alrededores del complejo minero, generándose un nivel freático casi constante en la base de la zona de baja piezometría. El valor mínimo del nivel freático es equivalente aprox. -

400 m.s.n.m., el cual como ya se menciona es casi constante a lo largo del complejo minero. Se observa además que al Sureste del modelo las piezometrías tienden a aumentar y la influencia del complejo minero disminuye.

5.1.6. Análisis del flujo en el complejo minero: Modelo 1-k₁-B

El flujo en el complejo minero es analizado en base al *rate budget* (en escala de esferas), las líneas de flujo y las direcciones de flujo (vectores). Ello permite determinar las entradas y salidas de fluido dentro del complejo minero o en secciones de este, según los marcadores de región generados en la malla de entrada. Debido a limitaciones de memoria RAM se han reducido los nodos para realizar operaciones de cálculo relacionadas a líneas de flujo de afluentes (backward), de esta forma se ha seccionado el PM1 en 5 selecciones de nodos cada una correspondiendo a un nivel de M1. De esta forma la Figura 8.82 a la Figura 8.127 son las imágenes (Anexo W6) utilizadas para el análisis.

Se observa flujo desde las labores de M1 hacia M2 en todas las conexiones entre estas minas, es decir, entre el N3 de M1 con el N2 de M2, entre el N5 de M1 con el N5 de M2 y entre una zona de explotación (ZE 7) de M1 con galerías del N3 de M2. El flujo sigue hasta los piques de M2 (en particular P1M2 y P3M2) hasta descender al Nivel 7 de M2 y luego descender aún más por las rampas de M2 hasta el último nivel de esta (Nivel 10). No se detecta flujo de M2 hacia M1.

Existe flujo ascendente dentro de M1 y corresponde a la rampa de M1. El flujo se dirige de un nivel de menor cota (Nivel 4) a un nivel de mayor cota (Nivel 3) a través de la rampa de M1. Por otra parte, existe flujo ascendente en la conexión indirecta entre M1 y M2, ya que el flujo del Nivel 4 de M1 pasa a través de la zona de explotación y luego sube a través de esta ZE hasta alcanzar la galería de conexión con el Nivel 3 de M2. Las conexiones directas también implican un flujo ascendente, puesto que los niveles de conexión de M2 se encuentran a una mayor cota. El flujo en los piques de M1 y M2 es en general vertical hacia abajo, exceptuando los niveles de conexión directa donde existe flujo saliente horizontalmente hacia las labores de M2 (siguiendo el trayecto mencionado en párrafos previos).

5.1.7. Balance de labores subterráneas: Modelo 1-k₁-B

Uno de los objetivos del estudio es generar un modelo que permita el control hidrológico de labores específicas del complejo minero, así el Anexo W7 presenta los flujos salientes de cada una de las labores del complejo minero. Estos flujos corresponden a una transferencia interna a través de los elementos seleccionados. Así, los valores de la Tabla 8.10 (Anexo W7) permiten dilucidar el comportamiento en todo el modelo y en particular al interior de las labores.

5.2. Modelos en régimen transitorio

La calibración se ha realizado en régimen transitorio, tomando como referencia la Tabla 8.11 (Anexo X1), en ella se indican los días transcurridos tras el inicio del proceso de inundación real de las minas y los niveles piezométricos medidos en los pozos de Mina 1 y Mina 2. Notar que no se tiene información de los primeros 120 días aproximadamente. En la realidad existe un desfase (mayor a 6 meses) en el cese del drenaje de ambas minas y en ocasiones existe reactivación de los pozos de bombeo (de forma más limitada) en ciertos periodos. Para fines académicos y a modo de simplificación, se ha supuesto que ambas minas han cesado su drenaje en el día 0 (primer día en que ambas minas se encuentran sin bombeo) y no existe reactivación de los pozos.

Dado que las simulaciones y calibraciones en régimen transitorio tienen como objetivo determinar el comportamiento del proceso de inundación, se debe, desactivar las condiciones de contorno de seepage face impuestas en las labores mineras, con el objetivo de permitir la inundación natural de las minas.

En primera instancia se intentó realizar una calibración mediante FePEST, no obstante, debido al excesivo tiempo de cómputo en la calibración de los modelos de serie 1, se ha optado por realizar una calibración manual. El excesivo tiempo de calibración en FePEST de los modelos de serie 1 puede deberse a la naturaleza iterativa de la condición seepage face definida a nivel de código en el programa FEFLOW, sumado a la complejidad y tamaño del modelo, esto es, a pesar de la desactivación de las condiciones de contorno, es posible que en el archivo de condiciones iniciales (post-estacionario) existan variables asociadas a una previa utilización de seepage face, que aumenten el tiempo de

cómputo, resultando en que calibraciones de parámetros isotrópicos tarden entre 5-7 días aproximadamente.

5.2.1. Calibración manual

La calibración manual comenzó con pruebas de valores extremos y análisis de sensibilidad de los principales parámetros hidráulicos del modelo (porosidad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) en las zonas hidrogeológicas definidas en este (macizo no alterado, macizo alterado, talleres de explotación y labores mineras). Los resultados de cada simulación se contrastaron con los datos reales de inundación a través del error absoluto medio, hasta alcanzar un error aceptable (Detallado en el Anexo X2).

Las pruebas de sensibilidad fueron realizadas dentro de los rangos de valores reales y teóricos de cada parámetro hidráulico en las zonas respectivas (Anexo X2).

Del proceso mencionado se concluye que, para el modelo en cuestión:

Porosidad: No tiene una influencia significativa en los niveles de inundación de las minas. Por el contrario, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento presentan una influencia considerable en las cotas de inundación, ya que determinan la velocidad de ascenso del nivel piezométrico en los pozos de observación.

Conductividad hidráulica: Presenta una mayor sensibilidad en la zona fractura y en el complejo minero. Los resultados indican que la conductividad hidráulica en las labores subterráneas (complejo minero) controla la relación entre los valores piezométricos en función del tiempo reportados en PM1 y PM2. En este sentido, valores altos de conductividad hidráulica tienden a equilibrar los valores reportados en ambos pozos, mientras que valores bajos generan una diferencia en la piezometría reportada en PM1 y PM2.

Coficiente de almacenamiento: Muestra una mayor sensibilidad que la conductividad hidráulica, especialmente en zonas de gran volumen como la zona fracturada. Los resultados indican que este parámetro permite regular la cota final del nivel piezométrico. Es decir, valores bajos de coeficiente de almacenamiento incrementan la cota final del nivel freático en el periodo de simulación,

por el contrario, valores altos disminuyen las cotas finales de los niveles piezométricos reportados en PM1 y PM2.

En primera instancia las calibraciones manuales, aunque lograron reducir significativamente las diferencias con los datos reales, no alcanzaron un error aceptable. Esto se debe principalmente a dos motivos, el primero, el supuesto de cese total del drenaje de ambas minas en el día 0, y el segundo, la consideración de que todas las labores subterráneas representan volúmenes completamente vacíos.

Por lo anterior, y basándose en los datos reales de piezometría de los pozos, se llevaron a cabo zonificaciones según el eje z de las velocidades de ascenso del nivel piezométrico para Mina 1 y Mina 2, como se detalla en la Tabla 8.14 (Anexo X3).

Estas zonificaciones se generaron en la zona de mayor influencia hidrogeológica del modelo, correspondiente a la zona fracturada. En estas áreas, únicamente se varió el coeficiente de almacenamiento, ya que las simulaciones indicaron que es el parámetro hidráulico que más influye en la velocidad de ascenso del nivel piezométrico. La zonificación abarco un radio de 10 metros, medido desde los bordes de las labores subterráneas.

De este modo, se definieron 11 subzonas dentro de la zona fracturada y en torno a las minas (Tabla 8.15, Anexo X3), con el objetivo de controlar las velocidades de inundación en el modelo, es decir, incrementarlas o reducir las según corresponda en cada subzona.

5.2.2. Resultados de calibración manual

La Tabla 8.16 (Anexo X4) muestra los parámetros hidráulicos obtenidos tras la calibración manual para las diferentes zonas del modelo, con excepción de las subdivisiones mencionadas. Las porosidades se mantuvieron inalteradas (Tabla 4.2), dado su limitada influencia en los niveles piezométricos simulados.

Por su parte, la Tabla 8.17 (Anexo X4) presenta los valores de coeficiente de almacenamiento asignados a las nuevas subdivisiones. Estos valores se determinaron mediante calibraciones manuales y análisis comparativos basados en las velocidades de ascenso de piezometría, calculadas a partir de los datos reales.

5.2.3. Resultados de simulación en régimen transitorio calibrado

El modelo fue resuelto en régimen transitorio utilizando los parámetros hidráulicos ya señalados, con un periodo de simulación de 5 años. La convergencia se alcanzó en aproximadamente 40 minutos. El balance hídrico al final de la simulación (Figura 8.128, Anexo Y1) muestra un error mínimo (imbalance) correspondiente al $5.6 \cdot 10^{-3}$ % del total del balance hídrico del modelo.

Al final de la simulación (día 1825), los puntos de observación registraron niveles piezométricos en una cota de 280 m.s.n.m., tanto en PM1 como en P1M2. Esto sugiere que el proceso de inundación no solo inunda cada labor subterránea de las minas, sino que también genera un rebalse de estas.

Dado el supuesto de que el volumen de las labores está completamente vacío, no existe resistencia al flujo dentro de estas. Este factor, junto con la alta conductividad hidráulica asignada a las minas, provoca que los niveles piezométricos de PM1 y PM2 se mantengan muy próximos durante el desarrollo del fenómeno de inundación, con diferencias no mayores a 15 metros y que, partir del día 729, se vuelven despreciables. Los valores correspondientes a las curvas de inundación de PM1 y P1M2 se presentan en la Tabla 8.18 (Anexo Y4).

La Figura 5.1 y Figura 5.2 presentan la secuencia de inundación de las labores subterráneas a partir del nivel freático en un tiempo determinado. En estas se observa el rebalse del agua contenida en las labores hacia las zonas aledañas, lo cual respalda los datos obtenidos en los puntos de control de la simulación (La Figura 8.131 y la Figura 8.132 del Anexo Y4 presentan diferentes visualizaciones del mismo proceso).

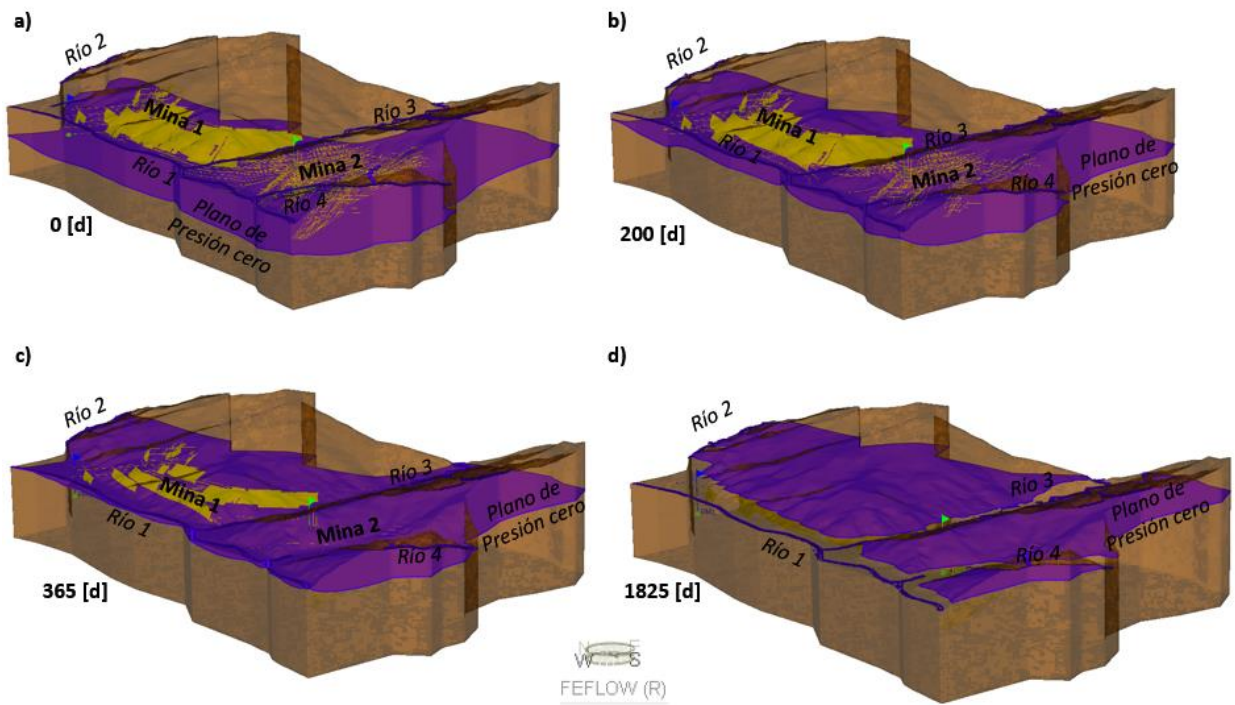


Figura 5.1 Aumento progresivo de la piezometría (plano de presión cero) y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación. Vista interior.

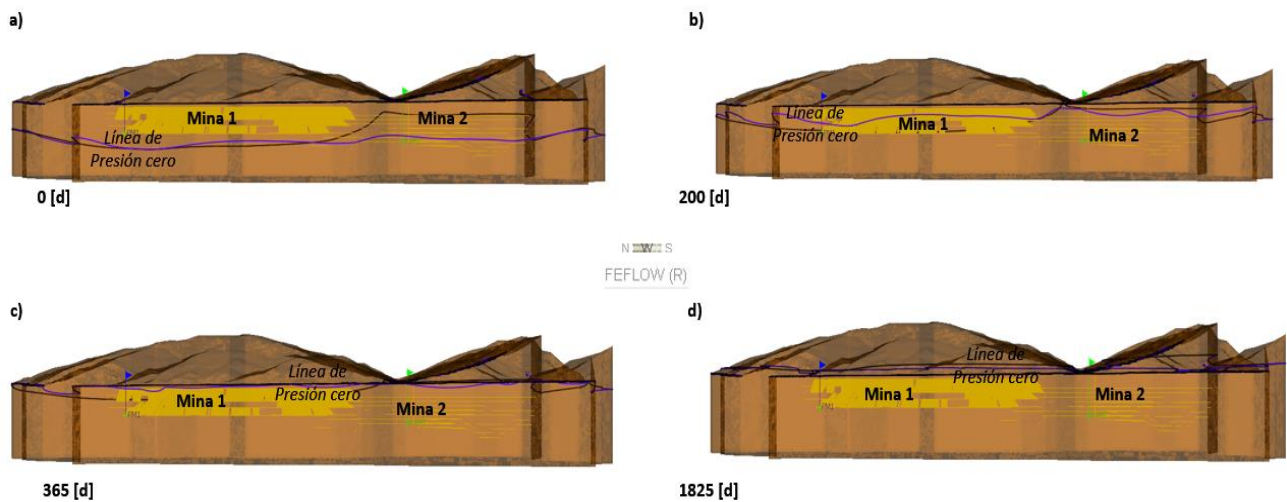


Figura 5.2 Aumento progresivo del nivel freático y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación. Vista interior en eje X (Oeste).

5.2.4. Fenómeno de inundación real v/s inundación simulada

La Figura 5.3 contrasta las curvas de inundación reales con las modeladas y la Figura 8.133 a la Figura 8.135 (Anexo Y5) muestran los gráficos relacionados con el error del modelo respecto a los datos reales. Aunque el modelo no reproduce la realidad con alta precisión, los resultados son considerados aceptables para una calibración manual, dadas las complejidades del problema. Las mayores discrepancias se presentan entre los días 160 y 270, excluyendo el periodo en el que la piezometría de Mina 1 permanece constante. En el rango señalado, se observa un error promedio de 20 metros en los valores reportados por el modelo, así el modelo falla al no poder reproducir el comportamiento cóncavo hacia arriba de los datos reales.

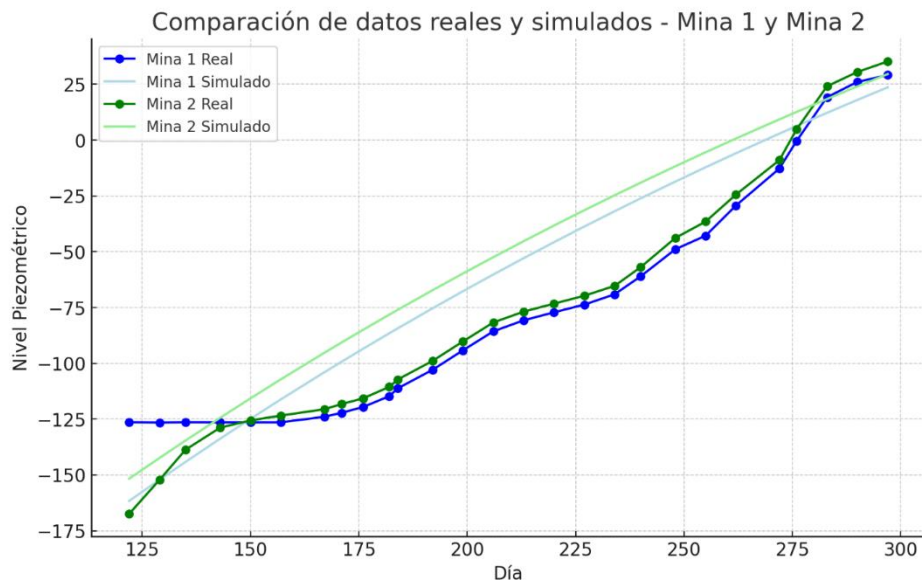


Figura 5.3 Comparación de datos reales v/s simulados en Mina 1 y Mina 2.

Los valores de piezometría real de las minas se mantienen cercanos durante la mayor parte del proceso de inundación, lo cual es replicado en el modelo. No obstante, una excepción corresponde al periodo de piezometría constante de Mina 1 (Figura 5.3), el cual no pudo ser reproducido en el modelo.

Los altos errores mencionados se deben principalmente al supuesto de que todas las labores subterráneas presentan volúmenes completamente vacíos. Además, el modelo no reproduce el comportamiento constante de la piezometría en Mina 1 durante el periodo comprendido entre los días

122 a 157 del fenómeno de inundación, lo cual se atribuye al supuesto del cese total del drenaje de ambas minas en el día 0. También es lógico argumentar que el uso de un valor constante de lluvia útil afectó la concavidad de los resultados del modelo, no obstante, esto se descartó tras realizar pruebas con valores mensuales de lluvia incorporados mediante una serie temporal. Los resultados de dichas pruebas se omiten debido a la extensión del documento, además de que su efecto es despreciable y no contribuye a generar la concavidad hacia arriba que se busca.

A continuación, se expone el fundamento de cómo estos supuestos impactan la concavidad hacia arriba del modelo.

Supuesto de volumen vacío en labores subterráneas: Al asumir que las labores subterráneas están completamente vacías, el fluido no encuentra obstáculos al interior de la mina, lo que genera una curva suave sin cambios bruscos en la piezometría. En la realidad, las labores subterráneas se encuentran parcialmente rellenas (algunas rellenas en su totalidad), ya sea por material de relleno o con escombros. Este efecto puede replicarse en el modelo mediante la asignación de valores de conductividad hidráulica y/o coeficiente de almacenamiento ajustado según la proporción de volumen vacío en las labores subterráneas.

Supuesto de cese total del drenaje de ambas minas en el día 0: En la realidad, existe una holgura entre el cese de drenaje de ambas minas. En particular, Mina 2 detuvo el bombeo de forma gradual (desde el décimo nivel) un año antes que Mina 1, la cual cesó su bombeo en el tiempo referido como día 0. Por su parte, Mina 2 continuó drenando cantidades bajas de fluido incluso después de dicho día. Lo anterior, explica por qué el nivel piezométrico de M1 se mantiene constante entre los días 122 al 157.

Este efecto es difícil de replicar sin una correcta incorporación en el modelo de los tiempos de cese de bombeo y de las cantidades de drenaje de cada mina en un tiempo determinado. Por lo tanto, la opción más viable es incorporar estos desfases de cese de bombeo a través de una serie temporal que regule la desactivación de la condición de contorno de seepage face.

6. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados del modelo son adecuados considerando las condiciones e hipótesis planteadas. Se han logrado representar las características físicas del flujo en las cercanías y al interior de las labores mineras, incluidas las conexiones entre minas. Asimismo, el modelo refleja el rebalse del complejo minero, un fenómeno que también se observaría en la realidad del caso de estudio si se suspendiera el drenaje para el control de los niveles de inundación. Este riesgo de inundación da lugar a que la mina tenga que mantener el bombeo de manera perpetua.

El modelo proporciona información sobre cada labor subterránea (galerías, piques, talleres de explotación, entre otros) o zona de interés (como conexiones entre minas, niveles específicos, etc.), permitiendo su análisis particular. Este enfoque responde a uno de los principales objetivos: generar un modelo que facilite el control tanto general como específico de cada labor minera representada. Este logro se basa en la aplicación de diversas metodologías para la creación de las mallas utilizadas (*.dxf) en la construcción del modelo numérico.

En etapas iniciales, se evaluaron distintas condiciones de contorno para recrear el fenómeno de inundación en las labores mineras. Todas ellas fueron sometidas a pruebas, optándose finalmente por la condición de *seepage face*, dado que ofrece una representación más completa de la realidad. Si bien las otras condiciones de contorno propuestas no logran representar el proceso de inundación, poseen cierta validez teórica en función de los supuestos utilizados, lo que justifica su análisis preliminar.

Propuestas relacionadas con la creación del modelo de mallas:

1. Diseñar el modelo en Rhinoceros, ya que este software permite una mayor flexibilidad y puede generar mallas de mejor calidad que AutoCAD. Esto ayuda a evitar problemas asociados con elementos mal formados, lo que disminuiría el tiempo de cómputo y los errores finales. Además, facilita la creación de mallados menos demandantes computacionalmente.
2. Simplificar la creación de talleres de explotación. La complejidad en las formas de los talleres, debido a la trayectoria irregular de las galerías, suele generar geometrías complejas. Para este método de explotación en particular, la simplificación podría incluir la reducción de los quiebres en las entidades que representan las galerías, disminuyendo su irregularidad.

3. Automatizar tareas repetitivas mediante la creación de códigos que ejecuten procesos en secuencia o realicen operaciones sobre grupos de entidades. Esto evita el trabajo individualizado sobre cada entidad. Un ejemplo práctico es la creación y uso del código Lisp en el Anexo N.
4. Tener en cuenta que la generación de modelos de malla conlleva numerosos errores potenciales, los cuales aumentan con la complejidad del modelo. Por ello, es fundamental establecer un flujo de trabajo previo que contemple los errores más comunes asociados con mallas complejas, identificando sus causas para facilitar su prevención. Este enfoque también implica realizar las simplificaciones necesarias en el diseño.

Aplicaciones y analogías en otras áreas y casos de estudio:

1. La metodología empleada en la creación del modelo puede ser adaptada y aplicada a diversas problemáticas ingenieriles que requieran evaluaciones mediante métodos numéricos y la generación de modelos de malla. En este sentido, los modelos de malla desarrollados y la metodología utilizada pueden, con las modificaciones pertinentes, ser empleados en otras áreas como geomecánica, entre otras. Cabe destacar que la generación de modelos de mallas para otros tipos de minería, con zonas de explotación menos irregulares, facilitaría significativamente la realización de los proyectos. Por ejemplo, sería menos complejo elaborar modelos para métodos como block caving, room and pillar, o minería a cielo abierto, entre otros, siempre que el nivel de detalle del proyecto sea similar al presentado en este documento, dado que estas formas de explotación suelen ser más regulares en su geometría.

Finalmente, se espera que este trabajo sea una herramienta útil para aquellos lectores que enfrenten problemas de naturaleza similar, facilitando y agilizando sus procesos. Dado que una parte significativa del contenido se encuentra en los anexos, se recomienda su revisión. Se agradece al lector su interés en esta memoria, confiando en que el contenido expuesto contribuya al desarrollo de soluciones en problemáticas similares.

7. Referencias

1. Ta, D., Cao, S., Steyl, G., Yang, H., & Li, Y. (2019). Prediction of groundwater inflow into an iron mine: A case study of the Thach Khe iron mine, Vietnam. *Mine Water and the Environment*, 38(2), 310–324. <https://doi.org/10.1007/s10230-019-00595-4>
2. Álvarez, R., Ordóñez, A., García, R., & Loredó, J. (2018). An estimation of water resources in flooded, connected underground mines. *Engineering Geology*, 232, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.016>
3. Wolkersdorfer, C. (2008). *Water management at abandoned flooded underground mines*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77331-3>
4. Younger, P. L., & Adams, R. (1999). *Predicting mine water rebound*. Environment Agency. <https://doi.org/10.13140/2.1.4805.5681>
5. Younger, P. L. (1999). Pronóstico del ascenso del nivel freático en minas subterráneas. *Boletín Geológico y Minero*, 110(4), 407–422. <http://doc.igme.es/BusquedaBoletines/BoletinCons.asp>
6. Environmental law alliance worldwide. (2010). *Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros* (Primera Ed). Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW).
7. Younger, P. L. (2016). A simple, low-cost approach to predicting the hydrogeological consequences of coalfield closure as a basis for best practice in long-term management. *International Journal of Coal Geology*, 164, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.002>
8. Loredó, J., Ordóñez, A., Jardón, S., & Álvarez, R. (2011). Mine water as geothermal resource in Asturian coal mining basins (NW Spain). *Proceedings, 11th International Mine Water Association Congress – Mine Water – Managing the Challenges*, 177 – 181.
9. Menéndez, J., & Loredó, J. (2020). Mine water in the closure of a coal basin: From waste to potential resources. In *Frontiers in Water-Energy-Nexus—Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for Environmental Sustainability* (pp. 301–304). https://doi.org/10.1007/978-3-030-13068-8_75

10. Farr, G., Busby, J., Wyatt, L., Crooks, J., Schofield, D. I., & Holden, A. (2020). The temperature of Britain's coalfields. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-109>
11. Klinger, C., Charmoille, A., Bueno, J., Gzyl, G., & Súcar, B. G. (2012). Strategies for follow-up care and utilisation of closing and flooding in European hard coal mining areas. *International Journal of Coal Geology*, 89, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.008>
12. Loredó, C., Roqueñí, N., & Ordóñez, A. (2016). Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *International Journal of Coal Geology*, 164, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
13. Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea Tomo I* (Segunda Ed). Ediciones Omega.
14. Bergadá Granyó, J. M. (2017). *Mecánica de fluidos: Breve introducción teórica con problemas resueltos* (Tercera Ed). Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica.
15. De las Heras Jiménez, S. (2012). *Mecánica de fluidos en ingeniería* (Primera Ed). Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica. <https://books.google.cl/books?id=jf9pBQAAQBAJ>
16. Diersch, H.-J. G. (2014). *FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
17. Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport* (Segunda Ed). Elsevier Science.
18. Neupane, P. K., Mondal, N. C., & Manglik, A. (2020). Envisaging the sustainability of an aquifer by developing groundwater flow model for a part of Choutuppal Mandal, Nalgonda district, Telangana, India. *Nepal Journal of Science and Technology*, 19(1), 222–233. <https://doi.org/10.3126/njst.v19i1.29824>

19. DHI WASY. (2020). *Training Manual FEFLOW 7.3*.
20. Sánchez San Román, F. J. (2017). *Hidrología superficial y subterránea*. Universidad de Salamanca.
21. Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2008). *Fundamentos de hidrología*. Mundi-Prensa Libros.
22. Pérez-Trejo, L., Méndez Sánchez, A., & Paniagua Mercado, A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos. *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 237–245. https://www.researchgate.net/publication/41847100_Determinacion_de_la_viscosidad_de_fluidos_newtonianos_y_no_newtonianos_una_revision_del_viscosimetro_de_Couette
23. Keith Todd, D., & W. Mays, L. (2005). *Groundwater Hydrology* (B. Zobrist & J. Welter, Eds.). John Wiley & Sons, Inc.
24. DHI WASY. (n.d.). *FEFLOW 7.2 Documentation*. Retrieved June 9, 2023, from http://www.feflow.info/html/help72/feflow/02_News/news.html
25. DHI WASY. (n.d.). *FEFLOW-White Papers - Vol. III*.
26. DHI WASY. (2016). *FEFLOW 7.0 User Guide*.
27. DHI WASY. (n.d.). *FEFLOW 7.2 DOCUMENTATION-Fluid-Transfer BC*. Retrieved June 9, 2023, from http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09_Parameters/Boundary_Conditions/Flow/fluid_transfer_bc.html
28. British Columbia Ministry of environment. (2012). *Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities*.
29. Custodio, E., & LLamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea Tomo II* (Segunda Ed). Ediciones Omega.

30. Si, H. (2020). *TetGen: A Quality Tetrahedral Mesh Generator and 3D Delaunay Triangulator*.
31. Thum, P. (2009). *One for all- the new SAMG solver control within FEFLOW*.
32. Autodesk. (n.d.). *Help Autodesk*. Retrieved June 4, 2023, from <https://help.autodesk.com/view/ACD/2024/ENU/>
33. Twiss, R. J., & Moores, E. M. (2006). *Structural Geology*. W. H. Freeman, 2006.
34. Herrera Herbert, J. (2020). *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.62726>
35. Saez Garcia, E., LLera Lopez, J. L., & Embil Martinez, E. (n.d.). *Metodos de explotación para capas de carbón inclinadas y verticales*.
36. Esri. (n.d.). *Dirección de flujo*. Retrieved December 29, 2023, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/flow-direction.htm>
37. Esri. (n.d.). *Cómo funciona Dirección de flujo*. Retrieved December 29, 2023, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.1/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>
38. DHI WASY. (n.d.). *FEFLOW-White Papers - Vol. I*.
39. Carlos Rivera Villarreyes. (2024, January 12). *Incomplete satisfaction of flow constraints within 30 iterative cycles at time = 1.0000000e + 00 [d]. Termination of cycling*. https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:groupPost:2879124-7161864332543250432?commentUrn=urn%3Ali%3Acomment%3A%28groupPost%3A2879124-7161864332543250432%2C7162870418624753664%29&dashCommentUrn=urn%3Ali%3Afsd_comment%3A%287162870418624753664%2Curn%3Ali%3AgroupPost%3A2879124-7161864332543250432%29

40. ASTM International. (2010). *ASTM D5447 - 04 Standard guide for application of a groundwater flow model to a site-specific problem*. <https://doi.org/10.1520/D5447-17>
41. Barnett, B., Townley, LR., Post, V., Evans, RE., Hunt, RJ., & Peeters, L. (2012). *Australian groundwater modelling guidelines*.
42. Dhatt, G., Touzot, G., & Lefrançois, E. (2012). *Finite Element Method*. John Wiley & Sons, Inc.
43. Du, Q., Faber, V., & Gunzburger, M. (1999). Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms. *SIAM Review*, *41*(4), 637–676. <https://doi.org/10.1137/S0036144599352836>
44. Shewchuk, J. R. (2002). *What is a good Linear Finite Element? Interpolation, Conditioning, Anisotropy and Quality measures (PrePrint)*.
45. Autodesk. (n.d.). *Drawing file format compatibility in AutoCAD*. Retrieved June 4, 2023, from <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/AutoCAD-drawing-file-format.html>
46. Esri. (n.d.). *Shapefiles*. Retrieved June 4, 2023, from <https://enterprise.arcgis.com/es/portal/10.4/use/shapefiles.htm>
47. Esri. (n.d.). *Archivos de georreferenciación para datasets ráster*. Retrieved June 4, 2023, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/world-files-for-raster-datasets.htm>
48. Esri. (n.d.). *Información general sobre georreferenciación*. Retrieved June 9, 2023, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm>
49. Esri. (n.d.). *Crear un nuevo shapefile*. Retrieved June 9, 2023, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/shapefiles/creating-a-new-shapefile.htm>
50. Esri. (n.d.). *¿Qué son los datos ráster?* Retrieved June 9, 2023, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

51. Esri. (n.d.). *Información general de la caja de herramientas Análisis*. Retrieved June 9, 2023, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/analysis/an-overview-of-the-analysis-toolbox.htm>

52. Esri. (n.d.). *Exportar entidades a dibujos CAD*. Retrieved June 9, 2023, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/cad/exporting-features-to-cad-drawings.htm#:~:text=En%20un%20documento%20de%20mapa,CAD%20en%20el%20men%C3%BA%20contextual.>

8. Anexos

8.1. Índice de figuras de anexos

Figura 8.1 Volumen elemental representativo y dominio de definición: Volumen elemental representativo (a), REV por sus siglas en inglés y su dominio de definición según factor de escala (b). Donde u es la velocidad del fluido según el eje X (análogamente v y w son las velocidades en los ejes Y, Z respectivamente) y ρ la densidad en el eje respectivo.	85
Figura 8.2 Principales pasos del FEM: a) WRM en todo el sistema de forma continua. b) Subdivisión del sistema y aplicación de WRM para cada elemento. c) Resolución e interpolación para cada elemento. d) Obtención del sistema de ecuaciones lineales para cada elemento. e) Ensamblaje. d) Obtención de la variable de interés para todo el dominio	90
Figura 8.3 Triangulación de Delaunay. a) Nube de puntos utilizados en la generación de una malla de Delaunay 2D. b) Triangulación de Delaunay 2D completa.	92
Figura 8.4 Teselación de Voronoi (a) y Teselación centroidal de Voronoi (b). Los círculos verdes corresponden a los puntos generadores y los puntos rojos a los centroides de las regiones de Voronoi correspondientes.....	94
Figura 8.5 Topografía TIN del caso de estudio.....	98
Figura 8.6 Gráfico de valores climatológicos para un año hidrológico medio de la zona de estudio.	99
Figura 8.7 Método de testeros. a) Vista isométrica Suroeste b) Vista en planta c) Vista frontal. ...	100
Figura 8.8 Ejemplo de contenidos y visualización de los planos de labores específicos. N1 y N2 corresponden los niveles 1 y 2 respectivamente, z_1 y z_2 corresponden a las cotas respectivas con $z_1 < z_2$	102
Figura 8.9 Proceso de georreferenciación de cartas geológicas.....	104
Figura 8.10 Vectorización de cartas geológicas georreferenciadas (de buena calidad).....	105
Figura 8.11 Filtro de shapefiles de información secundaria inicial.	106

Figura 8.12 Migración de principales shapefiles hacia AutoCAD.....	107
Figura 8.13 Referenciación de planos de labores (AutoCAD).....	108
Figura 8.14 Contextualización del caso de estudio	109
Figura 8.15 Proyección en planta de los límites del modelo conceptual (incluyendo el complejo minero y estructuras geológicas).	110
Figura 8.16 Direcciones de flujo superficial generado en ArcGIS Desktop.	111
Figura 8.17 Ejemplo de zonas a corregir mediante alargue (a) y recorte (b).	113
Figura 8.18 Correcciones generales y topológicas de los planos de labores específicos.	113
Figura 8.19 Simplificación sección transversal de galerías. a) Sección real con nodos ilustrativos b) Sección simplificada con nodos reales.	114
Figura 8.20 Creación de entidades solidas. a) Vista isométrica de entidades lineales. b) Vista isométrica de entidades sólidas, posterior a la unión de sólidos. c) Vista en planta de entidades sólidas, posterior a la unión de sólidos.	116
Figura 8.21 Creación de entidades tipo sólido y agrupación por zonas de interés.	117
Figura 8.22 Agrupación y ajuste de guías. a) Distancias de seguridad de Nivel 1 de M1. b) Ajuste de guía debido a distancia de seguridad de radio de 10 [m]. c) Ajuste de guía debido a distancia de seguridad de radio de 50 [m]. d) Resultado del ajuste y clasificación de guías (Nivel 1 de M1).	119
Figura 8.23 Generación de entidades solidas de ZE. a) Entidades solidas asociadas a las guías de la ZE. b) Vista en planta de ajuste recto y superficies limitantes de la ZE. c) Vista isométrica de superficies limitantes de la ZE. d) Resultado al utilizar la herramienta Esculpir (generación de entidad solida).	120
Figura 8.24 Delimitación de entidades de superficie. a) Vista en planta de conexión no PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1. b) Vista isométrica de conexión no PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1. c) Vista	

en planta de conexión PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1. d) Vista isométrica de conexión PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1.	122
Figura 8.25 Labores de M1 y zonas de interés como entidades de superficie. a) Vista en planta b) Vista frontal c) Vista isométrica.	123
Figura 8.26 Labores de M2 y zonas de interés como entidades de superficie (se omiten ZE). a) Vista en planta b) Vista frontal c) Vista isométrica.	124
Figura 8.27 Supermesh de modelo estructurado.	129
Figura 8.28 Vista en planta de modelo (FEM) estructurado.	130
Figura 8.29 Modelo estructurado con información topográfica.	130
Figura 8.30 Reconstrucción de topografía en AutoCAD Civil 3D a través de nube de puntos extraída de FEFLOW (a) y generación de superficie TIN (b).	131
Figura 8.31 Dominio y malla topográfica como entidad sólida de AutoCAD. a) Vista isométrica b) Vista en planta. c) Vista frontal.	132
Figura 8.32 Zona de influencia geomecánica y complejo minero. a) Vista isométrica. b) Vista isométrica inferior. c) Vista frontal. d) Vista lateral izquierda.	133
Figura 8.33 Dominio, zona fracturada y complejo minero del modelo como entidades superficiales independientes en AutoCAD. a) Vista isométrica. b) Vista frontal. c) Vista en planta.	134
Figura 8.34 Resultado de ajuste manual en cercanías de la intersección de piques con topografía del modelo (AutoCAD). a) Vista isométrica de las mallas finales (complejo minero y dominio del modelo). b) Vista isométrica de la zona de ajuste manual de M1. c) Vista isométrica de las zonas de ajuste manual de M2.	136
Figura 8.35 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie A.	140
Figura 8.36 Histograma de número de condición de los Modelos Serie A.	140

Figura 8.37 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie A, sin incluir elementos desactivados.	141
Figura 8.38 Histograma de número de condición de los Modelos Serie A, sin incluir elementos desactivados.	141
Figura 8.39 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie A.	142
Figura 8.40 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie A.	142
Figura 8.41 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie A sin incluir elementos desactivados.	143
Figura 8.42 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie A sin incluir elementos desactivados.	143
Figura 8.43 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie B.	145
Figura 8.44 Histograma de número de condición de los Modelos Serie B.	146
Figura 8.45 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie B, sin incluir elementos desactivados.	146
Figura 8.46 Histograma de número de condición de los Modelos Serie B, sin incluir elementos desactivados.	147
Figura 8.47 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie B.	147
Figura 8.48 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie B.	148
Figura 8.49 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie B sin incluir elementos desactivados.	148
Figura 8.50 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie B sin incluir elementos desactivados.	149

Figura 8.51 Asignación de parámetro de precipitación útil.	152
Figura 8.52 Precipitación útil asignada a los elementos superficiales del Modelo 1 Serie B.	152
Figura 8.53 Vista en planta de las conductividades hidráulicas del Modelo 1 Serie B.	153
Figura 8.54 Porosidades asignadas mediante distribución elemental. Común a todos los modelos.	154
Figura 8.55 Creación de selección de nodos pertenecientes a los ríos del modelo. Modelo 1 Serie B. a) Selección de nodos en topografía. b) Selección de nodos a 25 [m] de radio de las líneas que definen los ríos y profundidad hasta -700 [m]. c) Nodos que definen los ríos, resultado de la intersección de los a) y b).....	155
Figura 8.56 Valores de conductancia asignados al modelo. Modelo 1 Serie B.	156
Figura 8.57 Balance hídrico Modelo 1-k ₁ -A, régimen estacionario.	157
Figura 8.58 Balance hídrico Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	158
Figura 8.59 Grafico de nivel piezométrico v/s tiempo. Modelo 1-k ₁ -A, régimen estacionario.	158
Figura 8.60 Grafico de nivel piezométrico v/s tiempo. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	159
Figura 8.61 Nivel freático. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	159
Figura 8.62 BCs del complejo minero, resultado del régimen estacionario, Modelo 1-k ₁ -B.	160
Figura 8.63 Vista en planta de 30 isosuperficies piezométricas (a) y cercanías de piques de Mina 1 (b) y Mina 2 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	161
Figura 8.64 Vista en planta de 52 isosuperficies piezométricas (a) y cercanías de piques de Mina 1 (b) y Mina 2 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	162
Figura 8.65 Vista isométrica de 30 isosuperficies piezométricas y cercanías piques Mina 2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	163

Figura 8.66 Vista isométrica de 52 isosuperficies piezométricas y cercanías pique Mina 1 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	163
Figura 8.67 Isolíneas y franjas de piezometría. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	164
Figura 8.68 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista de la cara inferior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	165
Figura 8.69 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = -500$ [m] y punto medio local.	166
Figura 8.70 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en eje X indicado en la figura (PM1).....	167
Figura 8.71 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en eje X indicado en la figura.	167
Figura 8.72 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = 87.5$ [m]	168
Figura 8.73 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = 0$ [m]	169
Figura 8.74 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = -290$ [m]	170
Figura 8.75 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = -500$ [m]	171
Figura 8.76 Cortes para el seguimiento de datos, en malla de elementos finitos.....	172
Figura 8.77 Seguimiento de datos de piezometría, corte I-I' Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	173

Figura 8.78 Seguimiento de datos de piezometría, corte II-II' Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	174
Figura 8.79 Seguimiento de datos de piezometría, corte III-III' Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	175
Figura 8.80 Seguimiento de datos de piezometría, corte IV-IV' Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	176
Figura 8.81 Seguimiento de datos de piezometría, corte V-V' Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	177
Figura 8.82 Rate Budget, Mina 1-N1 (a) y zum en cercanías de PM1 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	178
Figura 8.83 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N1). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	179
Figura 8.84 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N1 (a). Zum en piques de M2 (b) y rampa de conexión N7-N8 de M2 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	180
Figura 8.85 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N1 con niveles de mina de referencia. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	181
Figura 8.86 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 1. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	181
Figura 8.87 Rate Budget, Mina 1-N2 (a) y zum en cercanías de PM1 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	182
Figura 8.88 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N2). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	183

Figura 8.89 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N2 (a). Zum en piques de M2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario	184
Figura 8.90 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N2 con niveles de mina de referencia. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	185
Figura 8.91 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 2. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	185
Figura 8.92 Rate Budget, Mina 1-N3 (a). Zum en cercanías de PM1 (b) y en conexión M1-N3 con M2-N2. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	186
Figura 8.93 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N3). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	187
Figura 8.94 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N3 (a). Zum en conexión niveles 5 de M1 y M2. Zum en piques de M2 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	187
Figura 8.95 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N3 con niveles de mina de referencia. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	188
Figura 8.96 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 3. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	188
Figura 8.97 Vectores de velocidad de Darcy. Conexión directa entre M1-N3 y M2-N2. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	189
Figura 8.98 Rate Budget en zum en zona de conexión M1-N3 con M2-N2 (a) (según Figura 8.92) y rate budget de la conexión (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	190
Figura 8.99 Líneas de flujo afluentes (backward) de sección de conexión entre M1-N3 y M2-N2 (a) y zum en la sección (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	190

Figura 8.100 Líneas de flujo (forward) de sección de conexión entre M1-N3 y M2-N2. Líneas de flujo en cercanías a piques de M2 (a) y líneas de flujo en cercanías de las rampas de M2 (b) Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	191
Figura 8.101 Rate Budget, Mina 1-N4 (a). Zum en cercanías de PM1 (b). Zum en trayecto final de rampa de M1, conexión entre M1-N3 con M1-N4 (c). Zum en conexión indirecta entre M1 y M2 (d). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	192
Figura 8.102 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N4). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	192
Figura 8.103 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N4. Zum en piques de M2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	193
Figura 8.104 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 4. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	194
Figura 8.105 Rate Budget, rampa de conexión de M1-N3 con M1-N4. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	194
Figura 8.106 Vectores de velocidad de Darcy. M1, Rampa de conexión entre N3 y N4. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	195
Figura 8.107 Vectores de velocidad de Darcy. Conexión indirecta entre M1-N4 y M2-N3, mediante ZE 7. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	196
Figura 8.108 Rate Budget conexión (indirecta) de ZE 7 de M1 con galería de M2-N3. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	196
Figura 8.109 Rate Budget, Mina 1-N5 (a). Zum en cercanías de PM1 (b). Zum en conexión M1-N5 con M2-N5 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	197
Figura 8.110 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N5). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	198

Figura 8.111 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N5. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	198
Figura 8.112 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 5. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	199
Figura 8.113 Vectores de velocidad de Darcy. Conexión directa entre M1-N5 y M2-N5. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	200
Figura 8.114 Rate Budget, Mina 2-N1 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	201
Figura 8.115 Rate Budget, Mina 2-N2 (a). Zum en conexión directa con M1-N3 (b). Zum en cercanías de Piques M2 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	202
Figura 8.116 Rate Budget, Mina 2-N3 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	203
Figura 8.117 Rate Budget, Mina 2-N4 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario	204
Figura 8.118 Rate Budget, Mina 2-N5 (a). Zum en conexión directa con M1-N5 (b). Zum en cercanías de Piques M2 (c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	205
Figura 8.119 Rate Budget, Mina 2-N6 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	206
Figura 8.120 Rate Budget, Mina 2-N7 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Zum en cercanías de rampa de acceso a M2-N8(c). Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	207
Figura 8.121 Vectores de velocidad de Darcy. PM2, cercanías de piques de M2 y Nivel 7. Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.	208

Figura 8.122 Rate Budget, Mina 2-N8 (a). Zum en cercanías de rampas de acceso a M2-N8 y M2-N9 (b). Modelo 1- k_1 -B, régimen estacionario.....	209
Figura 8.123 Vectores de velocidad de Darcy. PM2, cercanías de rampas N7-N8 y N8-N9 de M2. Modelo 1- k_1 -B, régimen estacionario.	210
Figura 8.124 Rate Budget, Mina 2-N9 (a). Zum en cercanías de rampas de acceso a M2-N9 y M2-N10 (b). Modelo 1- k_1 -B, régimen estacionario.....	210
Figura 8.125 Rate Budget, Mina 2-N10 (a). Zum en cercanías de rampas de acceso a M2-N9 y M2-N10 (b). Modelo 1- k_1 -B, régimen estacionario.....	211
Figura 8.126 Vectores de velocidad de Darcy. PM2, cercanías de rampas N8-N9 y N9-N10 de M2. Modelo 1- k_1 -B, régimen estacionario.	212
Figura 8.127 Flujo de Darcy (en elementos). Sección M2. Nótese que las altas velocidades coinciden con las direcciones preferenciales del flujo. Modelo 1- k_1 -B, régimen estacionario.	213
Figura 8.128 Balance hídrico, régimen transitorio calibrado.....	222
Figura 8.129 Nivel piezométrico simulado en función del tiempo. PM1 en azul y P1M2 en verde. Modelo transitorio calibrado.	223
Figura 8.130 Time steps simulación régimen transitorio. Modelo calibrado.....	224
Figura 8.131 Aumento progresivo del nivel freático y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación.	226
Figura 8.132 Aumento progresivo del nivel freático y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación. Vista interior.....	227
Figura 8.133 Error absoluto de la simulación.	228
Figura 8.134 Error relativo de la simulación (en porcentaje).	228

Figura 8.135 Velocidades reales v/s simuladas (comparadas en intervalos de datos reales de piezometría).....	229
--	-----

8.2. Índice de tablas de anexo

Tabla 8.1 Valores climatológicos para un año hidrológico medio.....	98
Tabla 8.2 Cotas y longitudes de niveles de minas.....	100
Tabla 8.3 Zonas de interés y cantidad de marcadores de región.....	125
Tabla 8.4 Parámetros malla de entrada del complejo minero	127
Tabla 8.5 Parámetros malla de entrada del dominio del modelo	135
Tabla 8.6 Parámetros de entrada de mallas FEM.....	137
Tabla 8.7 Principales resultados en generación de mallas FEM.....	150
Tabla 8.8 Valores de conductividad hidráulica para los diferentes modelos.....	153
Tabla 8.9 Nomenclatura de identificación de modelos.....	156
Tabla 8.10 Flujo saliente de labores subterráneas del Complejo Minero, Modelo 1-k ₁ -B, régimen estacionario.....	213
Tabla 8.11 Niveles piezométricos del proceso de inundación real.....	216
Tabla 8.12 Ejemplo de valores de sensibilidad relativa obtenidos (<i>Si</i>).....	218
Tabla 8.13 Ejemplo de valores de sensibilidad promedio obtenidos (<i>S</i>).....	218
Tabla 8.14 Velocidades de ascenso de piezometría a partir de datos reales (velocidades acotadas en colores según criterios del autor).....	219

Tabla 8.15 Subdivisiones de macizo alterado en radio de 10 metros de labores subterráneas (colores relacionados con velocidades de Tabla 8.12).....	220
Tabla 8.16 Parámetros hidráulicos resultantes de calibración manual (sin subdivisiones de zona fracturada).	220
Tabla 8.17 Coeficiente de almacenamiento en zonas de ajuste (subdivisiones de zona fracturada en radio de 10 metros alrededor de labores mineras).....	221
Tabla 8.18 Piezometría en función del tiempo del proceso de inundación de las minas modeladas (5 años).	224

Anexo A Conceptos básicos hidrología de subterránea.

Anexo A1. Definición y clasificación de unidades hidrogeológicas fundamentales

Las unidades hidrogeológicas son sistemas físicos que poseen cierto funcionamiento, regulado por las extracciones, recargas, etc. Se pueden clasificar según su capacidad para almacenar y transmitir agua a través de esta ^[13,20]. Así surgen las definiciones de acuífero, acuicludo, acuitardo y acuífugo. Acuífero es aquella formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y permite fácilmente su circulación a través de sus poros o grietas. Al contrario, un acuicludo puede contener agua en su interior, pero, no la transmite, a diferencia de un acuitardo, el cual, puede contener cantidades apreciables de agua y permite su transmisión de forma muy lenta, facilitando una recarga vertical de otras unidades geológicas. Por último, un acuífugo no permite el almacenamiento de agua ni la transmisión de esta.

Otra clasificación ^[13,20,23] surge según la presión hidrostática del agua dentro de la unidad hidrogeológica, dividiéndose en acuíferos confinados, no confinados y semiconfinados. Los acuíferos libres (no confinados o freáticos) son aquellos que poseen una superficie libre del agua en su interior en contacto directo con el aire y por lo cual se encuentran a presión atmosférica. Por el contrario, en un acuífero confinado (cautivo o a presión), el agua de su interior se encuentra a una presión mayor a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros y huecos de su formación geológica. De forma similar, un acuífero semiconfinado (semicautivo), puede considerarse un caso particular de los acuíferos

cautivos en el que el techo (parte superior) o el muro (parte inferior) que encierra la unidad hidrogeológica corresponda a un acuitardo.

Adicionalmente se pueden clasificar según el origen de la unidad hidrogeológica, esto es si su comportamiento se debe a los poros, grietas o a la karstificación del medio ^[13,20].

Anexo A2. Ley de Darcy

El movimiento de agua en medios porosos (flujo de agua subterráneo) viene determinado por la Ley de Darcy (ley macroscópica) ^[13,21], la cual establece una proporcionalidad entre el gradiente hidráulico y la velocidad de Darcy de un flujo, ecuación (1) ^[13], donde la velocidad de Darcy por definición es la velocidad resultante de la división del caudal que pasa por una superficie perpendicular al flujo por el área total de dicha superficie, ello en base a la definición de caudal indicada en la ecuación (13) ^[13,20] y el gradiente hidráulico es un vector que indica la dirección y magnitud de la máxima variación para el nivel piezométrico a lo largo del flujo, ecuación (14) ^[13,20], donde el nivel piezométrico, ecuación (15), para un régimen laminar, representa la energía por unidad de peso del agua ^[13,20,21] y debido a que el flujo siempre se dirige de un mayor nivel energético a uno menor, el gradiente hidráulico tendrá sentido contrario a la velocidad, a esto se debe el signo negativo en la ecuación (1) ^[13,20].

De esta forma la ley de Darcy define un coeficiente de proporcionalidad denominado conductividad hidráulica como una propiedad macroscópica del medio cuando interviene un gran número de poros ^[13,20,21].

Donde, i = gradiente hidráulico [adimensional], k = conductividad hidráulica [LT^{-1}] y \mathbf{v} = velocidad de Darcy [LT^{-1}] ^[13,20].

$$Q = A \cdot \mathbf{v} \quad (13)$$

Donde, Q = caudal [L^3T^{-1}] y A = área de superficie por la cual pasa el flujo [L^2] ^[13,20].

$$\mathbf{i} = -\nabla h \quad (14)$$

Donde, h = nivel piezométrico [L] y ∇ el operador gradiente^[13,16,17], se puede demostrar que en régimen laminar h se expresa como^[13,20];

$$h = \frac{p}{g \cdot \rho} + z \quad (15)$$

Donde, p = presión [$ML^{-1}T^{-2}$], ρ = densidad del fluido [ML^{-3}], g = aceleración de gravedad LT^{-2} y z = altura [L] del punto en cuestión respecto a un plano horizontal de referencia (generalmente la base de la unidad hidrogeológica), además el primer sumando de la ecuación (15) corresponde a la altura de fluido que ingresa a un tubo vertical (piezómetro) colocado en el medio saturado^[13,20].

La ley de Darcy solo es válida para régimen laminar^[13,20] (régimen gobernado por las fuerzas viscosas^[22]). El régimen es determinado mediante el número de Reynolds (Re), para un medio poroso resulta en lo indicado en la ecuación (16)^[13,20], así en el presente estudio solo se abordan flujos subterráneos con $Re < 4$ lo que corresponde a un régimen laminar^[13].

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (16)$$

Donde, Re = Número de Reynolds [adimensional], d = Tamaño medio de las partículas (d_{50}) [L] y μ = Viscosidad dinámica [$ML^{-1}T^{-1}$].

Se dice que un fluido es Newtoniano si la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es lineal, de lo contrario es un flujo no Newtoniano^[22]. En el presente documento solo se tratará con fluidos Newtonianos.

Anexo A3. Parámetros hidrológicos fundamentales

Porosidad y porosidad efectiva: Un medio poroso está formado por un agregado de granos, entre los cuales existen espacios vacíos, llamados poros, los cuales pueden ser ocupados por fluidos, así, la porosidad de un medio se define como la relación entre el volumen de vacíos (poros) y su volumen total^[13,23].

En cambio, la porosidad eficaz de un medio se define como la relación entre el volumen de poros interconectados y su volumen total, o de forma análoga, es la relación entre el volumen de fluido liberado por la acción de la gravedad y su volumen total ^[13,20].

Tanto la porosidad y la porosidad efectiva son parámetros adimensionales ^[13,20], en los siguientes capítulos del presente texto se referirá como porosidad y denotará con m a la porosidad efectiva, salvo que se indique lo contrario.

Conductividad hidráulica y transmisividad: La conductividad hidráulica define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada ^[13].

Físicamente es un tensor simétrico y positivo que representa la facilidad que un cuerpo poroso ofrece a ser atravesado por un fluido, ecuación (17) ^[13], esta propiedad depende tanto del medio, como del fluido, por ello se define la permeabilidad intrínseca o coeficiente de permeabilidad, el cual solo depende de las propiedades del medio (por ejemplo, la porosidad) ^[13,20].

$$k = k_0 \cdot g \cdot \frac{\rho}{\mu} \quad (17)$$

Donde, k = Conductividad hidráulica [LT^{-1}], k_0 = Coeficiente de permeabilidad [L^2].

La conductividad hidráulica permite definir el concepto de *transmisividad*, el cual representa el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija ^[13,23]. Matemáticamente corresponde al producto de la permeabilidad hidráulica con el espesor del medio, ecuación (18), y físicamente es la capacidad que tiene el medio para hacer circular el agua de forma horizontal ^[20,22,23].

$$T = b \cdot k \quad (18)$$

Donde, T = transmisividad [L^2T^{-1}], b = Espesor del medio (acuífero) [L].

Coeficiente de almacenamiento y coeficiente de almacenamiento específico: El coeficiente de almacenamiento específico es de gran importancia en el régimen transitorio y se define como la

variación de masa por unidad de volumen en un elemento de volumen medio (dV) al variar la presión una unidad ^[13,20], se puede demostrar que lo dicho anteriormente equivale a la ecuación (19), donde el primer sumando de la ecuación representa el agua procedente de la compresión del acuífero y el segundo sumando la procedente a la expansión del agua, efectos que se deben a la elasticidad del acuífero ^[13,20].

$$S' = \rho(\alpha + m\beta) \quad (19)$$

Donde, S' = Coeficiente de almacenamiento específico [T^2L^{-2}], m = Porosidad efectiva [adimensional], α = Compresibilidad vertical del medio [LT^2M^{-1}] y β = Compresibilidad del agua [LT^2M^{-1}].

A través de S' se define el coeficiente de almacenamiento, ecuación (20), el cual representa la altura de agua liberada por el medio al descender el nivel piezómetro una unidad ^[13,20], en otras palabras, es el volumen de agua liberado por un prisma vertical del acuífero de sección unidad y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico ^[13,20,23].

$$S = g \cdot b \cdot S' \quad (20)$$

Donde, S = Coeficiente de almacenamiento [adimensional] y b = Espesor del medio [L].

La ecuación (20) se aplica al caso de acuíferos confinados. En el caso de acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es aproximado a la porosidad efectiva, debido a que toda variación de altura piezométrica se traduce en una variación del nivel libre de agua a diferencia del caso de acuíferos confinados, donde la variación del nivel piezométrico no necesariamente implica un cambio en el nivel libre, pero sí implica un cambio de presión ^[13,20].

Anexo A4. Principio de conservación de masa y supuesto de continuidad

El principio de conservación de masa se basa en el axioma de Lavoisier el cual indica que “nada se crea ni se destruye”, a partir de ello se define la ecuación de balance hidráulico, ecuación (21), la cual es aplicable para cualquier unidad o región de esta, para un tiempo cualquiera ^[13]. Dicha ecuación

indica que las entradas de fluido serán iguales a las salidas más (o menos) el almacenamiento de fluido en la unidad ^[13,16,20].

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta\text{Almacenamiento} \quad (21)$$

Notar que en la ecuación (21) la variación de almacenamiento puede despreciarse cuando la unidad de tiempo es lo suficientemente grande como para alcanzar el equilibrio hidráulico del sistema ^[13].

Un medio puede suponerse continuo desde el punto de vista matemático si sus propiedades lo son, esto es si las propiedades del medio no varían bruscamente ^[13], lo que está estrechamente relacionado con el dominio definido para el estudio, en particular, un medio poroso no puede considerarse continuo para un dominio microscópico o para un dominio heterogéneo macroscópico ^[13,16], por ello las demostraciones de las ecuaciones fundamentales del flujo en medios porosos requieren el supuesto de un volumen dV llamado volumen elemental representativo, tal que este sea lo suficientemente grande para que los efectos microscópicos del flujo y las fluctuaciones de los promedios de sus parámetros (velocidad, porosidad, etc.), sean despreciables y a su vez debe ser lo suficientemente pequeño para no caer en un dominio de heterogeneidad macroscópica ^[13,16], la Figura 8.1 ejemplifica el volumen elemental representativo y el dominio para el cual está definido, tomando como ejemplo la porosidad del medio. Si esto se cumple para las distintas propiedades del flujo en medio poroso, se pueden demostrar las ecuaciones fundamentales del movimiento del agua subterránea ^[13,16].

Así finalmente, se tiene que el comportamiento de los flujos laminares en medios porosos está gobernado por la ley de Darcy y a través de esta, el supuesto de medio continuo (a través de un volumen elemental representativo) y el principio de conservación de masa se deducen las ecuaciones fundamentales que rigen el movimiento del agua en medios porosos ^[13,16,23]. Dado que no es motivo principal del texto, las demostraciones solo se indicarán a grandes rasgos.

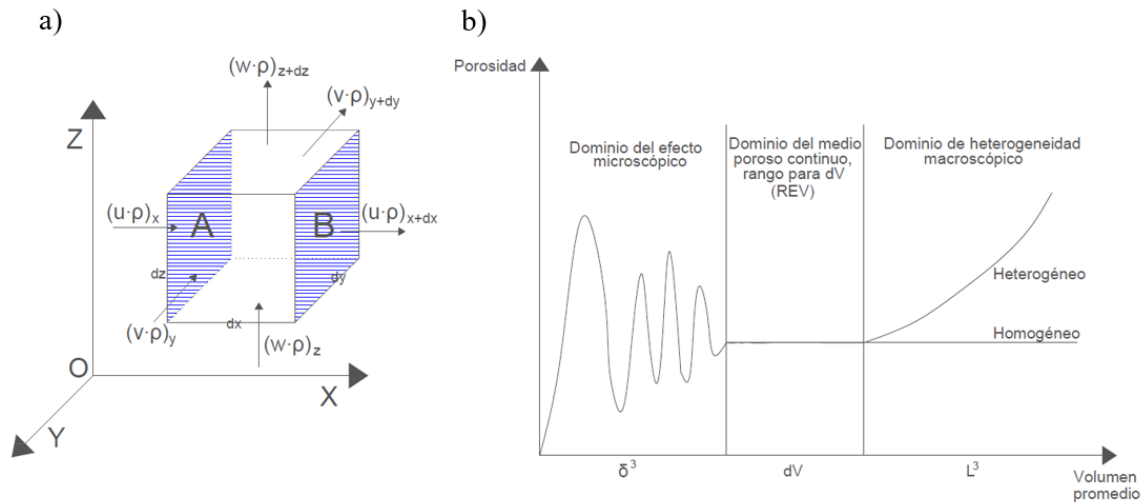


Figura 8.1 Volumen elemental representativo y dominio de definición: Volumen elemental representativo (a), REV por sus siglas en inglés y su dominio de definición según factor de escala (b). Donde u es la velocidad del fluido según el eje X (análogamente v y w son las velocidades en los ejes Y, Z respectivamente) y ρ la densidad en el eje respectivo.

Anexo B Conceptos básicos de modelización hidrogeológica subterránea

Anexo B1. Modelo conceptual

Descripción general del flujo subterráneo en cierta área, basado en datos específicos o factores que influyen en el proceso hidrogeológico ^[17]. Formalmente se define como una interpretación o descripción de las características y de la dinámica de un sistema físico ^[40]. Su nivel de detalle dependerá del objetivo del modelo, la disponibilidad de data confiable y la complejidad del sistema a modelar. Este resume que es lo que se sabe del sistema hidrogeológico y por ende corresponde a un marco de diseño para el modelo numérico ^[17]. Se debe simplificar el modelo conceptual para incluir solo los procesos importantes para alcanzar el objetivo propuesto, pero aun así debe tener la suficiente complejidad para representar de forma relevante el comportamiento del sistema ^[17,41].

Generalmente problemas de calibración y fallas en la precisión de las predicciones del modelo se atribuyen a un modelo conceptual inapropiado o insuficiente ^[17].

Anexo B2. Modelo matemático

Descripción matemática del flujo subterráneo, que posee ecuaciones de balance para las cantidades físicas y sus relaciones constitutivas ^[17]. Formalmente se define como ecuaciones matemáticas que expresan el sistema físico e incluyen supuestos a modo de simplificación de la realidad, es decir, es la representación del sistema físico mediante ecuaciones matemáticas de las cuales se puede deducir el comportamiento del sistema con cierto grado de confiabilidad conocido ^[40]. Estos se dividen en analíticos y numéricos, donde los modelos analíticos otorgan soluciones exactas de ecuaciones representativas del flujo para sistemas simples de fácil resolución que puedan ser solucionados sin necesidad de aproximaciones ^[40], por el contrario, los modelos numéricos otorgan soluciones aproximadas y pueden ser utilizados sistemas complejos ^[17,40].

Anexo B3. Modelo numérico

Modelo computacional, que divide discretiza el espacio y/o tiempo con objetivo de calcular el nivel piezométrico en las ubicaciones designadas ^[16,17,29], esto se logra a través de métodos tales como FDM, FEM u otros métodos, obteniendo una solución aproximada del flujo, es decir, dando solución aproximada al modelo matemático definido ^[16,17]. Formalmente se define como la aplicación del modelo matemático para representar, un sitio específico del sistema de flujo subterráneo ^[40]. Los métodos más utilizados en hidrología subterránea corresponden al FDM y al FEM ^[17,29], este último es el utilizado, puesto que se encuentra implementado en el código de simulación de FEFLOW ^[16].

Anexo C Métodos de elementos finitos

Para describir cómo funciona el FEM se puede suponer un lugar de interés con dominio Ω y frontera Γ (Figura 8.2-a). La ecuación que representa el flujo en el dominio de interés en régimen estacionario corresponde a la ecuación (3) y sea ω tal que $\omega = -\frac{F}{k}$, se obtiene;

$$\nabla^2 h - \omega = 0 \tag{22}$$

De esta forma la ecuación (22) y sus BCs asociadas describen el flujo en Ω y Γ respectivamente ^[16,42].

Ahora suponiendo que h_e y \hat{h} son solución exacta y aproximada, respectivamente, de la ecuación (22), se tiene que ^[16];

$$\nabla^2 h_e - \omega = 0 \quad (23)$$

$$\nabla^2 \hat{h} - \omega \neq 0 \quad (24)$$

Luego, si se define R como el error o residuo asociado a la aproximación \hat{h} , entonces, la ecuación (24) se puede expresar como ^[16,17];

$$R = \nabla^2 \hat{h} - \omega \quad (25)$$

De esta forma el objetivo es encontrar una aproximación \hat{h} tal que R sea cercano cero ^[16,17,29,42]. Para ello se utiliza el método de los residuos ponderados (WRM, por sus siglas en inglés) ^[16,42], lo cual de forma general consiste en utilizar una función de peso W de tal forma que se cumpla ^[16,17,42];

$$\int W \cdot (\nabla^2 \hat{h} - \omega) d\Omega = 0 \quad (26)$$

Al integrar por partes la ecuación (26), se obtiene ^[16,42];

$$\int W \cdot \nabla \hat{h} \cdot n \, d\Gamma - \int \nabla W \cdot \nabla \hat{h} \, d\Omega - \int W \cdot \omega \, d\Omega = 0 \quad (27)$$

Donde n representa un vector unitario normal a la superficie de integración Γ ^[16,42]. La ecuación (27) está definida para todo el dominio (Figura 8.2-a). Sin embargo, con motivo de encontrar una solución se discretiza el dominio, es decir se genera una malla y con ello se define el análogo de la ecuación (27) para cada elemento i , donde i representa el i -ésimo elemento que compone el dominio (Figura 8.2-b). Siguiendo esta lógica y suponiendo cada elemento como un medio continuo, el nivel piezométrico en cada elemento vendrá definido por una función \hat{h}_i lo cual corresponde al valor de \hat{h} para el i -ésimo elemento, así para cada elemento se obtiene ^[16,29];

$$\int W \cdot \nabla \hat{h}_i \cdot n \, d\Gamma_i - \int \nabla W \cdot \nabla \hat{h}_i \, d\Omega_i - \int W \cdot \omega_i \, d\Omega_i = 0 \quad (28)$$

Así el problema se reduce en determinar \hat{h}_i para cada elemento, sin embargo, encontrar una única función que describa la variable de interés como un continuo (para cada elemento) es un proceso demasiado complejo que no necesariamente tiene solución ^[16,17], por ello se vuelve necesario realizar una interpolación (Figura 8.2-c), para aproximar la función continua \hat{h}_i por una función mediante segmentos más simples, como por ejemplo funciones lineales ^[16,17,29,42]. De esta forma se obtiene la ecuación (29) para un elemento triangular (3 nodos) ^[16,17,29];

$$\hat{h}_i = N_{i1} \cdot \hat{h}_{i1} + N_{i2} \cdot \hat{h}_{i2} + N_{i3} \cdot \hat{h}_{i3} = \sum_{j=1}^k N_{ik} \cdot \hat{h}_{ik} \quad (29)$$

Donde \hat{h}_{i1} , \hat{h}_{i2} y \hat{h}_{i3} corresponden a los valores de \hat{h} para el i-ésimo elemento en el nodo 1, 2 y 3 respectivamente. N_{i1} , N_{i2} y N_{i3} corresponden a funciones base asociadas al i-ésimo elemento para los nodos 1, 2 y 3 respectivamente. El termino k corresponde al k-ésimo nodo para el i-ésimo elemento. Por lo que \hat{h}_{ik} corresponde a los valores de \hat{h} en el k-ésimo nodo para el i-ésimo elemento ^[16,17,29].

Luego, al sustituir la ecuación (29) en la ecuación (28) se puede llegar a un sistema de ecuaciones lineales para el i-ésimo elemento (Figura 8.2-d) tal que ^[16,17,29];

$$A_i \cdot \hat{h}_{ik} = B_i \quad (30)$$

Donde, para régimen estacionario, el termino A_i es una matriz de coeficientes fijos dependientes de la discretización en elementos, de la conductividad hidráulica y la transmisividad, es decir, refleja la relación entre los nodos del dominio y la interacción entre estos ^[16,29]. B_i , en régimen estacionario, es un vector que depende de la discretización en elementos, del nivel piezométrico conocido en cada nodo y de los caudales impuestos, es decir, depende de las condiciones de borde prescritas y la existencia de fuentes o sumideros ^[16,29]. \hat{h}_{ik} como se ha mencionado anteriormente corresponde a un vector que contiene las incógnitas asociadas a \hat{h} en el k-ésimo nodo para el i-ésimo elemento ^[16,29]. Tanto A_i como B_i están definidos para el i-ésimo elemento.

Finalmente, la ecuación (30) puede ser globalizada para el dominio Ω y frontera Γ a través de un proceso llamado ensamblaje (Figura 8.2-e) ^[16,17,29,42], el cual representa la suma de las

contribuciones de las matrices o vectores provenientes de las integrales de los i -ésimos elementos hacia matrices y vectores globales ^[16,42]. Este proceso es válido si y solo si las funciones de interpolación satisfacen criterios de continuidad ^[16,42].

Sea m la cantidad total de nodos del sistema, entonces \hat{h}_m es un vector con los valores de \hat{h} asociados para cada m -ésimo nodo de la malla. De esta forma se obtiene ^[16,29,42],

$$A \cdot \hat{h}_m = B \quad (31)$$

Donde A y B son la matriz y vector (respectivamente) global del sistema, la información que contienen es análoga a las de A_i y B_i ^[16,29]. \hat{h}_m corresponde a las incógnitas del sistema de ecuaciones lineales a resolver, lo cual se puede hacer a través de diversos métodos, generalmente el método del gradiente conjugado o el método de eliminación de Gauss ^[16,17,42]. De esta forma el sistema puede resolverse de forma eficiente y precisa a través de los métodos numéricos mencionados ^[16,17].

Una vez obtenido \hat{h}_m se utilizan estos resultados y las funciones de interpolación para obtener los valores \hat{h} en todo el sistema definido (Figura 8.2-f) ^[16,17].

De esta forma los principales pasos del FEM han sido esquematizados a modo resumen en la Figura 8.2 con el propósito de facilitar la comprensión del FEM.

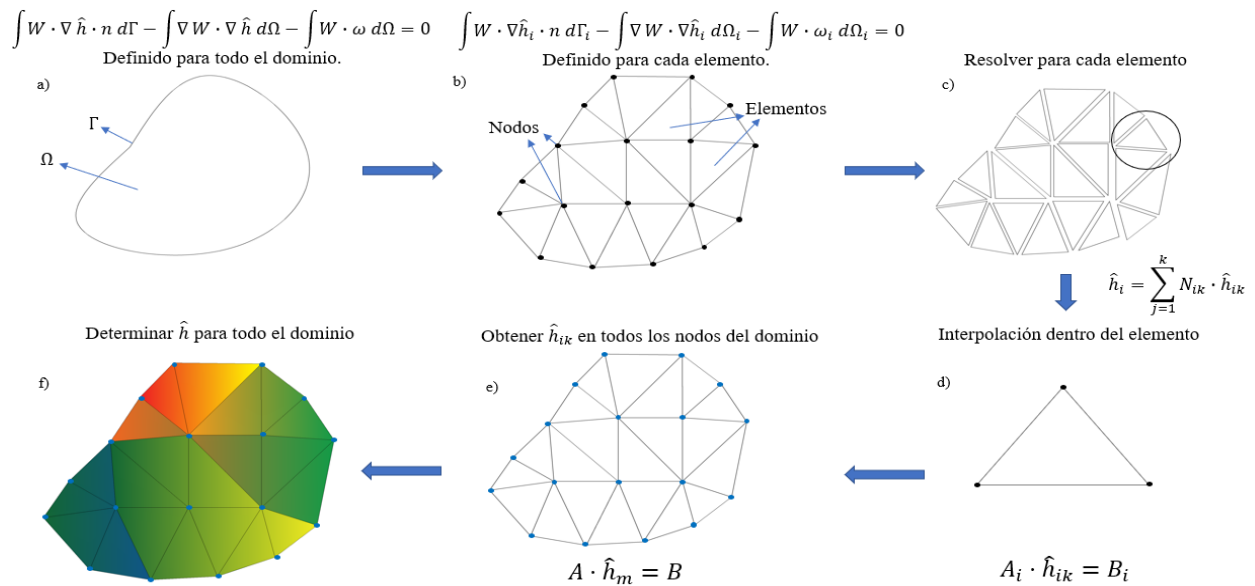


Figura 8.2 Principales pasos del FEM: a) WRM en todo el sistema de forma continua. b) Subdivisión del sistema y aplicación de WRM para cada elemento. c) Resolución e interpolación para cada elemento. d) Obtención del sistema de ecuaciones lineales para cada elemento. e) Ensamblaje. d) Obtención de la variable de interés para todo el dominio

Si bien los pasos señalados se realizaron para un flujo en régimen estacionario, de forma similar puede obtenerse un sistema de ecuaciones lineales para régimen transitorio, sin embargo, a la discretización espacial ya realizada a través del FEM se le debe sumar una discretización del tiempo [16,17,42], lo cual se puede realizar a través FDM o FEM, llegando a existir códigos que discretizan el espacio y tiempo a través del FEM y las FDM, respectivamente [17]. En particular FEFLOW utiliza para ambas discretizaciones el FEM [16]. Así, para régimen transitorio el sistema viene definido a través del FEM por [16];

$$C \cdot \frac{d\hat{h}_m}{dt} + A' \cdot \hat{h}_m = B' \quad (32)$$

Donde el termino C corresponde a una matriz de coeficientes fijos dependientes de la discretización en elementos, del coeficiente de almacenamiento y del coeficiente de almacenamiento específico [16]. A' y B' son análogos a los términos A y B de la ecuación (31) para régimen permanente,

pudiendo existir diferencias dentro de sus términos (lo que depende del tipo de problema), por lo que se evita usar su equivalencia, sin embargo, dependen de los mismos factores ya mencionados [16,29].

Finalmente $\frac{d\hat{h}_m}{dt}$, es un vector que contiene las derivadas de cada valor de \hat{h}_m con respecto a un tiempo dt [16].

Anexo D TetGen

Anexo D1. Opciones de mallado de FEM

TetGen ofrece distintas opciones para la generación de mallas, las cuales deben ser comprendidas por el usuario para lograr un uso eficiente, por ello se procede a definir y explicar las principales opciones utilizadas [24,30].

Tolerancia para la detección de características pequeñas: Se refiere a la tolerancia que define si una característica (línea, caras, volúmenes, cualquier tipo de entidad geométrica) es demasiado pequeña para su incorporación al mallado. Debe ser siempre menor al menor valor para una característica de la malla de entrada, con el objetivo de incorporar todas las características geométricas de la malla de entrada. De lo contrario, existirán características omitidas o más comúnmente TetGen fallara en el mallado. Esta opción también influye en la cantidad de elementos de la malla final (FEM), puesto que, si se fija una tolerancia demasiado baja, por ejemplo, 10^{-14} (mínimo permitido) se generarán demasiados elementos pequeños, incrementando la carga computacional, de esta forma la tolerancia para características pequeñas está limitada a su derecha por el mínimo valor de una característica en la malla de entrada y limitada a su izquierda por la carga computacional y la cantidad de elementos deseados. Para modelos complejos es recomendable establecer una tolerancia baja con el objetivo de generar elementos pequeños que se acoplen de mejor manera a las zonas con quiebres abruptos de la malla de entrada, por ejemplo, las galerías y las zonas de explotación [24]. El valor por defecto de esta variable en FEFLOW es de 10^{-8} [24].

Tetraedralización de Delaunay: La tetraedralización de Delaunay es una forma de conectar los puntos pertenecientes a un espacio de manera que no exista puntos dentro de la esfera circunscrita a ningún tetraedro. Es decir, cada tetraedro de Delaunay contiene únicamente los puntos que forman su superficie convexa. Esta opción permite forzar la tetraedralización a través del método de Delaunay,

mejorando la calidad y convergencia de la malla final ^[24,30]. A modo de ejemplo (caso 2D) se presenta la Figura 8.3, donde dado un set de puntos de entrada 2D (Figura 8.3-a) se obtiene la triangulación de Delaunay correspondiente (Figura 8.3-b). Notar que cada uno de los vértices de los triángulos de la malla corresponden a los puntos de entrada y a su vez los círculos circunscritos no contienen puntos adicionales aparte de los vértices del triángulo que lo describen ^[30].

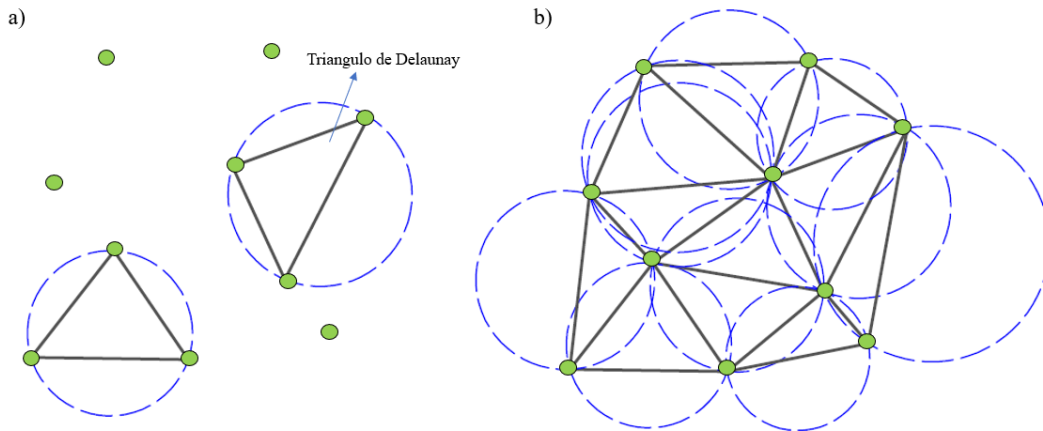


Figura 8.3 Triangulación de Delaunay. a) Nube de puntos utilizados en la generación de una malla de Delaunay 2D. b) Triangulación de Delaunay 2D completa.

Relación entre radio y longitud de segmento mínimo (radius edge-ratio): Permite establecer el valor máximo para el radius edge-ratio ρ del tetraedro τ ^[24]. Se define como la relación entre el radio r de la circunferencia circunscrita y la longitud d del segmento más corto de un elemento ^[24,30]. Sea θ_{min} el menor ángulo entre las caras de τ , la ecuación (33) define el radius edge ratio de un tetraedro ^[30].

$$\rho(\tau) = \frac{r}{d} \geq \frac{1}{2 \sin \theta_{min}} \quad (33)$$

Los elementos cuya relación entre radio y longitud de segmento mínimo es menor a 2.5 reciben el nombre de “bien formados” (well-shaped). Existen elementos planos de mala calidad (llamados astillas o slivers por su nombre en inglés) cuyo valor para este parámetro puede ser muy bajo (cerca de 1) ^[24,30]. Esto último implica que un valor bajo para este parámetro no es suficiente por sí solo para asegurar una malla de buena calidad. Sin embargo, se ha demostrado que las mallas limitadas hacia

un valor bajo de radius-edge ratio poseen una mejor distribución de sus nodos ^[24,30]. Su valor por defecto en FEFLOW es de 2.

Mínimo y máximo ángulo diedro: El ángulo diédrico es el ángulo que se forma entre 2 caras adyacentes de un tetraedro. Un ángulo diédrico adecuado permite garantizar una buena calidad de malla ^[30]. Si el ángulo diédrico es demasiado pequeño, las caras adyacentes pueden ser demasiado cercanas, afectando negativamente la precisión de la solución, de forma análoga, un ángulo diédrico muy alto generaría que las caras del tetraedro estén demasiado separadas, también afectando negativamente la precisión del modelo ^[24,30]. A través de estas opciones se controla el valor para el mínimo y el máximo ángulo diedro permitido para la malla final (FEM). TetGen permite un valor mínimo y máximo tanto para el mínimo ángulo diédrico como para el máximo ángulo diédrico los valores corresponden a $5^\circ - 20^\circ$ y $150^\circ - 165^\circ$ respectivamente. Los valores por defecto del mínimo y máximo ángulo diédrico corresponden a 10° y 160° respectivamente.

Conservar límites externos: En el contexto de mallas los límites externos son las características y entidades que limitan la malla, tanto de forma interna como externa, es decir corresponden a las caras (superficies) que delimitan la estructura externa e interna de la malla. Esta opción permite mantener la geometría original de la malla inicial, esto quiere decir que no ocurre un remallado en los límites de la malla inicial, es decir, no se generan puntos de Steiner que subdividan las características de la malla inicial y que permitan métodos de refinado en su geometría (como el método de Delaunay) ^[30]. Las zonas no pertenecientes a los límites si son remalladas. El no permitir un remallado de los límites externos de la malla inicial implica que la calidad de la malla final (FEM) vendrá fuertemente determinada por la calidad de la malla inicial, a su vez el tiempo de generación de la malla final se reduce en gran medida.

Teselación centroidal de Voronoi (CVT): La teselación de Voronoi es una subdivisión del espacio según puntos de entrada llamados puntos generadores, esta subdivisión genera regiones que contienen todos los puntos más cercanos a un punto generador dado en comparación a la distancia hacia otros puntos generadores ^[30]. En la teselación centroidal de Voronoi (CVT del inglés) los puntos generadores corresponden al centroide (centro de masa) de cada región correspondiente ^[30,43]. Esta opción permite generar nodos (no pertenecientes a la malla inicial) que cumplan con el método de CVT ^[24], lo que permite obtener una malla con una distribución de mayor regularidad en sus

elementos, mejorando la calidad y distribución de la malla FEM ^[24,43]. Este último ocurre debido a que los vértices del diagrama de Voronoi coinciden con los circuncentros de los tetraedros de una tetraedralización de Delaunay ^[30]. Esta opción se suele utilizar en etapas posteriores a la generación de la malla FEM (remallado), y aumenta el tiempo de cómputo según la complejidad del modelo y la cantidad de nodos generados mediante CVT. La Figura 8.4 ilustra los métodos mencionados. La Figura 8.4-a presenta una teselación de Voronoi para 10 puntos al azar y la Figura 8.4-b presenta el CVT de 10 puntos, notando que los centroides de las regiones de Voronoi coinciden con los puntos generadores respectivos ^[30,43].

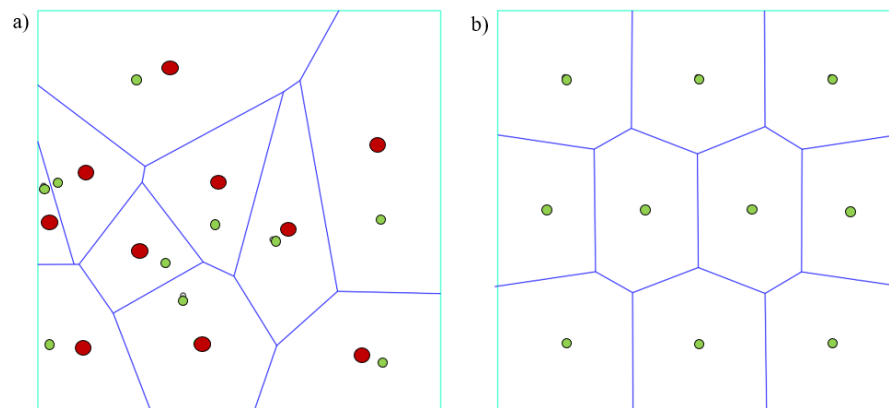


Figura 8.4 Teselación de Voronoi (a) y Teselación centroidal de Voronoi (b). Los círculos verdes corresponden a los puntos generadores y los puntos rojos a los centroides de las regiones de Voronoi correspondientes.

Chequeo de input: Al habilitar esta opción se realiza un chequeo de la información de entrada (malla de entrada), determinando si esta cumple los requisitos necesarios de una PLC. Se recomienda siempre activarla, puesto que permite revisar en etapas tempranas del modelo, si la malla tiene problemas topológicos y hasta cierto punto, que tipo de problema, de esta forma, se puede escoger una estrategia de solución pertinente ^[24].

Verificación de la malla generada por TetGen: Al habilitar esta opción se ejecuta una rutina que evalúa las inconsistencias geométricas en la malla de salida (FEM). Se recomienda activar esta opción para detectar de forma rápida los errores de la malla de salida, puesto que podrían acarrear problemas en pasos posteriores, por ejemplo, en la simulación de flujo. Se debe tener en cuenta que

la convergencia de una malla de salida (FEM) no implica que esta esté libre de errores, aquí radica la importancia de esta opción ^[24].

Limpiador de coordenadas: Esta opción permite mejorar el comportamiento del mallador en situaciones de redondeos negativos, especialmente cuando se trata con una alta densidad de nodos u otras características. En tal situación los excesos de dígitos de doble precisión pueden causar problemas al comparar puntos o al aplicar mecanismos de exclusión de características muy pequeñas o cercanas. Al activar esta opción se eliminan los excesos de dígitos de precisión doble, mejorando la calidad de la malla generada ^[24]. En mallas de alta complejidad se recomienda siempre dejar activa esta opción.

Anexo D2. Parámetros de calidad de malla

La calidad de malla es un término amplio que no tiene una única definición ^[30,44]. Depende del modelo, los objetivos del modelo, el método numérico empleado, etc. ^[44]. Sin embargo, el conceso es que una malla de buena calidad (elementos de buena calidad) debe ser una malla robusta, esto es, una malla cuyo rendimiento sea consistente y preciso frente a variaciones en las condiciones de simulación y geometría del modelo ^[30,44]. Además, una malla de buena calidad debe ser eficiente en términos computacionales, asegurando un tiempo de cómputo adecuado para los objetivos planteados^[30,44]. Por el contrario, una malla de mala calidad (elementos de mala calidad) tiende a ser demasiado sensible a las variaciones de condiciones iniciales del modelo, obteniendo una baja consistencia en los resultados de su resolución ^[30,44]. Al mismo tiempo los tiempos de cómputo tienden a aumentarse debido a la baja calidad de los elementos que componen la malla, siendo posible la no convergencia del modelo ^[30,44].

Para la evaluación de la malla FEM se requiere utilizar parámetros que evalúen la forma de los tetraedros generados a través de números reales ^[30]. Existen diversos tipos de parámetros de medición de forma, en particular FEFLOW ofrece los ya mencionados máximo y mínimo ángulo diedro, además del número de condición (condition number) ^[24,30]. Este último se define a continuación.

Número de condición: FEFLOW define el número de condición como una medida para la diferencia entre un elemento ideal (tetraedro regular) y el elemento real de la malla FEM ^[24]. Mientras

menor el valor, mejor la calidad del elemento y viceversa. El menor valor para el parámetro es 1, resultando en un elemento ideal y el máximo valor es infinito, lo que indicaría un elemento altamente distorsionado ^[24].

Estos parámetros pueden ser analizados para todo elemento de una malla FEM a través de variables estadísticas como el mínimo, máximo, promedio, desviación estándar, asimetría (skewness) y curtosis ^[24]. Se definen los menos comunes.

Asimetría (skewness): Cuantifica la asimetría de una distribución de datos con respecto a la distribución normal. Es cero cuando la distribución es perfectamente simétrica. Si la asimetría es negativa la cola de la distribución se extiende hacia la izquierda (sesgo a la izquierda). Si la asimetría es positiva, la cola de la distribución se extiende hacia la derecha (sesgo a la derecha).

Curtosis: Cuantifica la altura y pesadez de las colas en relación con la distribución normal, proporcionando información sobre la forma de las colas y la concentración de datos alrededor de la media. Tiene valor cero (mesocúrtica) cuando la distribución de datos tiene distribución normal estándar. Es menor que cero (platicúrtica) cuando las colas de la distribución son más ligeras (extendidas) que las de una distribución normal, asociándose una concentración baja de datos alrededor de la media y una forma más achatada en relación con la distribución normal. Es mayor que cero (leptocúrtica) cuando las colas de la distribución son más pesadas (altas y concentradas) que las de una distribución normal, asociándose una concentración alta de datos alrededor de la media y una forma más puntiaguda en relación con la distribución normal.

Anexo E Parámetros de triangulación de mallas superficiales de AutoCAD

Distancia entre malla y caras originales: Desviación máxima de las caras de malla de la forma del objeto original. Valores bajos producen una desviación menor, pero aumentan la generación de caras 3D y por tanto la carga computacional ^[32].

Angulo máximo entre caras nuevas: Angulo máximo de la normal de superficie de 2 caras adyacentes. Al aumentar este valor, la densidad de malla se incrementa en las zonas con muchas

curvaturas y se reducirá en las zonas planas. Por lo tanto, esta opción permite refinar detalles como agujeros o empalmes ^[32].

Relación altura/anchura máxima para caras nuevas: Relación altura/anchura máxima de las caras 3D de la malla. Esta opción permite disminuir la creación de caras largas y rajadas (de baja calidad) ^[32].

Longitud de arista máxima para caras nuevas: Longitud máxima de las aristas de las caras 3D de la malla. Valores altos generan una malla con menos caras (menos carga computacional) y un menor parecido a la forma original y viceversa. Esta opción permite disminuir la creación de caras largas y rajadas (para valores bajos) ^[32].

Anexo F Topografía

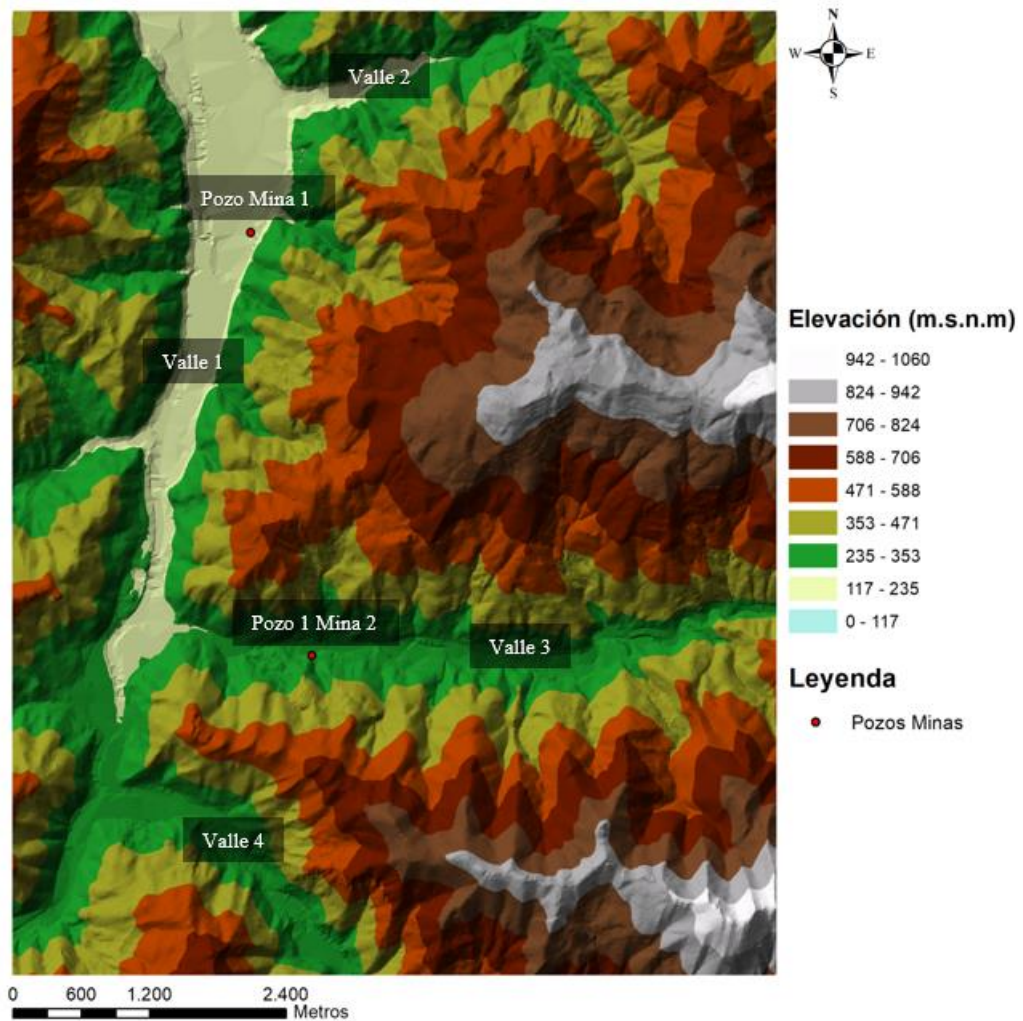


Figura 8.5 Topografía TIN del caso de estudio.

Anexo G Climatología

Tabla 8.1 Valores climatológicos para un año hidrológico medio.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Año
P_m (mm)	112.3	123.5	104.5	97.8	96.9	92.9	115.2	100.6	61.4	56.2	56.4	68.7	1086.5
E_r (mm)	59.2	31.4	20.2	17.8	20.9	35.0	43.5	71.4	98.7	118.9	56.4	68.7	642.3
P_u (mm)	53.0	92.0	84.3	80.0	76.1	57.9	71.7	29.1	0.0	0.0	0.0	0.0	444.2

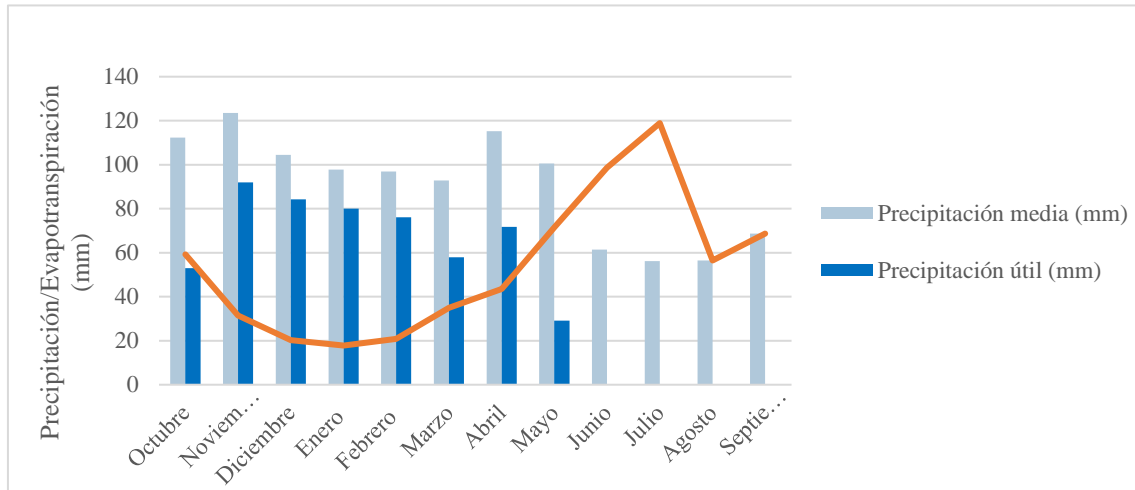


Figura 8.6 Gráfico de valores climatológicos para un año hidrológico medio de la zona de estudio.

Anexo H Método de explotación por testeros

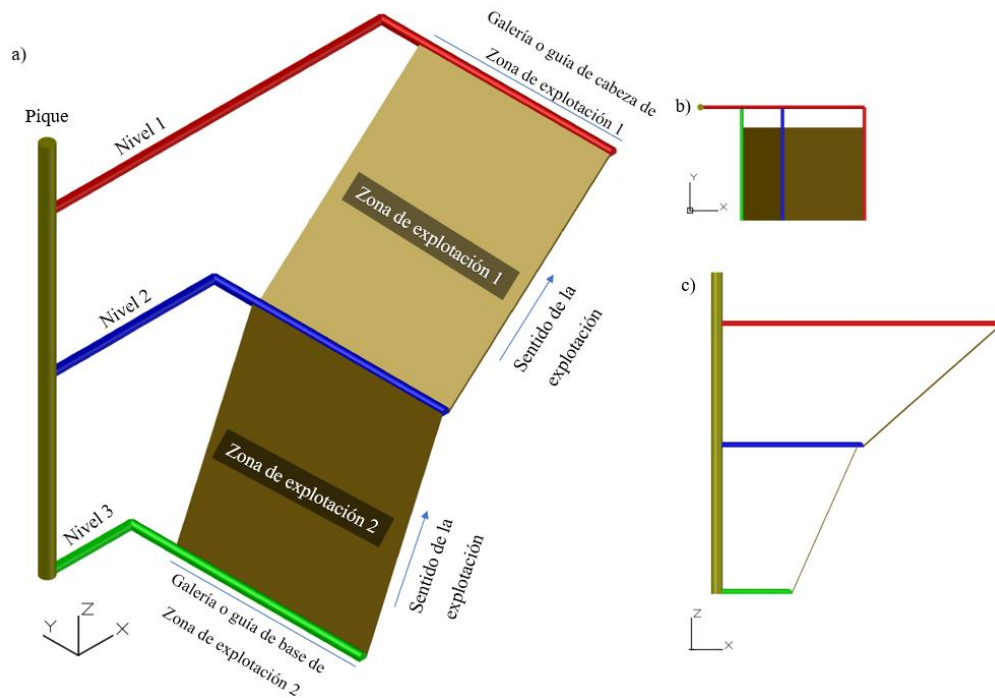


Figura 8.7 Método de testeros. a) Vista isométrica Suroeste b) Vista en planta c) Vista frontal.

Anexo I Descripción general de las labores

Tabla 8.2 Cotas y longitudes de niveles de minas.

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1 cota (m)	180	100	20	-50	-142	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
M2 cota (m)	76	23	-28	-81	-135	-188	-241	-294	-341	-394
M1 longitud (km)	23.793	29.424	28.320	26.305	11.772	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
M2 longitud (km)	33.817	37.008	41.574	32.069	38.659	26.122	20.415	13.379	2.351	1.129

Anexo J Recopilación y análisis de información

Archivos de dibujo CAD: Corresponden a archivos de dibujos nativos de AutoCAD, por lo que su extensión es *.dwg ^[45]. Representan las labores mineras a través de entidades (elementos geométricos básicos a partir de los cuales se crea un dibujo de AutoCAD ^[32]) tipo línea, polilínea 2D y 3D, se destacan:

- *Planos de labores generales*: Corresponde a una vista en planta del complejo minero, el cual incluye variedades de minas a cielo abierto y subterráneas, las entidades de este archivo están definidas como un plano $z = 0$ [m] (elevación), sirviendo como un mapa minero 2D.
- *Planos de labores específicos*: Consisten en 2 archivos, uno asociado a Mina 1 y otro a Mina 2. Estos archivos son el núcleo del proyecto, puesto que permiten, tras su procesamiento, la creación del modelo conceptual y la malla inicial, con posterior integración al software FEFLOW. Las entidades contenidas en los planos representan las labores subterráneas, incluyendo sus coordenadas de elevación. Las zonas de explotación son representadas a través de sus guías de base y guías de cabeza, por lo que deben ser reconstruidas. La Figura 8.8 muestra un ejemplo a modo de representación de los contenidos y de la visualización de los planos de labores específicos, se destaca que es un ejemplo y no refleja la realidad de estos. En el ejemplo se indica a que grupo de labores de explotación pertenecen las guías de base y guías de cabeza.

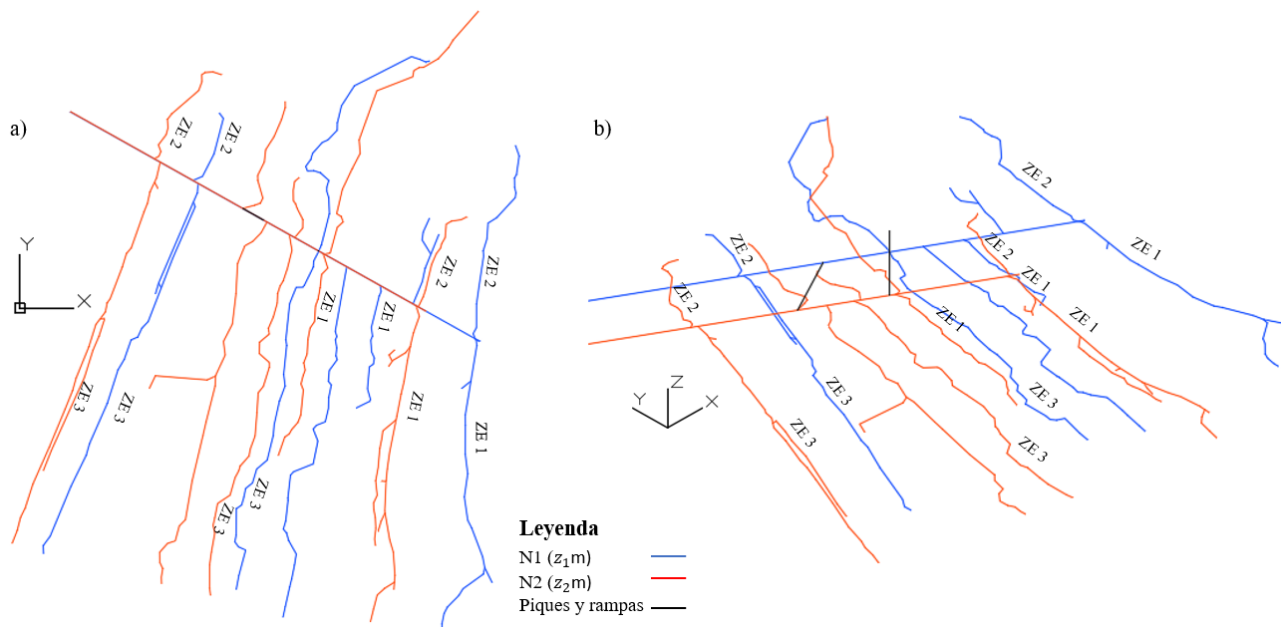


Figura 8.8 Ejemplo de contenidos y visualización de los planos de labores específicos. N1 y N2 corresponden los niveles 1 y 2 respectivamente, z_1 y z_2 corresponden a las cotas respectivas con

$$z_1 < z_2.$$

Documentación digital escrita: Archivos *.pdf correspondientes a informes, tesis doctorales, etc. relacionados con estudios o análisis hidrogeológicos, medio ambientales, etc. realizados en la zona de interés por diversos autores. Estos archivos permiten una mejor contextualización y entendimiento del caso de estudio, complementando información estructural de las labores, geología de la zona, etc. Además, de ellos se extraen valores para las variables climatológicas e hidrogeológicas de la zona los cuales han sido presentados en el capítulo anterior.

Shapefiles: Un shapefile (extensión *.shp) es un formato de almacenamiento de datos vectoriales de Esri para almacenar la ubicación, la forma y los atributos de las entidades geográficas ^[46]. Se almacena como un conjunto de archivos relacionados y contiene una clase de entidad (puntos, líneas y polígonos) ^[46]. Estos archivos pueden ser mapeados y analizados a través del software ArcGIS Desktop ^[46]. Así, se tienen archivos *.shp con información de:

- Curvas de nivel: Consiste en 2 archivos, correspondientes a las curvas directoras e intermedias cuya extensión geográfica es mucho mayor a la de la zona de estudio.

- Red hidrográfica: Archivo que contiene los principales ríos y arroyos en una extensión geográfica mayor a la zona de estudio. Este archivo solo contiene información espacial y no contiene información hidrológica (caudales, profundidad, etc.).
- Litología (simple): Archivo que contiene información litológica de una zona extensa que incluye la zona de estudio, este archivo es de uso contextual y referencial, puesto que su nivel de detalle no es suficiente para el estudio realizado.

Imágenes georreferenciadas y no georreferenciadas: Corresponden a cartas geológicas no referenciadas con extensión *.jpg (formato de imagen) y a cartas geológicas georreferenciadas con sus respectivas coordenadas con extensión *.jgw ^[47]. Las cartas georreferenciadas son de escasa calidad visual, por lo tanto, se opta por utilizar estas solo como base para la georreferenciación de las cartas geológicas no georreferenciadas de buena calidad visual. La principal información extraída de estos mapas corresponde a las litologías, la geología estructural y los puntos de acceso a la mina. La información litológica es más detallada que el *.shp de litologías, sin embargo, este último será utilizado en conjunto con las cartas georreferencias de mala calidad visual como referencia en procesos de georreferenciación. Respecto a la geología estructural, los mapas no contenían información de los ángulos de buzamiento ni de la profundidad de las principales estructuras de la zona.

Anexo K Contextualización del caso de estudio

A continuación, se indican los principales pasos a realizar para la correcta contextualización del caso de estudio, donde los pasos del 1 al 5 se realizan en ArcGIS Desktop y los paso 6 y 7 en AutoCAD.

1. Georreferenciar cartas geológicas de buena calidad visual: A partir de las cartas geológicas georreferenciadas se deben determinar puntos de control que servirán para georreferenciar las cartas geológicas de buena calidad visual, puesto que permiten mayor extracción de información. Los puntos de control incluyen los puntos de acceso de ambas minas y puntos litológicos escogidos según zonas geométricas coincidentes en ambos mapas (mapa referenciado y mapa a referenciar), estos últimos pueden variar a elección del usuario. Una vez escogidos los puntos, se utiliza la herramienta Georreferenciar de ArcGIS Desktop ^[48], donde se utiliza como datos de entrada los puntos de control

definidos, y el mapa a referenciar, generando finalmente un mapa referenciado de buena calidad visual. Si el mapa referenciado no cumple con las expectativas de precisión deseadas se debe escoger otro set de puntos de forma estratégica. Para verificar la distorsión de la nueva carta georreferenciada se utiliza a modo de referencia el shapefile que contiene las litologías simples, verificando que los cuerpos geológicos principales coincidan con los indicados en la nueva carta georreferenciada, esta decisión se fundamenta netamente en la geometría de los cuerpos geológicos contenidos en los mapas, haciendo fácil detectar desviaciones excesivas. La Figura 8.9 ilustra a modo resumen el proceso mencionado.

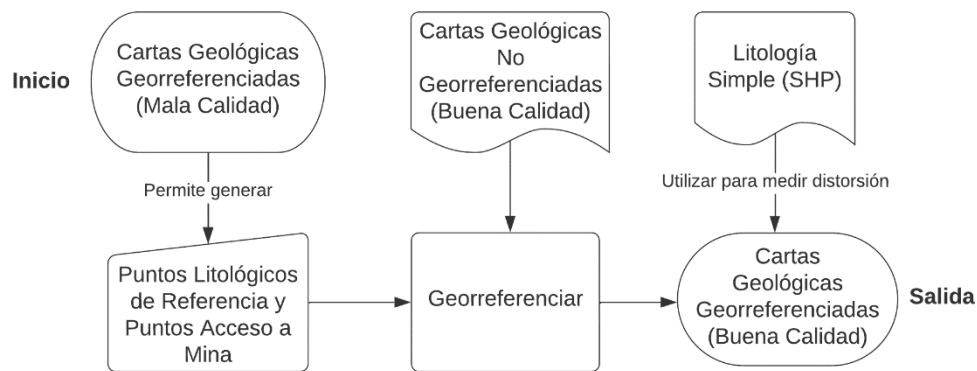


Figura 8.9 Proceso de georreferenciación de cartas geológicas.

2. *Delimitar la zona de estudio*: Las cartas geológicas y archivos disponibles contienen información para una extensión geográfica de orden mucho mayor al necesario para el estudio, por ello se debe delimitar geográficamente la zona de estudio de tal forma que no incorpore información no relevante o un exceso de información ^[17,41]. Al mismo tiempo la zona de estudio debe ser mayor al modelo conceptual, permitiendo flexibilidad en este último y permitiendo noción de sus alrededores ^[17,41]. De lo anterior se desprende que es un proceso iterativo que tiene en cuenta variables como el procesamiento computacional de información, entre otros ^[17,41]. Así la delimitación de la zona de estudio se logra a través de la creación de un polígono que actuara como primer filtro de información geográfica. De esta forma se crea un shapefile a través de la herramienta Edición de ArcGIS Desktop ^[49]. Notar que este polígono es el que limita a la Figura 3.1 y Figura 3.2 presentadas en el capítulo

Caso de estudio (entre otras figuras del presente texto). Las dimensiones finales del polígono que delimita la zona de estudio son de aproximadamente 6.7 [km] de ancho por 8.5 [km] de largo.

3. *Vectorizar la carta georreferenciada de buena calidad visual*: Las principales características de la carta georreferenciada de buena calidad son vectorizadas de forma manual, respetando la delimitación de la zona de estudio. Así, los puntos de acceso a mina se vectorizan como puntos; recordando que en rigor los puntos de acceso minan inicialmente no son puntos, ya que pertenecen a un archivo *.jpg (es decir, es un archivo ráster en ArcGIS Desktop ^[50]), por lo tanto, los puntos de acceso a mina en primera instancia son píxeles ^[50], de ahí que tengan que vectorizarse, esto último aplica a todas las características de un archivo en formato imagen ^[50]. Por consiguiente, la geología estructural se vectoriza como líneas (fallas, pliegues, etc.) y la litología detallada se vectoriza como polígonos. A su vez, se crean textos que indiquen el rumbo y manteos de las litologías y estructuras geológicas presentes. Con esto se tiene toda la información relevante de la zona de interés en un formato vectorial. La Figura 8.10 resume lo mencionado.

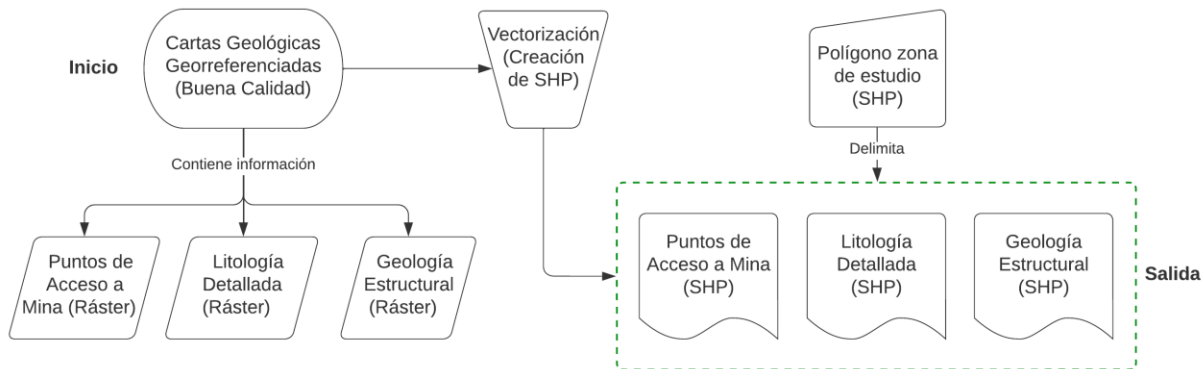


Figura 8.10 Vectorización de cartas geológicas georreferenciadas (de buena calidad).

4. *Delimitar los shapefiles iniciales*: Se debe filtrar la información de los *.shp iniciales (litología simple, red hidrográfica y curvas de nivel mencionados previamente en la Figura 4.1), para ello se utiliza la herramienta Clip o la herramienta Intersección (a gusto del usuario) de ArcGIS Desktop ^[51], lo cual necesita de dato de entrada el *.shp que delimita la zona de estudio. La Figura 8.11 resume el proceso mencionado, donde se ha añadido el término “Zona de estudio” para indicar que el *.shp está filtrado según el polígono de la zona de estudio.

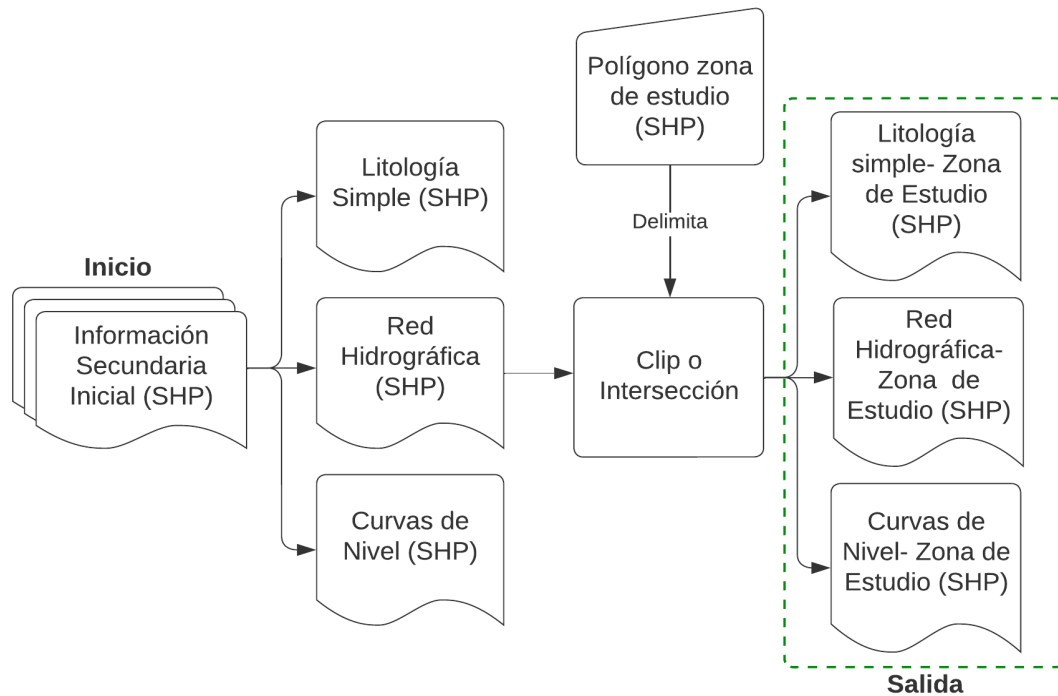


Figura 8.11 Filtro de shapefiles de información secundaria inicial.

5. *Migrar a AutoCAD*: Todos los *.shp deben ser exportados desde ArcGIS hacia AutoCAD, generando archivos con formato *.dwg. Para ello se utiliza la herramienta Exportar a CAD de ArcGIS^[52]. La decisión de migrar la información a AutoCAD responde a lo expuesto en capítulos previos (Capítulo 2.6) ya que permite la visualización de los planos de labores en forma 3D, al contrario de ArcGIS solo permite la visualización en planta de los Planos de labores específicos, no permitiendo visualización en 3D. De esta forma se tiene toda la información útil en un solo software (AutoCAD), esto se ilustra en la Figura 8.12.

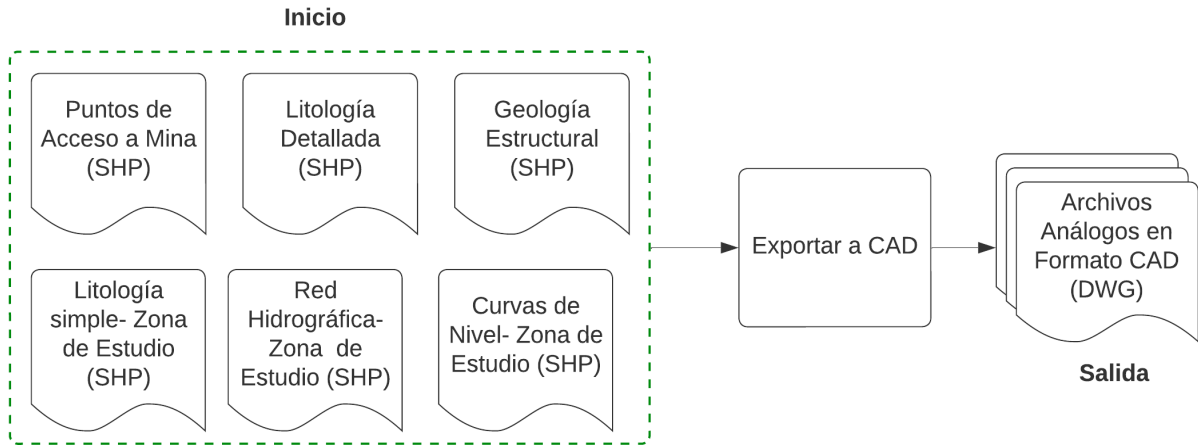


Figura 8.12 Migración de principales shapefiles hacia AutoCAD.

6. *Referenciar planos de labores:* Para referenciar los planos de labores generales y específicos se utiliza como puntos de control el archivo Puntos de acceso a mina en formato *.dwg. Se debe tener en cuenta que los planos de labores no cuentan con información de datum, sumado a esto los procesos realizados (georreferenciación, vectorización, etc.) conllevan un cierto error, lo que dificulta el hacer que coincidan perfectamente todos los puntos de control con los puntos respectivos de los planos de labores, por lo tanto, se centra la referenciación en los puntos de control asociados a Mina 1. De esta forma se obtienen los planos de labores referenciados, el proceso se ilustra en la Figura 8.13.

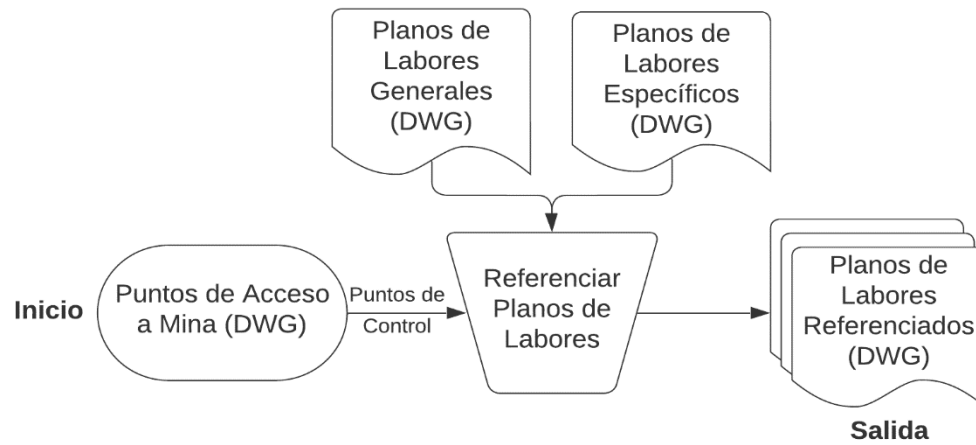


Figura 8.13 Referenciación de planos de labores (AutoCAD).

7. *Integración de la información:* Siguiendo los pasos señalados se obtienen los archivos necesarios que en complemento con la documentación digital escrita proporcionan una definición y contextualización al caso de estudio, además permitiendo visualizar, editar y analizar su información en AutoCAD, esto último no excluye a ArcGIS Desktop, puesto que para tareas particulares resultara más cómodo y útil que AutoCAD. La Figura 8.14 resume lo indicado.

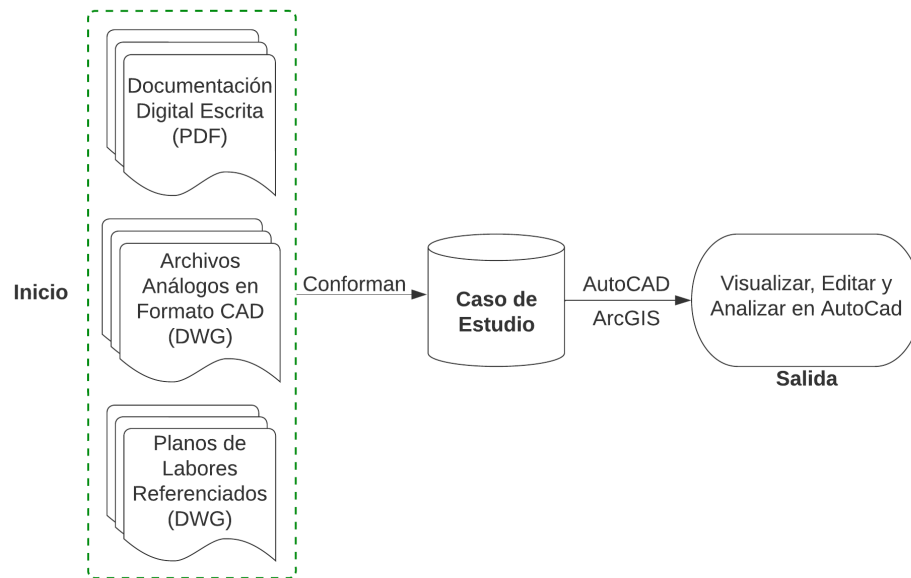


Figura 8.14 Contextualización del caso de estudio

Anexo L Proyección en planta de los límites del modelo conceptual

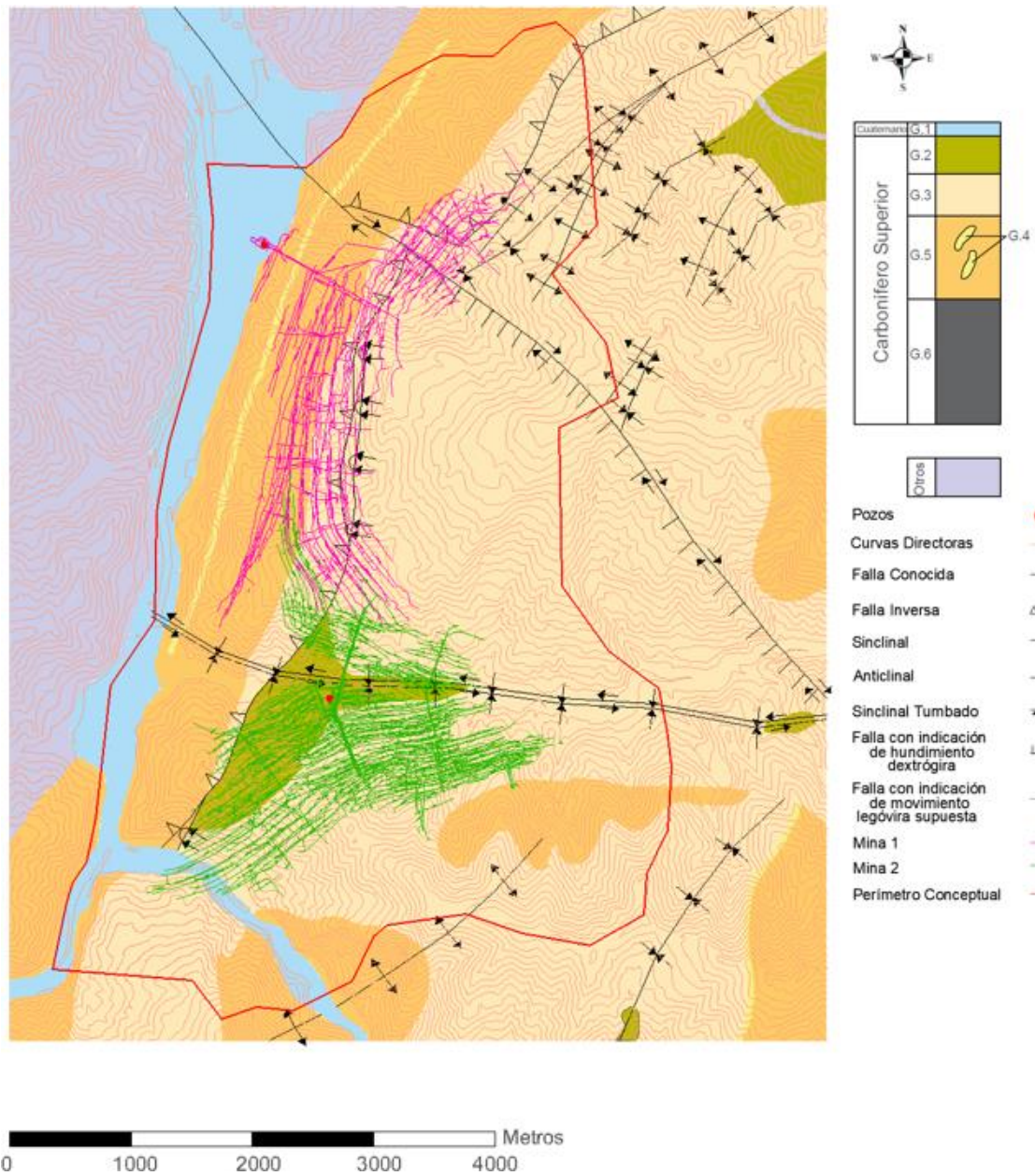


Figura 8.15 Proyección en planta de los límites del modelo conceptual (incluyendo el complejo minero y estructuras geológicas).

Anexo M Direcciones de flujo superficial

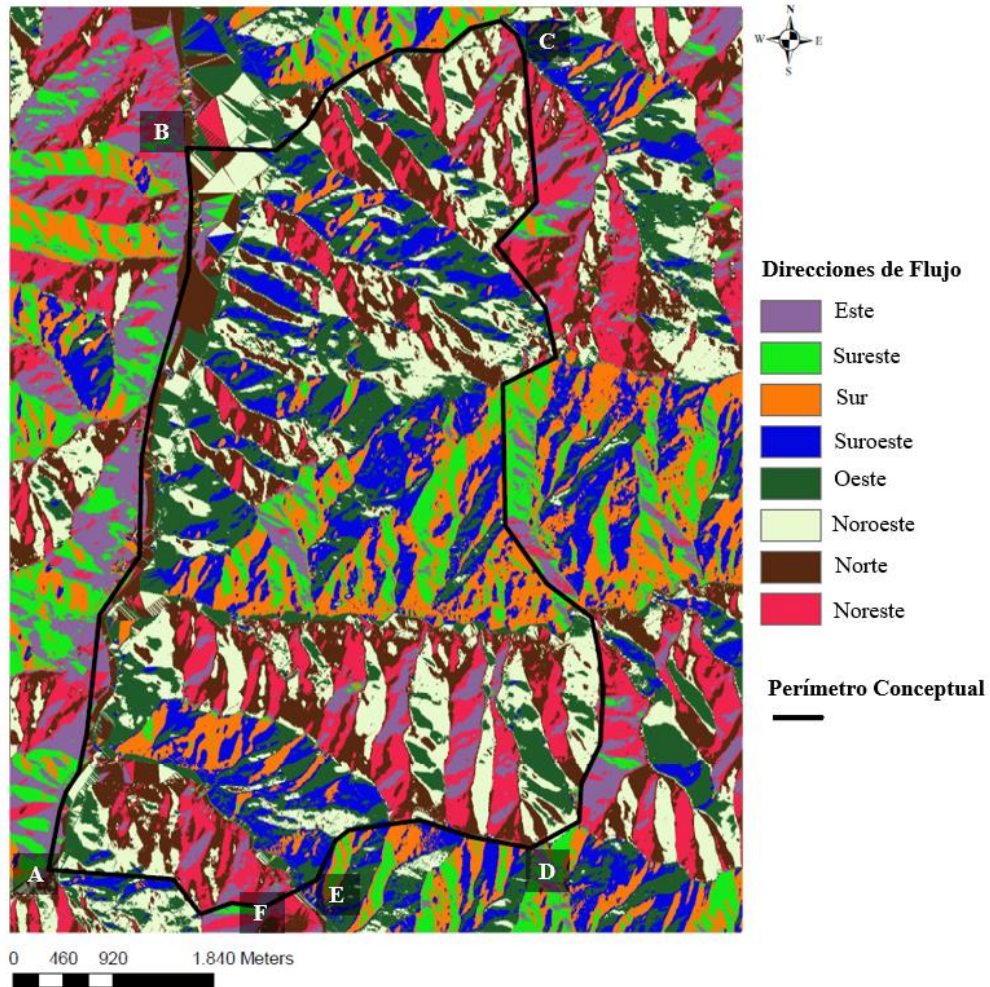


Figura 8.16 Direcciones de flujo superficial generado en ArcGIS Desktop.

Anexo N Malla del complejo minero

El primer objetivo es crear una malla del complejo minero y verificar si esta cumple con los criterios de TetGen, para ello se realizaron una serie de procedimientos, tomando como núcleo el archivo de planos de labores específicos en formato *.dwg. Así los procedimientos se resumen como;

1.- *Correcciones generales y de carácter topológico del archivo de planos de labores específicos*: El archivo *.dwg de planos de labores específicos contiene entidades de tipo líneas,

polilíneas, splines, entre otras. Las entidades deben ser tratadas y/o corregidas según los procesos a realizar aguas abajo. De esta forma las correcciones y procedimientos corresponden a:

- Eliminación de duplicados. Esto se logra fácilmente con la herramienta eliminar sobrante de AutoCAD.
- Reconstrucción de zonas de información perdida. Por ejemplo, la reconstrucción de la conexión del nivel 7 con el nivel 8 de M2 mediante una rampa, la cual es la única conexión entre los niveles 8 e inferiores con el resto de M2. Otro ejemplo importante es la reconstrucción de conexiones de los niveles de las minas con sus respectivos piques. Toda reconstrucción fue justificada según información recopilada de las labores.
- Transformación de entidades tipo spline: En menor medida el archivo contiene entidades tipo spline. Estas entidades tienen ciertas propiedades que no son compatibles con las herramientas utilizadas en los procesos posteriores, por lo que deben transformarse a entidades simples, tipo líneas, polilíneas 2D y/o 3D.
- Alargue y recorte: Con el propósito de evitar errores en los procesos posteriores se debe corregir las entidades lineales de tal forma que estas se intersequen de forma precisa si las labores que representan efectivamente se intersecan, es decir, se debe eliminar cualquier holgura diferencial implicada en la conexión de las entidades, tanto holguras negativas como positivas. A modo de ejemplo se presenta la Figura 8.17 la cual indica las situaciones en que 2 labores que se intersecan tienen una holgura demasiado pequeña (ya sea positiva o negativa). La magnitud aceptable para la holgura depende del modelo, de la creación de entidades 3D (sólidos y/o superficies) y de los parámetros a utilizar en TetGen, como por ejemplo del parámetro de tolerancia para características pequeñas referido en el capítulo de 2.5 de la presente. La Figura 8.17 se puede suponer como una vista en planta y las labores como galerías o puede suponerse como una vista lateral con Labor 1 y Labor 2 labores correspondiente a una galería y un pique respectivamente, ambos casos deben corregirse según la holgura aceptable definida. Notar que Figura 8.17-a requiere un alargue de la Labor 1 y la Figura 8.17-b requiere un recorte de la Labor 1.

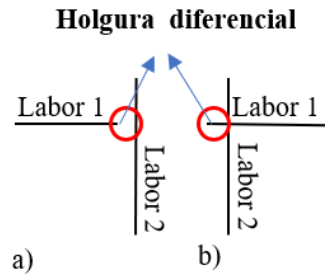


Figura 8.17 Ejemplo de zonas a corregir mediante alargue (a) y recorte (b).

De esta forma la Figura 8.18 resume las correcciones realizadas.

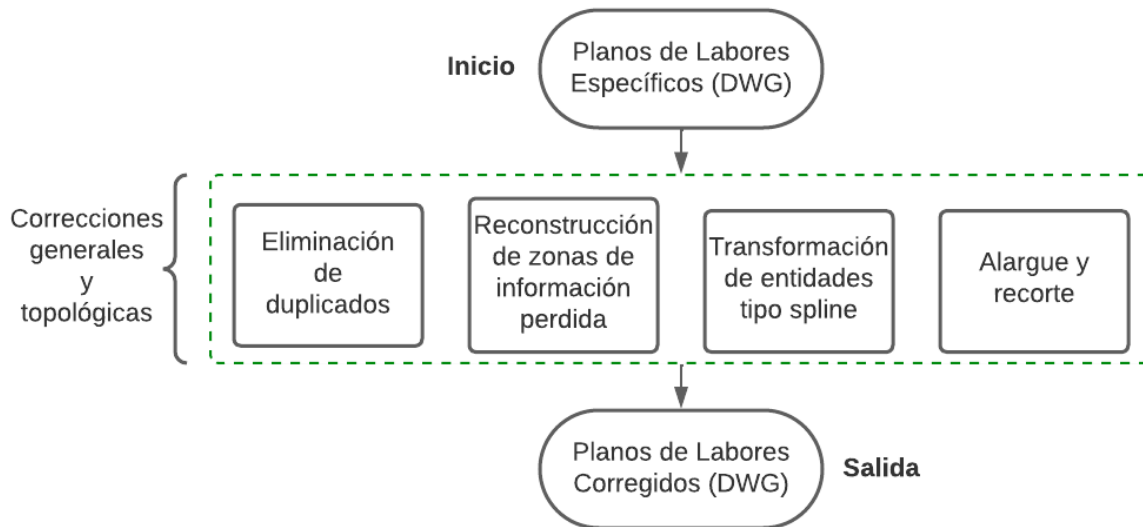


Figura 8.18 Correcciones generales y topológicas de los planos de labores específicos.

2.- *Creación de entidades tipo sólido y agrupación por zonas de interés:* En este caso particular las zonas de interés corresponden a zonas en las que el modelador quiere tener un enfoque más específico y detallado, esto es, si se requiere un mayor control de los resultados del modelo en una labor X (por ejemplo, una galería, pique, zona de explotación, etc.), entonces esta labor X debe ser tratada como una zona de interés. Cada zona de interés se define al crear una capa en el archivo *.dwg con las entidades que formaran dicha zona. Luego, para toda entidad lineal que represente una galería, una rampa o un pique se realiza un barrido, a través de la herramienta Barrido de AutoCAD, tomando

como base la sección transversal de la labor correspondiente a modelar, esto genera entidades tipo sólido, los cuales son agrupados y unidos (herramienta de Unión en AutoCAD) según las zonas de interés definidas. En el presente caso se ha decidido que los piques corresponden cada uno por sí solo a una zona de interés y cada uno de los niveles de ambas minas (por separado) corresponden a zonas de interés. Las entidades solidas asociadas a las rampas han sido agrupadas de forma separada a los niveles y piques, con objetivo de mantener la homogeneidad en el diseño y para lograr un mayor control de los niveles y piques de forma separada.

Es de suma importancia realizar simplificaciones geométricas en lo que respecta a la creación de entidades 3D del tipo sólido (incluyendo entidades 3D tipo superficie o similares), puesto que el procesamiento de estas entidades tiene un alto costo computacional, especialmente en casos complejos como el de minas subterráneas. Esto se explica por la cantidad de puntos que definen dichas entidades 3D. De esta forma se realizan simplificaciones en la geometría de la sección transversal de las galerías del complejo minero. Así la Figura 8.19 indica las dimensiones y forma reales de la sección transversal de las galerías y su respectiva aproximación, indicando a modo ilustrativa la razón de esta reducción de carga computacional al reducir la cantidad de nodos que componen la sección transversal, notar que esto es un ejemplo y que en la realidad la cantidad de nodos de una sección transversal como el de la Figura 8.19-a típicamente tiene muchos más nodos según la suavidad de las curvas que componen el polígono.

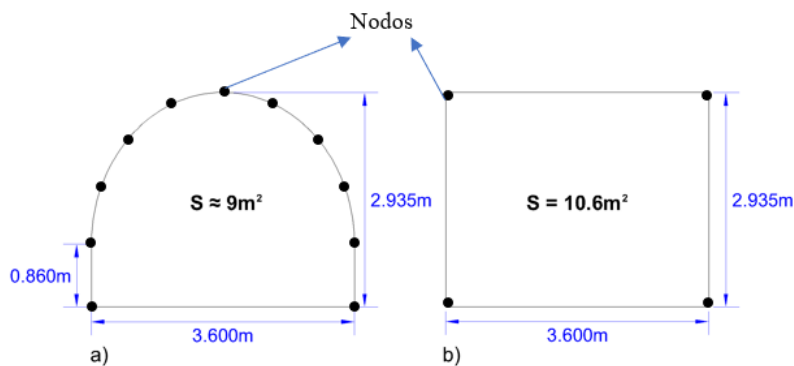


Figura 8.19 Simplificación sección transversal de galerías. a) Sección real con nodos ilustrativos b) Sección simplificada con nodos reales.

La herramienta de Barrido de AutoCAD permite generar una entidad tipo solido a partir de una entidad lineal que actúa como trayectoria y un polígono que representa la sección transversal a barrer en dicha trayectoria. Actualmente el código implementado en la herramienta no permite generar múltiples solidos a través de múltiples trayectorias, por lo que se deben realizar de forma unitaria, lo que demanda gran cantidad de tiempo y aumenta la probabilidad de error debido a la actividad humana. Para resolver este problema y automatizar el proceso se recurre a la creación de un código Lisp, este último es un lenguaje de programación compatible con AutoCAD, mediante el cual se pueden crear rutinas y/o comandos personalizados. Así, se ha desarrollado un código Lisp que permite crear todos los sólidos de forma automática. El código es el siguiente:

```

1  (vl-load-com)
2
3  (defun c:BarrMulti (/ *error* aux1 aux2 ob pb tr i)
4    (defun *error* (errmsg)
5      (if (not (wcmatch errmsg "Function cancelled,quit / exit abort,console break,end"))
6        (princ (strcat "\nError: " errmsg)))
7      (if aux1 (setvar 'delobj aux1))
8      (if aux2 (setvar 'cmdecho aux2))
9      (vla-endundomark (vla-get-activedocument (vlax-get-acad-object)))
10     (princ))
11
12     (if (and (setq ob (car (entsel "\nObjeto a Barrer: ")))
13             (setq pb (getpoint "\nPunto Base: "))
14             (princ "\nSeleccione Trayectorias, ")
15             (setq tr (ssget))
16             (setq aux1 (getvar 'delobj))
17             (setq aux2 (getvar 'cmdecho))
18             (not (vla-startundomark (vla-get-activedocument (vlax-get-acad-object))))
19             (setvar 'delobj 0)
20             (setvar 'cmdecho 0)
21             )
22     (repeat (setq i (sslength tr))
23       (command "_sweep" ob "" "_b" "_non" pb (ssname tr (setq i (1- i)))))
24     )
25     (*error* "end")
26   )
27

```

La Figura 8.20 muestra una sección del Nivel 4 de M1 con objetivo de ejemplificar los resultados a obtener para el presente procedimiento. La Figura 8.20-a indica las entidades lineales iniciales, donde las polilíneas del 1 al 4 pertenecen al Nivel 4 de M1 y la Polilínea 5 corresponde al pique de M1. Tanto la Figura 8.20-b como la Figura 8.20-c corresponden a las entidades sólidas resultantes posterior a la unión de las entidades sólidas individuales, puesto que por cada entidad lineal se obtiene un sólido asociado a la función de barrido y estos se unen según las zonas de interés definidas. A su vez, se aprecia la no existencia de separaciones internas de una misma zona de interés, esto es producto del proceso de unión de las entidades sólidas.

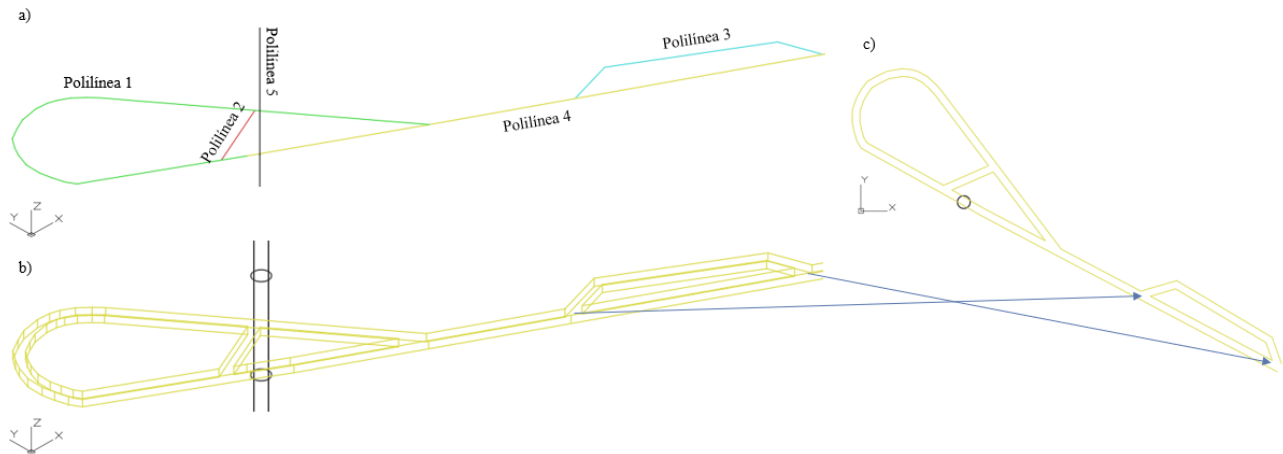


Figura 8.20 Creación de entidades sólidas. a) Vista isométrica de entidades lineales. b) Vista isométrica de entidades sólidas, posterior a la unión de sólidos. c) Vista en planta de entidades sólidas, posterior a la unión de sólidos.

La Figura 8.21 esquematiza el procedimiento para la creación de entidades tipo sólido y agrupación por zonas de interés.

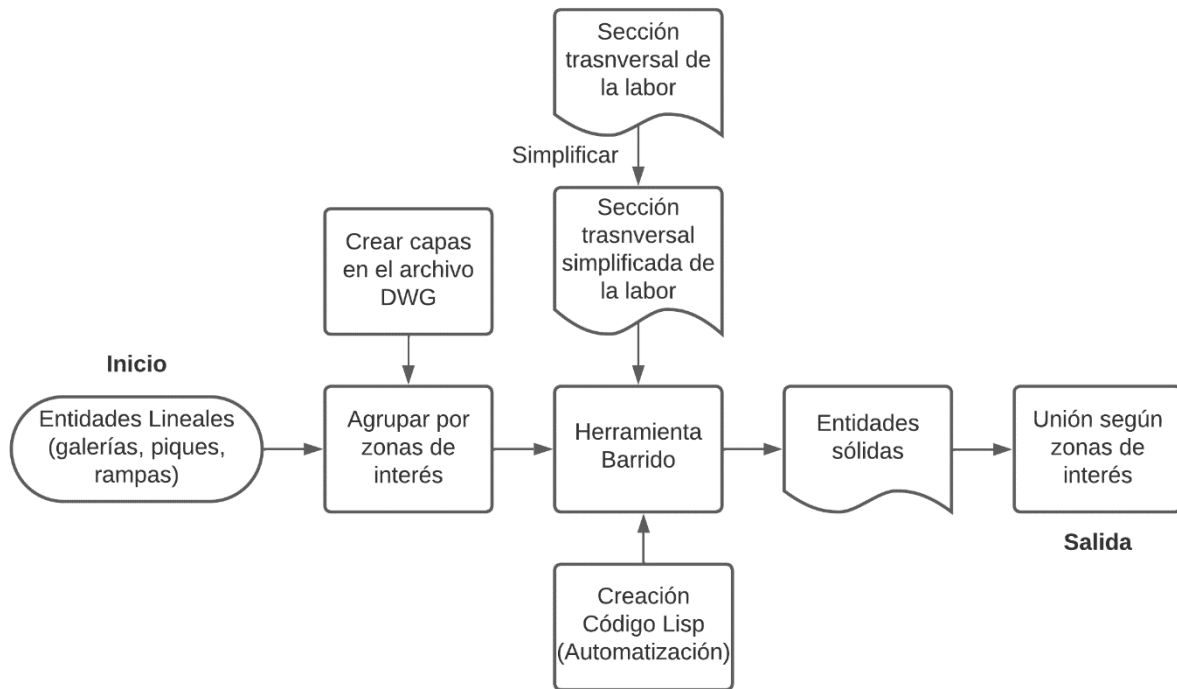


Figura 8.21 Creación de entidades tipo sólido y agrupación por zonas de interés.

3.- *Planificación de la modelización de las Zonas de explotación:* De forma general, lo primero en la modelización de las zonas de explotación (ZE abreviado) es evaluar qué tipo de explotación es la que se quiere reconstruir y/o modelar, puesto que las aproximaciones y los procedimientos que deben realizarse dependen en gran parte de la geometría ligada al método de explotación. Para el caso de estudio el método de explotación empleado corresponde al método de testers y la información disponible para recrear estas zonas de explotación corresponde a sus guías de base y guías de cabeza.

4.- *Clasificación y organización de zonas de explotación:* Se debe clasificar y agrupar las zonas de explotación, para ello se analiza el plano de labores y se determina la cantidad de grupos de zonas de explotación (ZE) presentes. Para cada grupo se debe crear una capa en el archivo de labores y cada capa debe contener las guías de base y cabeza que definen las ZE del grupo respectivo. De esta forma, se obtuvieron 11 grupos de ZE pertenecientes a M1. Las ZE de M2 han sido omitidas en el modelo a modo de simplificación, esto se justifica ya que las zonas de explotación de M2 en su mayoría se encuentran rellenas y su conductividad puede suponerse igual a la del macizo fracturado, a ello se le

suma que el interés principal del estudio radica en M1, por lo tanto, la creación de un modelo que incorpore los caserones de M2 con los supuestos mencionados se vuelve redundante y radicaría en complejidad extra sin información adicional asociada al modelo.

5.- *Incorporación de distancia de seguridad y ajuste de guías*: Las guías no están limitadas, es decir, no se indica su inicio ni final (Figura 8.22). Por ello se han supuesto distancias de seguridad correspondientes a radios de 50 [m] y 10 [m] para las galerías principales y secundarias respectivamente. Los estudios previos indican que los valores supuestos están dentro del rango de valores reales. Las distancias de seguridad permiten ajustar las guías a una extensión más cercana a la realidad. Para ello se debe recortar las entidades lineales y solidas que representan las guías según las distancias de seguridad fijadas. Para ilustrar lo mencionado se presenta la Figura 8.22 que contiene una vista en planta de las labores del Nivel 1 de M1 y sus distancias de seguridad correspondientes (Figura 8.22-a), además la Figura 8.22-b y la Figura 8.22-c indican ejemplos del ajuste a realizar con objetivo de obtener una extensión de guía cercana a la realidad. Finalmente, la Figura 8.22-d presenta el resultado final del procedimiento obteniéndose el Nivel 1 de M1 con las guías ajustadas y agrupadas según las ZE a las que pertenecen.

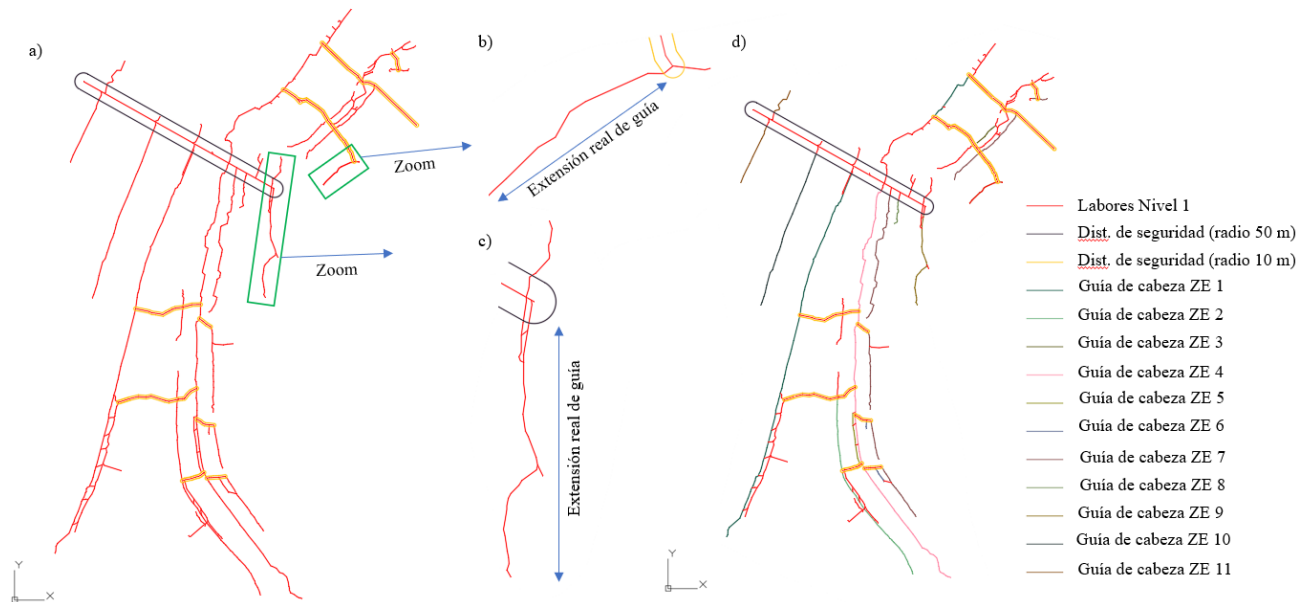


Figura 8.22 Agrupación y ajuste de guías. a) Distancias de seguridad de Nivel 1 de M1. b) Ajuste de guía debido a distancia de seguridad de radio de 10 [m]. c) Ajuste de guía debido a distancia de seguridad de radio de 50 [m]. d) Resultado del ajuste y clasificación de guías (Nivel 1 de M1).

6.- *Creación de entidades sólidas de las ZE:* Se extraen la superficie inferior (cara inferior) y la superficie superior (cara superior) de las entidades sólidas que representan la guía de cabeza y guía de base respectivamente. A partir de ellas se trazan rectas que conecten sus vértices extremos las cuales se utilizan para generar superficies (a través de la herramienta *Solevación*) que encierren un volumen hermético el cual a través de la herramienta *esculpir* de AutoCAD genera un sólido. El proceso es ilustrado en la Figura 8.23, tomando como ejemplo una ZE ubicada entre los niveles 1 y 2 de M1 y perteneciente al grupo ZE 11. La Figura 8.23-a muestra las labores como entidades sólidas señalando el límite entre entidades de una misma zona de interés. Esta subdivisión se debe al proceso anterior (ajuste de guías según distancias de seguridad). A continuación, la Figura 8.23-b y la Figura 8.23-c indican la generación de las superficies limitantes para la creación de la entidad sólida a través de la herramienta *Esculpir*, haciendo énfasis en un ajuste recto, esto es, las superficies laterales de la ZE deben ser de forma aproximadamente recta con respecto a sus guías, lo cual se logra fácilmente tomando como referencia la guía que represente la distancia más corta entre el punto inicial y final de la misma. La Figura 8.23-d muestra el resultado de dichos procedimientos, donde se aprecia la entidad

solida con su estructura interna, la cual viene determinada por la cantidad y disposición de los nodos que forman las guías de la ZE.

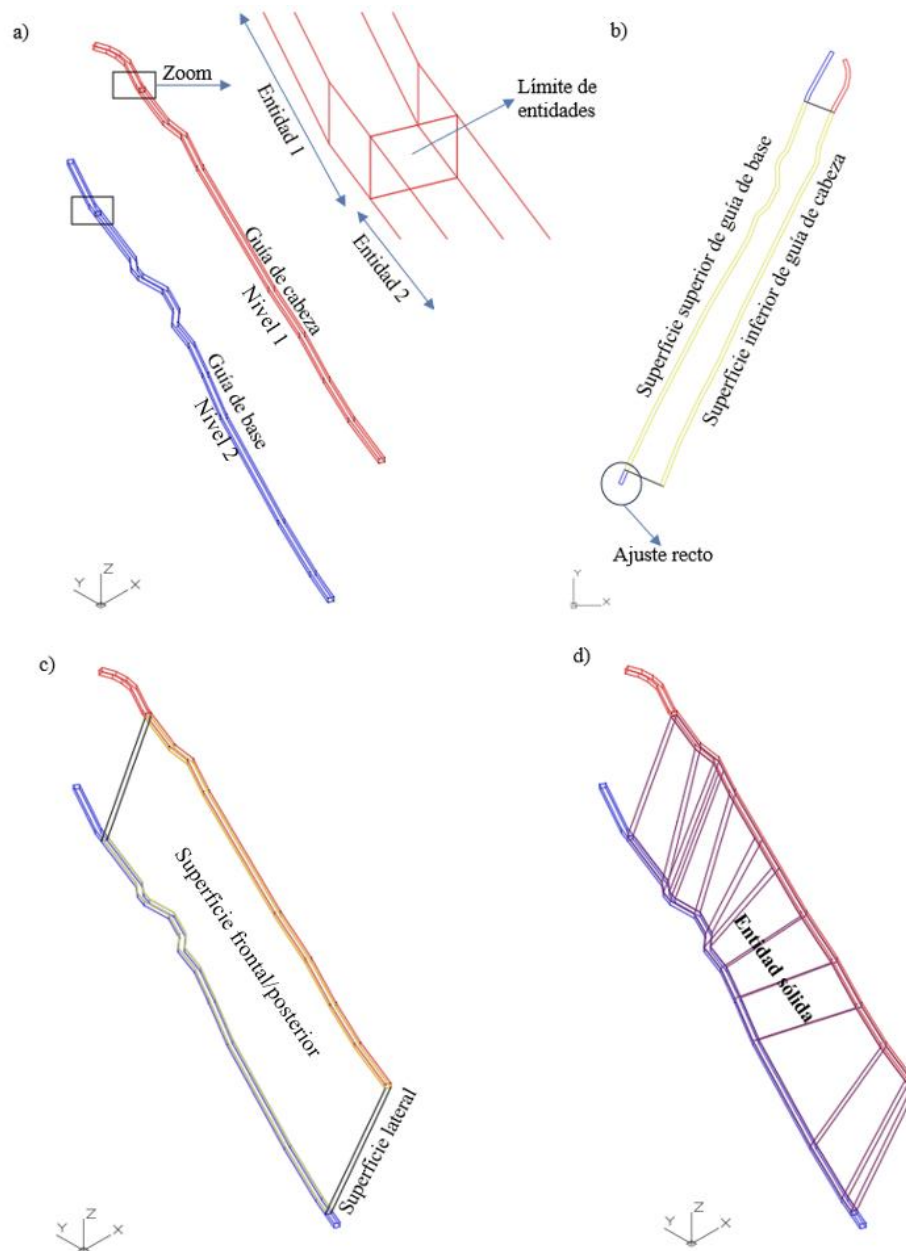


Figura 8.23 Generación de entidades solidas de ZE. a) Entidades solidas asociadas a las guías de la ZE. b) Vista en planta de ajuste recto y superficies limitantes de la ZE. c) Vista isométrica de superficies limitantes de la ZE. d) Resultado al utilizar la herramienta Esculpir (generación de entidad solida).

7.- *Conversión a entidades tipo superficie*: Todas las entidades tipo sólido deben ser convertidas a entidades tipo superficie, de esta forma se obtendrán superficies que representen los límites del sólido y que encierran un volumen hermético.

8.- *Delimitación de entidades tipo superficie*: Las entidades tipo superficie deben limitarse de tal forma que las zonas de interés se intersequen respetando los criterios de una PLC. Para lograr aquello se realizan operaciones de diferencia y/o corte entre las superficies que representan las zonas de interés. La Figura 8.24 indica la conexión entre PM1 y el Nivel 4 de M1, de forma ilustrativa para el presente proceso. Así, la Figura 8.24-a y la Figura 8.24-b presentan las superficies previas a las operaciones de diferencia y/o corte entre las zonas de interés (PM1 y el Nivel 4 de M1 para este caso particular), las cuales no cumplen con los criterios de una PLC. La Figura 8.24-c y la Figura 8.24-d corresponden al resultado final del presente proceso, el cual cumple con el objetivo de generar superficies que satisfacen los criterios de una PLC, para las distintas zonas de interés fijadas por el usuario. Aplicando el proceso para cada conexión entre zonas de interés se obtienen la Figura 8.25 y la Figura 8.26, la primera presenta las labores de M1 como entidades de superficie e indicando las distintas zonas de interés (niveles de M1, piques, rampas, zonas de explotación, etc.) y la segunda representa de la misma forma a M2 (se omiten las zonas de explotación).

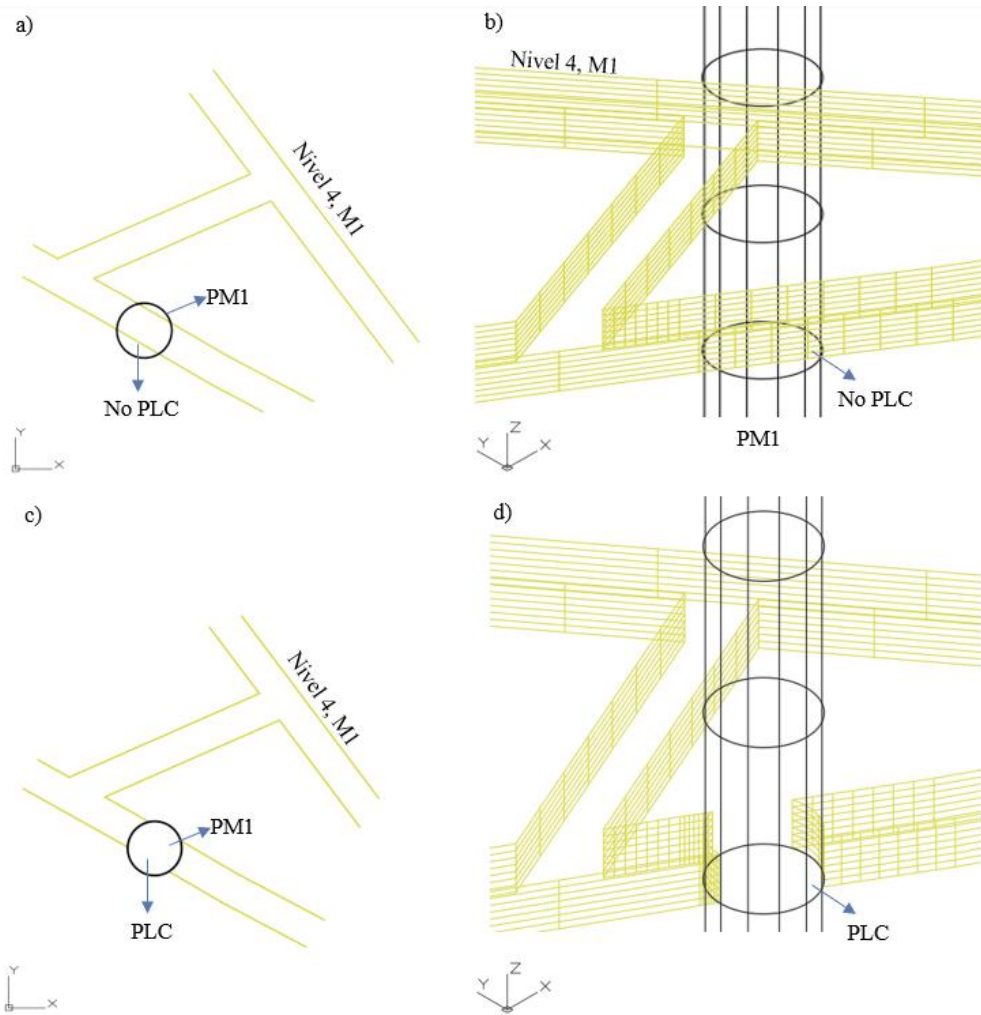


Figura 8.24 Delimitación de entidades de superficie. a) Vista en planta de conexión no PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1. b) Vista isométrica de conexión no PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1. c) Vista en planta de conexión PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1. d) Vista isométrica de conexión PLC entre PM1 y el Nivel 4 de M1.

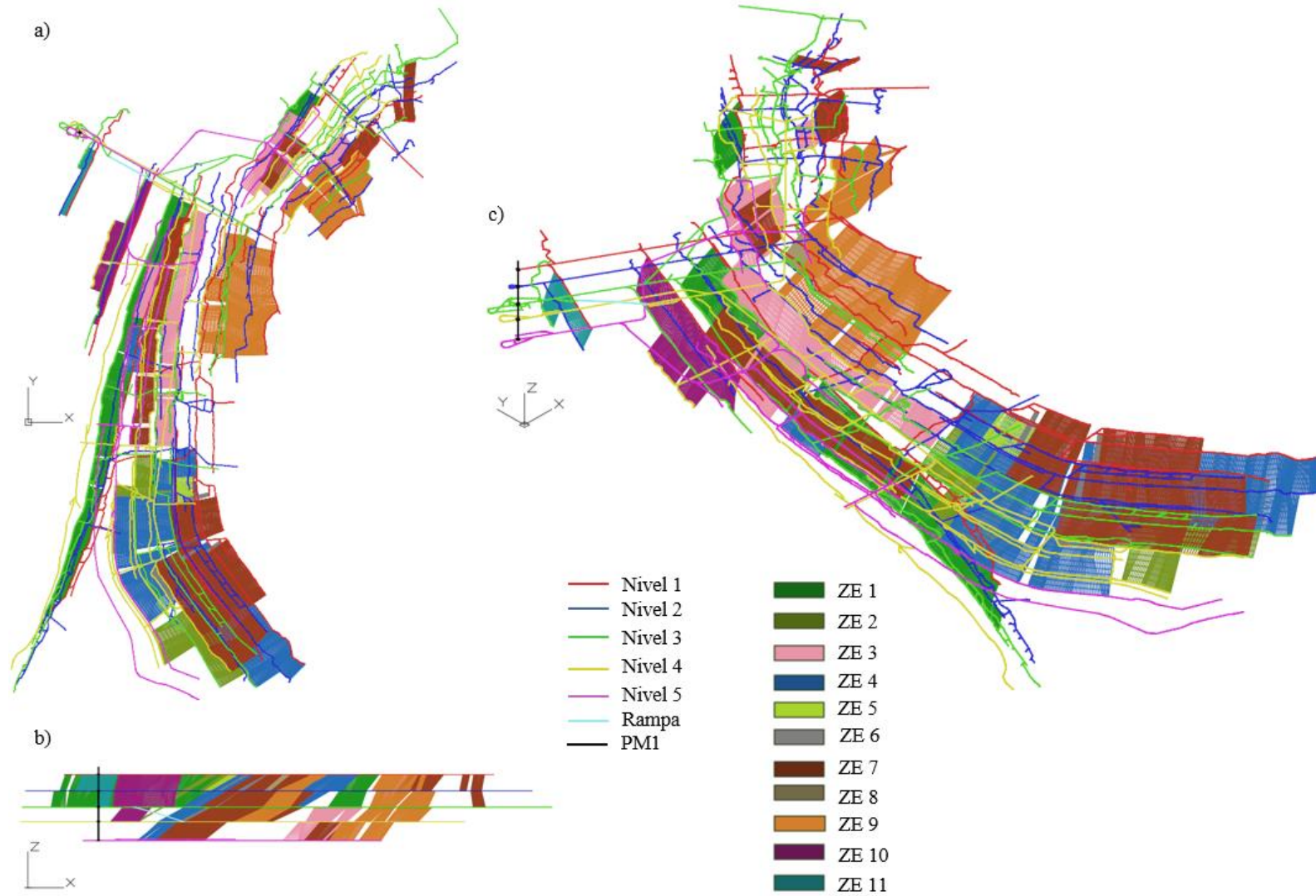


Figura 8.25 Labores de M1 y zonas de interés como entidades de superficie. a) Vista en planta b) Vista frontal c) Vista isométrica.

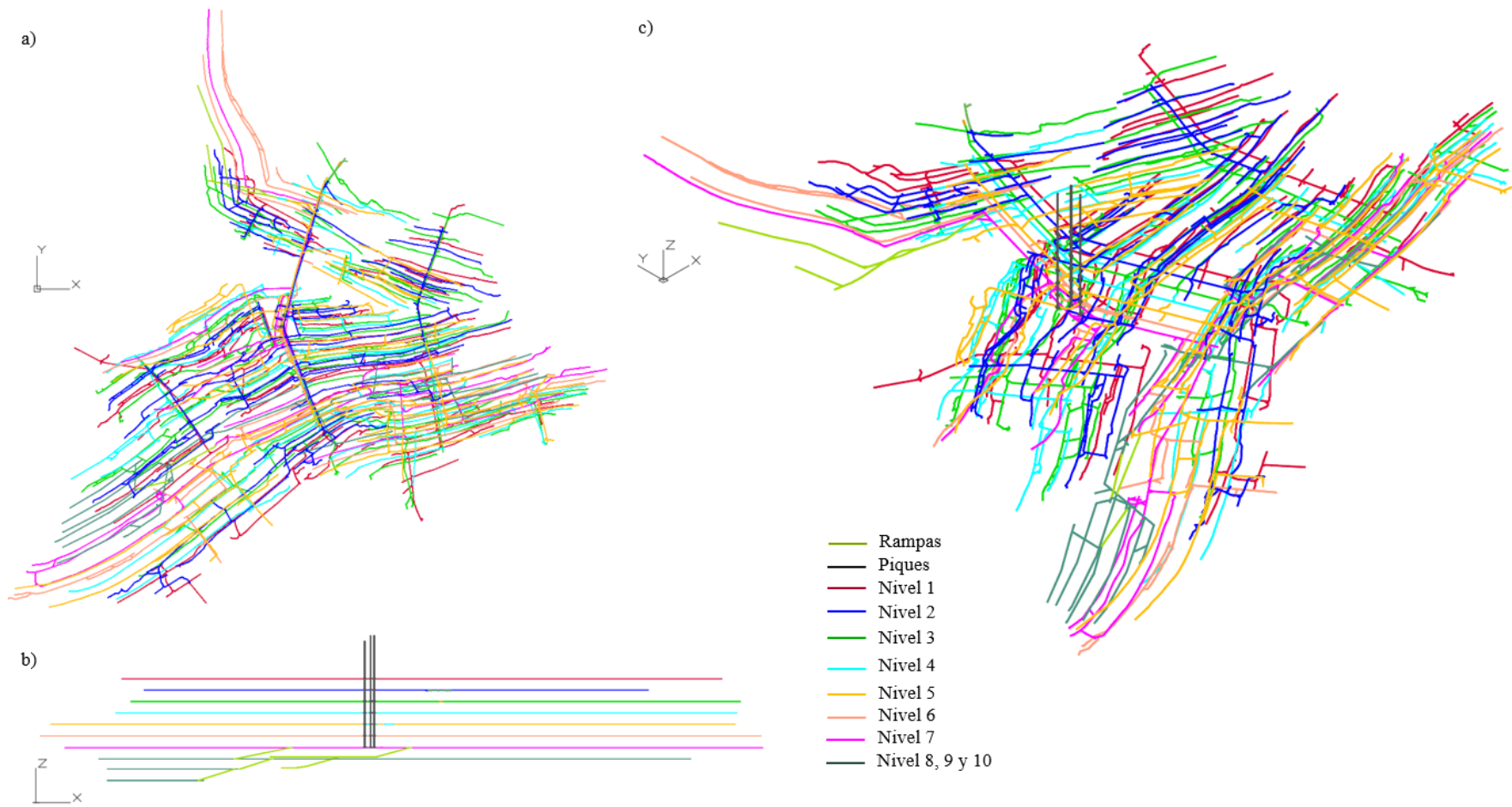


Figura 8.26 Labores de M2 y zonas de interés como entidades de superficie (se omiten ZE). a) Vista en planta b) Vista frontal c) Vista isométrica.

9.- *Creación de marcadores de región*: Un marcador de región (RM por su abreviación del inglés) es un punto el cual permite a TetGen identificar y/o agrupar los volúmenes herméticos a los que pertenece dicho punto, lo que facilita el análisis por zonas de interés. Para cada entidad tipo superficie se debe generar un RM, es decir un punto que pertenezca al volumen hermético de la superficie respectiva. Los RMs deben agruparse en capas del archivo *.dwg según las zonas de interés. Por ejemplo, para cada ZE se debe crear un RM, los cuales deben agruparse en capas del archivo según el grupo (zona de interés) de ZE al que pertenezcan, de esta forma se obtienen 11 agrupaciones de RMs, ya que son 11 grupos de ZE.

En total se crearon 121 RMs asociados al complejo minero. La Tabla 8.3 indica la cantidad de RMs según las zonas de interés definidas. Notar que cada pique y rampa es asociado a solo un RM. Además, la cantidad de RMs de un grupo de ZE es igual a la cantidad de unidades de ZE que forman dicho grupo.

Tabla 8.3 Zonas de interés y cantidad de marcadores de región.

Zona de interés	Cantidad de RM
Nivel 1, M1	1
Nivel 2, M2	1
Nivel 3, M3	1
Nivel 4, M4	1
Nivel 5, M5	1
PM1	1
Rampa M1	1
ZE 1	13
ZE 2	7
ZE 3	11
ZE 4	15
ZE 5	1
ZE 6	4

ZE 7	18
ZE 8	1
ZE 9	14
ZE 10	4
ZE 11	2
Nivel 1, M2	1
Nivel 2, M2	1
Nivel 3, M2	3
Nivel 4, M2	2
Nivel 5, M2	1
Nivel 6, M2	1
Nivel 7, M2	1
Nivel 8, M2	1
Nivel 9, M2	1
Nivel 10, M2	1
P1M2	1
P2M2	1
P3M2	1
Conexión Nivel 2 de M2 con Nivel 3 de M1	1
Conexión Nivel 3 de M2 con ZE 7	1
Conexión Nivel 5 de M2 con Nivel 5 de M1	2
M2 rampa, extensión Norte del Nivel 7	1
M2, rampa Nivel 7 – Nivel 8	1
M2, rampa Nivel 8 – Nivel 9	1
M2, rampa Nivel 9 – Nivel 10	1

10.- *Unión de superficies*: Todas las entidades de superficie deben unirse a través de la herramienta unión, esto generada una sola entidad de superficie con separaciones internas que

corresponden a las intersecciones entre los límites de las zonas de interés y que respetan los criterios de una PLC. De esta forma se obtiene una entidad de superficie que define la totalidad del complejo minero (M1 y M2).

11.- *Triangulación de malla*: La entidad de superficie que define al complejo minero es mallada a través de la herramienta de triangulación de malla. De esta forma se genera una malla según los criterios establecidos por el usuario. En particular se genera una malla triangular, aunque se puede utilizar cualquier malla con tal de que sea una PLC. La elección se basa en la facilidad comparativa al controlar los posibles errores topológicos y geométricos de la malla. Los parámetros de malla utilizados se indican en la Tabla 8.4. Debido a la complejidad del complejo minero la distancia entre malla y caras originales se ha fijado en 0.1 [m]. El ángulo máximo entre caras nuevas corresponde a 90°, este valor fue obtenido a partir de testeos dando uno de los mejores resultados. La relación anchura/altura se ha fijado en 0.866 para incentivar la generación de triángulos regulares (equiláteros). La longitud de arista máxima se ha fijado en 50 [m] teniendo en cuenta la reducción de carga computacional y considerando un posterior remallado en FEFLOW.

Tabla 8.4 Parámetros malla de entrada del complejo minero

Parámetro	Valor
Distancia entre malla y caras originales (metros)	0.1
Ángulo máximo entre caras nuevas (grados)	90
Relación altura/anchura para caras nuevas	0.866
Longitud de arista máxima para caras nuevas (metros)	50

12.- *Comprobación de malla (FEFLOW)*: La malla generada en AutoCAD debe ser comprobada en FEFLOW a través de TetGen, esto con objetivo de comprobar errores y/o espacios de mejora, por ejemplo, según criterios de calidad, geométricos, etc. La comprobación de mallas de forma independiente permite acotar las posibles fuentes de errores y con ello una detección en menor tiempo.

Anexo O Malla del dominio del modelo y acoplado de mallas

En este caso particular la malla del dominio del modelo presenta una problemática debido a la conexión entre los piques del complejo minero con la superficie topográfica, ya que TetGen no permite realizar un remallado que incluya los límites del modelo (en particular la topografía) por lo que no es posible generar una malla inicial del dominio del modelo y posteriormente un remallado que incluya el complejo minero. Esto implica que la malla a incorporar a FEFLOW debe incluir inicialmente tanto el dominio del modelo como el complejo minero. De esta forma se presenta el resumen de los procedimientos seguidos:

1.- *Generación de malla estructura a través de FEFLOW*: El objetivo principal de este paso es generar una malla topográfica con zonas de mayor densidad de elementos (zonas refinadas) las que corresponderán a las zonas de ríos y piques. Para ello en primera instancia se genera un supermesh el cual se presenta en la Figura 8.27. Notar que con motivo de generar una PLC se han generado 3 polígonos (denotados en la Figura 8.27 como P1, P2 y P3) para representar las zonas de macizo alterado y macizo inalterado, a su vez, las líneas representan la red fluvial de la zona y comparten nodos en común con los polígonos que intersecan, respetando los criterios de una PLC. Las ubicaciones de los 4 piques del complejo se representan a través de 4 puntos.

En un modelo estructurado FEFLOW permite controlar la densidad de elementos generados en torno a ciertas geometrías, tales como líneas y puntos. De esta forma se genera una malla de elementos finitos con una discretización mayor en las cercanías de los ríos y piques, lo cual se presenta en la Figura 8.28.

Por otro lado, a través del archivo Curvas de Nivel – Zona de Estudio (*.dwg) se extrae una nube de puntos en formato *.csv. La nube de puntos es importada a FEFLOW y utilizada para generar la topografía del modelo estructurado. El resultado se presenta en la Figura 8.29.

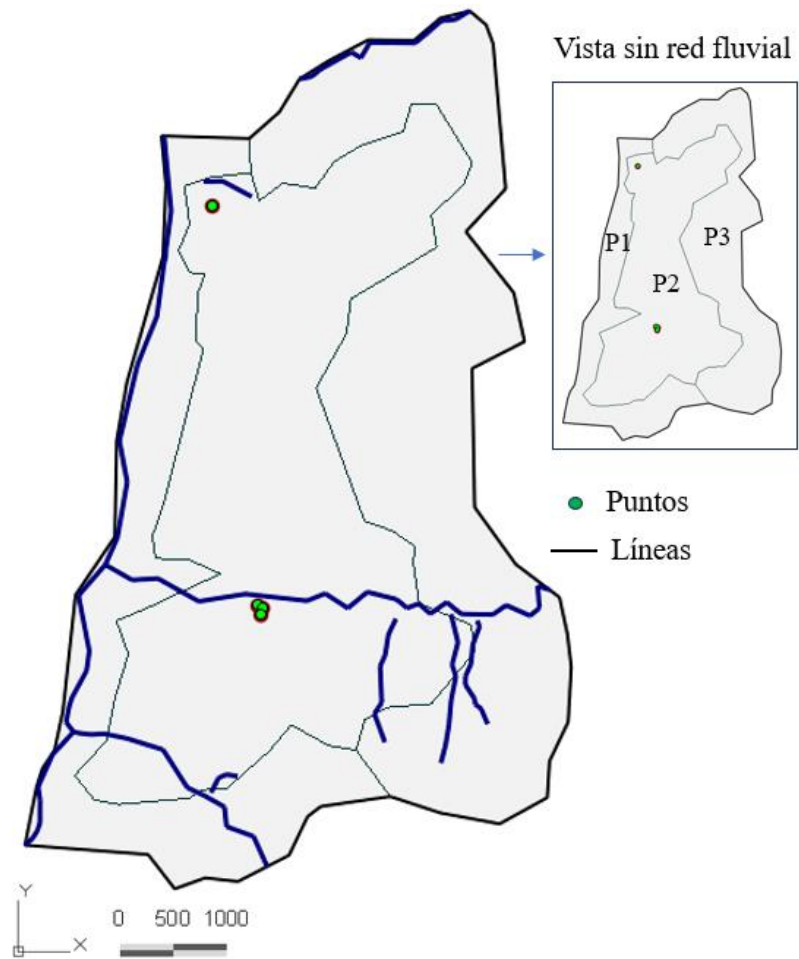


Figura 8.27 Supermesh de modelo estructurado.

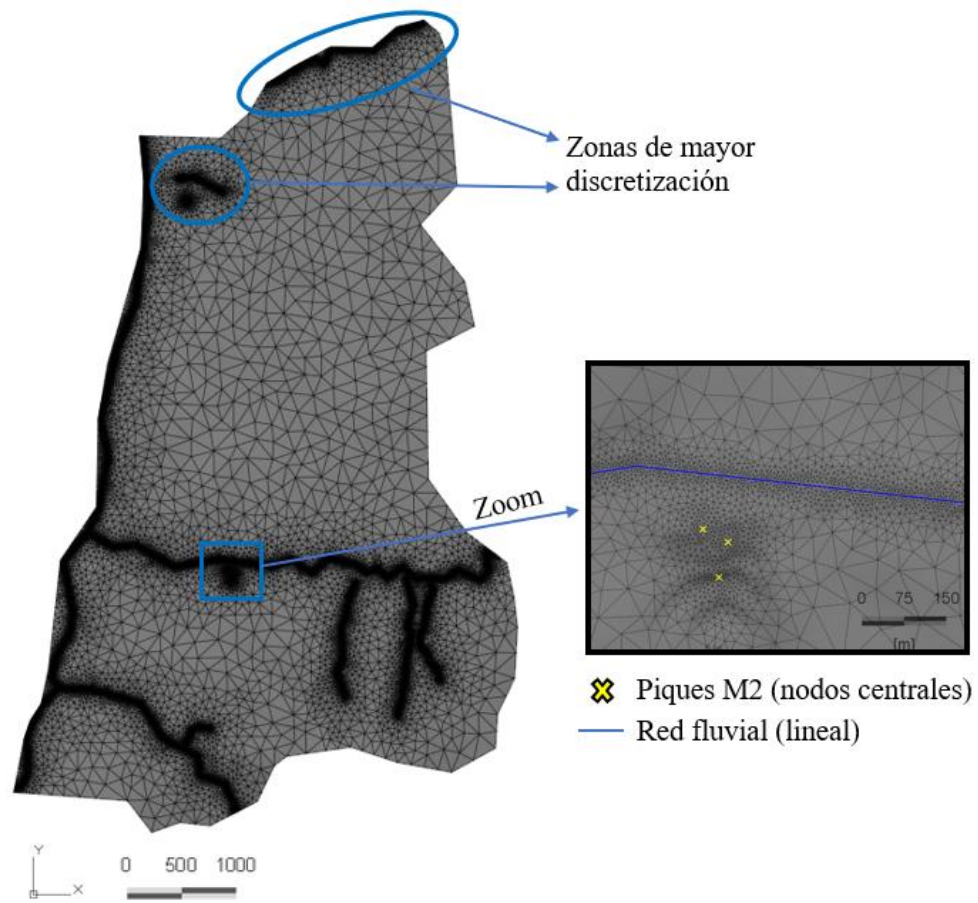


Figura 8.28 Vista en planta de modelo (FEM) estructurado.

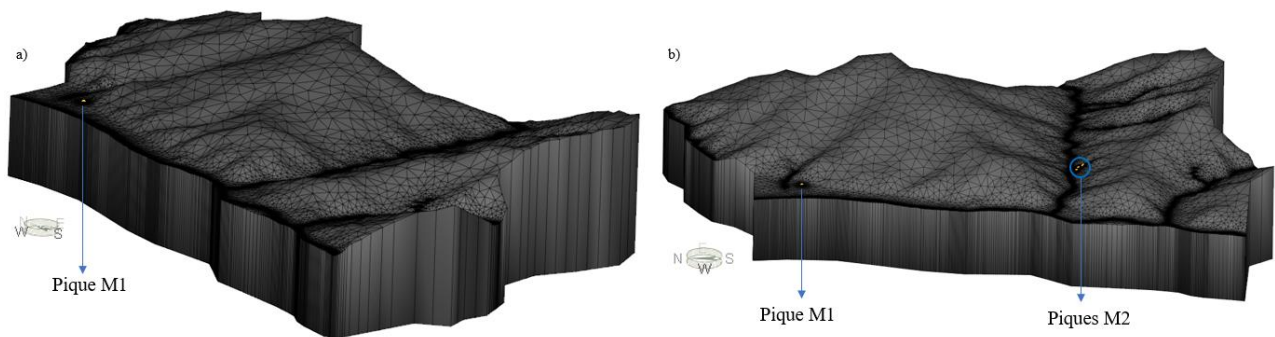


Figura 8.29 Modelo estructurado con información topográfica.

2.- *Recreación de la malla topográfica:* Como ya se ha expuesto anteriormente no se puede remallar los límites exteriores de una malla, por lo que se descarta remallar la topografía del modelo estructurado en conjunto con la malla del complejo minero. Debido a esto se procede a exportar la malla estructurada del dominio del modelo hacia AutoCAD, sin embargo, FEFLOW no permite (no funciona correctamente) esta funcionalidad, más si permite la exportación de una nube de puntos, por lo que se procede a exportar una nube de puntos de la topografía (cara superior) de la malla estructurada, la cual incluye los nodos creados en la refinación de las zonas de los ríos y piques. La nube de puntos es utilizada en Civil 3D para recrear exactamente la malla de la topografía del modelo estructurado, incluyendo los elementos refinados (Figura 8.30). Con ello se obtiene una malla topográfica que es eficiente en términos computacionales y que representa la realidad de forma precisa, junto con cumplir el objetivo de mantener un refinado de las zonas necesarias. Posteriormente la malla topográfica se exporta a AutoCAD en forma de entidad sólida, la cual incluye las caras laterales y la cara inferior del dominio del modelo, el resultado de esto último se indica en la Figura 8.31, donde es fácil notar que la entidad solida mantiene la estructura de la malla topográfica del modelo estructurado (esto último también fue comprobado a través de diversas técnicas computacionales). Finalmente, la entidad solida es convertida a una entidad de superficie.

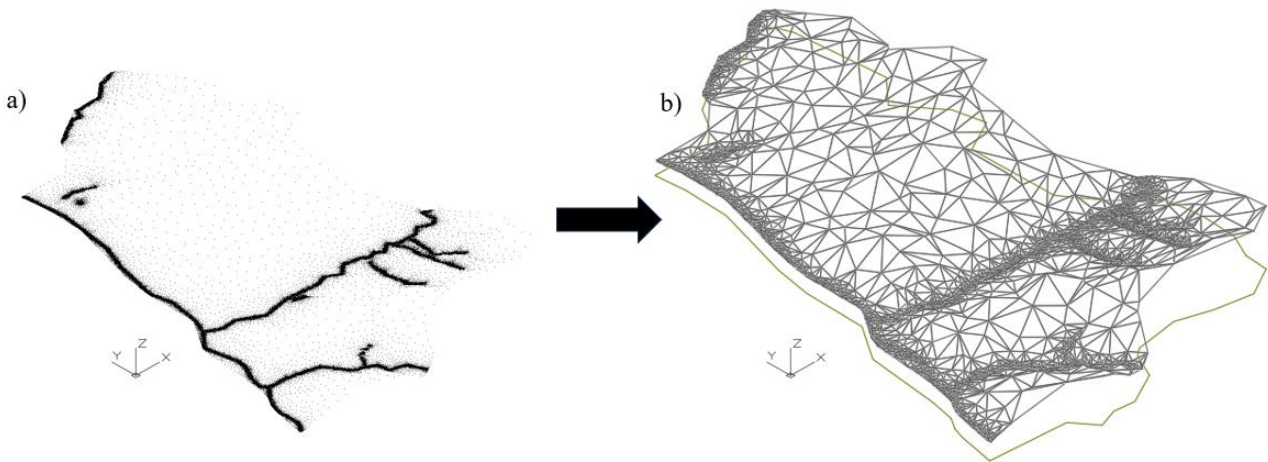


Figura 8.30 Reconstrucción de topografía en AutoCAD Civil 3D a través de nube de puntos extraída de FEFLOW (a) y generación de superficie TIN (b).

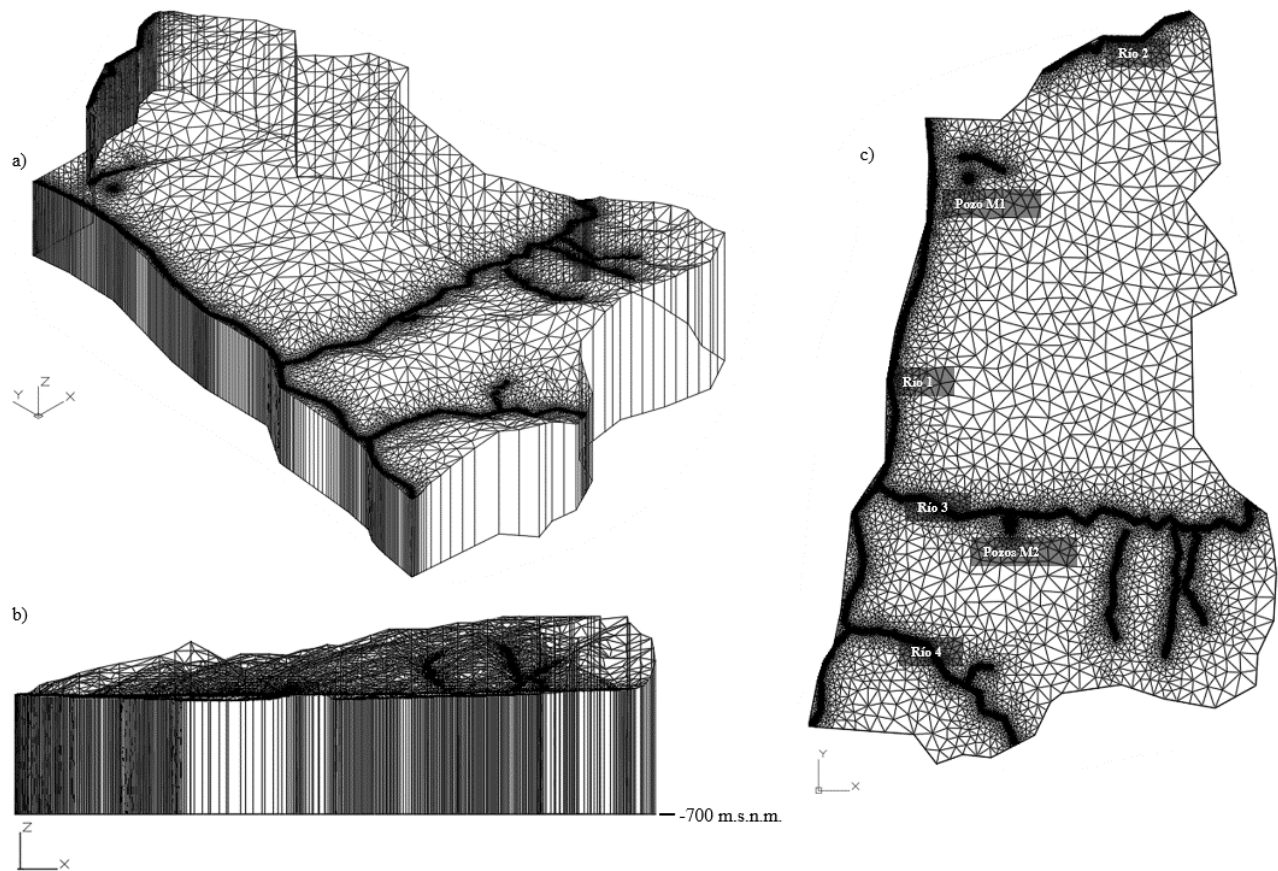


Figura 8.31 Dominio y malla topográfica como entidad sólida de AutoCAD. a) Vista isométrica b) Vista en planta. c) Vista frontal.

3.- *Generación de zona fracturada*: Para acercar el modelo a la realidad se ha supuesto una zona de influencia geomecánica de 200 [m] horizontales, extensión vertical superior infinita (hasta topografía) y extensión vertical inferior de 50 [m] verticales para cada labor del complejo minero. La zona de influencia horizontal es generada en ArcGIS de forma separada para cada nivel de M1 y M2 y posteriormente se exporta el resultado a AutoCAD, en el cual se realiza la extrusión según la extensión vertical ya definida y generando una holgura de tal forma que las caras superiores de los sólidos resultantes tengan una cota de elevación mayor a la mayor cota topográfica del modelo. De esta forma las entidades solidas que representan las zonas de influencia geomecánica son unidas y a partir de la entidad resultante se genera una entidad de superficie, la cual es recortada por la entidad de superficie del dominio del modelo, lo que resulta en una zona de influencia geomecánica representada por una entidad superficial sin cara superior, esta se presenta en conjunto con el complejo

minero en la Figura 8.32. De forma similar la Figura 8.33 presenta las entidades superficiales correspondiente al dominio del modelo (topografía como cara superior), la zona fracturada y el complejo minero.

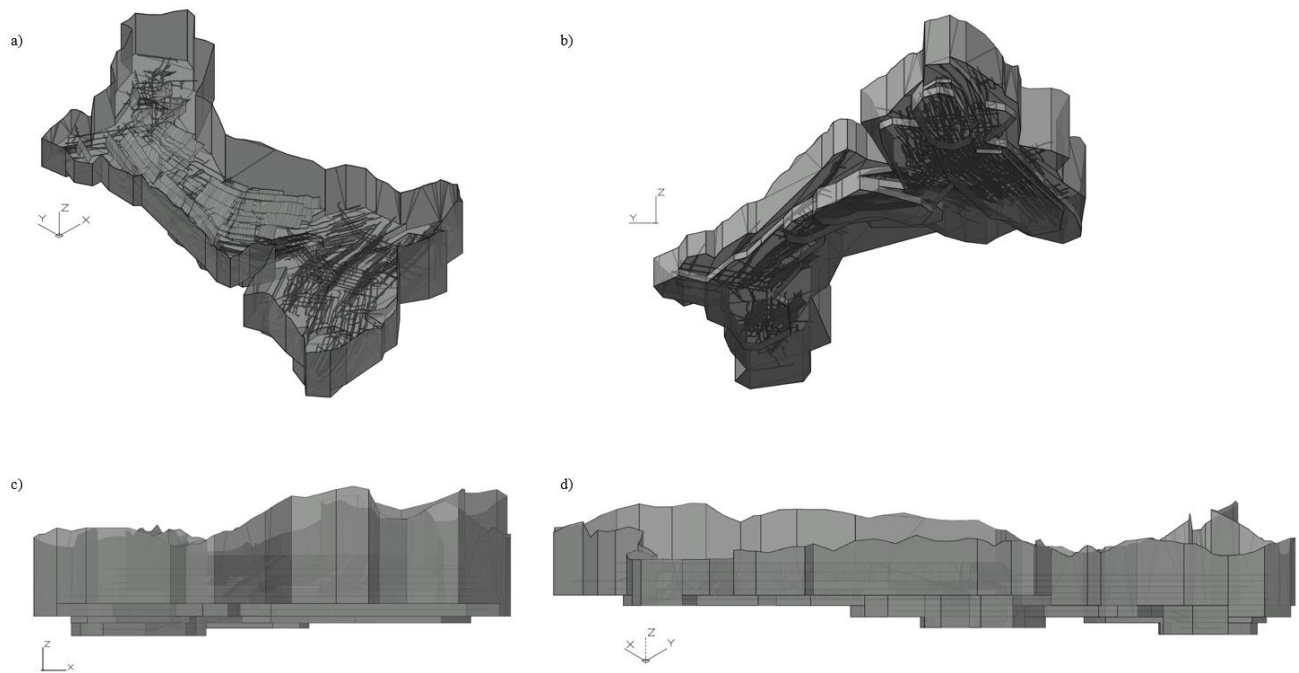


Figura 8.32 Zona de influencia geomecánica y complejo minero. a) Vista isométrica. b) Vista isométrica inferior. c) Vista frontal. d) Vista lateral izquierda.

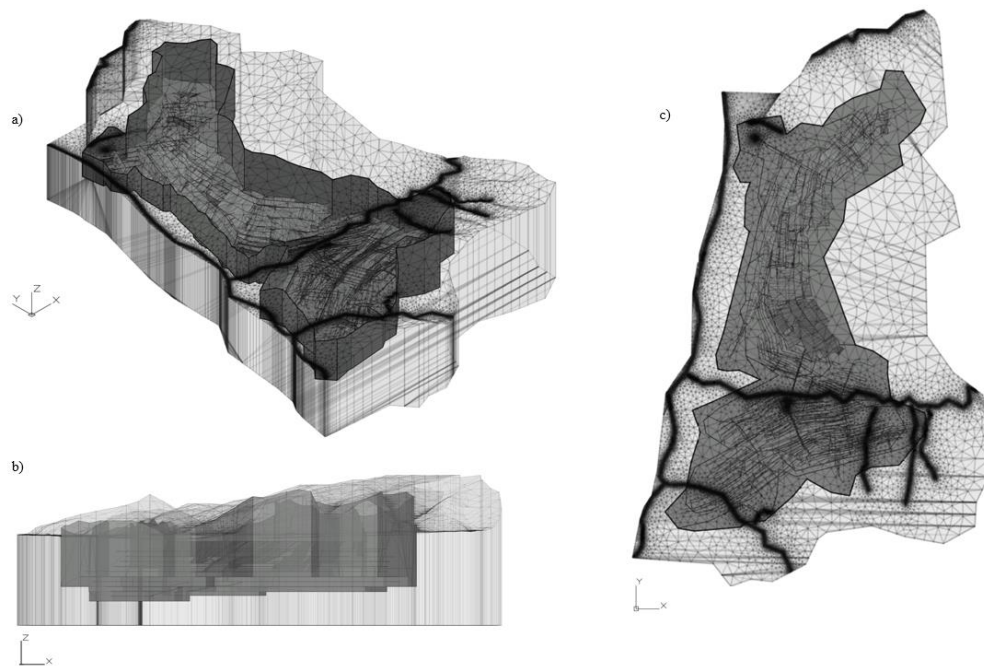


Figura 8.33 Dominio, zona fracturada y complejo minero del modelo como entidades superficiales independientes en AutoCAD. a) Vista isométrica. b) Vista frontal. c) Vista en planta.

4.- *Creación de malla del dominio del modelo*: Las entidades de superficie asociadas al dominio del modelo y a la zona de influencia geomecánica son unidas y posteriormente se genera una malla de la entidad resultante. Esto genera una malla del dominio del modelo con una separación interna que corresponde a la zona de influencia geomecánica (zona de macizo fracturado). Luego se crean 2 nuevos RMs, uno dentro de la zona fracturada y fuera de las labores del complejo minero y otro fuera de la zona fracturada y dentro del dominio del modelo. La Tabla 8.5 presenta los parámetros de la triangulación. Se ha fijado la relación altura/anchura en 0 (valor por defecto), lo que implica que no hay limitación, esto aliviano el cómputo sin afectar de forma significativa la calidad, ya que la malla tratada es relativamente simple. Los parámetros restantes son equivalentes a los de la malla de entrada del complejo minero, tanto en valor, como en el motivo de estos.

Tabla 8.5 Parámetros malla de entrada del dominio del modelo

Parámetro	Valor
Distancia entre malla y caras originales (metros)	0.1
Ángulo máximo entre caras nuevas (grados)	90
Relación altura/anchura para caras nuevas	0
Longitud de arista máxima para caras nuevas (metros)	50

5.- *Acoplamiento de mallas*: La malla del dominio del modelo (que incluye la zona fracturada como una separación interna) debe ser unida a la malla del complejo minero. La no existencia de herramientas para la unión de mallas complejas en los softwares disponibles implica que la unión de las mallas debe realizarse con un ajuste manual. Este ajuste consiste en la reconstrucción de los elementos de la malla topográfica (cara superior de la malla del dominio del modelo) que intersecan los piques de la malla del complejo minero. Notar que este es un ajuste menor, cuyo objetivo es eliminar holguras entre los elementos de intersección de ambas mallas, así generando una PLC. La Figura 8.34 indica los resultados del presente proceso, donde se aprecia que la malla del dominio del modelo (incluye topografía y zona fracturada) es independiente de la malla del complejo minero y las mallas de las zonas de ajuste manual permiten relacionar y acoplar las primeras 2. Las zonas de ajuste manual tienen un radio de 25 [m] aproximadamente y la creación de sus triángulos fue semiautomatizada a partir de diversas herramientas. En términos temporales el ajuste manual no tarda más de 2 horas, incluyendo testeos (para las 4 zonas de ajuste), este bajo tiempo de ajuste manual en relación con otras mallas complejas es producto de que la zona a reconstruir es solo una malla plana (sección topográfica en contacto con los piques). La malla resultante del proceso descrito se denominará Malla del Caso de Estudio y corresponde a una malla creada a partir de superficies, por lo tanto, no representa un mallado interno o un mallado de volumen, más que sus separaciones internas ya definidas (zona fracturada y complejo minero). Finalmente, la Malla del Caso de Estudio en formato *.dwg debe ser convertida a un archivo *.dxf.

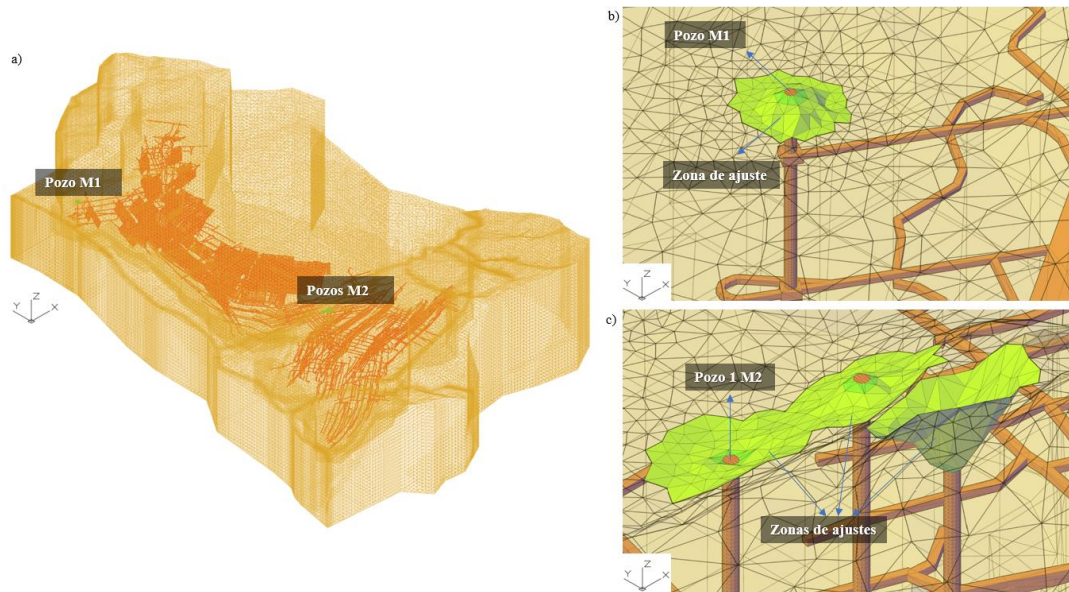


Figura 8.34 Resultado de ajuste manual en cercanías de la intersección de piques con topografía del modelo (AutoCAD). a) Vista isométrica de las mallas finales (complejo minero y dominio del modelo). b) Vista isométrica de la zona de ajuste manual de M1. c) Vista isométrica de las zonas de ajuste manual de M2.

Anexo P Parámetros de entrada de mallas FEM, modelos serie A y B

El volumen total de cada una de las mallas FEM es de $3.1 \cdot 10^{10} \text{ [m}^3\text{]}$ y el tiempo de generación del supermesh corresponde a 4 minutos para todos los modelos, esto ya que se utilizó la misma malla de entrada para todos los modelos.

Parámetros iniciales de los Modelos serie A y Modelos serie B: La opción de conservación de límites externos se encuentra desactivada, con el objetivo de generar un remallado de los límites externos e internos del modelo, lo que conlleva a una malla de mejor calidad. La opción de tolerancia para características pequeñas se encuentra fijada en $1e^{-8}$ (valor por defecto), lo que se fundamenta en testeos, tomando en cuenta la relación entre el tiempo de cómputo y calidad de malla, donde se observa que la calidad de malla aumenta en baja medida con relación al tiempo de cómputo a partir del valor $1e^{-8}$. Los valores de mínimo y máximo ángulo diédrico se fijan en sus valores por defecto, 10° y 160° grados respectivamente, esto debido a que pequeñas variaciones en estos valores genera un gran incremento en los tiempos de cómputo, para estos modelos en particular, por ejemplo, una variación

del mínimo ángulo diédrico de 2° corresponde a un tiempo de generación de FEM mayor a 24 horas, con un incremento despreciable en la calidad de malla. Los valores de radius-edge ratio de los Modelos Serie A y Modelos Serie B corresponden a 2.0 (valor por defecto) y 1.8 respectivamente, lo que se fundamenta en la generación de diferencias entre los modelos para determinar cómo afecta esta variación los resultados finales de los modelos. Valores de radius-edge ratio bajo 1.8 para los modelos conlleva a un tiempo de generación de FEM mayor a 24 horas.

La Tabla 8.6 presenta los principales parámetros de entrada de la malla FEM para las series de modelos seleccionadas.

Tabla 8.6 Parámetros de entrada de mallas FEM

	Modelos Serie A	Modelos Serie B
Tolerancia para características pequeñas	10^{-8}	10^{-8}
Radius edge-ratio	2.0	1.8
Mínimo ángulo diédrico (grados)	10	10
Máximo ángulo diédrico (grados)	160	160
Conservar limites externos	No	No

Anexo Q Modelos Serie A

El tiempo de generación de la malla FEM es de 45 minutos, resultando en una malla de aproximadamente $2.9 \cdot 10^6$ nodos y $17.5 \cdot 10^6$ elementos. El 80% de los elementos (octavo decil) tiene un número de condición menor o igual a 1.6.

Debido a la complejidad de la malla de entrada, la malla FEM resultante contiene elementos demasiado distorsionados que impiden resolver el modelo, por lo tanto, se procede a determinar cuáles son los elementos problemáticos y evaluar si estos pueden ser desactivados sin una influencia mayor en el resultado. Notar que el desactivar elementos en FEFLOW implica que no se realizaran cálculos en sus nodos, evitando de esta forma errores asociados a elementos muy distorsionados. De esta forma, existen 579 elementos con un número de condición mayor o igual a 50 correspondientes a un volumen de 703 [m³], de estos 579 elementos, 518 tienen un volumen menor o igual a 1 [m³] y sumados

corresponden a $20 \text{ [m}^3\text{]}$, así, los elementos con un número de condición mayor o igual a 50 y volumen menor o igual 1 m^3 corresponden al $6.4 \cdot 10^{-8} \%$ del volumen total, lo que hace que estos elementos sean despreciables en términos volumétricos, por lo que se pueden desactivar sin mucha influencia en la resolución del modelo. Lo expuesto se refuerza ya que FEFLOW interpreta los elementos desactivados como elementos impermeables y debido a la poca conductividad de la zona de estudio, se puede suponer estos elementos como impermeables.

La Figura 8.35 corresponde al gráfico de percentil v/s número de condición de los Modelos Serie A, incluyendo sus principales parámetros estadísticos, a su vez la Figura 8.36 presenta el histograma de número de condición de los Modelos Serie A. Es fácil notar los altos valores de número de condición alcanzando un máximo de $8.3 \cdot 10^{13}$ y una media de $1.5 \cdot 10^7$. La asimetría y la curtosis corresponden a valores positivos que es lo que se esperaría en un gráfico de este estilo, sin embargo, los valores son demasiado altos, lo cual ocurre debido a la presencia de elementos con un alto valor de número de condición. En particular la asimetría es de $2.2 \cdot 10^3$ y la curtosis de $5.3 \cdot 10^6$.

La desactivación de elementos conlleva a una nueva distribución a resolver, ya que los elementos desactivados se suponen impermeables y no se realiza un cálculo en sus nodos. La distribución sin incluir los elementos desactivados se presenta en la Figura 8.37 y en la Figura 8.38. La disminución en los valores de asimetría y curtosis es debido a la desactivación de elementos problemáticos, estos valores aún son positivos, lo cual es concordante con la distribución esperada del número de condición. En particular los valores de asimetría y curtosis para la nueva distribución a resolver son de $1.4 \cdot 10^2$ y $1.1 \cdot 10^5$ respectivamente. El valor máximo de número de condición en la nueva distribución ha disminuido a $9.3 \cdot 10^2$, lo cual corresponde a un elemento mal formado, sin embargo, este no es lo suficientemente distorsionado para impedir el cálculo de resolución del modelo, por lo que es aceptable. Además, la media ha disminuido a 1.6 lo que muy bueno en términos de calidad de malla y el octavo decil se mantiene en 1.6 aproximadamente.

Respecto al análisis del máximo y mínimo ángulo diédrico, la Figura 8.39 y la Figura 8.40 presentan sus histogramas de forma respectiva, previo a la desactivación de elementos. Se observa que en ambas distribuciones la asimetría es cercana a cero, con una ligera asimetría positiva (máximo ángulo diédrico) y negativa (mínimo ángulo diédrico) para los parámetros de forma respectiva, lo que indica un promedio mayor y menor a la mediana de forma respectiva para estos parámetros. La

curtosis de la Figura 8.39 indica un compartimiento casi normal con inclinación a leptocúrtica, al contrario, la Figura 8.40 indica un comportamiento platicúrtico. Los comportamientos descritos son los esperados para estos parámetros. En la Figura 8.39 se observa un máximo ángulo diédrico de 180° lo que es indicativo de un elemento sumamente mal formado, el cual en la mayoría de los casos puede impedir el cálculo de resolución de FEM. El promedio corresponde a 107.7° con una desviación estándar de 17.1° lo que es aceptable. Del mismo modo, la Figura 8.40 indica un mínimo ángulo diédrico de $6.0 \cdot 10^{-13}$ lo que es prácticamente cero, esto indica un elemento sumamente mal formado y que en la mayoría de los casos impide el cálculo computacional. El promedio corresponde a 38.1° con una desviación estándar de 12.0° lo que es aceptable.

La Figura 8.41 y la Figura 8.42 presentan los histogramas del máximo y mínimo ángulo diédrico excluyendo los elementos desactivados. Se observa que el máximo ángulo diédrico ha disminuido a 179.4° lo cual corresponde a un elemento mal formado, sin embargo, este no impide el cálculo por lo que es aceptable. De forma similar, el mínimo ángulo diédrico ha aumentado a 0.2° lo cual corresponde a un elemento mal formado, sin embargo, este no impide el cálculo por lo que es aceptable. Los nuevos valores de promedios, desviación estándar, curtosis y asimetrías no varían en gran medida y siguen siendo aceptables.

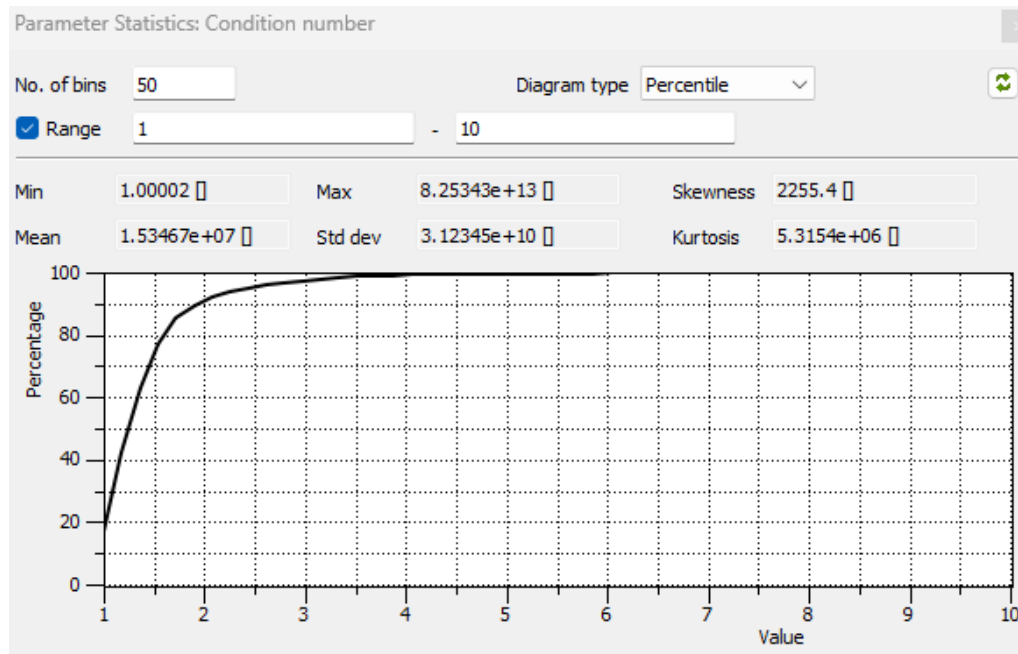


Figura 8.35 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie A.

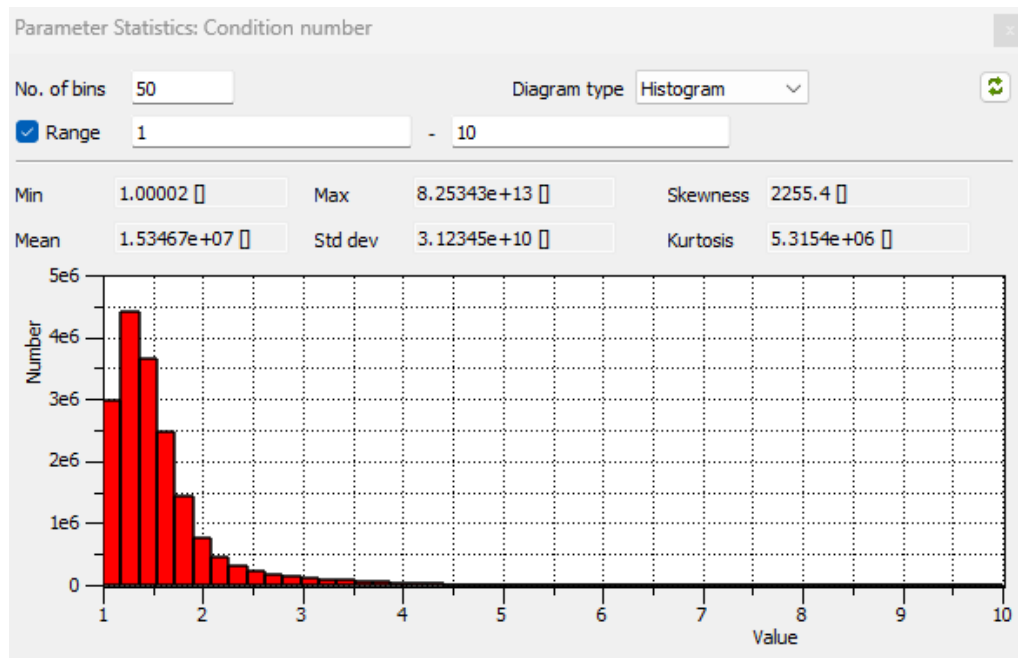


Figura 8.36 Histograma de número de condición de los Modelos Serie A.

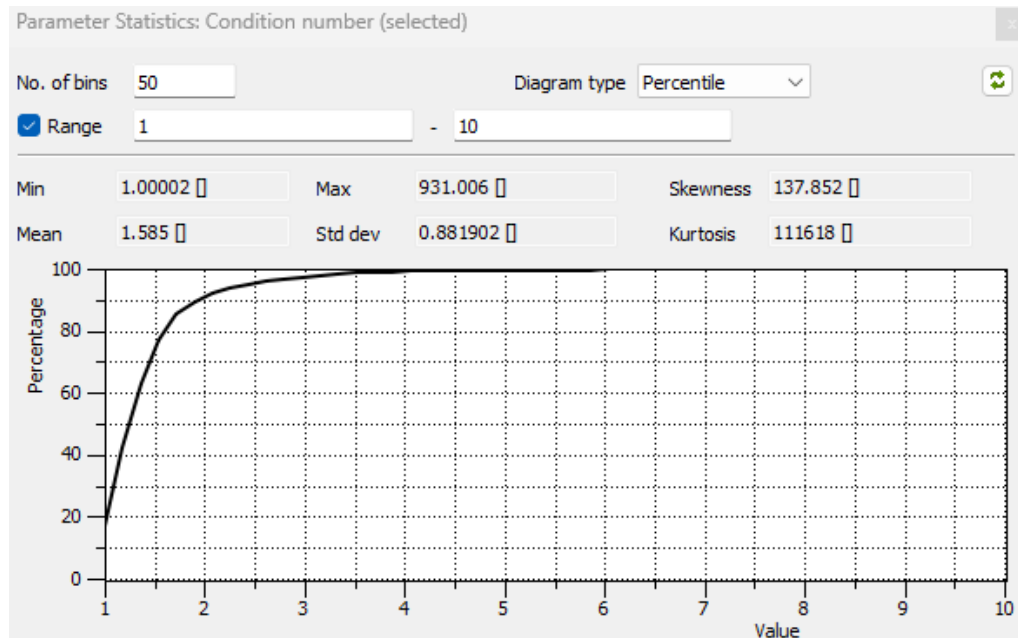


Figura 8.37 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie A, sin incluir elementos desactivados.

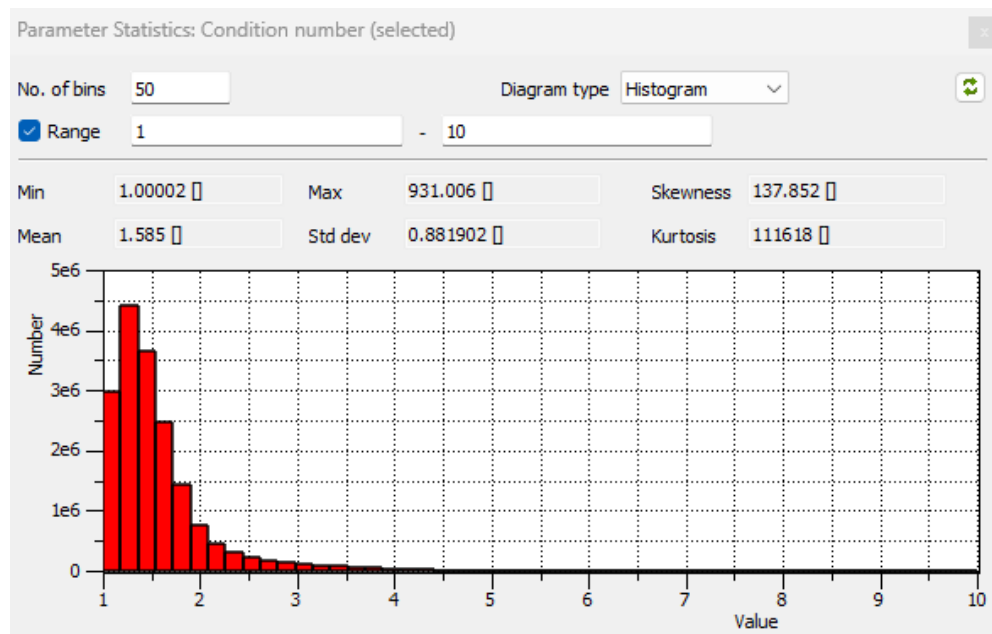


Figura 8.38 Histograma de número de condición de los Modelos Serie A, sin incluir elementos desactivados.

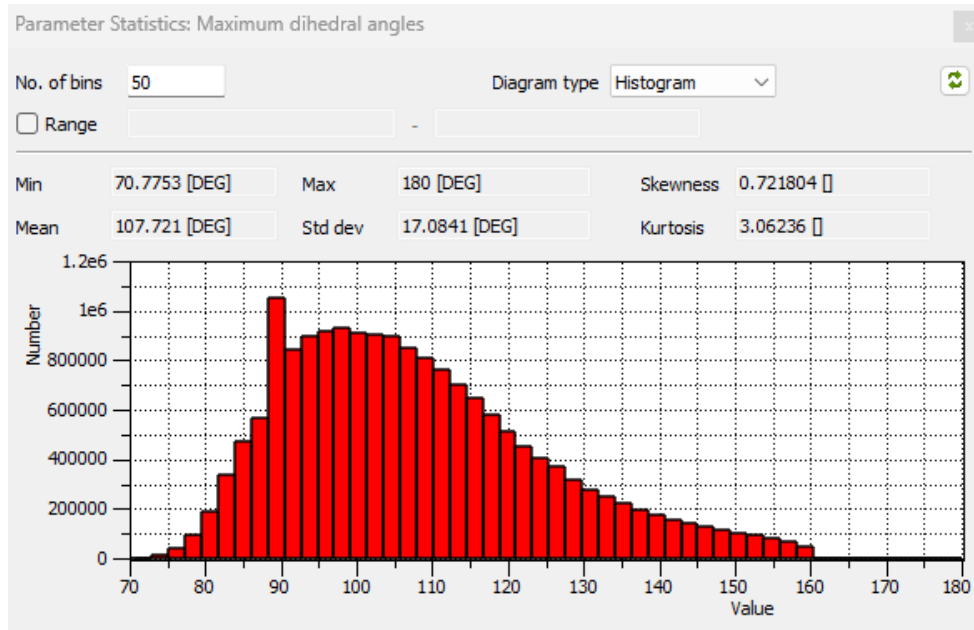


Figura 8.39 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie A.

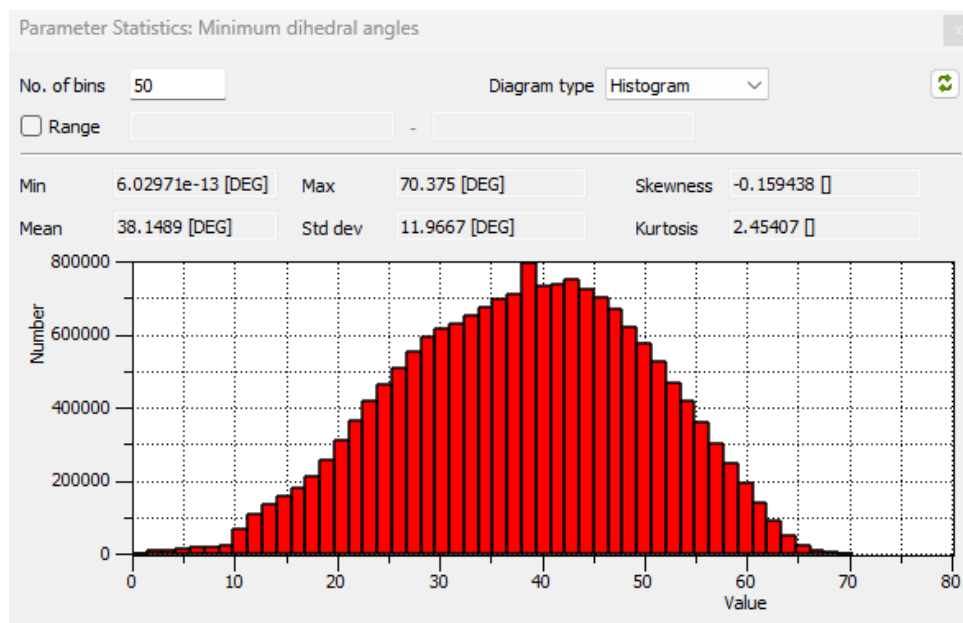


Figura 8.40 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie A.

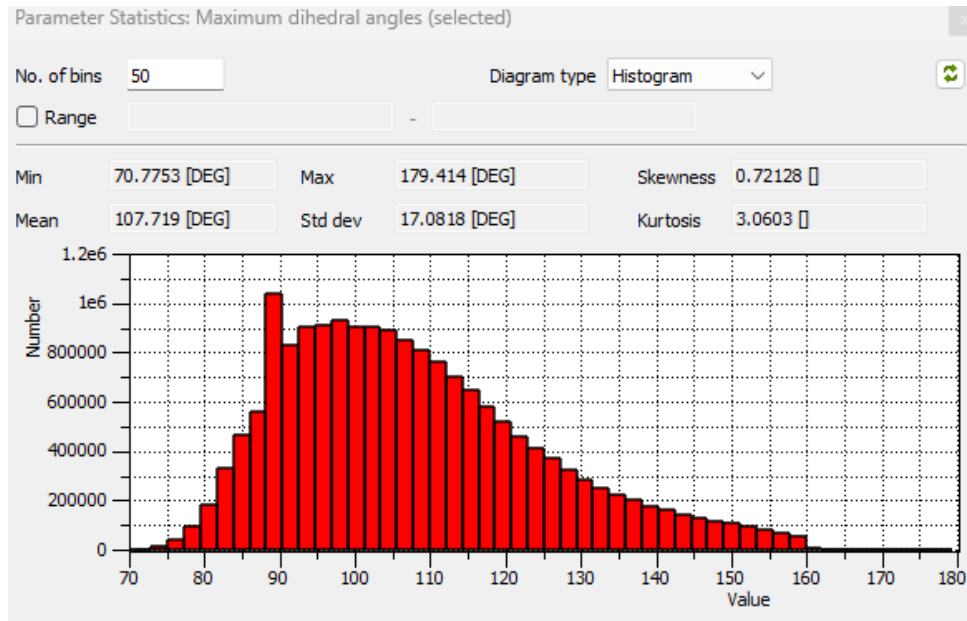


Figura 8.41 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie A sin incluir elementos desactivados.

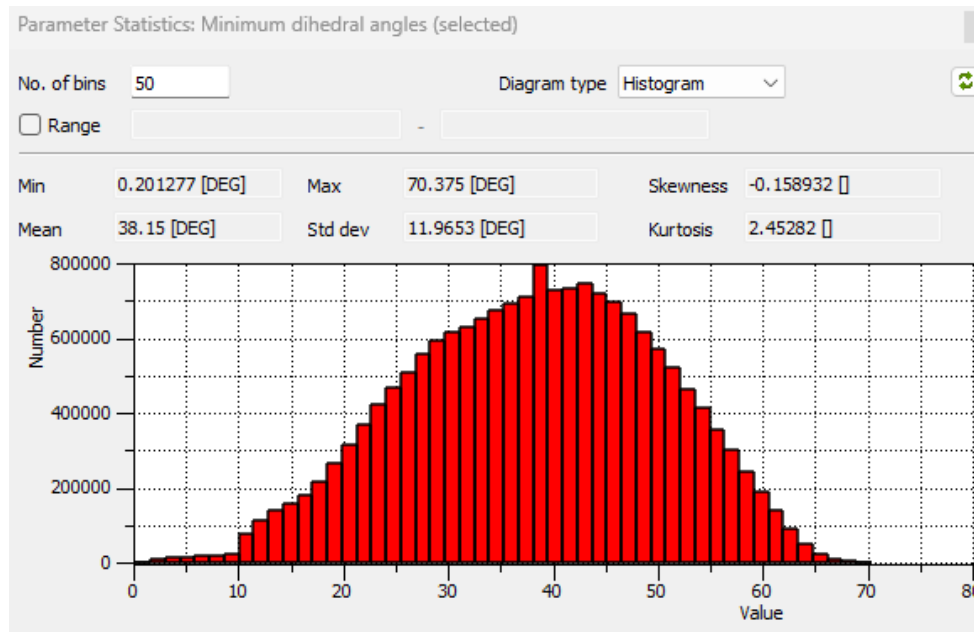


Figura 8.42 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie A sin incluir elementos desactivados.

Anexo R Modelos Serie B

El tiempo de generación de la malla FEM es de 50 minutos, resultando en una malla de aproximadamente $3.3 \cdot 10^6$ nodos y $19.7 \cdot 10^6$ elementos. El 80% de los elementos (octavo decil) tiene un número de condición menor o igual a 1.5.

Existen 469 elementos con un número de condición mayor o igual a 50 correspondientes a un volumen de 128 m^3 , de estos 469 elementos, 463 tienen un volumen menor o igual a $1 \text{ [m}^3\text{]}$ y sumados corresponden a $11.5 \text{ [m}^3\text{]}$, así, los elementos con un número de condición mayor o igual a 50 y volumen menor o igual $1 \text{ [m}^3\text{]}$ corresponden al $3.7 \cdot 10^{-8} \%$ del volumen total, lo que es despreciable en términos volumétricos, por lo que estos elementos pueden desactivarse.

La Figura 8.43 corresponde al gráfico de percentil v/s número de condición de los Modelos Serie B, incluyendo sus principales parámetros estadísticos, a su vez la Figura 8.44 presenta el histograma de número de condición de los Modelos Serie B. El número de condición máximo es de $1.1 \cdot 10^{14}$, con una media de $1.4 \cdot 10^7$. De forma similar a los Modelos Serie A, la asimetría y la curtosis corresponden a valores positivos con valores muy altos. En particular la asimetría es de $2.9 \cdot 10^3$ y la curtosis de $8.9 \cdot 10^6$.

La distribución sin incluir los elementos desactivados se presenta en las Figura 8.45 y en la Figura 8.46. Análogamente a los Modelos Serie A, los valores de asimetría y curtosis disminuyen debido a la desactivación de elementos mal formados y los valores para estas variables siguen siendo positivos lo cual es concordante para la distribución esperada del número de condición. Los valores de asimetría y curtosis para la nueva distribución a resolver son de $1.7 \cdot 10$ y $1.3 \cdot 10^3$ respectivamente. El valor máximo de número de condición en la nueva distribución ha disminuido a $2.7 \cdot 10^2$, lo cual corresponde a un elemento mal formado, sin embargo, este no es lo suficientemente distorsionado para impedir el cálculo de resolución del modelo, por lo que es aceptable. Además, la media ha disminuido a 1.5 lo que muy bueno en términos de calidad de malla y el octavo decil se mantiene en 1.5 aproximadamente.

La Figura 8.47 y la Figura 8.48 presentan los histogramas, previo a la desactivación de elementos, del máximo y mínimo ángulo diédrico, respectivamente. Las distribuciones son similares

a las de los Modelos Serie A, en términos de asimetría y curtosis, por lo que no se entrara en el detalle. De forma análoga a los Modelos Serie A, se observan elementos mal formados con un máximo ángulo diédrico de 180° y un mínimo ángulo diédrico de $6.0 \cdot 10^{-13}$, lo que es indicativo de uno o más elementos sumamente mal formados. El promedio para el máximo ángulo diédrico corresponde a 107.5° con una desviación estándar de 17.2° y el promedio para el mínimo ángulo diédrico es de 38.7° con una desviación estándar de 11.7° . Los valores de promedios y desviación estándar son aceptables.

La Figura 8.49 y la Figura 8.50 presentan los histogramas del máximo y mínimo ángulo diédrico excluyendo los elementos desactivados. El máximo ángulo diédrico ha disminuido a 178.4° lo cual corresponde a un elemento mal formado, sin embargo, este no impide el cálculo por lo que es aceptable. Similarmente, el mínimo ángulo diédrico ha aumentado a 0.3° lo cual corresponde a un elemento mal formado, sin embargo, este no impide el cálculo por lo que es aceptable. Los nuevos valores de promedios, desviación estándar, curtosis y asimetrías no varían en gran medida y siguen siendo aceptables.

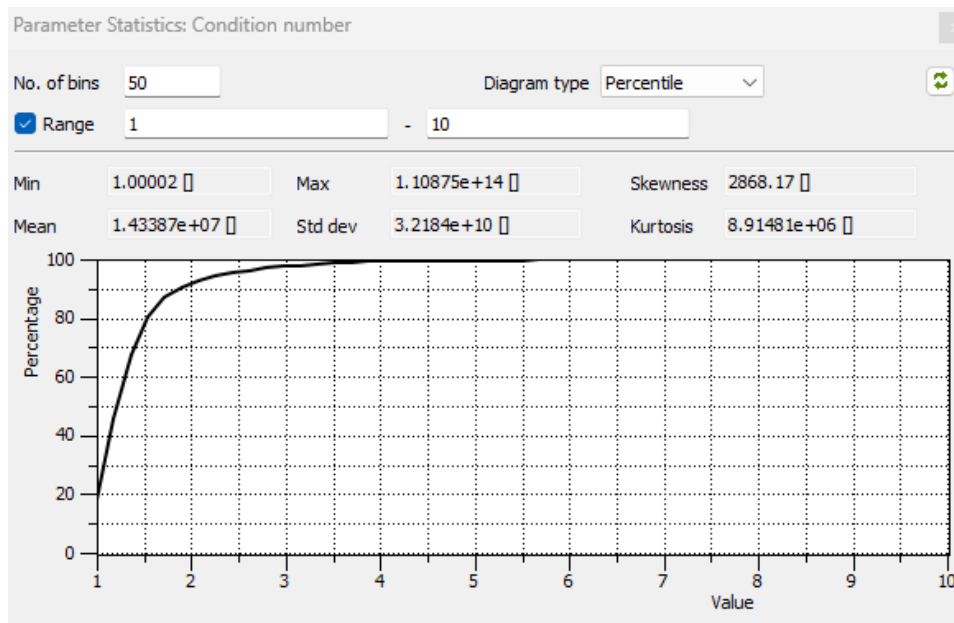


Figura 8.43 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie B.

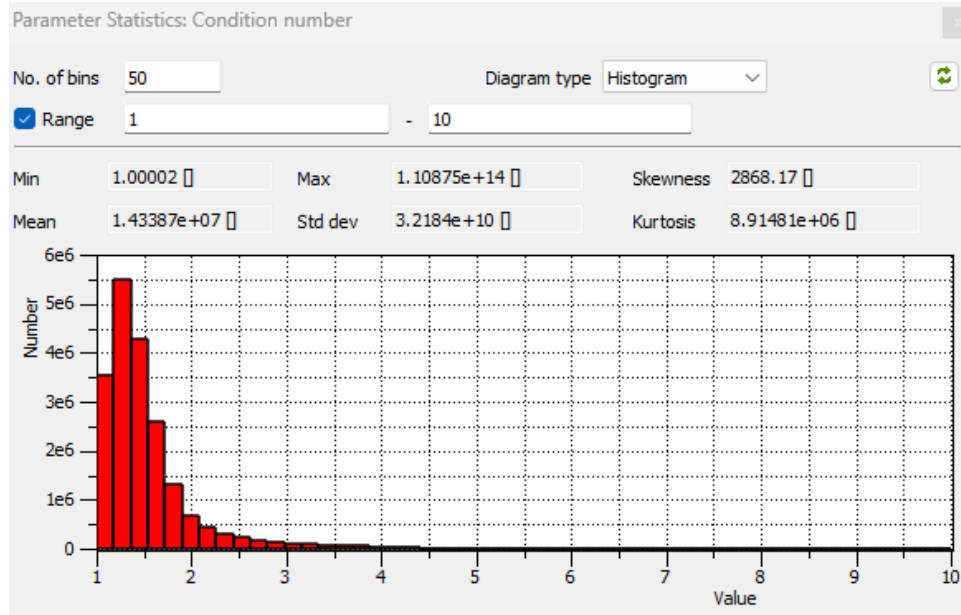


Figura 8.44 Histograma de número de condición de los Modelos Serie B.

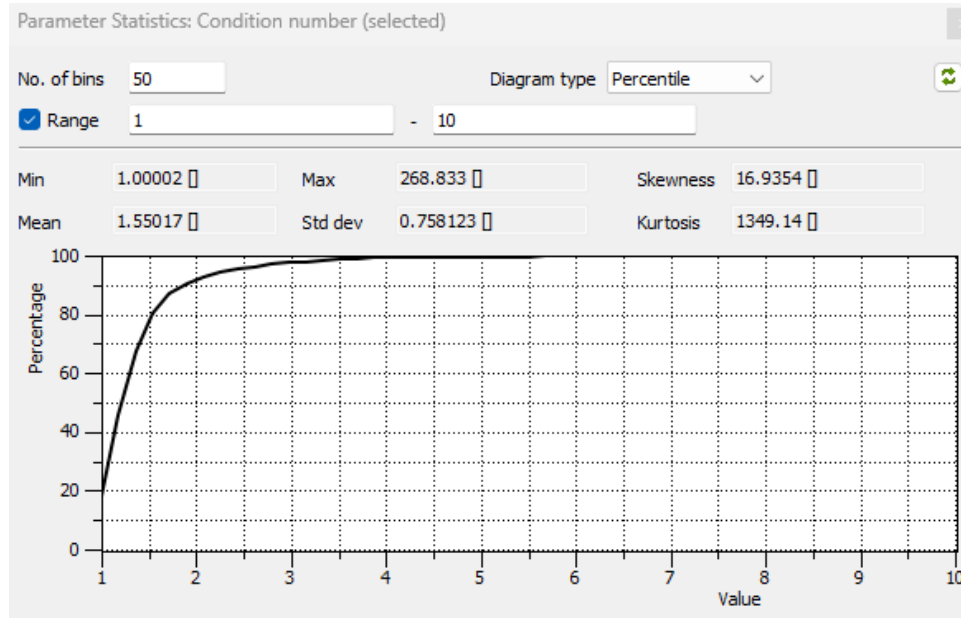


Figura 8.45 Gráfico percentil v/s número de condición de los Modelos Serie B, sin incluir elementos desactivados.

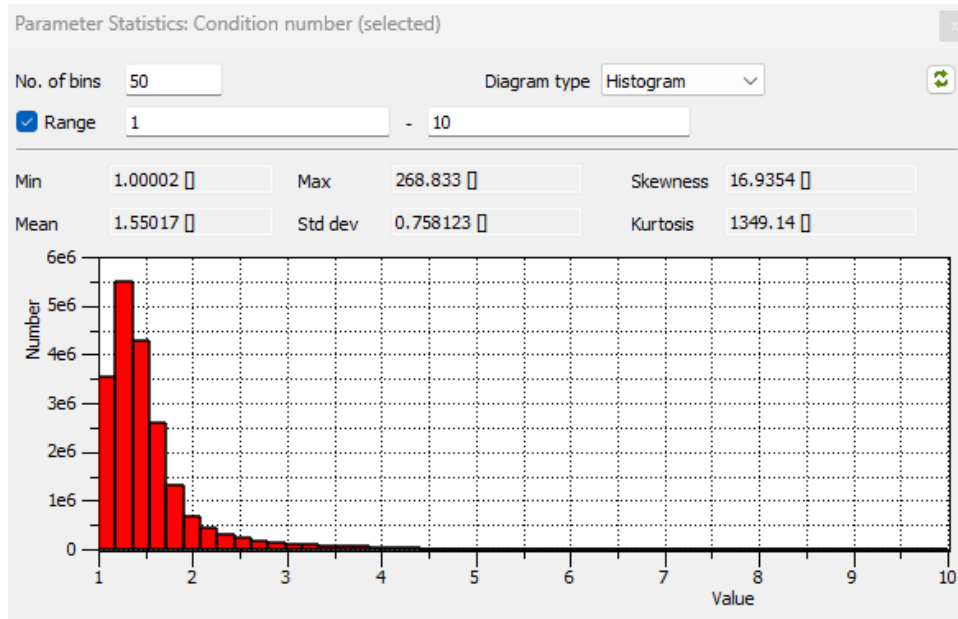


Figura 8.46 Histograma de número de condición de los Modelos Serie B, sin incluir elementos desactivados.

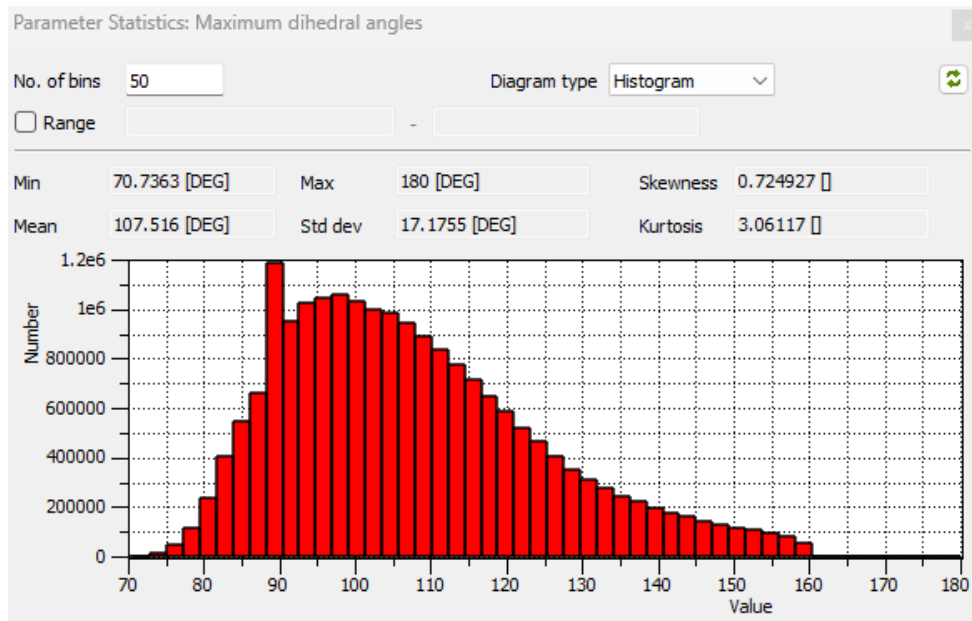


Figura 8.47 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie B.

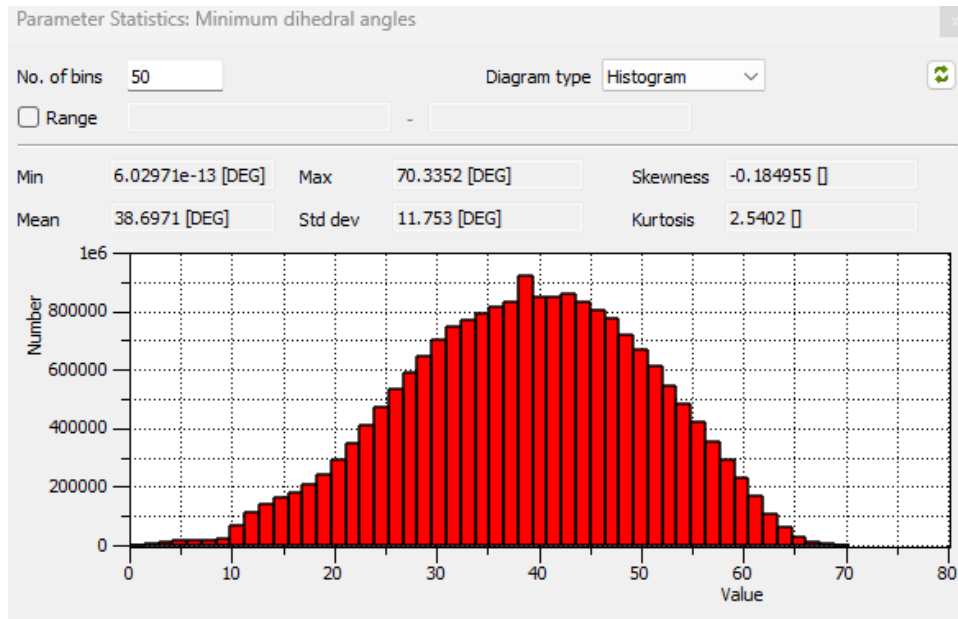


Figura 8.48 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie B.

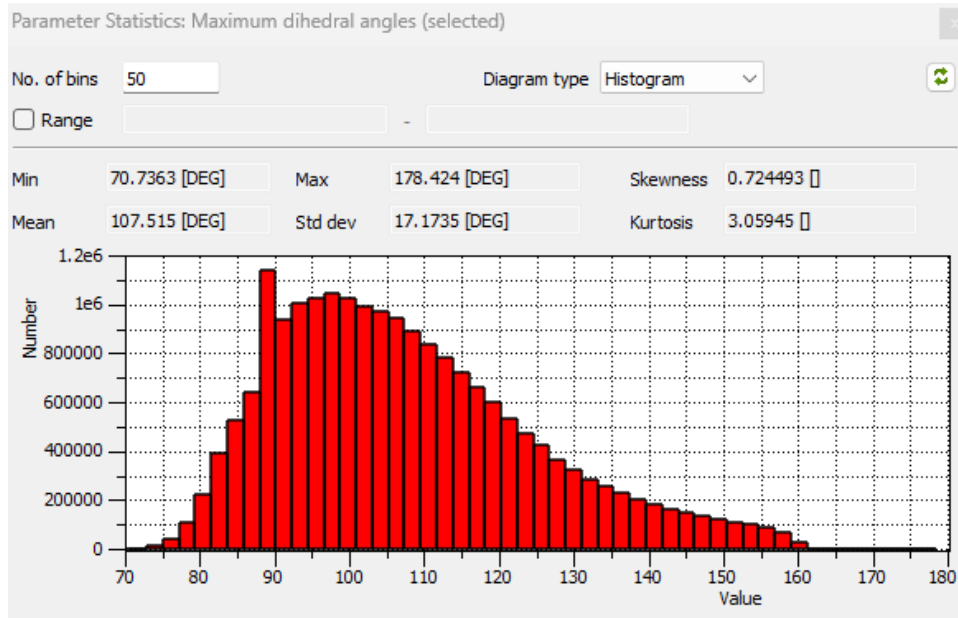


Figura 8.49 Histograma máximo ángulo diédrico de los Modelos Serie B sin incluir elementos desactivados.

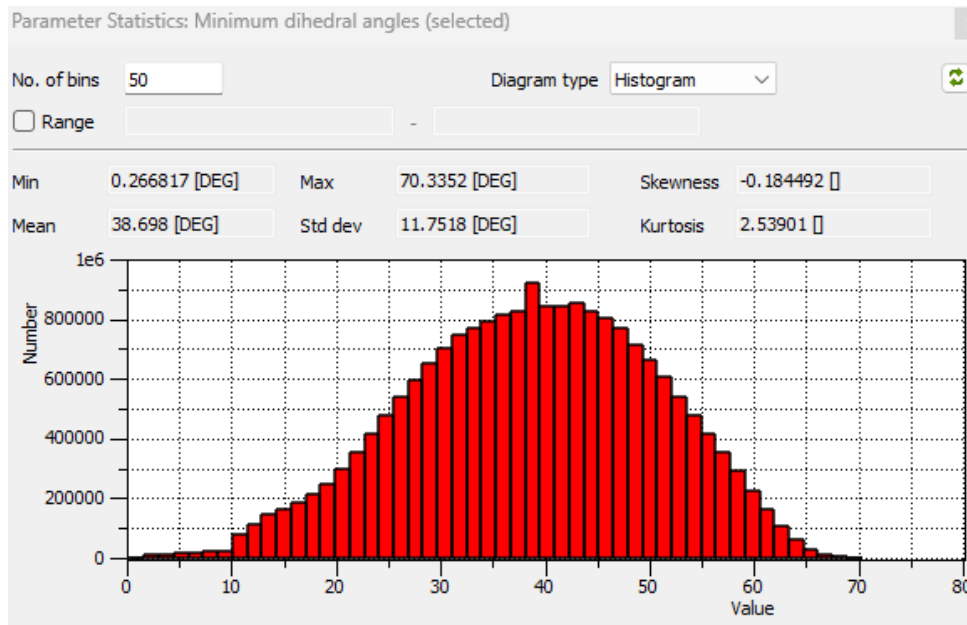


Figura 8.50 Histograma mínimo ángulo diédrico de los Modelos Serie B sin incluir elementos desactivados.

Anexo S Análisis comparativo Modelos Serie A y Serie B

La Tabla 8.7 resume las principales características de las mallas FEM generadas.

Tabla 8.7 Principales resultados en generación de mallas FEM

	Modelos Serie A	Modelos Serie B
Tiempo de generación de malla FEM	45 min	50 min
Número de nodos malla FEM	$2.9 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$
Número de elementos malla FEM	$17.5 \cdot 10^6$	$19.7 \cdot 10^6$
Elementos con número de condición ≥ 50	579	469
Volumen de elementos con número de condición ≥ 50	702.6 m^3	127.9 m^3
Elementos con número de condición ≥ 50 y volumen $\leq 1 \text{ m}^3$	518	463
Volumen de elementos con número de condición ≥ 50 y volumen $\leq 1 \text{ m}^3$	19.9 m^3	11.5
Máximo número de condición (post-desactivación de elementos)	931.0	268.8
Número de condición del octavo decil (post-desactivación de elementos)	1.6	1.5
Media de la distribución de número de condición (post-desactivación de elementos)	1.6	1.5
Media de máximo ángulo diédrico (post-desactivación de elementos)	107.7°	107.5°
Desviación estándar de máximo ángulo diédrico (post-desactivación de elementos)	17.1°	17.2°
Media de mínimo ángulo diédrico (post-desactivación de elementos)	38.2°	38.7°
Desviación estándar de mínimo ángulo diédrico (post-desactivación de elementos)	12.0°	11.7°

Comparación Modelos Serie A y Modelos Serie B: En términos generales la Serie B presenta una mejor calidad de malla en relación con la Serie A. Esto ocurre debido a la diferencia de radius-edge ratio entre los modelos (Tabla 8.6). En particular en los modelos de Serie B se observa un

aumento del 14% en el número de nodos y de 13% en el número de elementos. Notar que en Serie B los elementos mal formados, elementos con número de condición mayor o igual a 50, han disminuido un 19% en cantidad y un 82% en volumen. Los elementos mal formados con un volumen menor o igual a 1 [m³] han disminuido en cantidad un 11% y en volumen un 42%. Se hace evidente el gran aumento en calidad de malla y la gran disminución de volumen de elementos mal formados. Esto último refuerza aún más el supuesto de desactivación de elementos mal formados que impidan el cálculo. El máximo número de condición post- desactivación de elementos se ha reducido en un 71% y el número de condición promedio se ha reducido en 0.1 llegando a 1.5, lo cual es excelente en términos de calidad de malla. Todo lo anterior indica una excelente mejora en calidad de malla y se asocia con un aumento en el tiempo de generación de malla FEM de tan solo 5 minutos.

A lo ya expuesto se añaden los resultados de las simulaciones en régimen estacionario y transitorio para los distintos modelos de las Serie A y B, dando cuenta que el aumento de calidad de malla en Serie B se traduce en un mejor resultado en la resolución del modelo con un aumento de tiempo de cómputo despreciable. Debido a esto el énfasis de la memoria se centrará en los Modelos de Serie B.

Anexo T Asignación de parámetros hidráulicos

Anexo T1. Precipitación útil

Es asignada en los elementos de la cara superior del modelo (topografía), para ello se genera una selección de elementos a través de un archivo *.dxf que contiene todas las caras 3D que conforman la malla topográfica, de esta forma se genera la selección de los elementos que forman la topografía, con una distancia fija de 1 metro (en las configuraciones de mapa). Posteriormente se asigna el valor de 444.2 [$\frac{mm}{año}$] a través de la variable “in/outflow on top/bottom”. Esto se resume en la Figura 8.51, además la Figura 8.52 muestra el resultado del proceso para el Modelo 1 Serie B, lo que es análogo para los demás modelos.

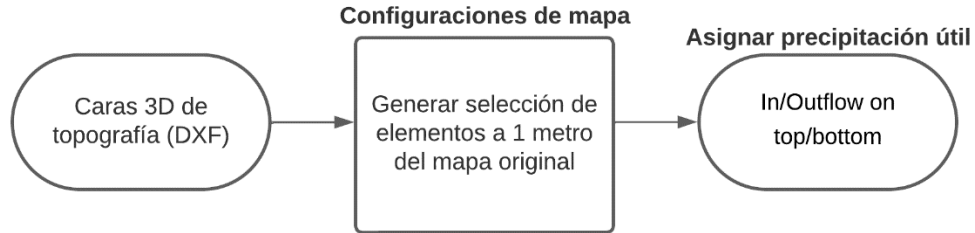


Figura 8.51 Asignación de parámetro de precipitación útil.

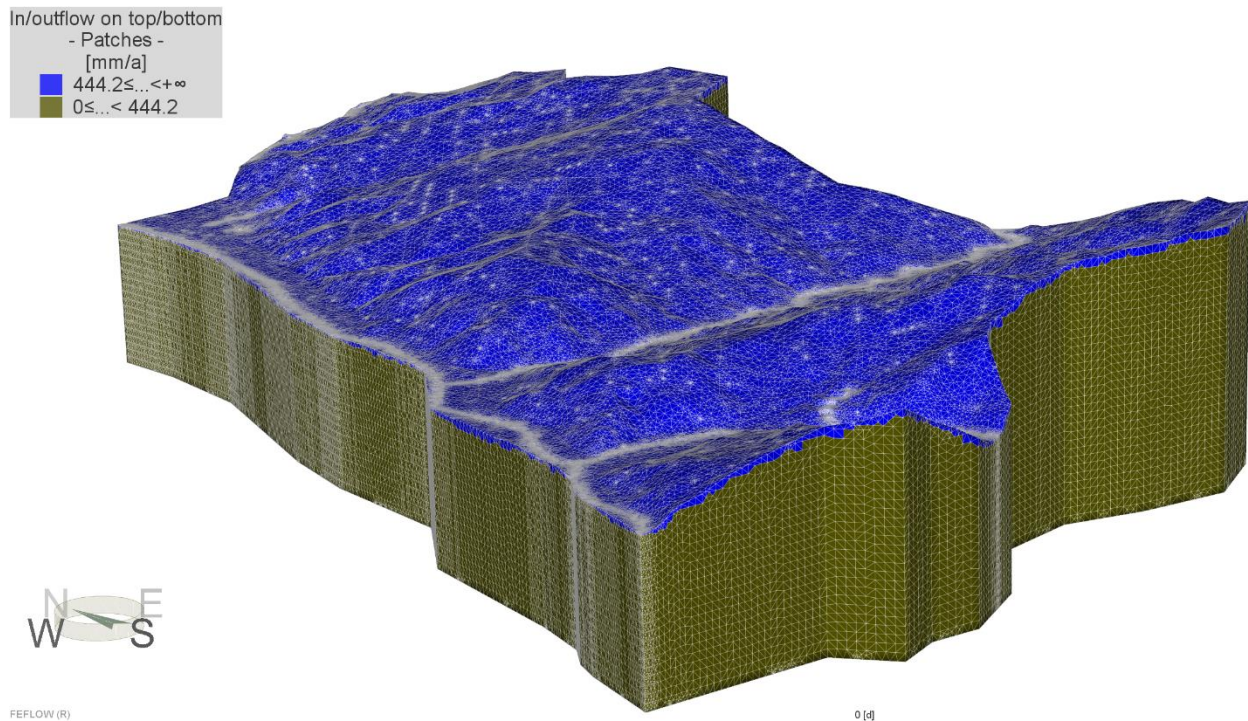


Figura 8.52 Precipitación útil asignada a los elementos superficiales del Modelo 1 Serie B.

Anexo T2. Conductividad hidráulica

La malla de entrada se ha generado de tal forma que a través de los marcadores de región las selecciones de elementos para asignar las conductividades ya se encuentran hechas una vez generado el FEM. Así, la Figura 8.53 indica las conductividades hidráulicas y su disposición en el Modelo 1 Serie B, esto es análogo para los diferentes modelos y series. La Tabla 8.8 indica los valores de conductividad hidráulica según el modelo.

Tabla 8.8 Valores de conductividad hidráulica para los diferentes modelos.

Modelos Serie A y B Conductividad hidráulica del complejo minero [$\frac{m}{s}$]	
Modelos Serie k ₁	300
Modelos Serie k ₂	10

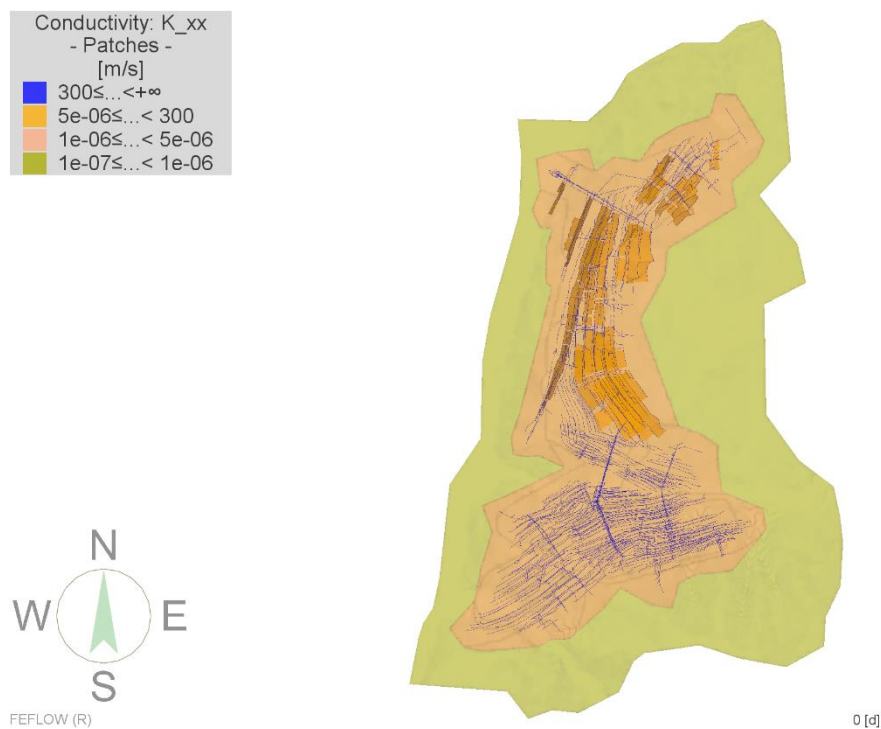


Figura 8.53 Vista en planta de las conductividades hidráulicas del Modelo 1 Serie B.

Anexo T3. Porosidad

Para asignar los valores de porosidad a los elementos de la malla, se ha generado una distribución elemental que contenga los elementos clasificados por zona con su respectivo valor de porosidad. De esta forma se obtiene la Figura 8.54.

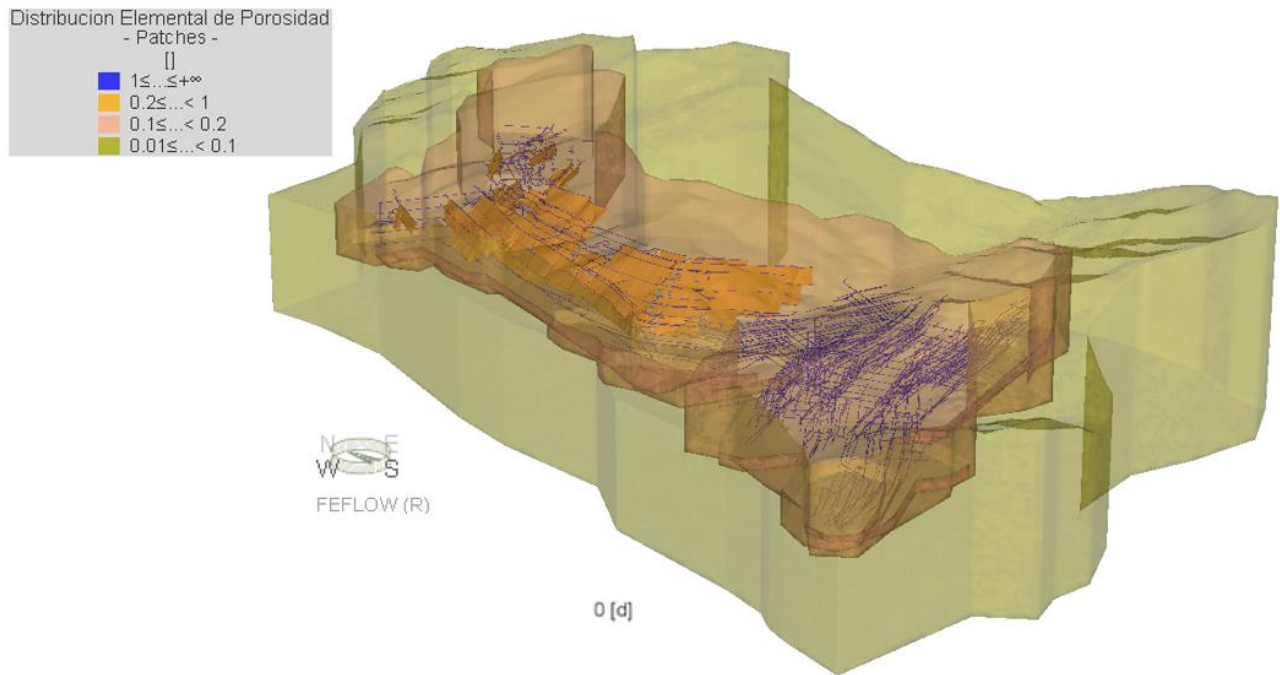


Figura 8.54 Porosidades asignadas mediante distribución elemental. Común a todos los modelos.

Anexo U Asignación de Fluid transfer BC

Lo primero es generar la selección de los nodos correspondientes a los ríos. Así, a través del mapa de red hidrográfica en formato *.dxf se genera una selección de nodos de 25 [m] de radio alrededor de las líneas del *.dxf que define la red hidrográfica. Este archivo no tiene coordenadas de elevación, por lo que se seleccionan los nodos hasta un $z = -700$ [m], es decir, se seleccionan todos los nodos a 25 [m] de las líneas que definen los ríos. Esta selección se ilustra en la Figura 8.55-b. Luego se interseca dicha selección de nodos con los nodos de la superficie topográfica (selección generada en el Precipitación útil). De esta forma se genera una selección de nodos de 25 [m] de radio y z igual a la cota topográfica. Posteriormente se puede establecer la condición de Fluid Transfer BC en los nodos que definen los ríos.

Lo anterior se resume en la Figura 8.55: en a) se observa la selección de nodos de la superficie topográfica y en b) la selección de 25 metros alrededor de la línea que define los ríos y con una elevación hasta $z = -700$ [m] (es decir, todo el modelo). En c) se observa el resultado de la intersección de ambas selecciones.

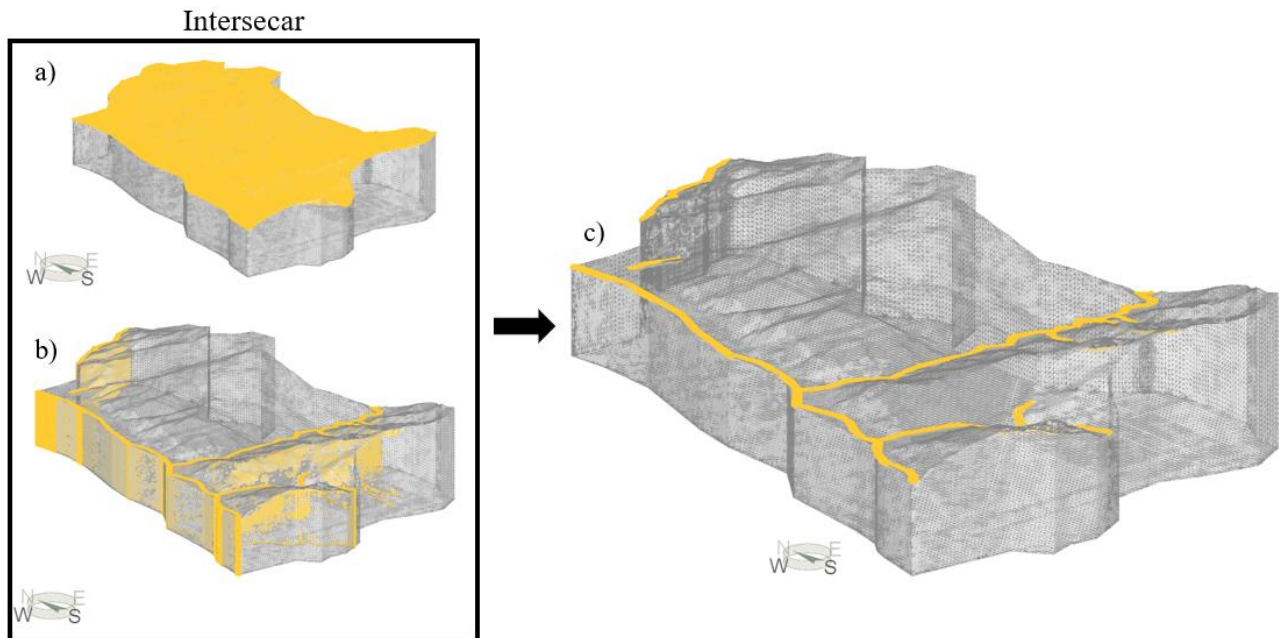


Figura 8.55 Creación de selección de nodos pertenecientes a los ríos del modelo. Modelo 1 Serie B.

- a) Selección de nodos en topografía. b) Selección de nodos a 25 [m] de radio de las líneas que definen los ríos y profundidad hasta -700 [m]. c) Nodos que definen los ríos, resultado de la intersección de los a) y b).

Anexo U1. Conductancia

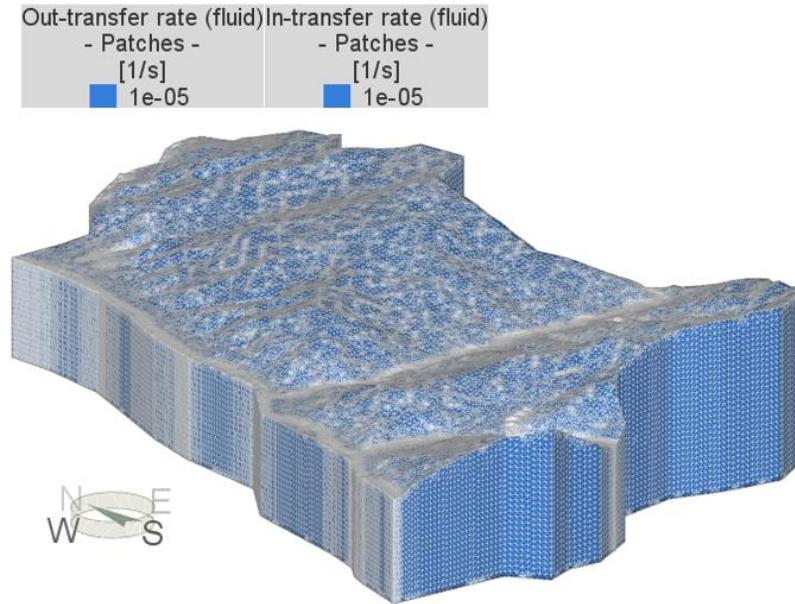


Figura 8.56 Valores de conductancia asignados al modelo. Modelo 1 Serie B.

Anexo V Nomenclatura de modelos

Tabla 8.9 Nomenclatura de identificación de modelos.

Nombre del Modelo	Malla FEM	Conductividad [$\frac{m}{s}$]	Condición de contorno
Modelo 1-k ₁ -A	A	300	Seepage face
Modelo 1-k ₂ -A	A	10	Seepage face
Modelo 1-k ₁ -B	B	300	Seepage face
Modelo 1-k ₂ -B	B	10	Seepage face
Modelo 2-k ₁ -A	A	300	$h = z_{mín} [m]$
Modelo 2-k ₂ -A	A	10	$h = z_{mín} [m]$
Modelo 2-k ₁ -B	B	300	$h = z_{mín} [m]$
Modelo 2-k ₂ -B	B	10	$h = z_{mín} [m]$

Modelo 3-k ₁ -A	A	300	$h = \text{Elevación [m]}$
Modelo 3-k ₂ -A	A	10	$h = \text{Elevación [m]}$
Modelo 3-k ₁ -B	B	300	$h = \text{Elevación [m]}$
Modelo 3-k ₂ -B	B	10	$h = \text{Elevación [m]}$

Anexo W Resultados régimen estacionario

Anexo W1. Características generales y balances hídricos

La Figura 8.57 y la Figura 8.58 corresponden a los balances hídricos de los Modelos 1-k₁-A y 1-k₁-B respectivamente. Las condiciones de Hydraulic Head BC (Dirichlet) corresponden a un flujo de salida, puesto que sus condiciones simulan el drenaje del complejo minero. Por otra parte, las condiciones de Fluid Transfer BC (Cauchy) corresponden a un flujo de entrada en el modelo, ya que este flujo corresponde al flujo de infiltración de los ríos al modelo. Notar que el aporte de flujo correspondiente a la lluvia útil (Distributed Source) es mínimo con relación al aporte de los ríos, sin embargo, su aporte no es despreciable.

Domain of Interest (DOI)		Fluid
Domain		[m ³ /d]
<input checked="" type="checkbox"/> Active		
Dirichlet BCs		
-4.1554e+05		
Neumann BCs		
Cauchy BCs		
-79.282	+3.7962e+05	
Wells		
Distributed Sink(-)/Source(+)		
-1.9726e-13	+35097	
Storage Capture(-)/Release(+)		
Imbalance		
-902.84		

Figura 8.57 Balance hídrico Modelo 1-k₁-A, régimen estacionario.

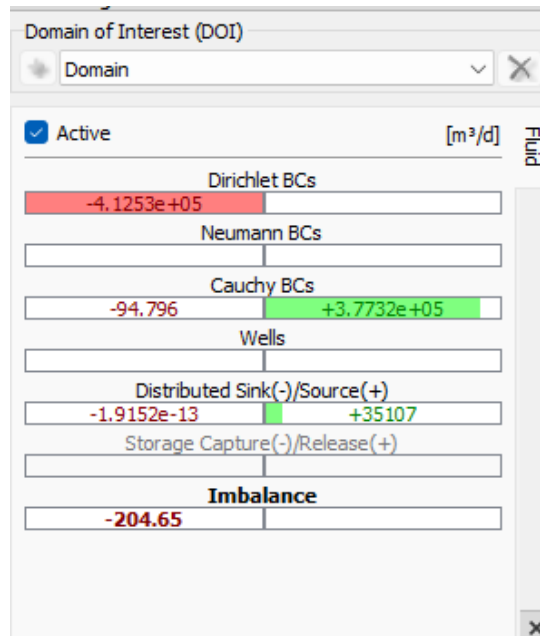


Figura 8.58 Balance hídrico Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

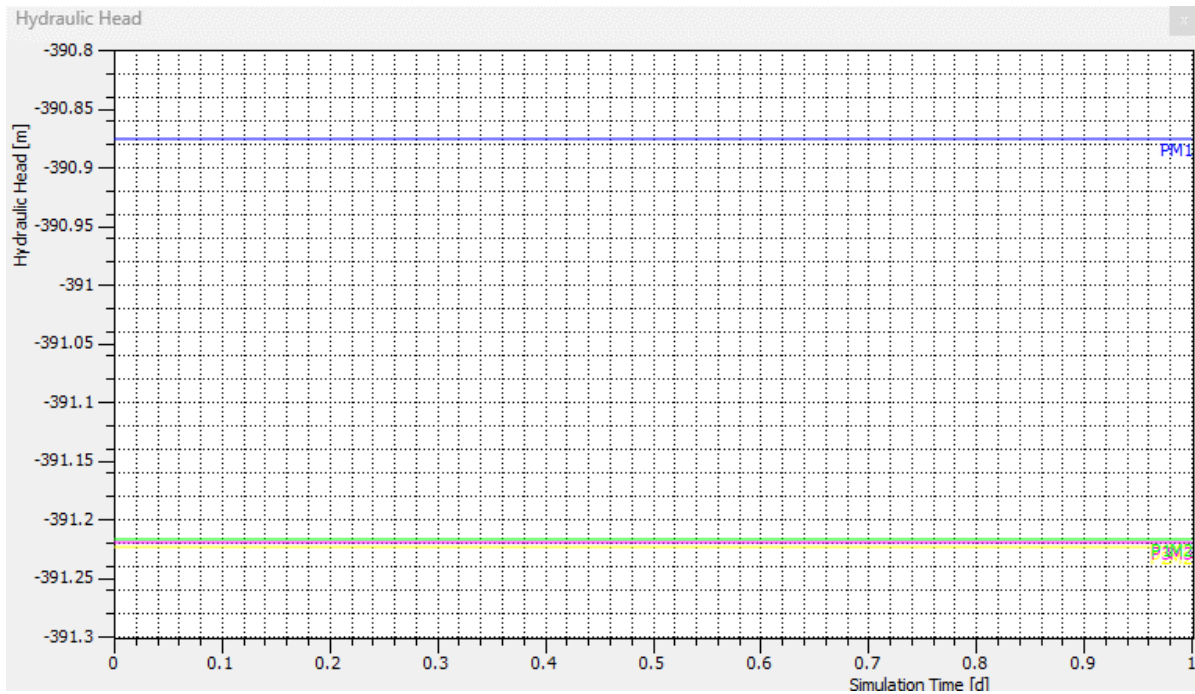


Figura 8.59 Grafico de nivel piezométrico v/s tiempo. Modelo 1-k₁-A, régimen estacionario.

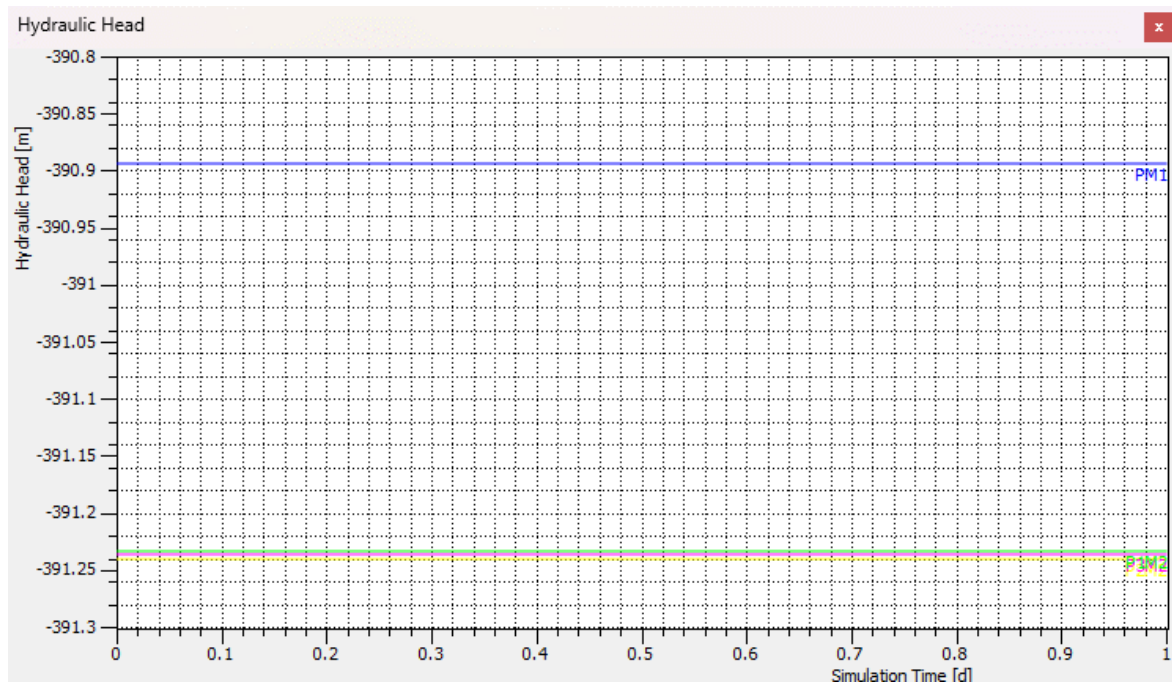


Figura 8.60 Grafico de nivel piezométrico v/s tiempo. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

Anexo W2. Nivel freático

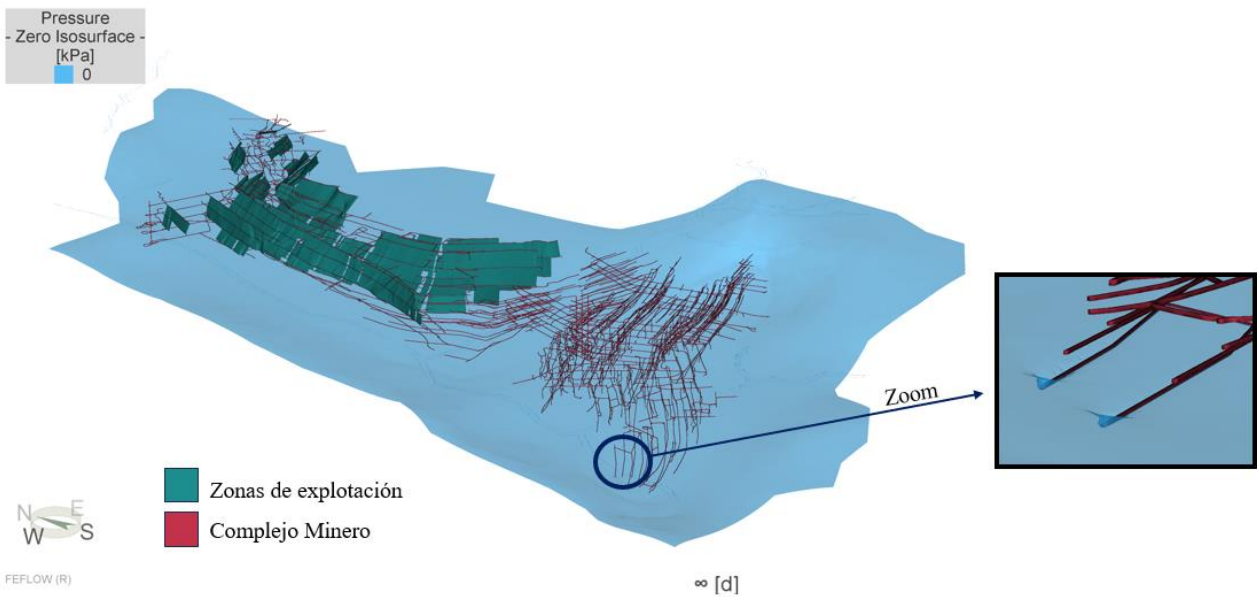


Figura 8.61 Nivel freático. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

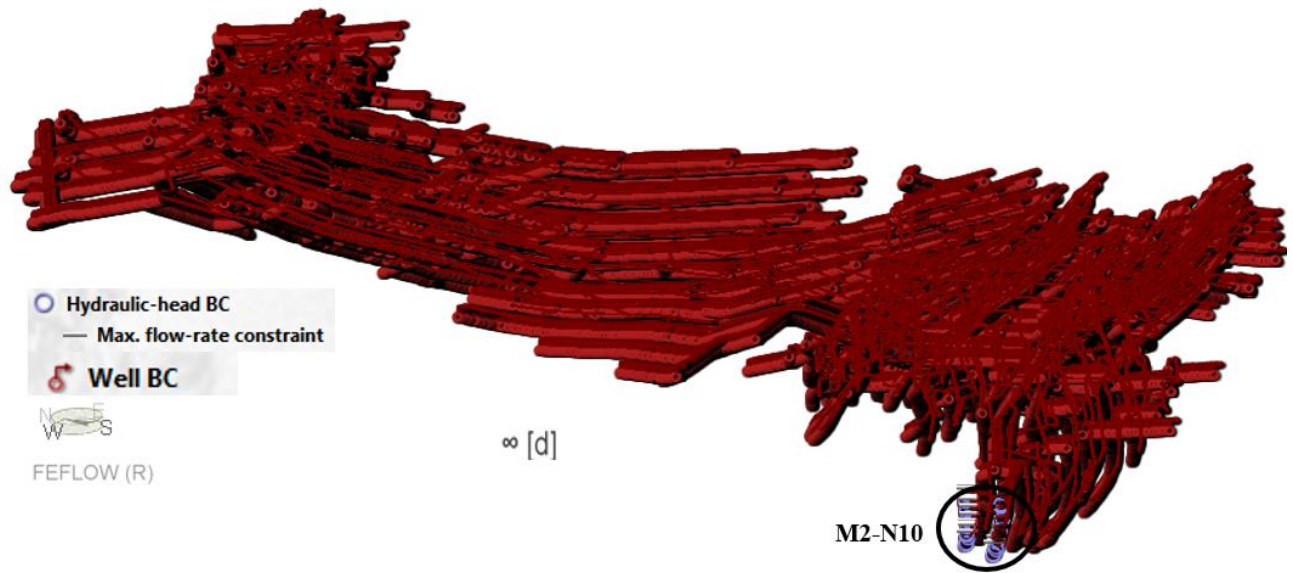


Figura 8.62 BCs del complejo minero, resultado del régimen estacionario, Modelo 1-k₁-B.

Anexo W3. Isosuperficies de piezometría

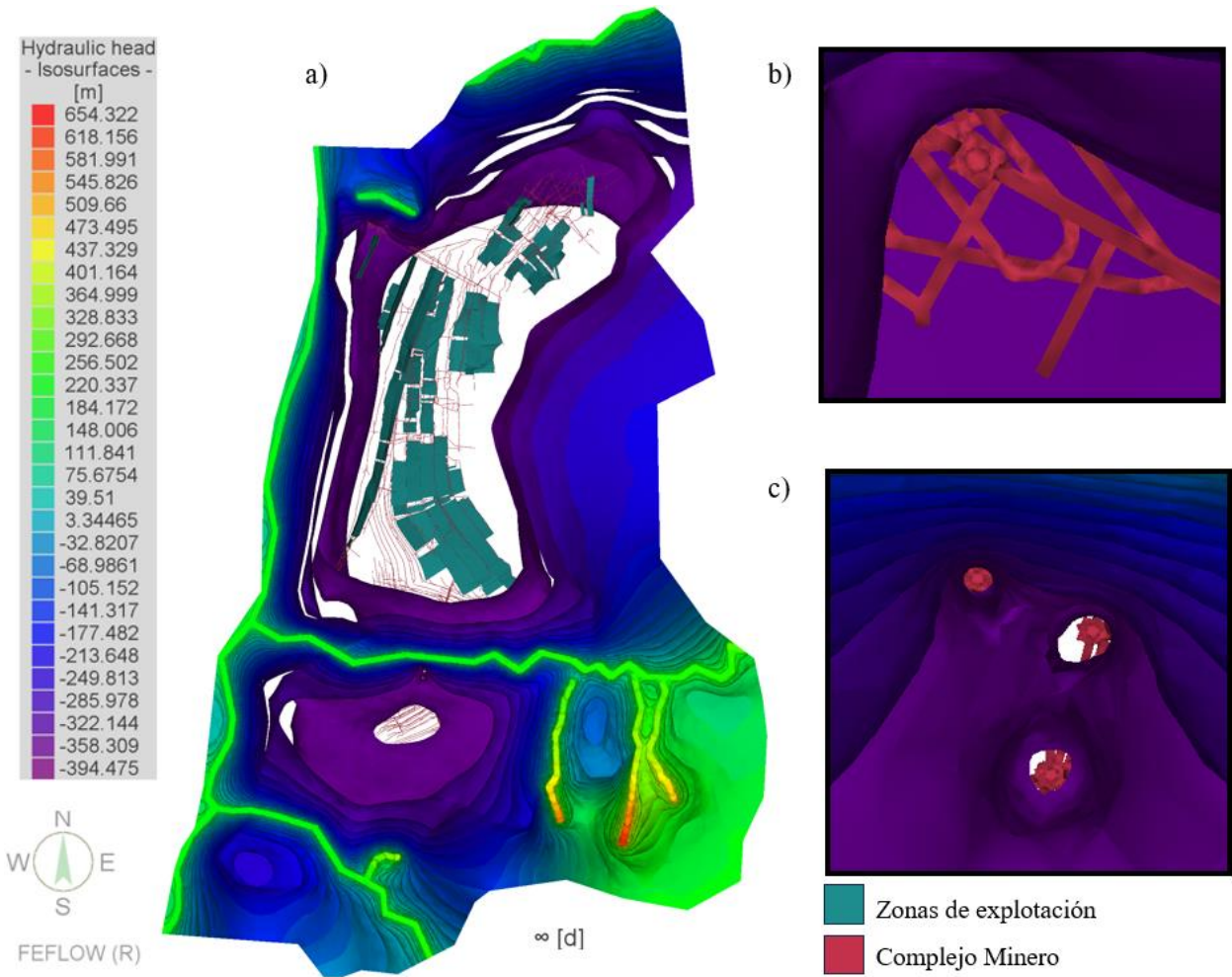


Figura 8.63 Vista en planta de 30 isosuperficies piezométricas (a) y cercanías de piques de Mina 1 (b) y Mina 2 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

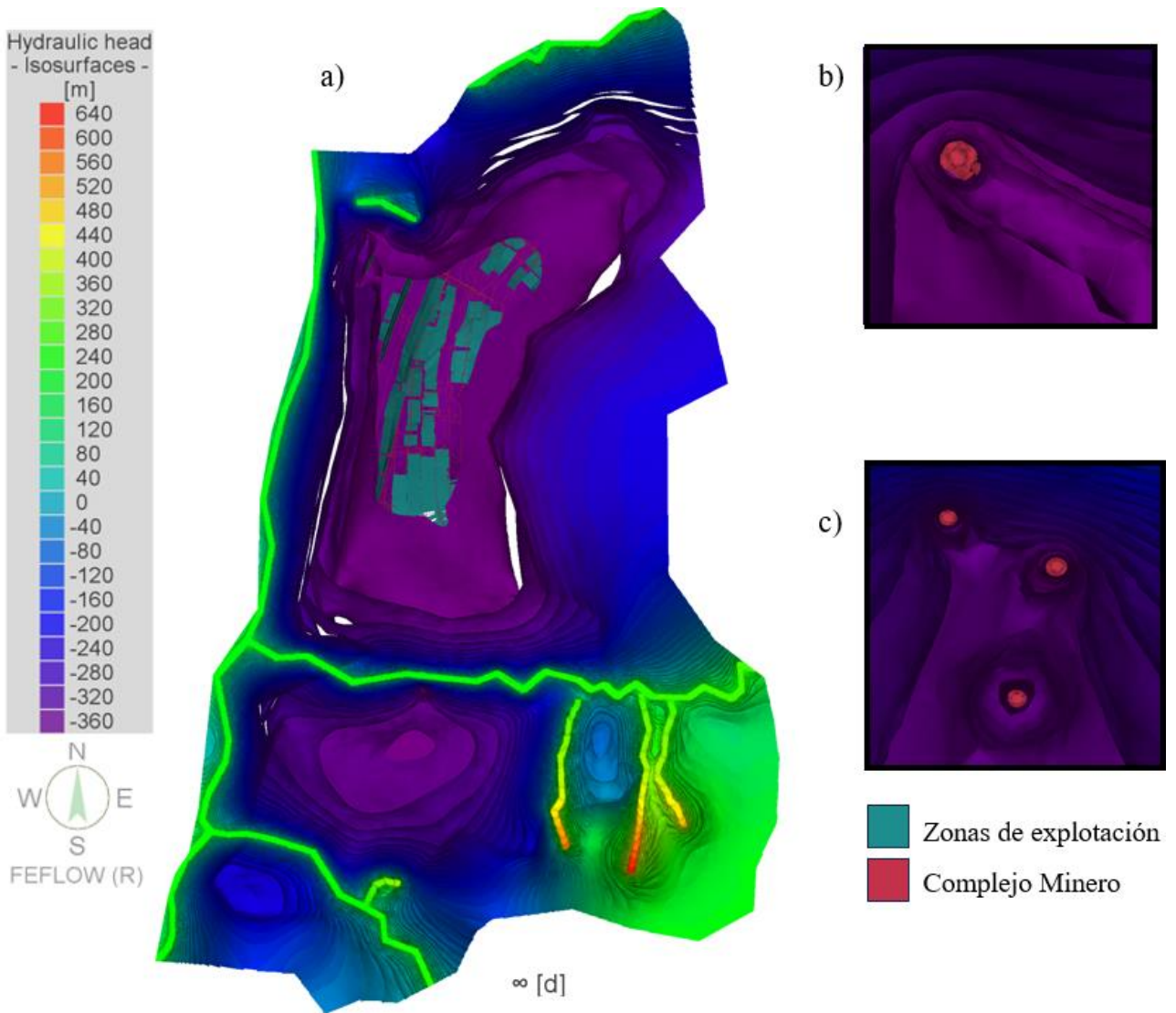


Figura 8.64 Vista en planta de 52 isosuperficies piezométricas (a) y cercanías de piques de Mina 1 (b) y Mina 2 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

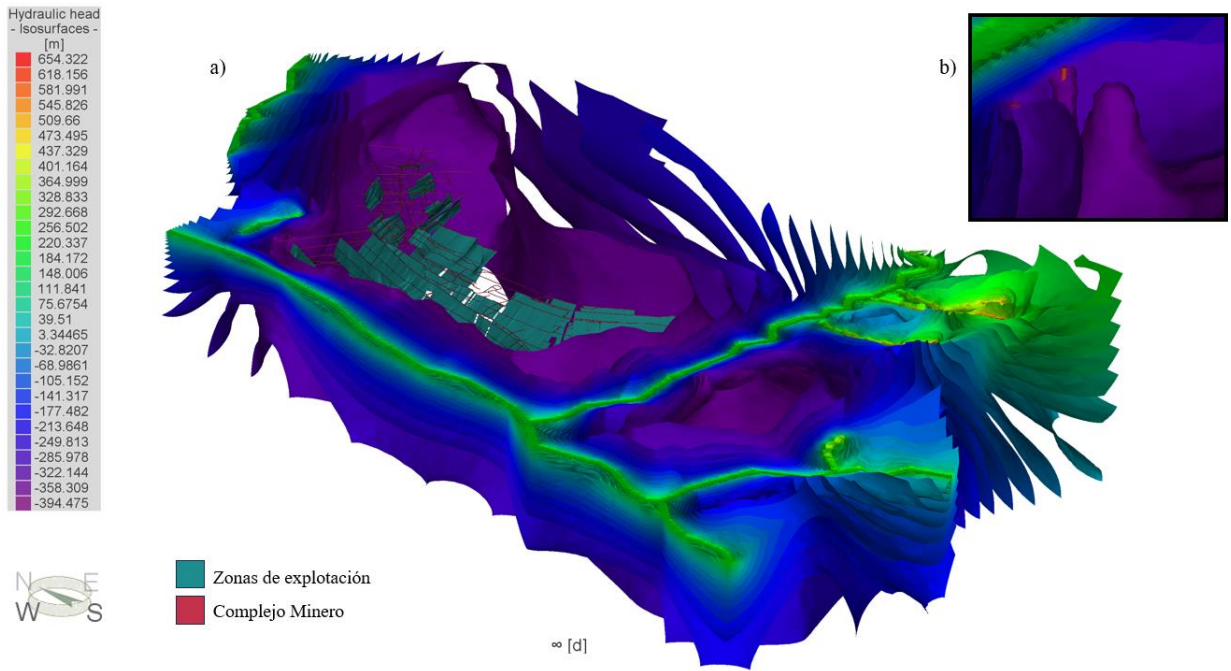


Figura 8.65 Vista isométrica de 30 isosuperficies piezométricas y cercanías piques Mina 2 (b).
Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

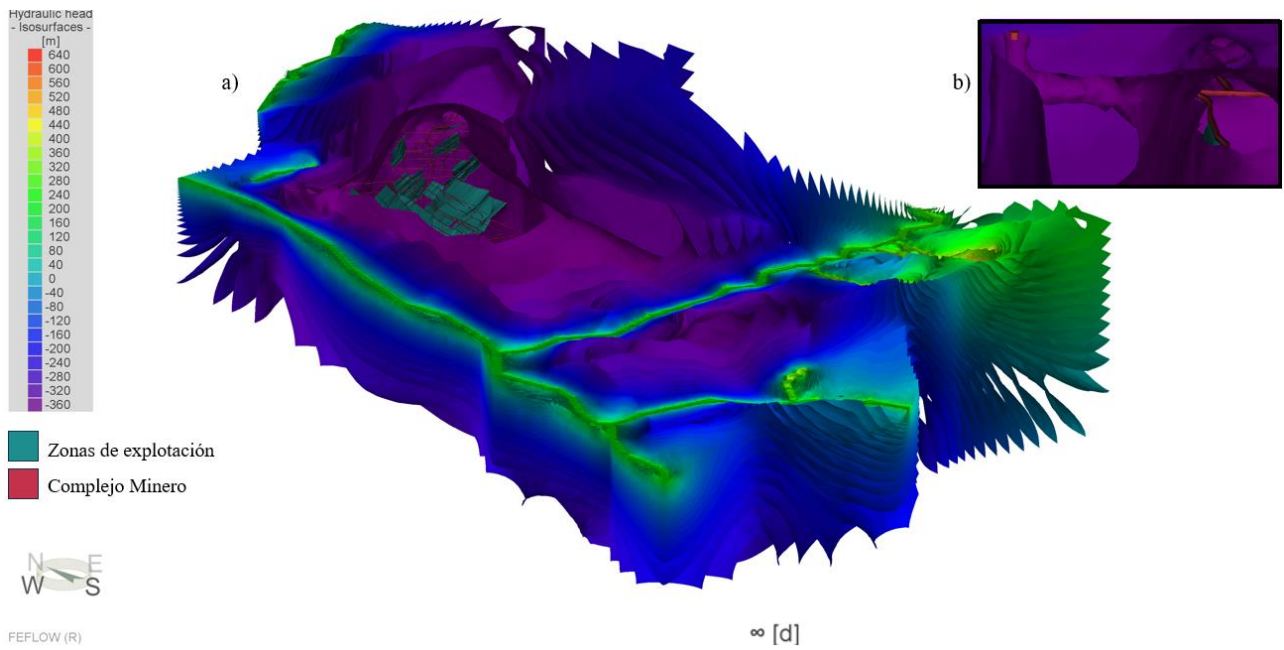


Figura 8.66 Vista isométrica de 52 isosuperficies piezométricas y cercanías pique Mina 1 (b).
Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

Anexo W4. Isolíneas y franjas de piezometrías

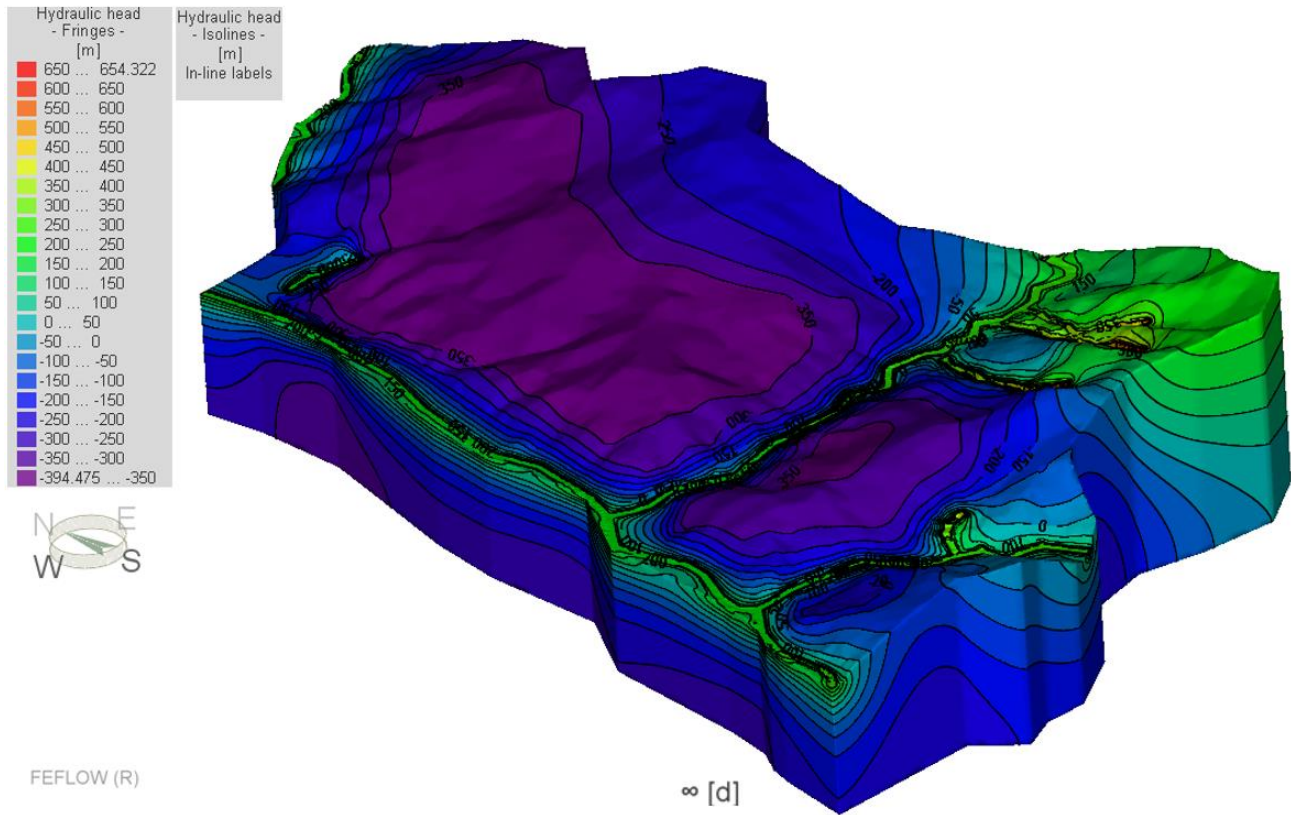


Figura 8.67 Isolíneas y franjas de piezometría. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

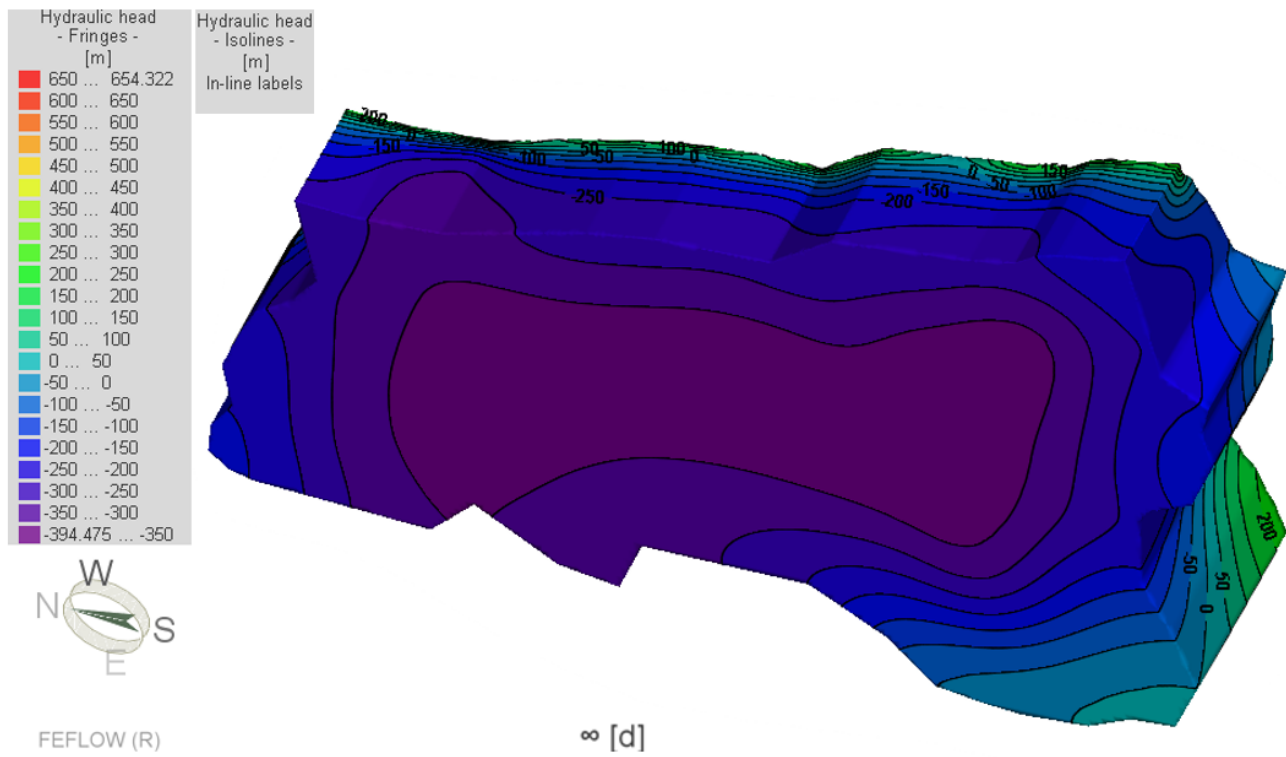


Figura 8.68 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista de la cara inferior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

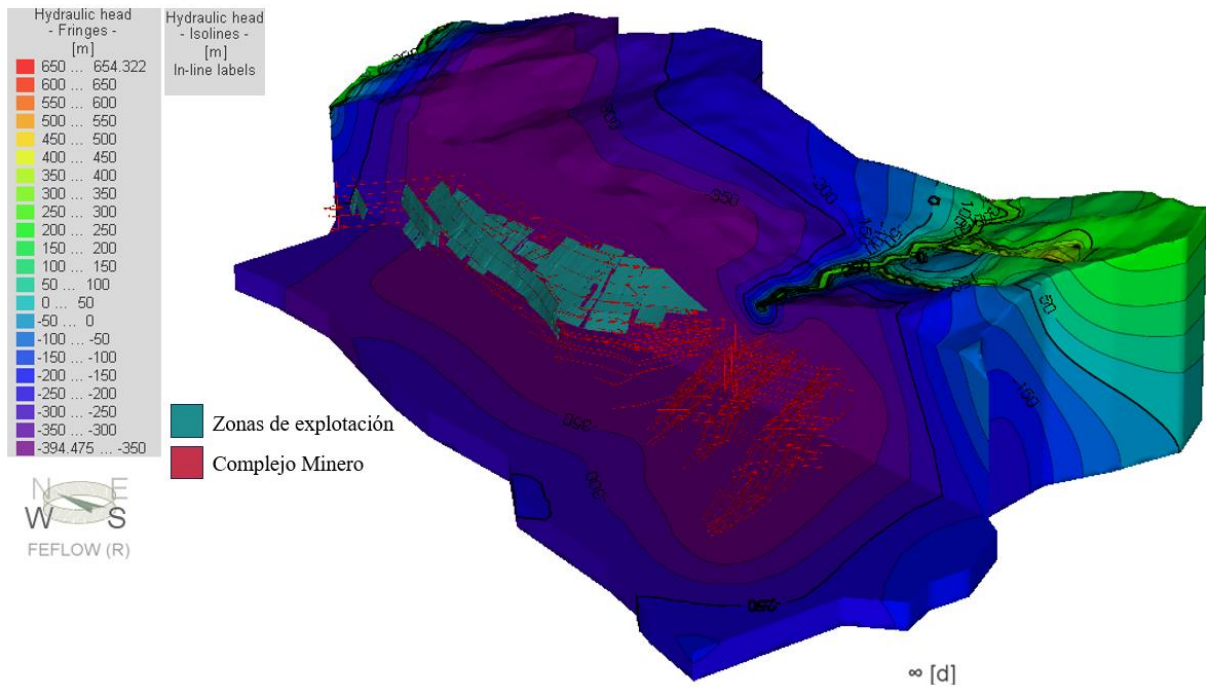


Figura 8.69 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = -500$ [m] y punto medio local.

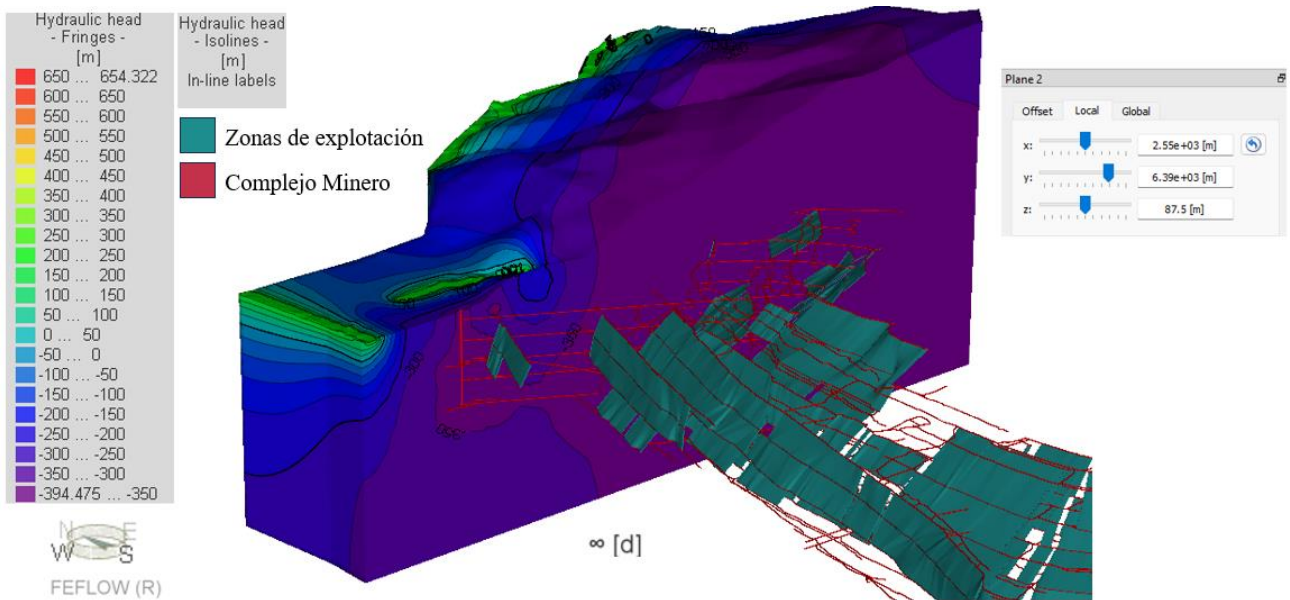


Figura 8.70 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en eje X indicado en la figura (PM1).

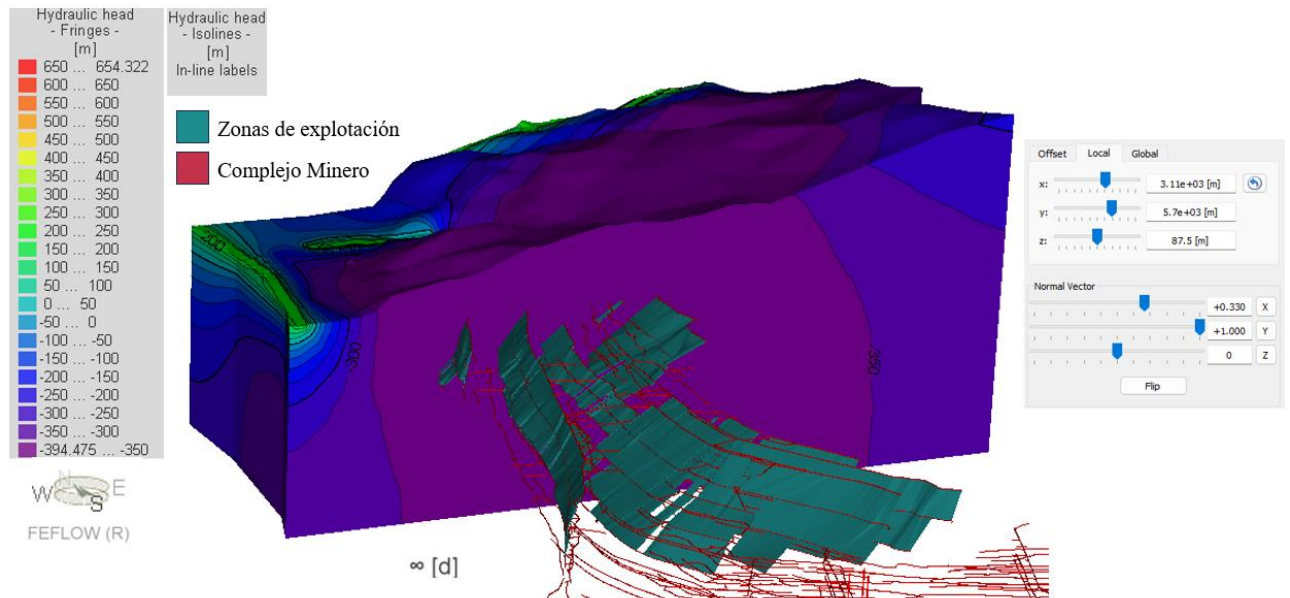


Figura 8.71 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en eje X indicado en la figura.

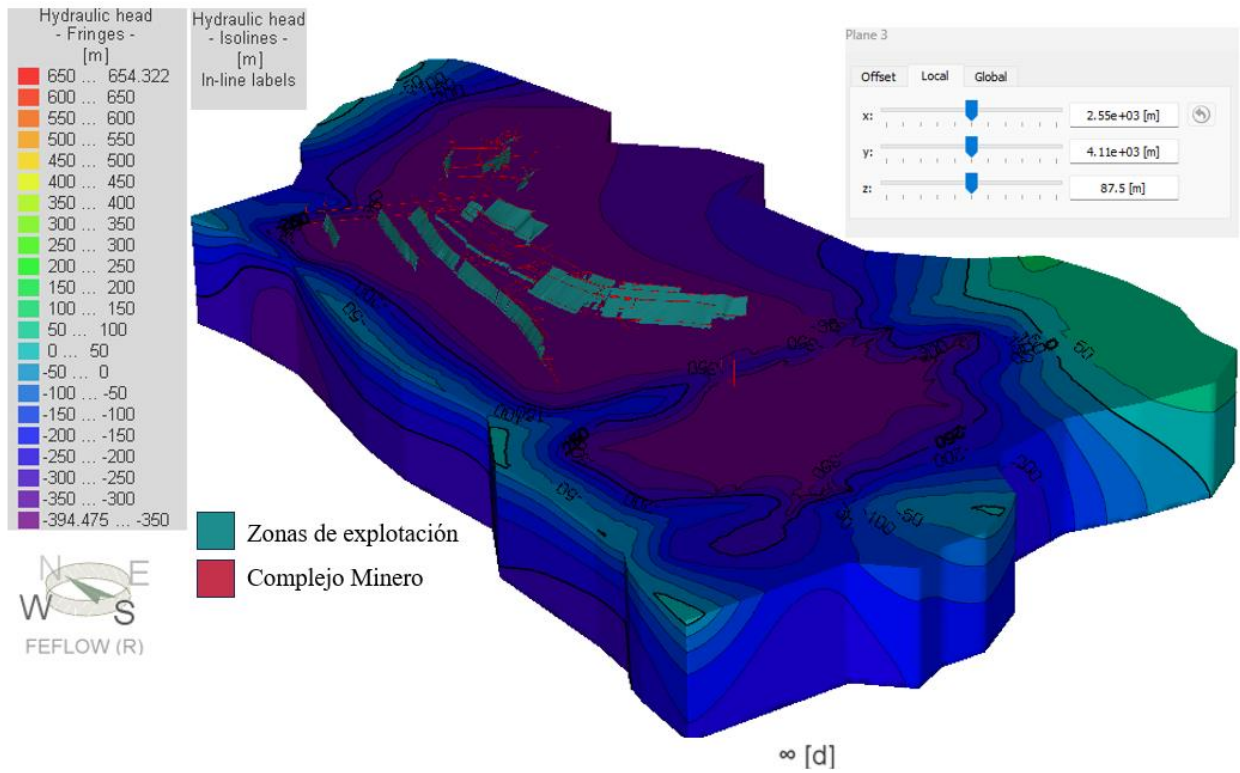


Figura 8.72 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = 87.5$ [m]

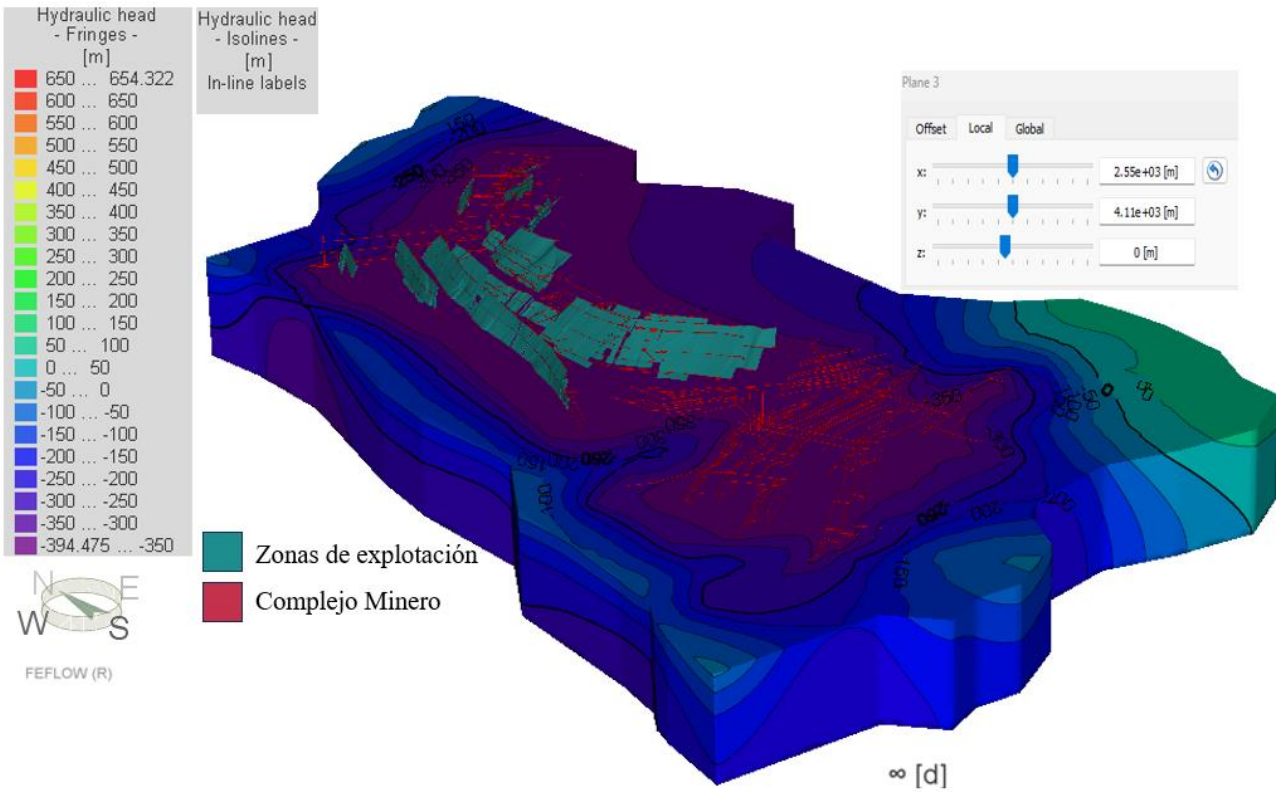


Figura 8.73 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en cota z = 0 [m]

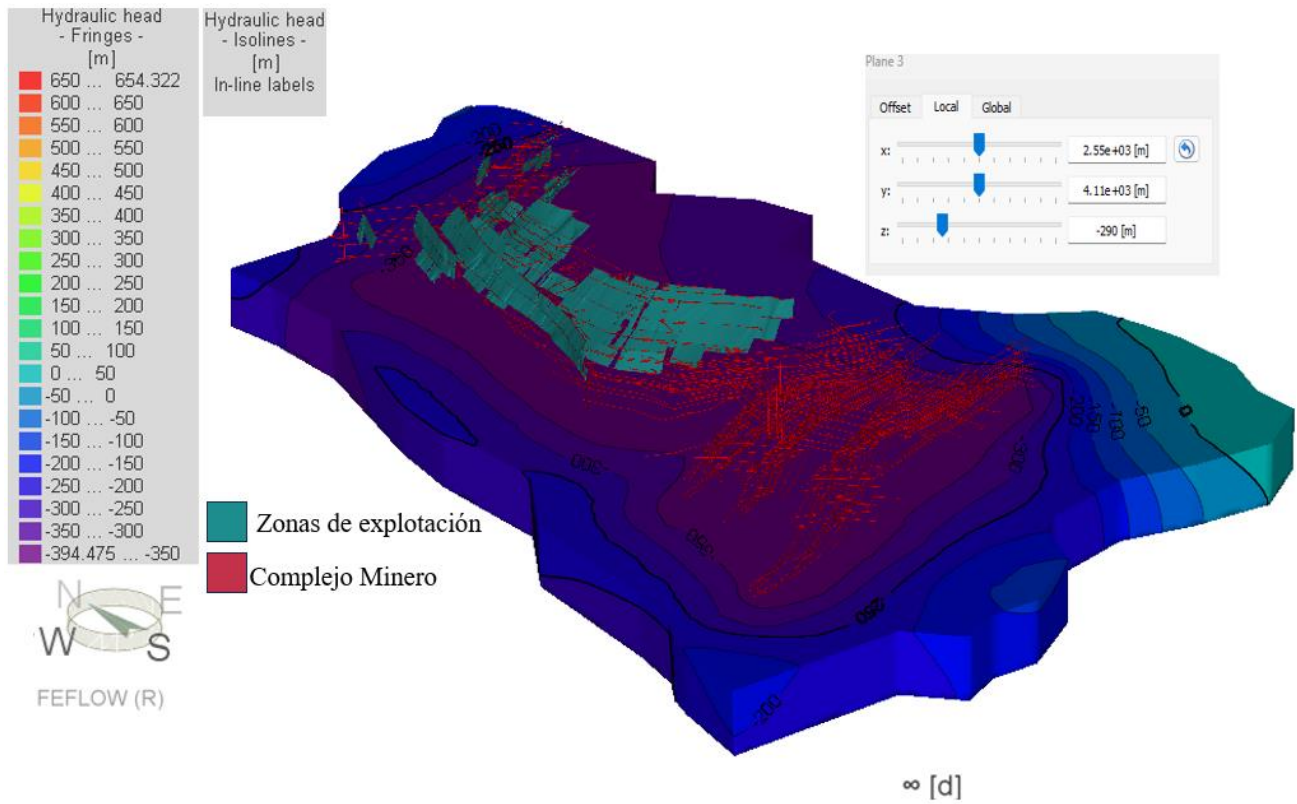


Figura 8.74 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = -290$ [m]

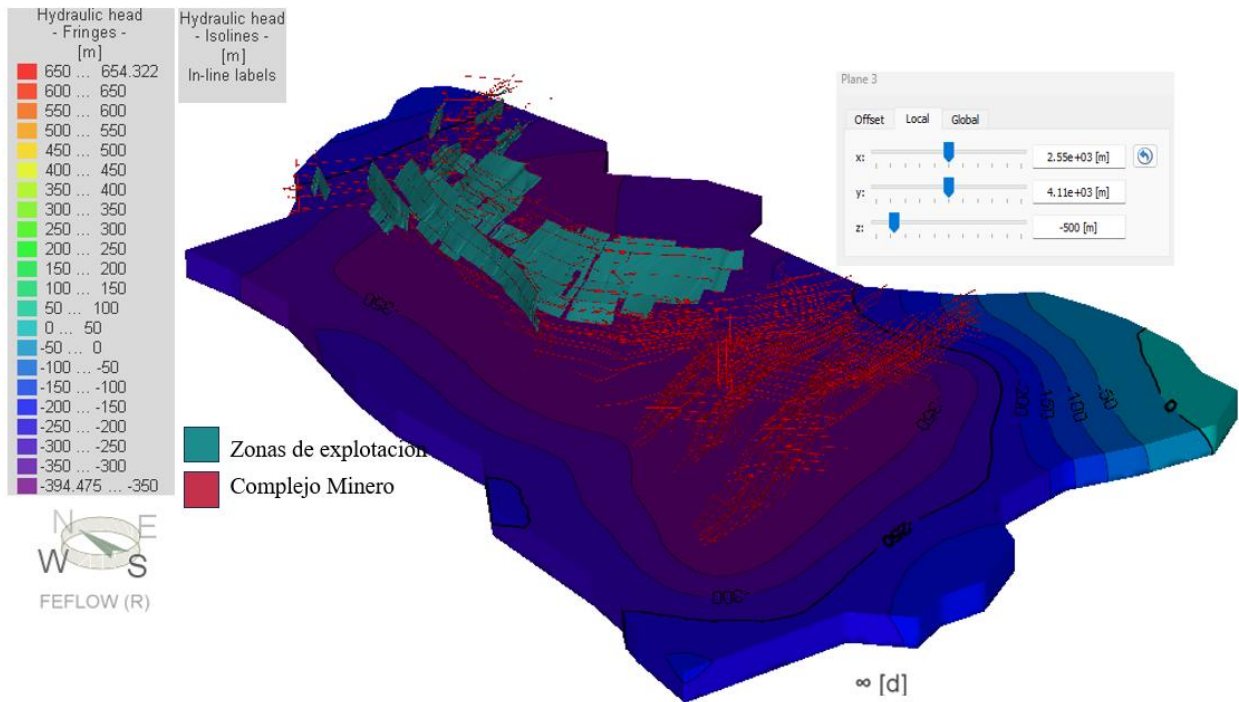


Figura 8.75 Isolíneas y franjas de piezometría. Vista interior del Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario. Planos de corte en cota $z = -500$ [m]

Anexo W5. Seguimiento de datos de piezometría

FEFLOW permite realizar gráficos de piezometrías a través de rectas que facilitan el seguimiento de datos. Las rectas elegidas para generar los planos de corte son las mismas utilizadas en el Capítulo 0. Las rectas son creadas en AutoCAD y exportadas en formato *.dxf, obteniéndose la Figura 8.76 en FEFLOW. Los gráficos resultantes del seguimiento de datos de piezometría se presentan en la Figura 8.77 a la Figura 8.81, correspondientes a los cortes I-I', II-II', III-III', IV-IV' y V-V' respectivamente.

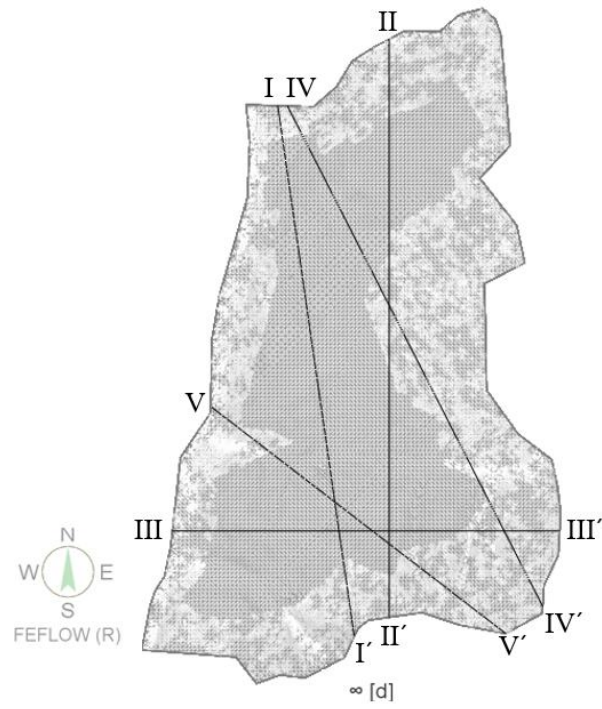


Figura 8.76 Cortes para el seguimiento de datos, en malla de elementos finitos.

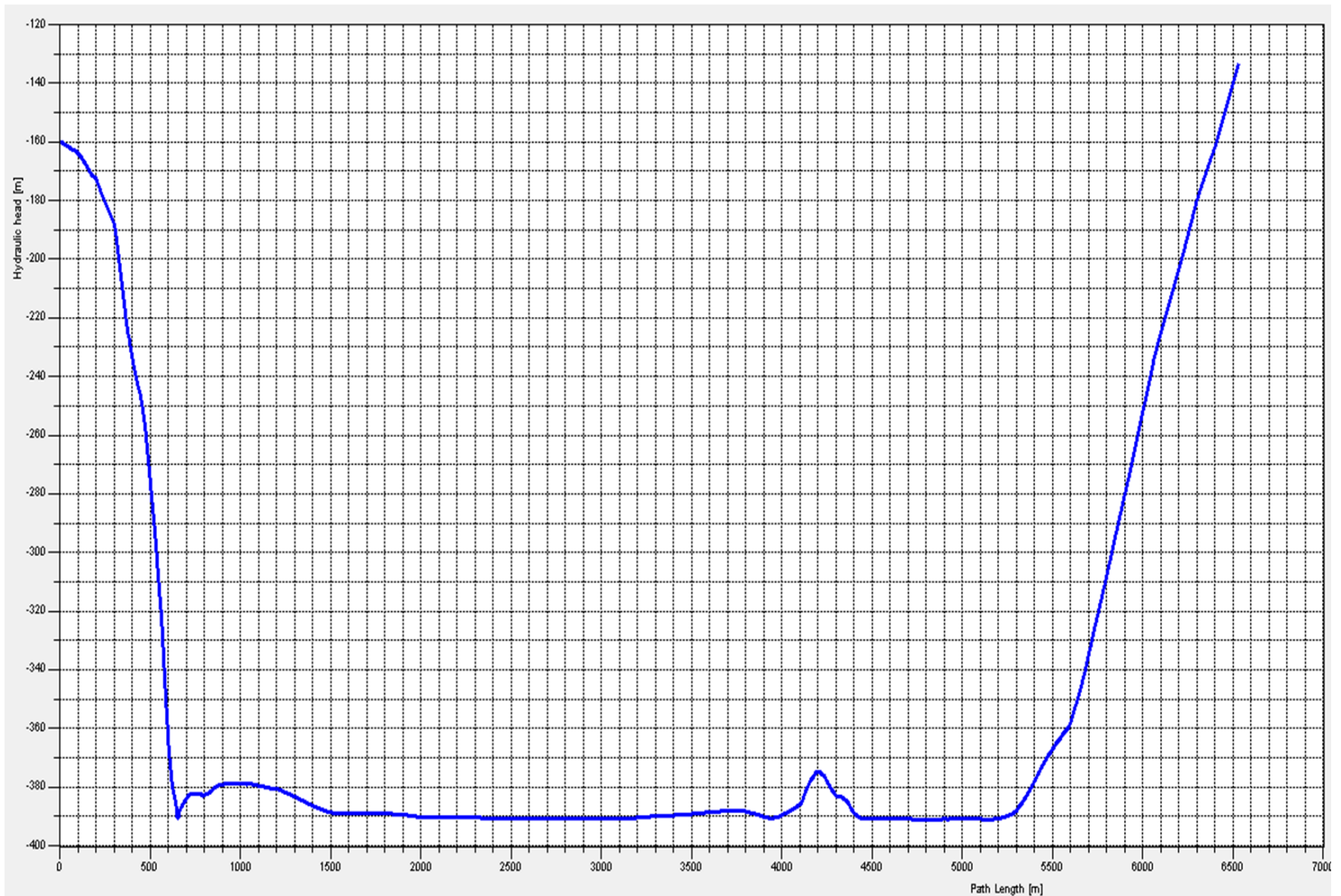


Figura 8.77 Seguimiento de datos de piezometría, corte I-I' Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.



Figura 8.78 Seguimiento de datos de piezometría, corte II-II' Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

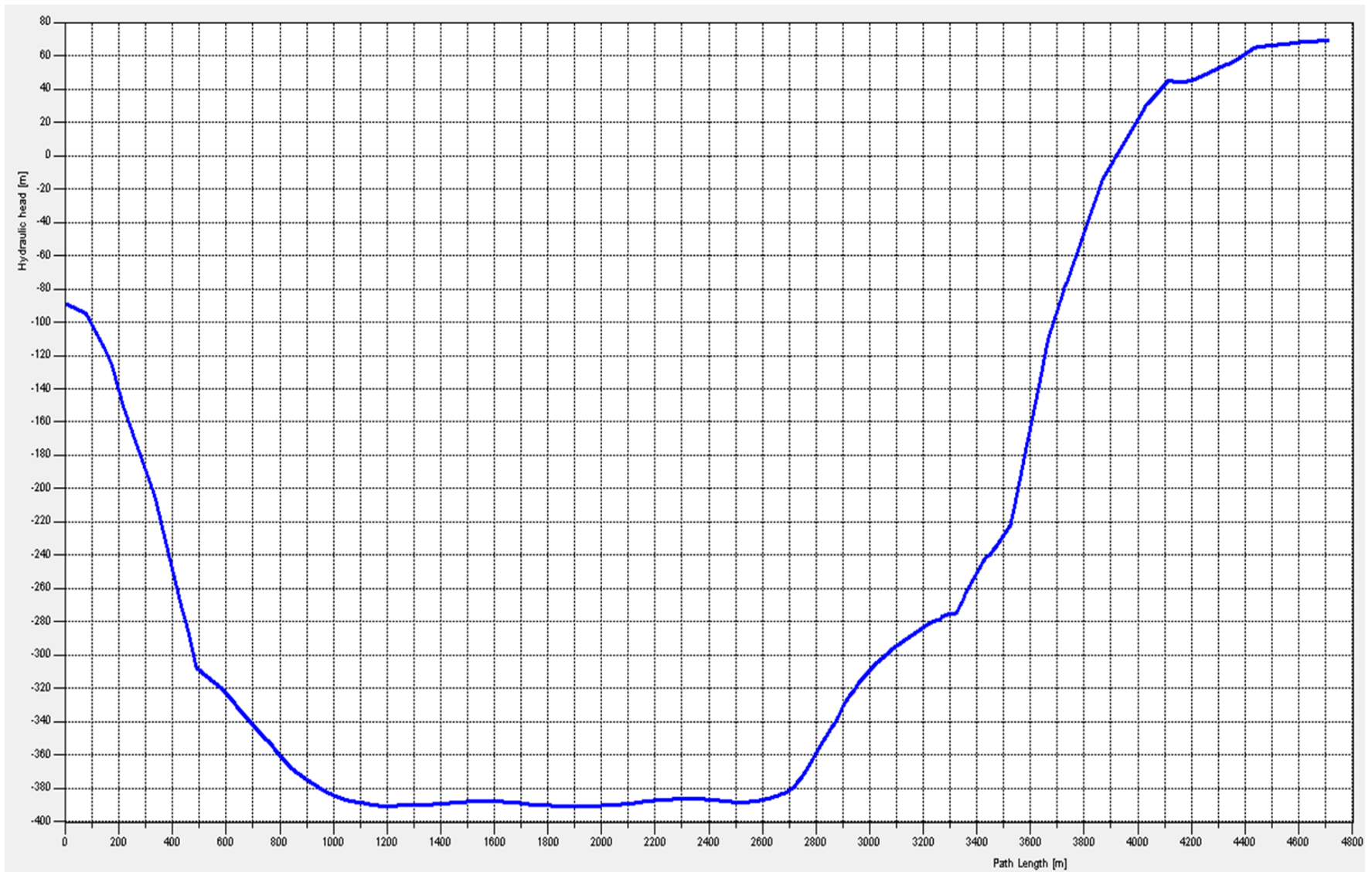


Figura 8.79 Seguimiento de datos de piezometría, corte III-III' Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

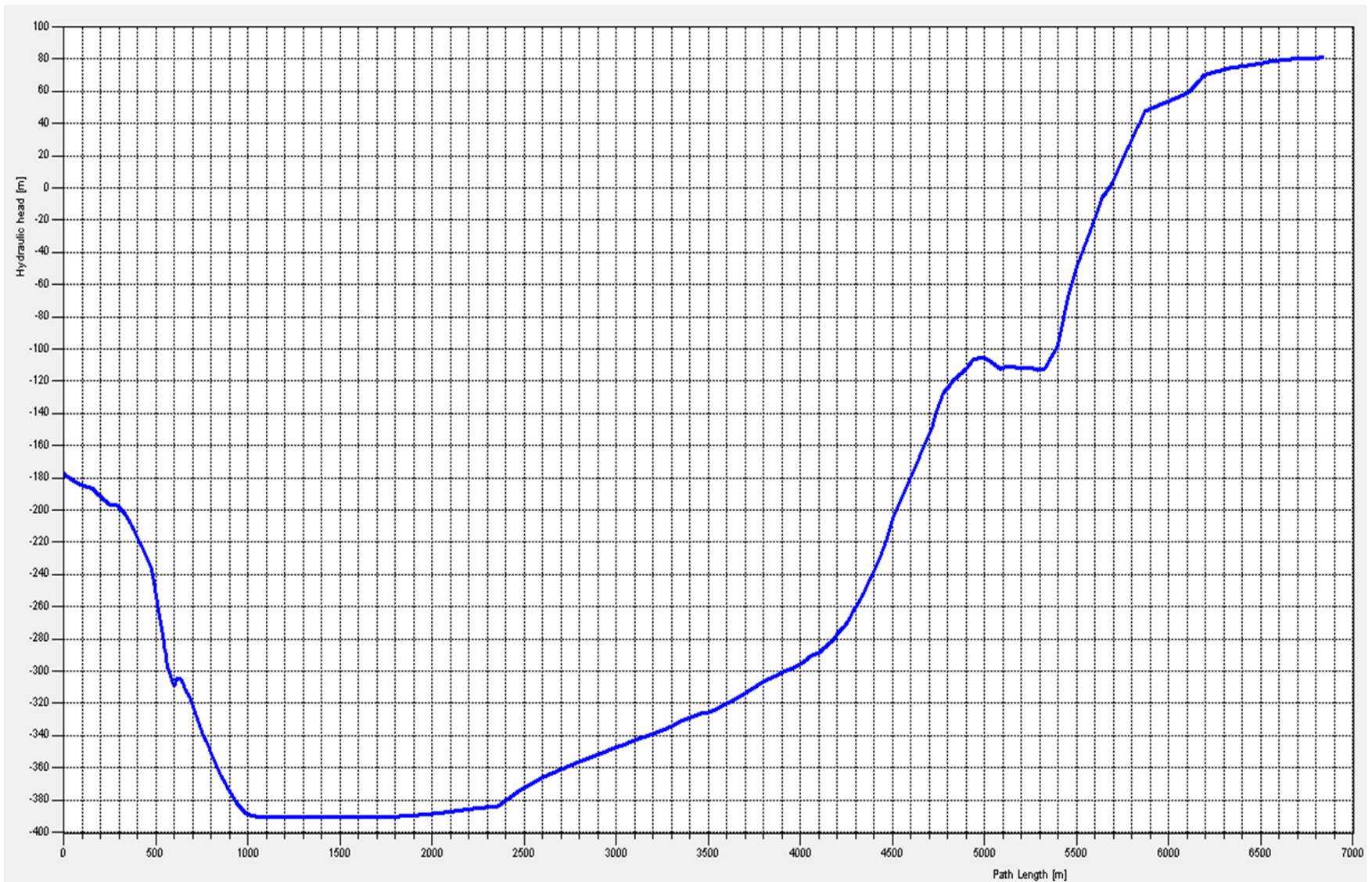


Figura 8.80 Seguimiento de datos de piezometría, corte IV-IV' Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

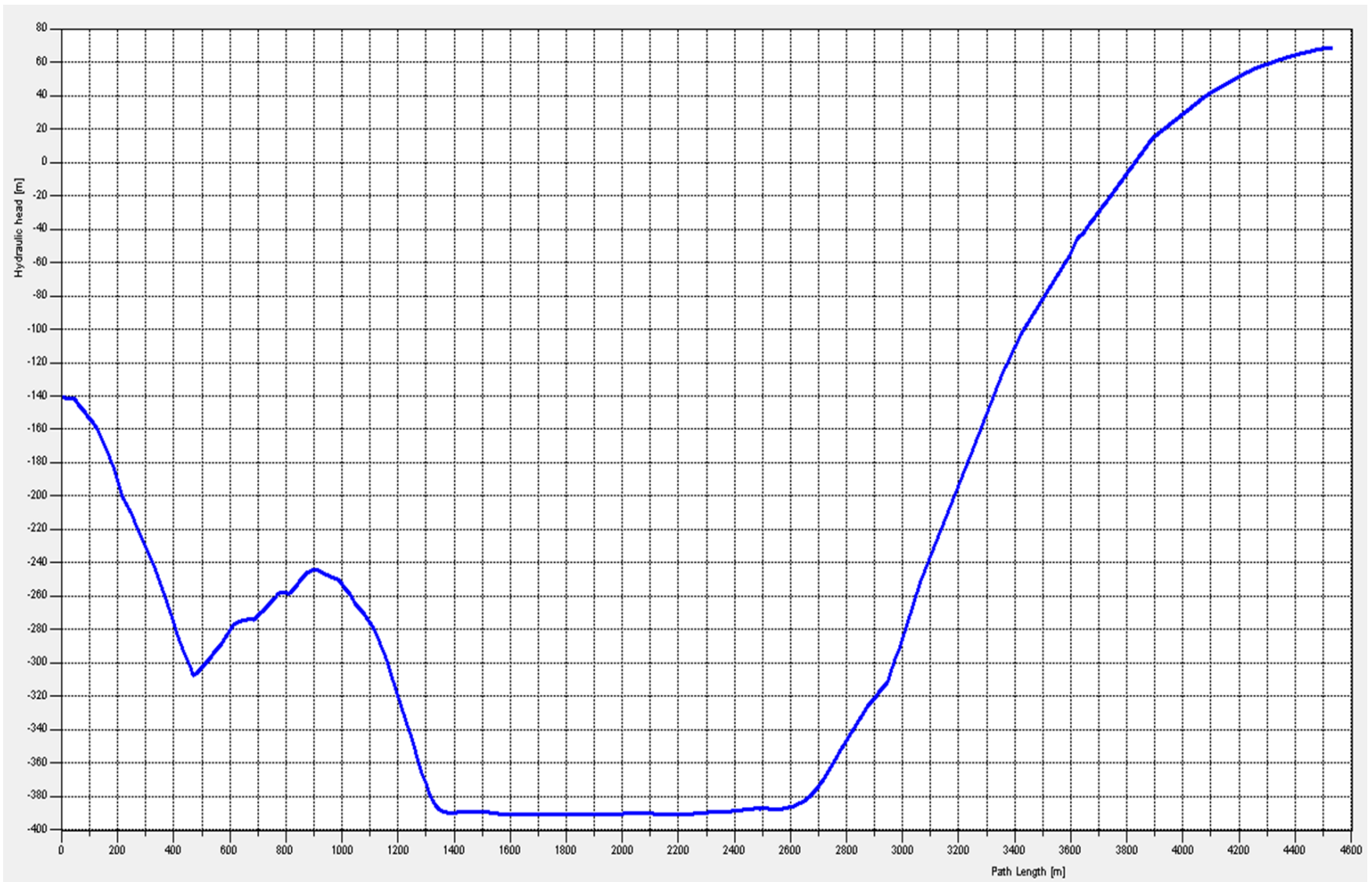


Figura 8.81 Seguimiento de datos de piezometría, corte V-V' Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

Anexo W6. Análisis del flujo en el complejo minero



Figura 8.82 Rate Budget, Mina 1-N1 (a) y zum en cercanías de PM1 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.



Figura 8.83 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N1). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

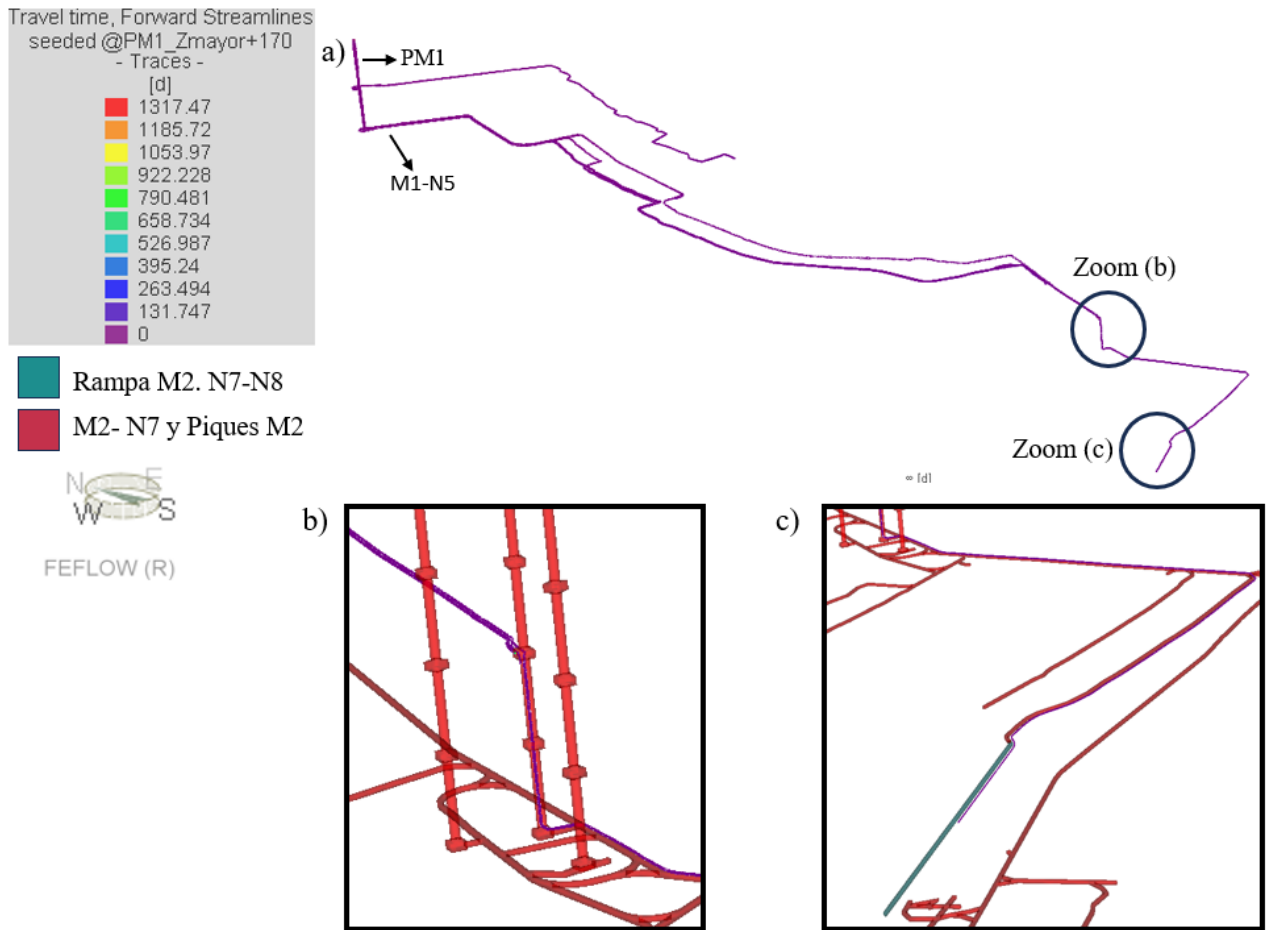


Figura 8.84 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N1 (a). Zum en piques de M2 (b) y rampa de conexión N7-N8 de M2 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

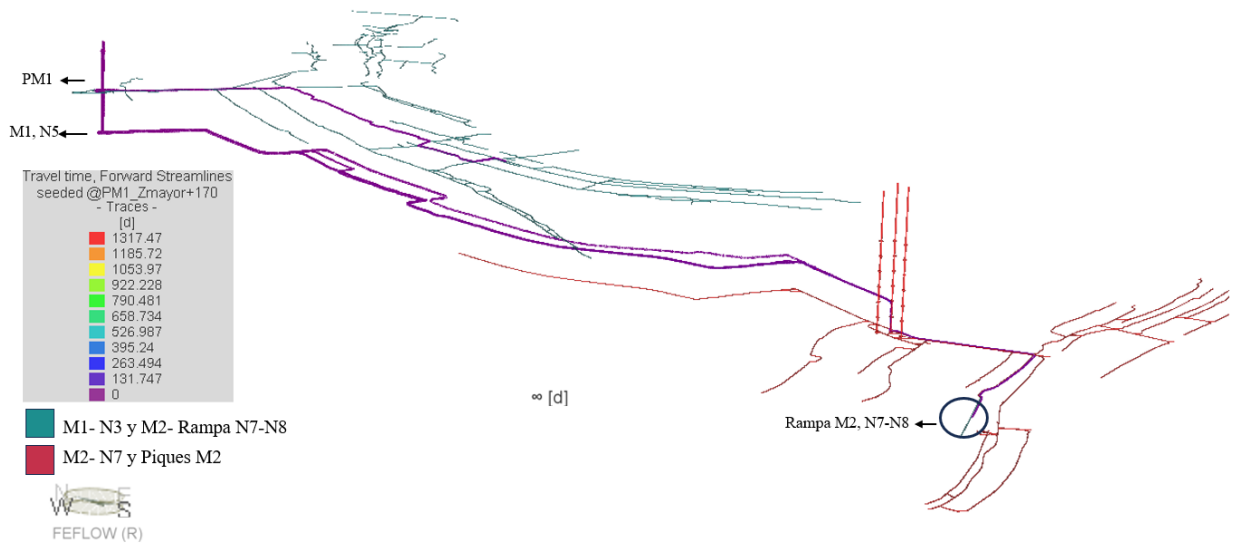


Figura 8.85 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N1 con niveles de mina de referencia. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

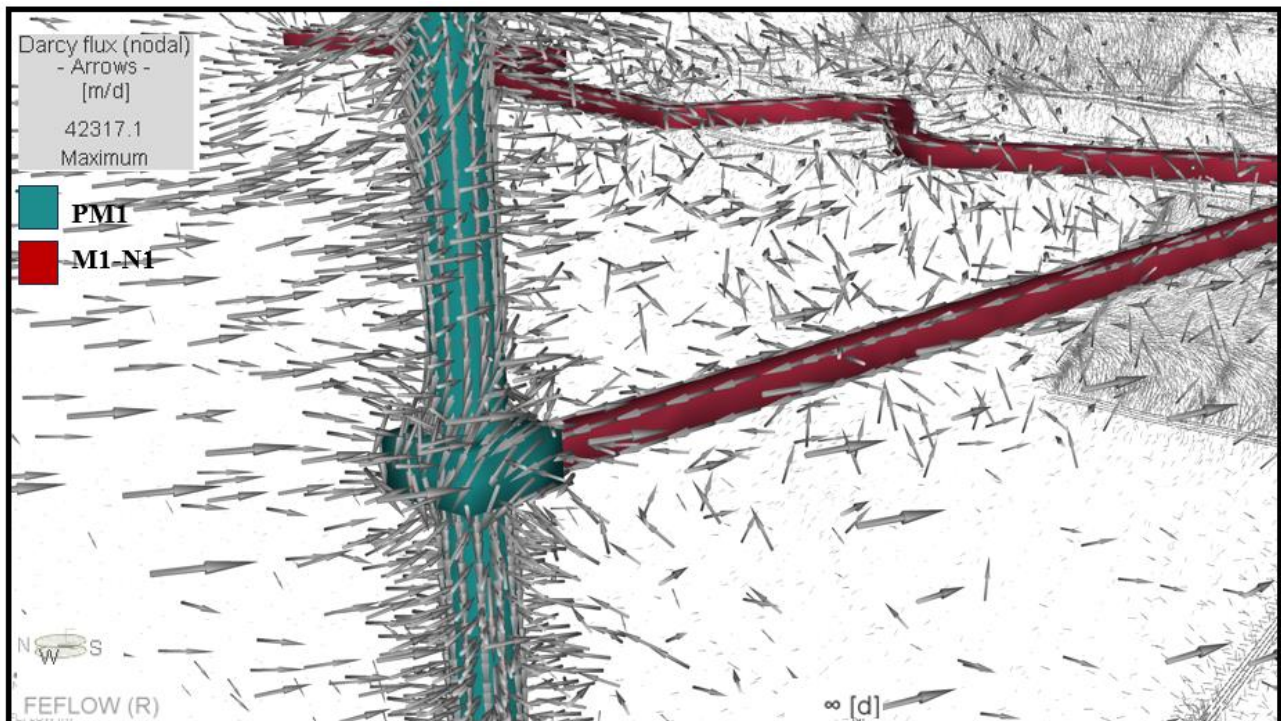


Figura 8.86 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 1. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

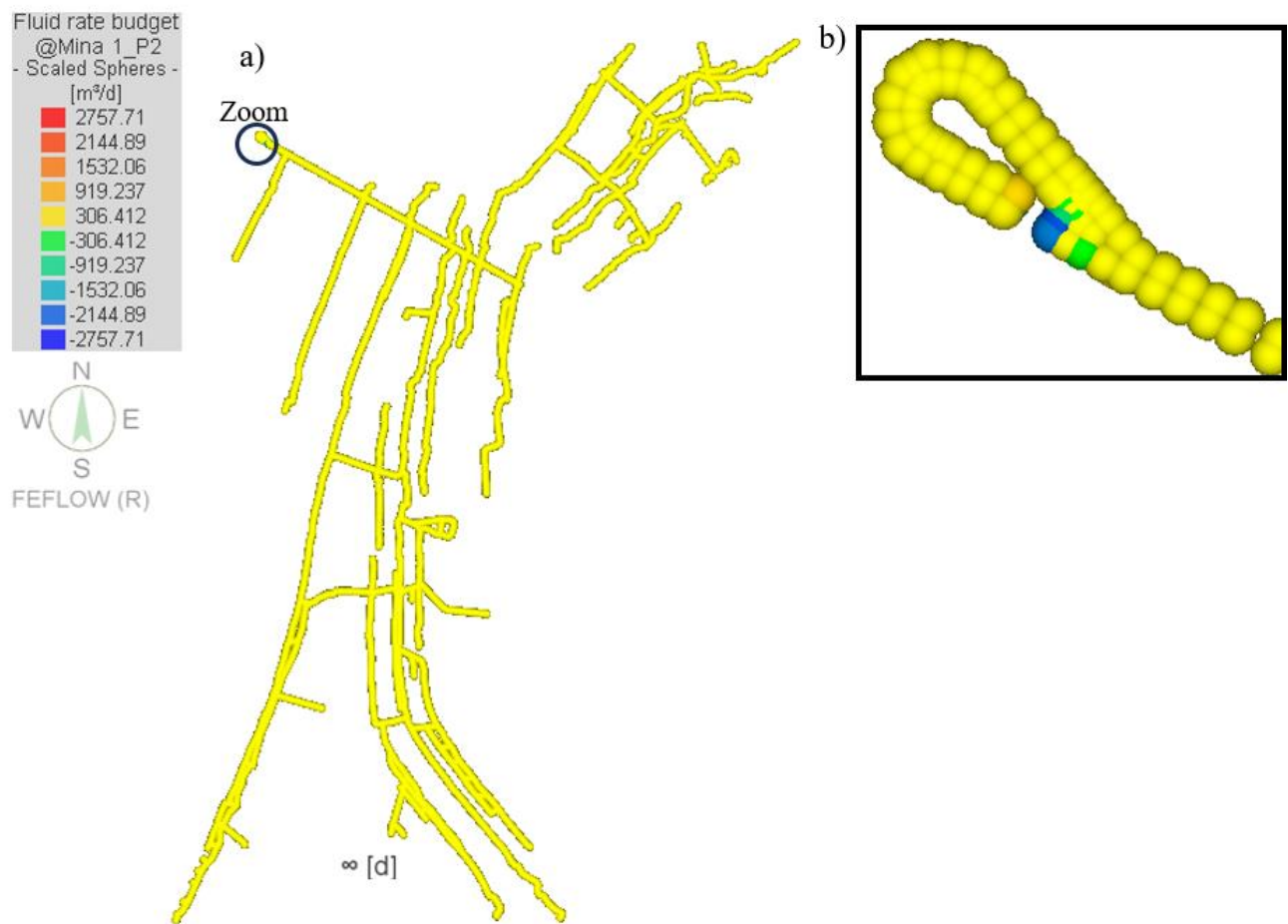


Figura 8.87 Rate Budget, Mina 1-N2 (a) y zoom en cercanías de PM1 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

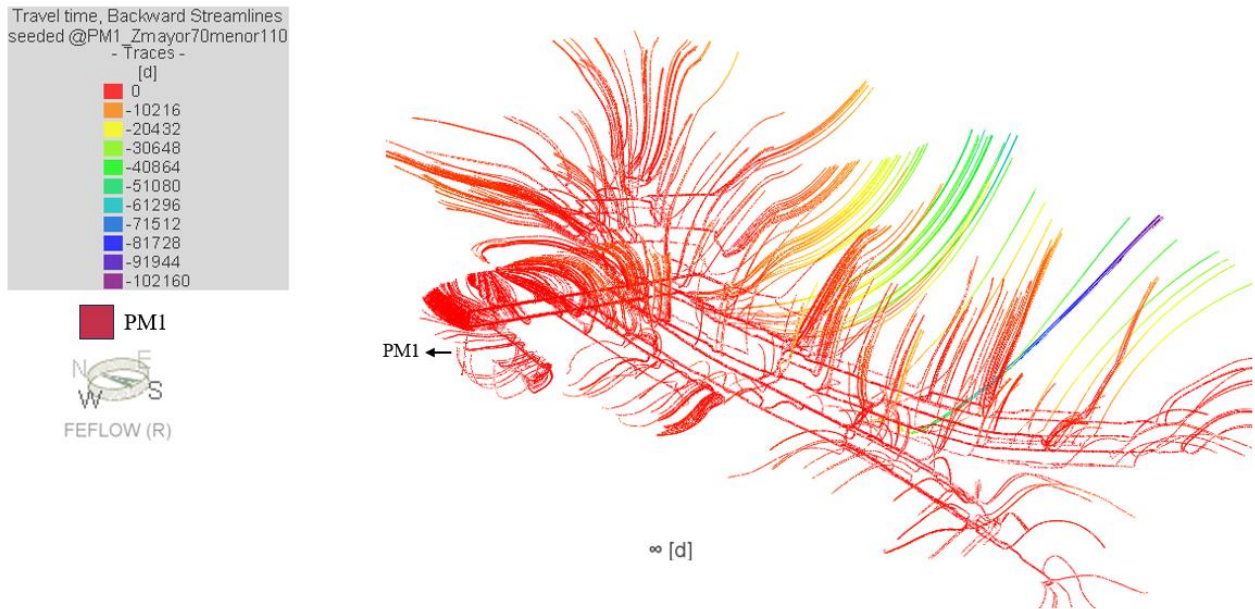


Figura 8.88 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N2). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

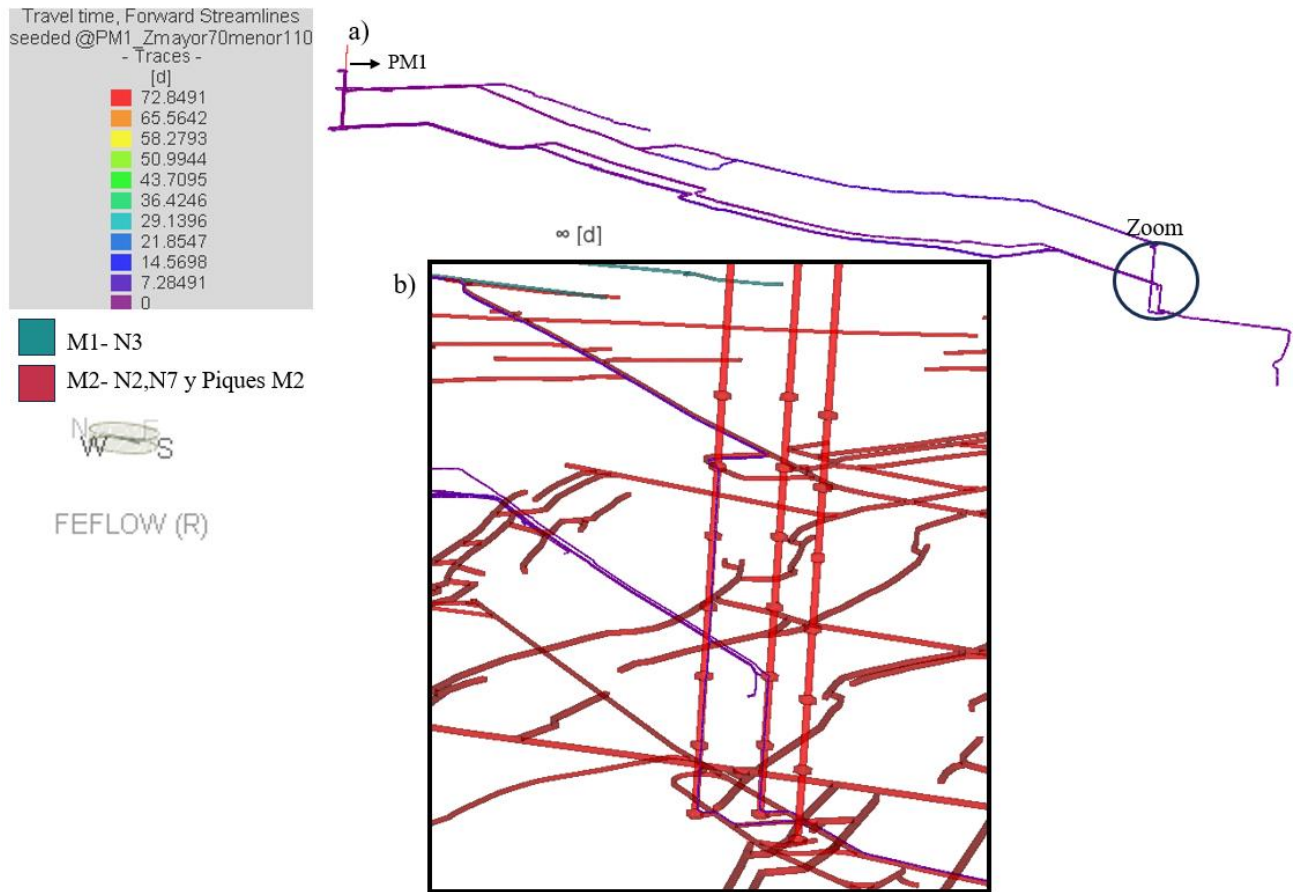


Figura 8.89 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N2 (a). Zum en piques de M2 (b). Modelo 1-
k₁-B, régimen estacionario

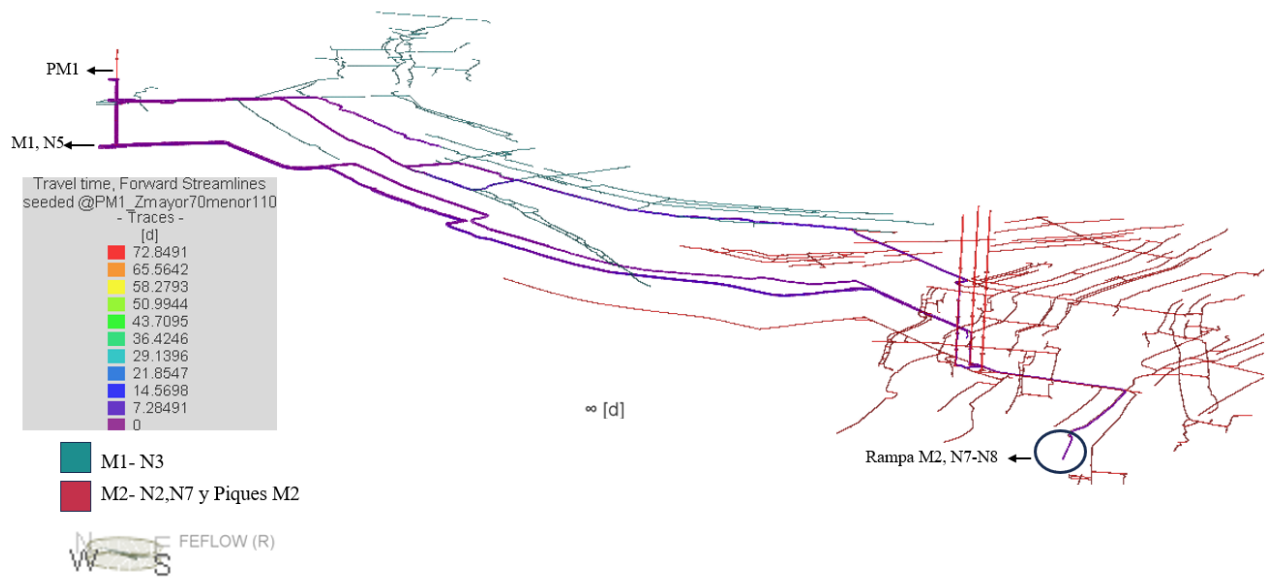


Figura 8.90 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N2 con niveles de mina de referencia. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

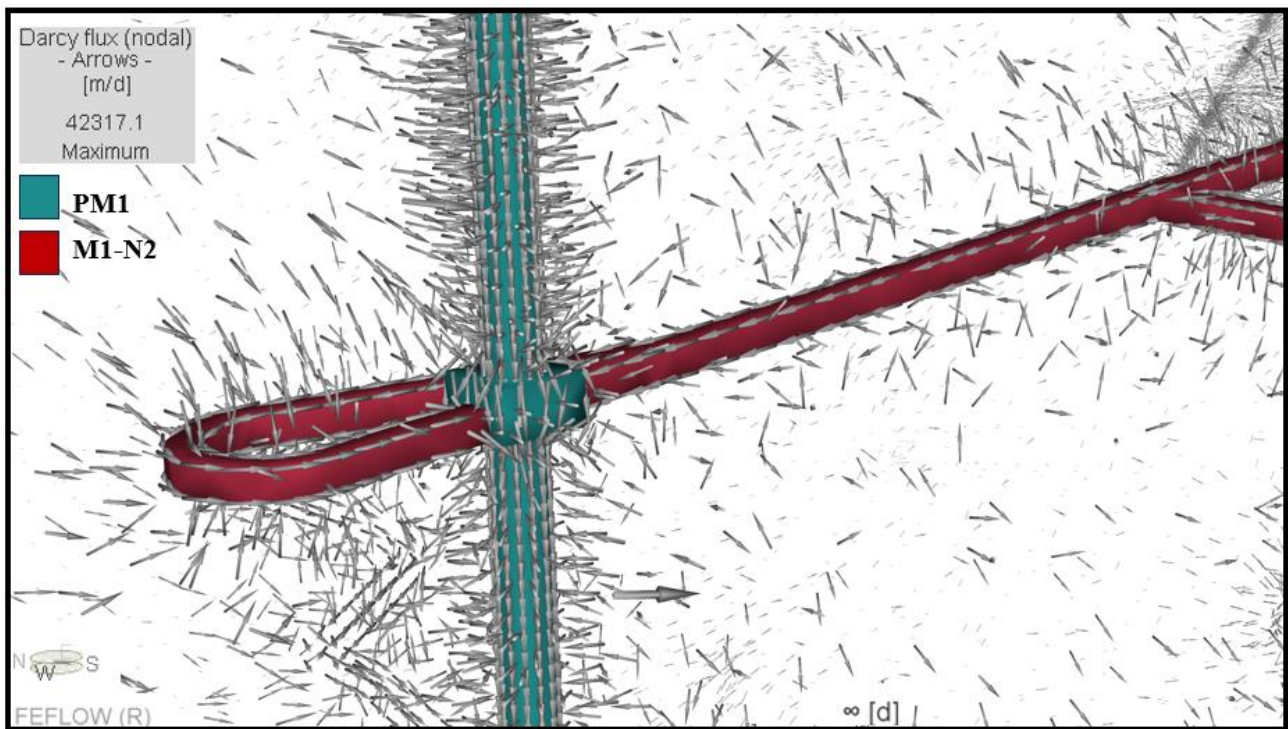


Figura 8.91 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 2. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

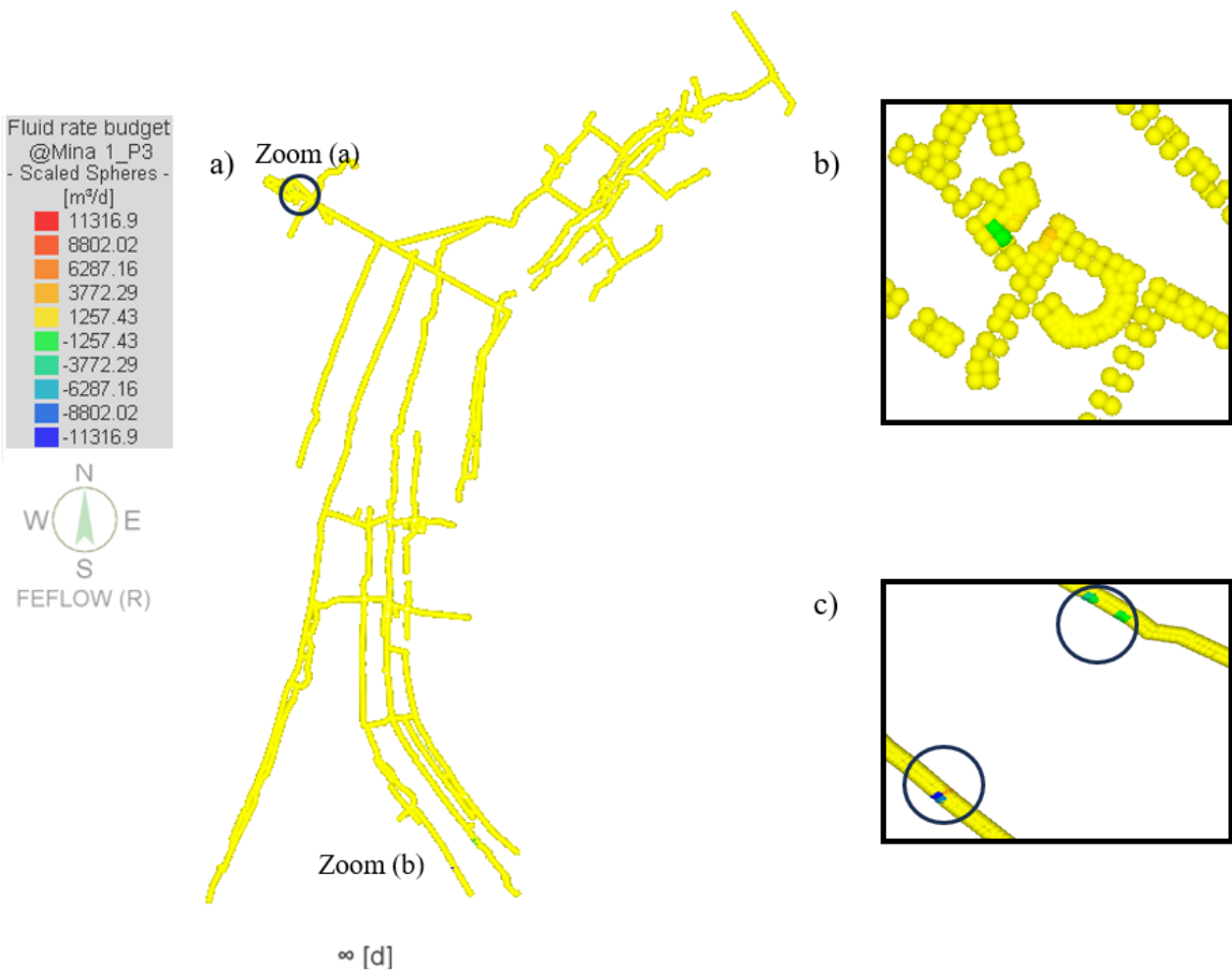


Figura 8.92 Rate Budget, Mina 1-N3 (a). Zum en cercanías de PM1 (b) y en conexión M1-N3 con M2-N2. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

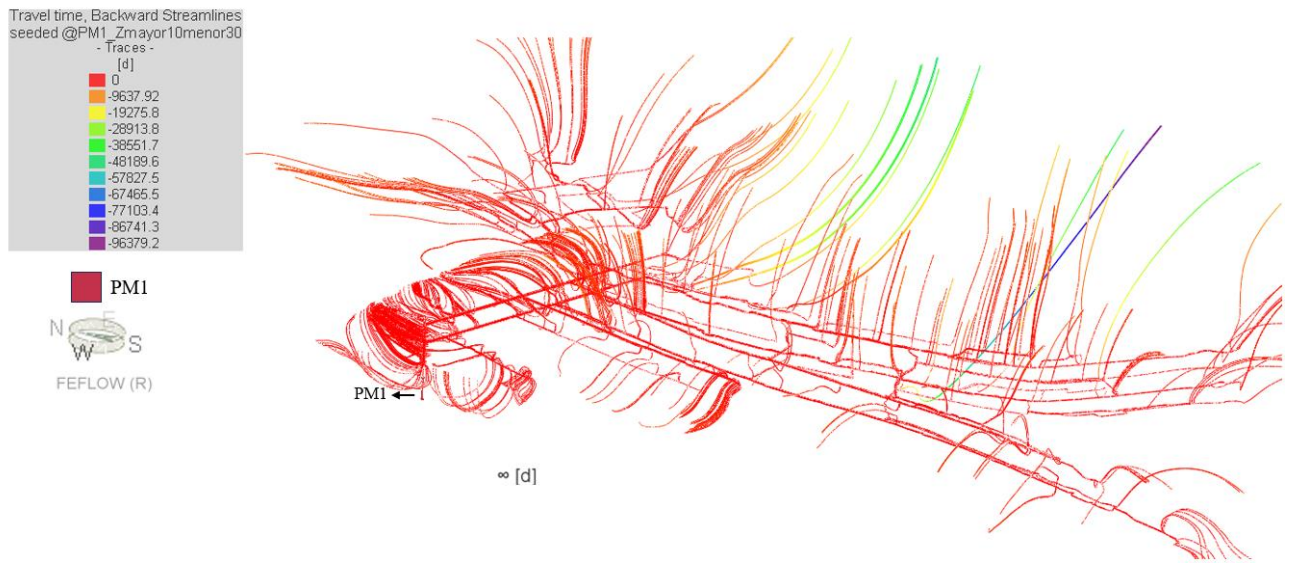


Figura 8.93 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N3). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

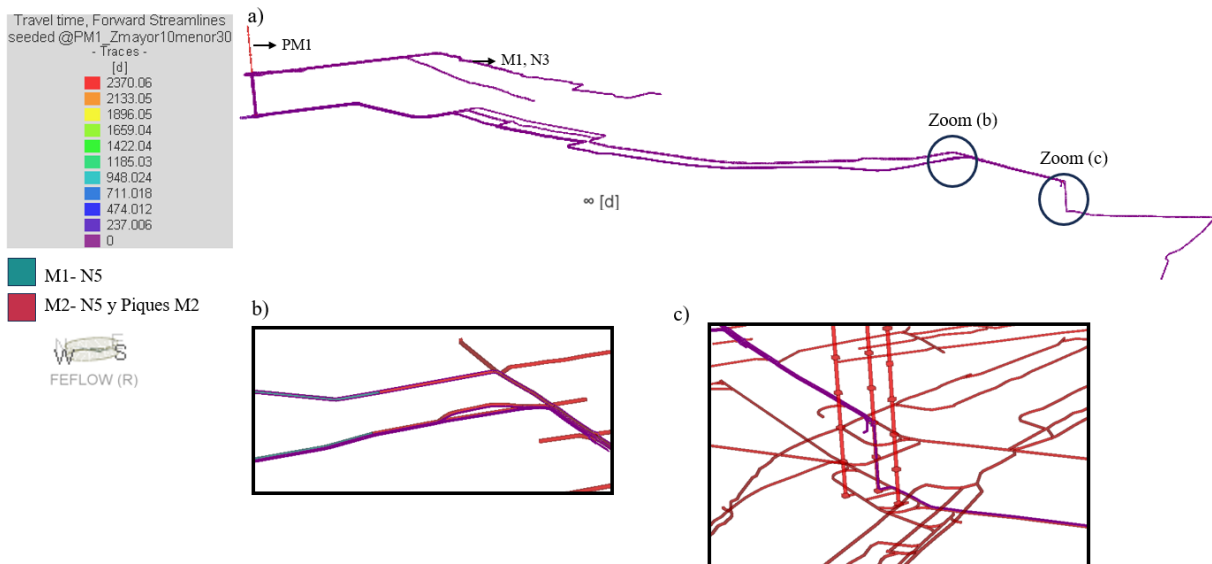


Figura 8.94 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N3 (a). Zum en conexión niveles 5 de M1 y M2. Zum en piques de M2 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

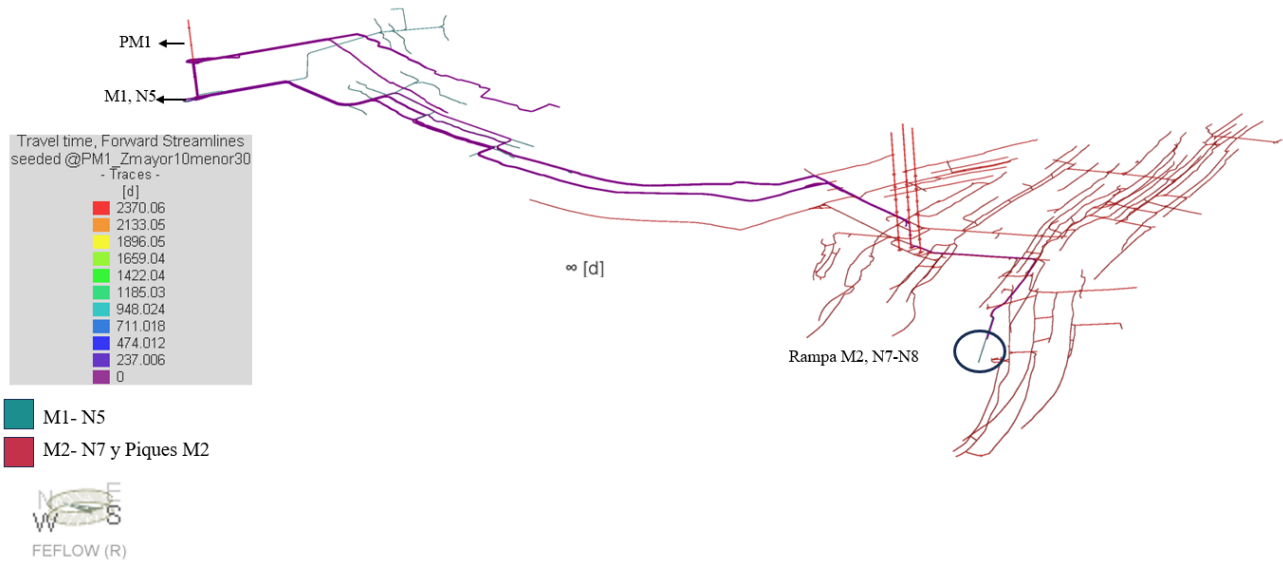


Figura 8.95 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N3 con niveles de mina de referencia. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

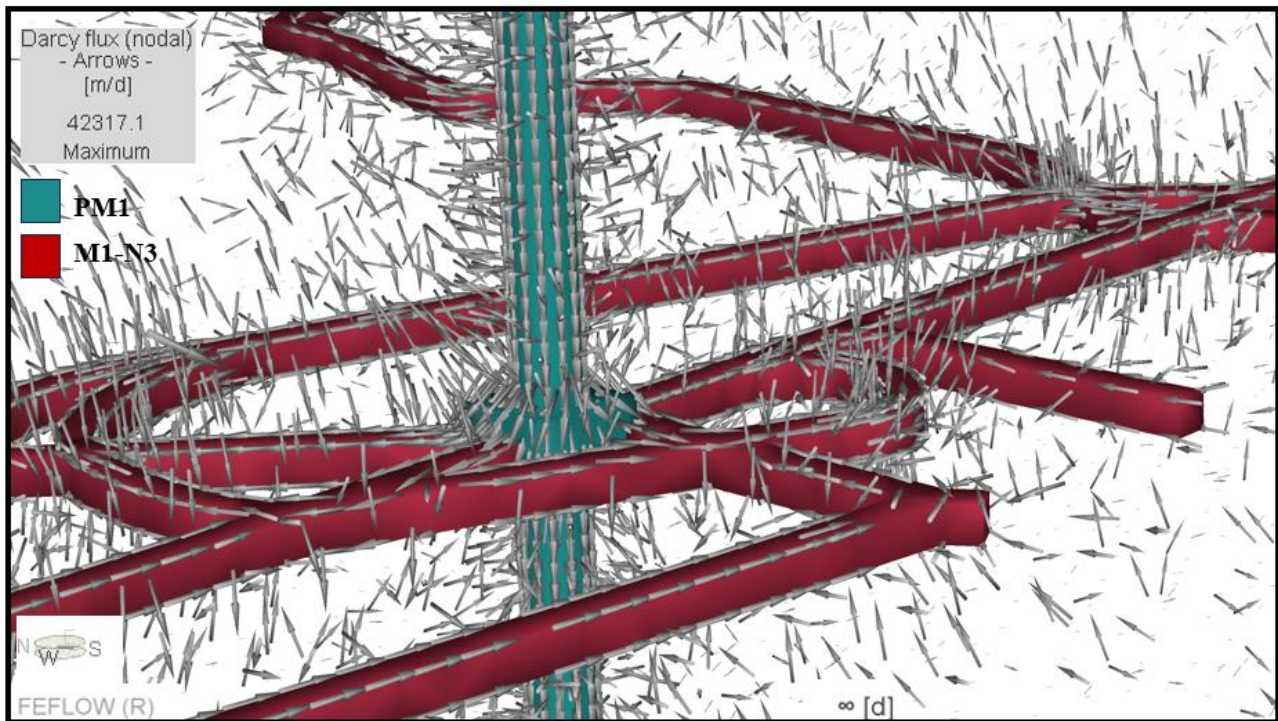


Figura 8.96 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 3. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

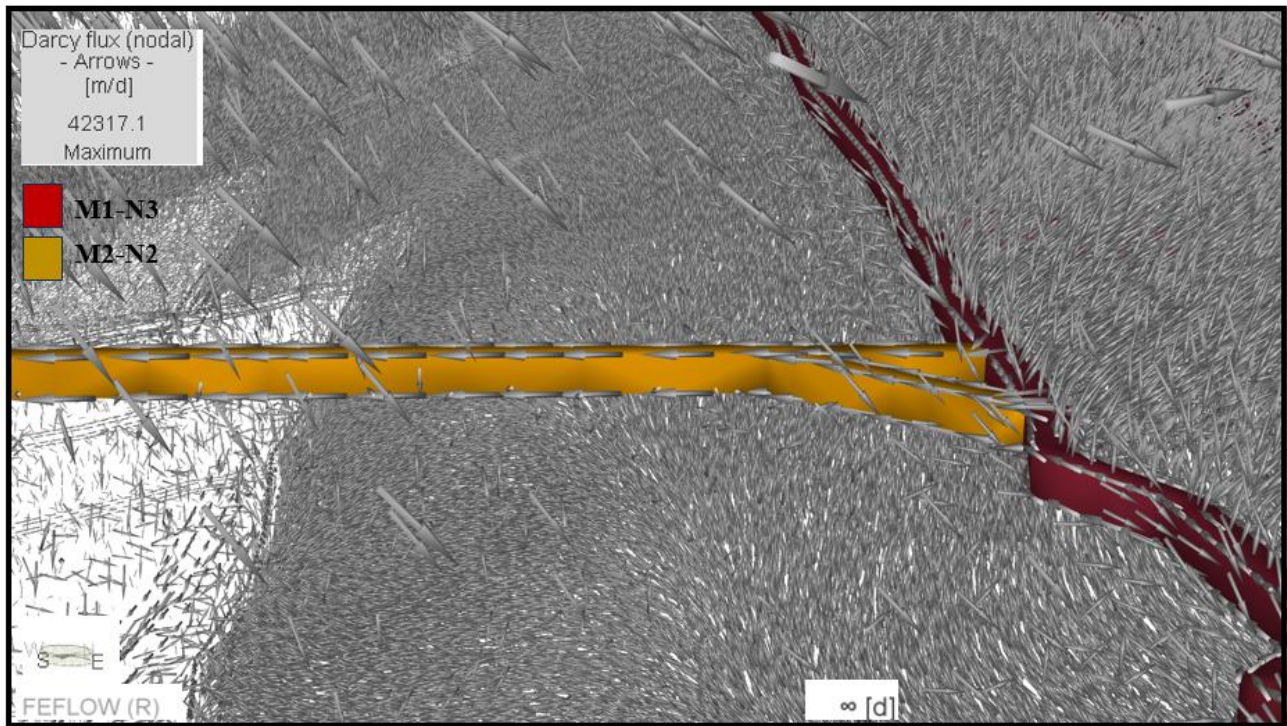


Figura 8.97 Vectores de velocidad de Darcy. Conexión directa entre M1-N3 y M2-N2. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

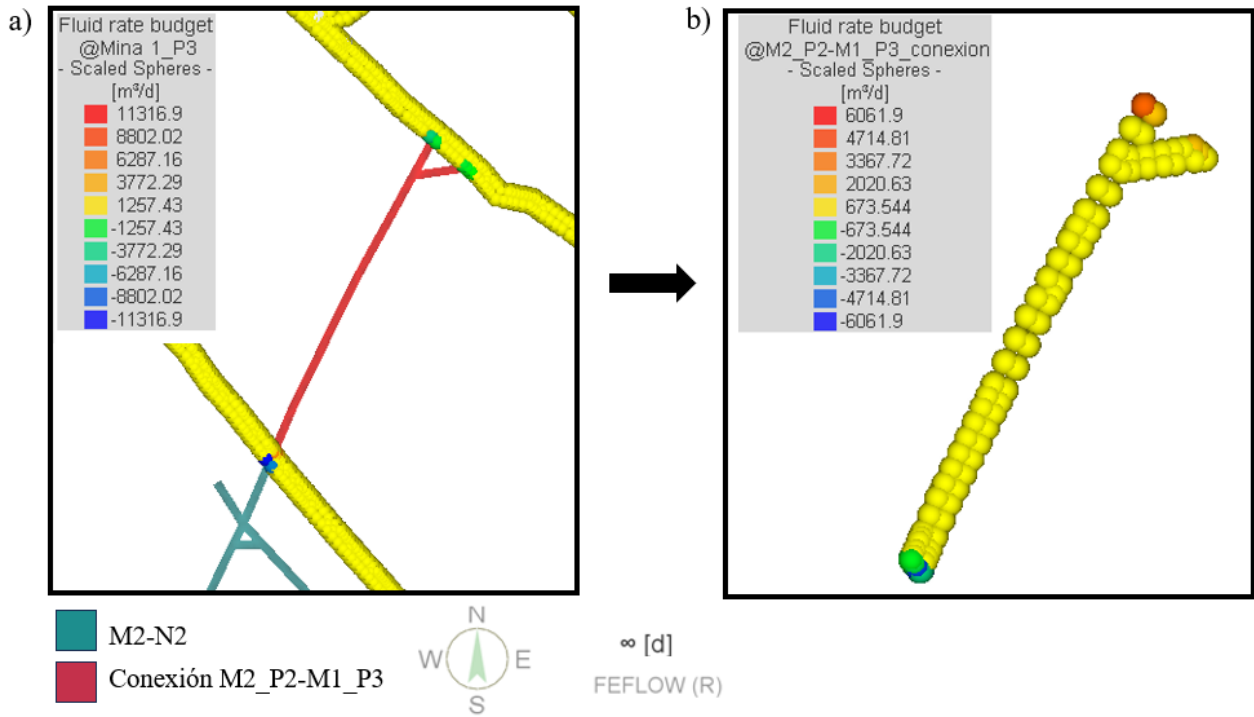


Figura 8.98 Rate Budget en zoom en zona de conexión M1-N3 con M2-N2 (a) (según Figura 8.92) y rate budget de la conexión (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

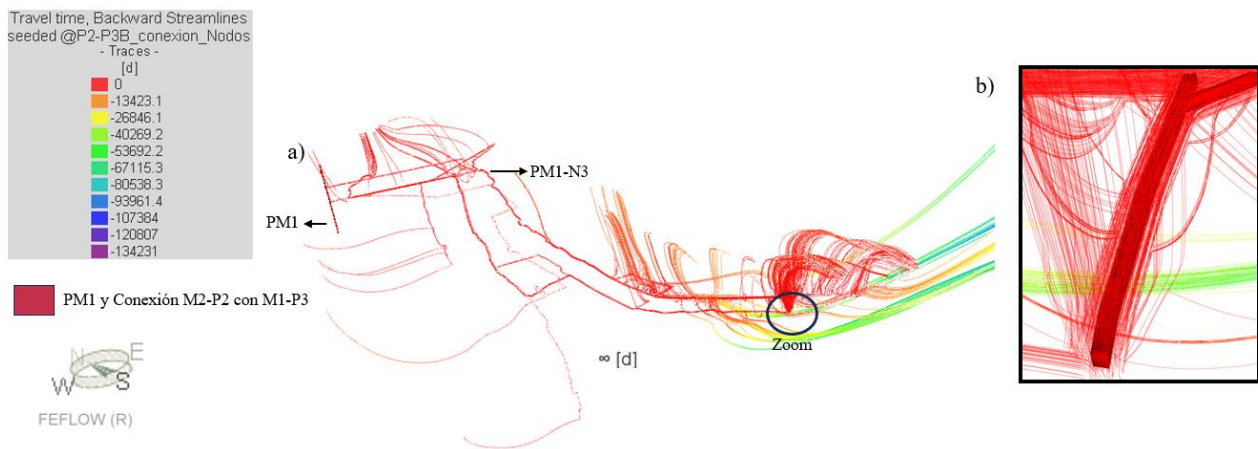


Figura 8.99 Líneas de flujo afluentes (backward) de sección de conexión entre M1-N3 y M2-N2 (a) y zoom en la sección (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

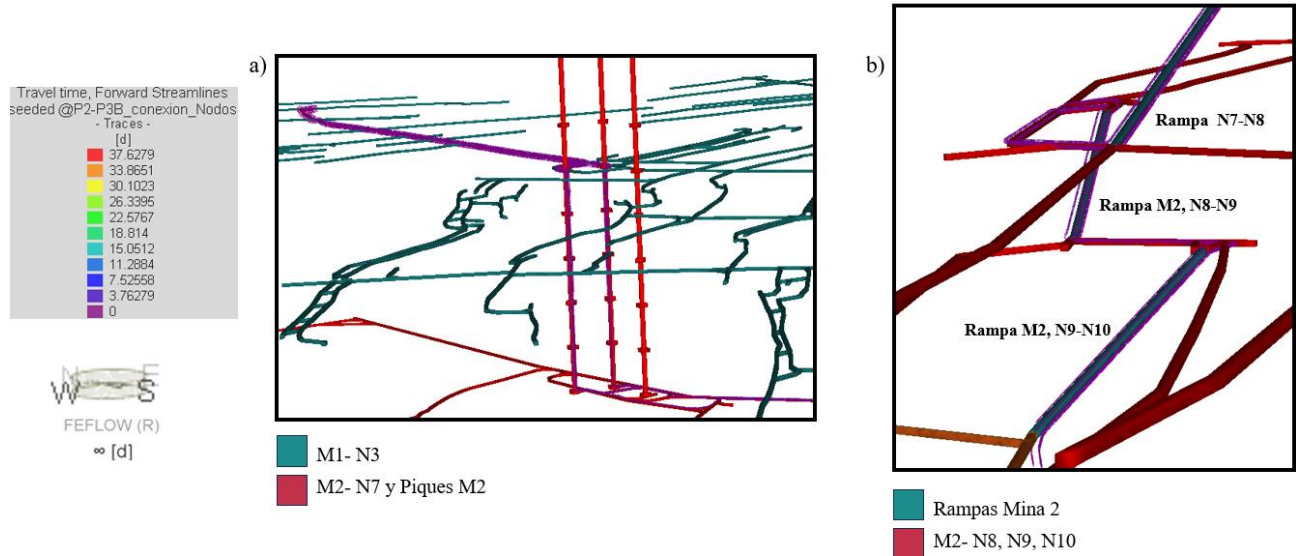


Figura 8.100 Líneas de flujo (forward) de sección de conexión entre M1-N3 y M2-N2. Líneas de flujo en cercanías a piques de M2 (a) y líneas de flujo en cercanías de las rampas de M2 (b) Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario

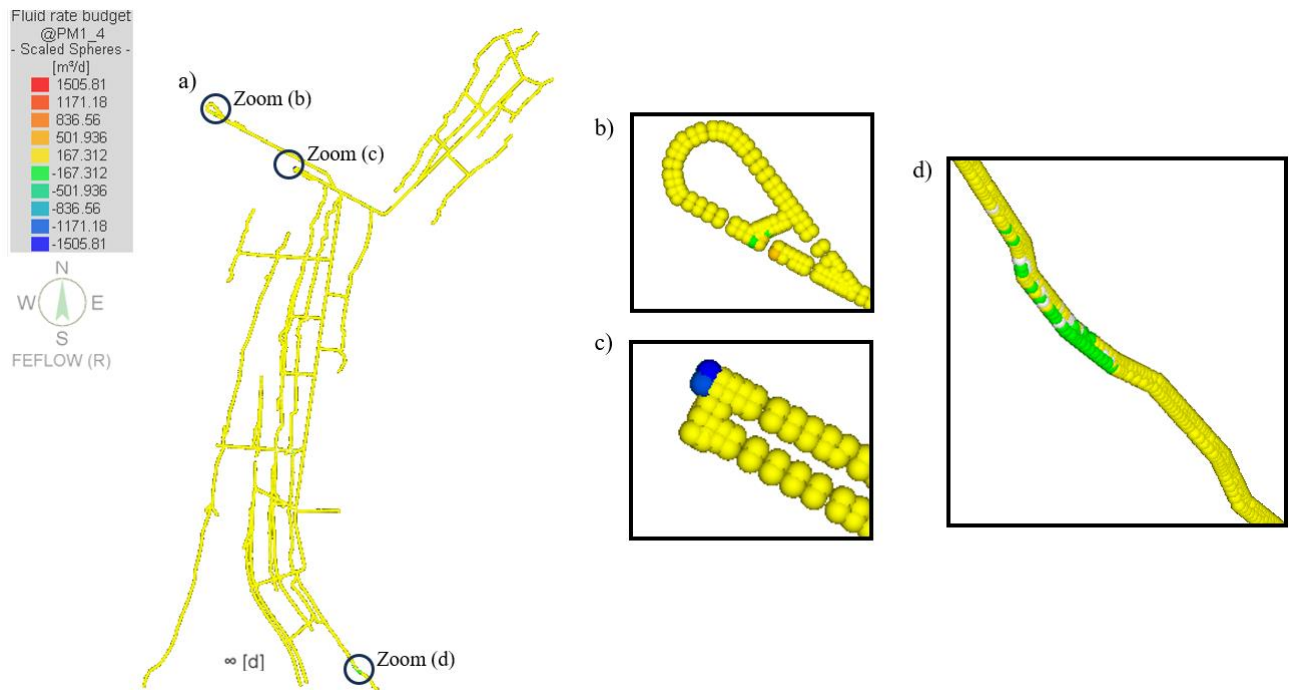


Figura 8.101 Rate Budget, Mina 1-N4 (a). Zum en cercanías de PM1 (b). Zum en trayecto final de rampa de M1, conexión entre M1-N3 con M1-N4 (c). Zum en conexión indirecta entre M1 y M2 (d). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.



Figura 8.102 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N4). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

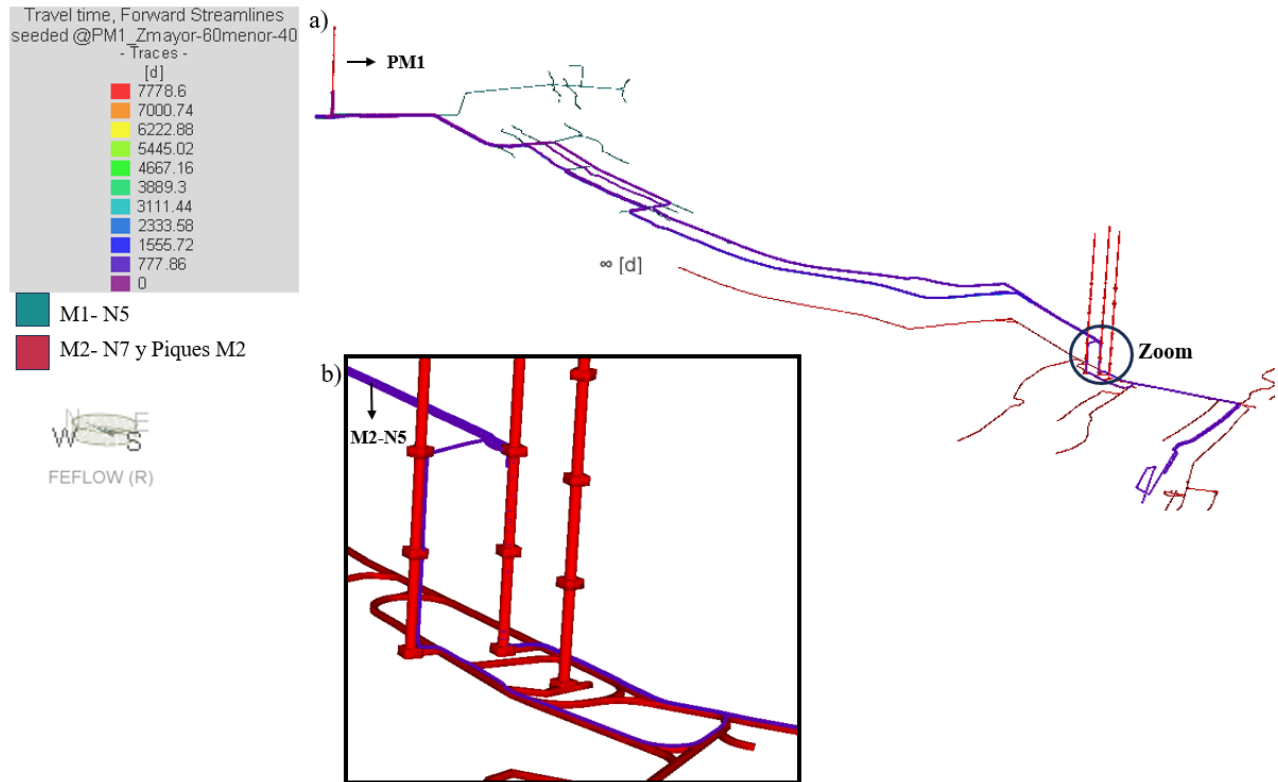


Figura 8.103 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N4. Zum en piques de M2 (b). Modelo 1-k1-B, régimen estacionario

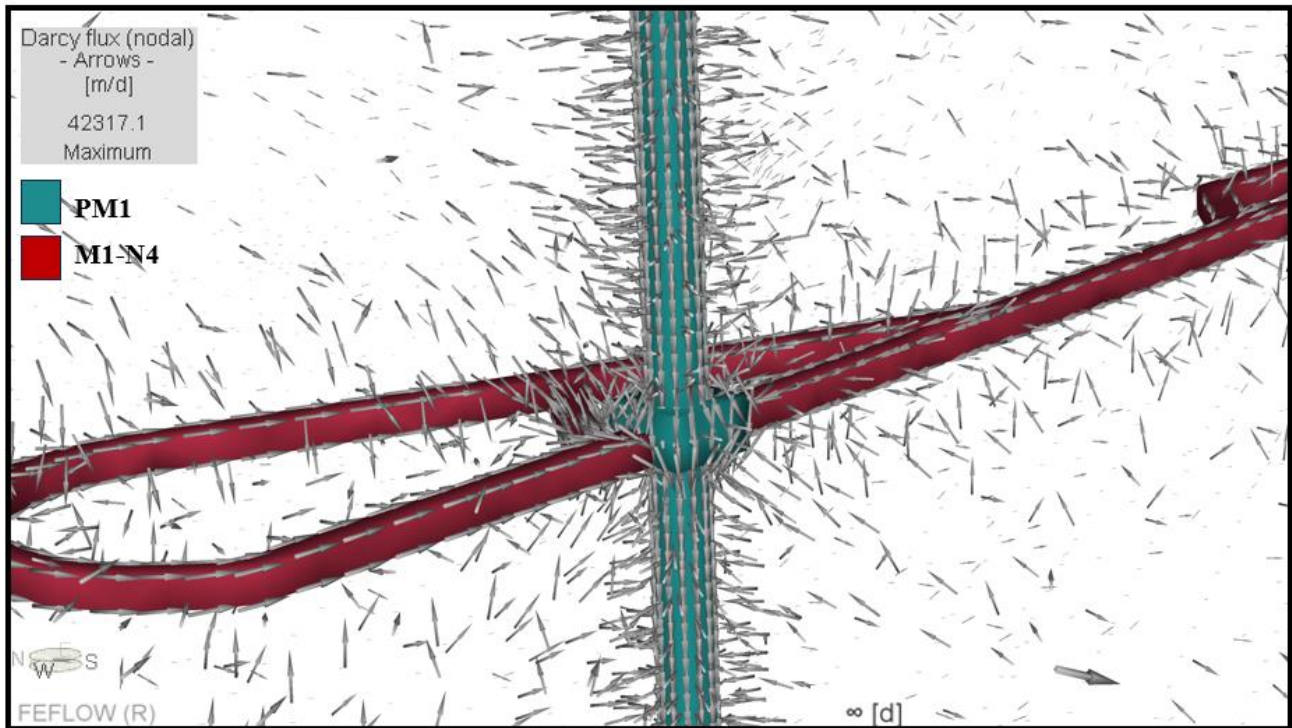


Figura 8.104 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 4. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

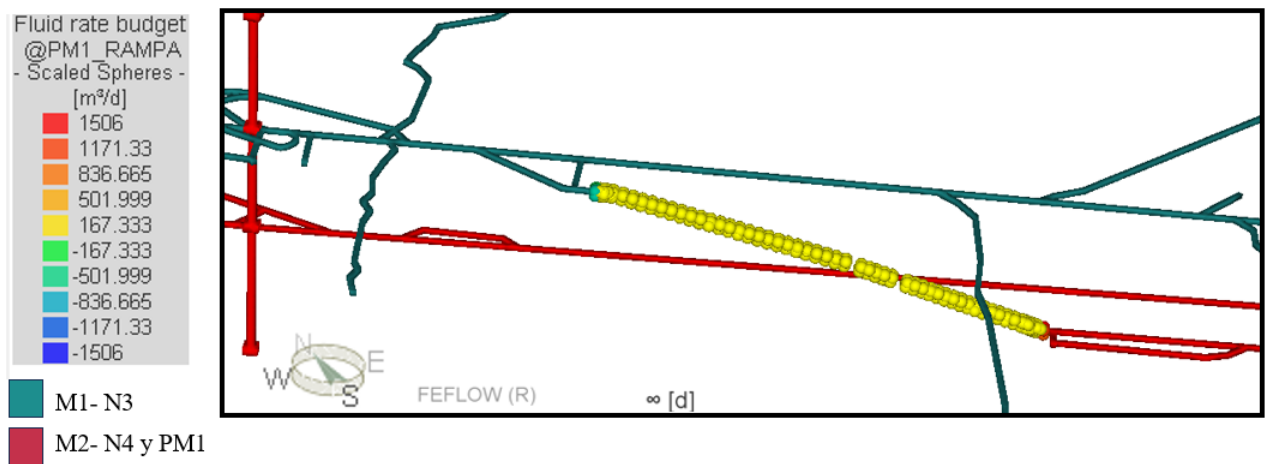


Figura 8.105 Rate Budget, rampa de conexión de M1-N3 con M1-N4. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

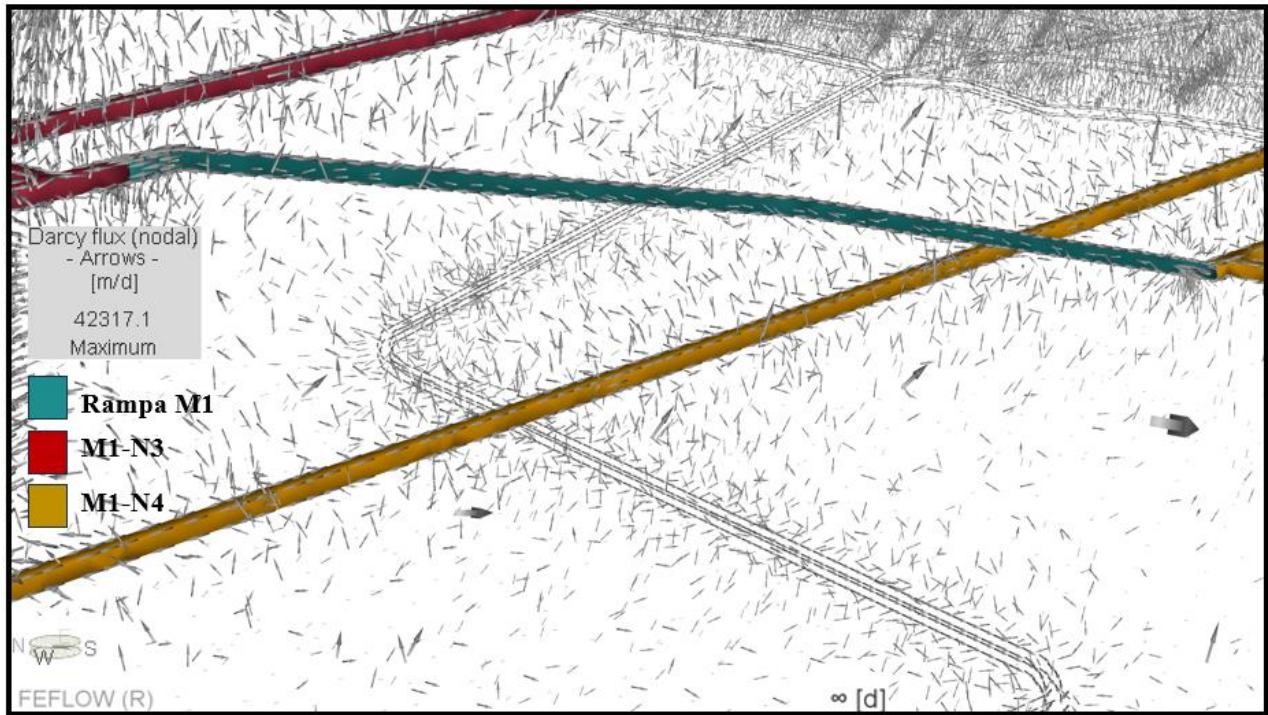


Figura 8.106 Vectores de velocidad de Darcy. M1, Rampa de conexión entre N3 y N4. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

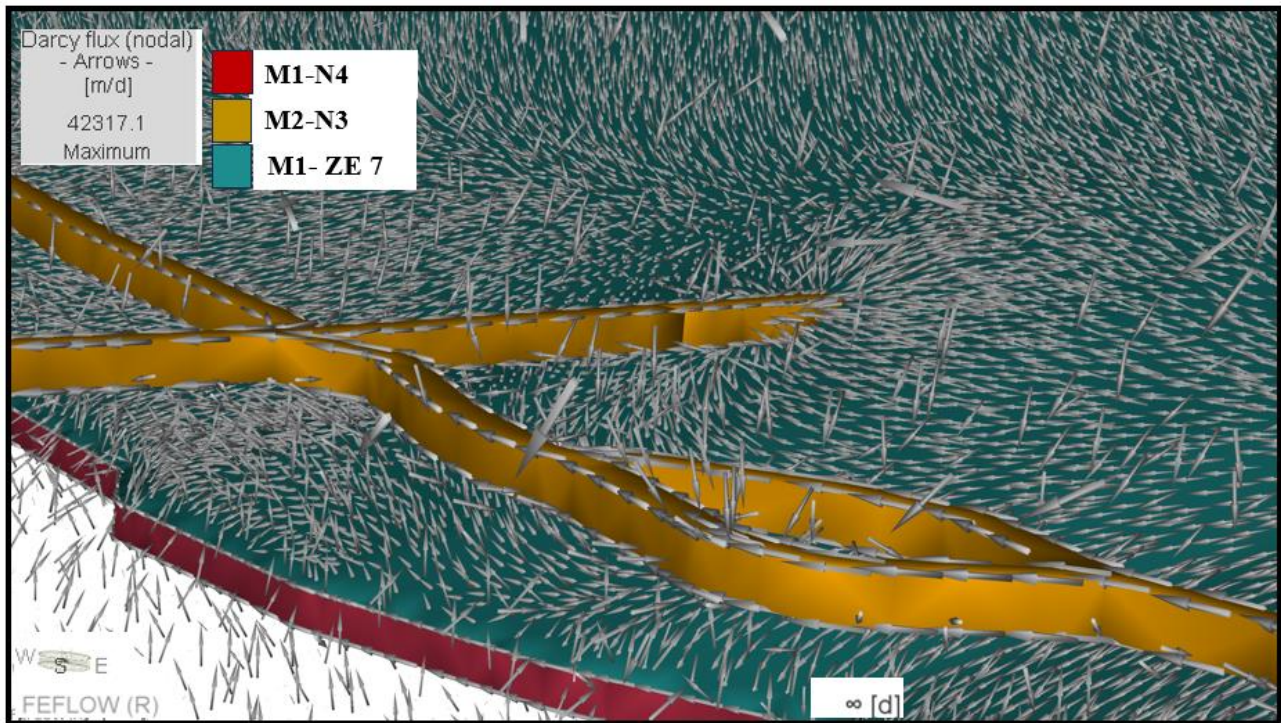


Figura 8.107 Vectores de velocidad de Darcy. Conexión indirecta entre M1-N4 y M2-N3, mediante ZE 7. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

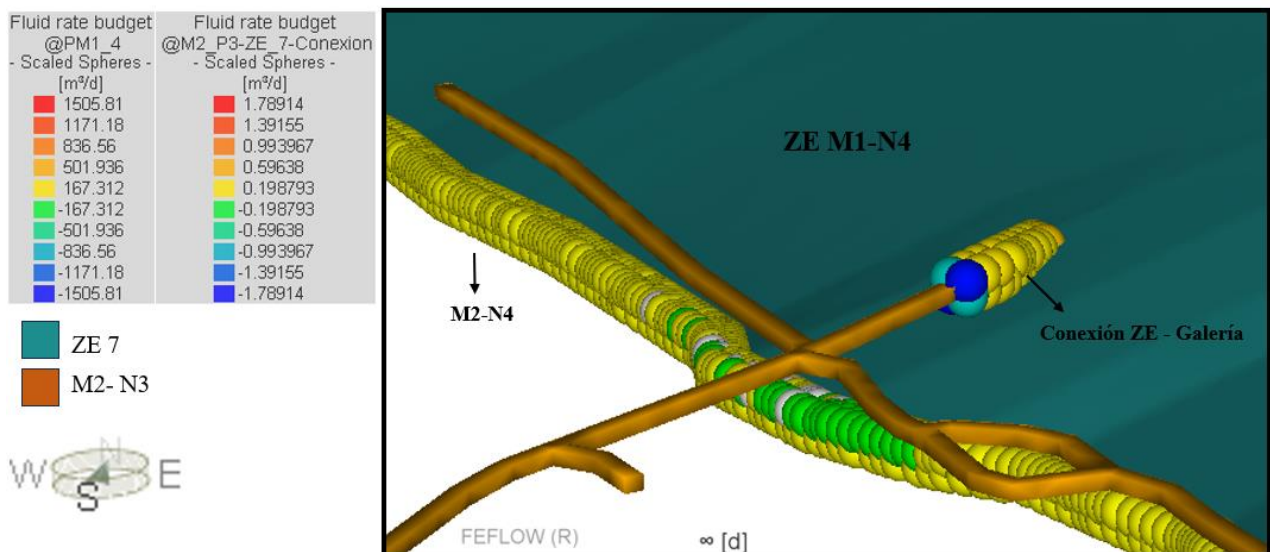


Figura 8.108 Rate Budget conexión (indirecta) de ZE 7 de M1 con galería de M2-N3. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

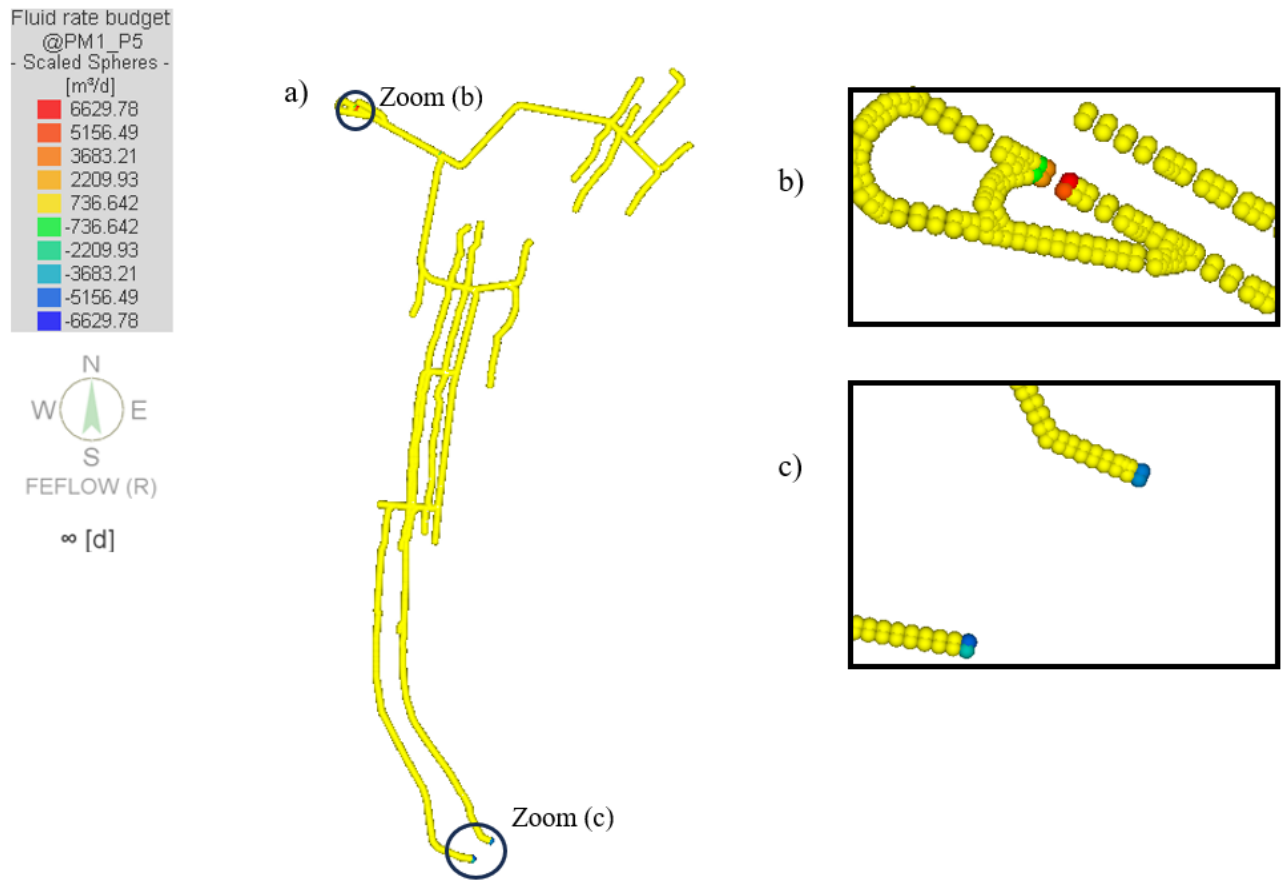


Figura 8.109 Rate Budget, Mina 1-N5 (a). Zum en cercanías de PM1 (b). Zum en conexión M1-N5 con M2-N5 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

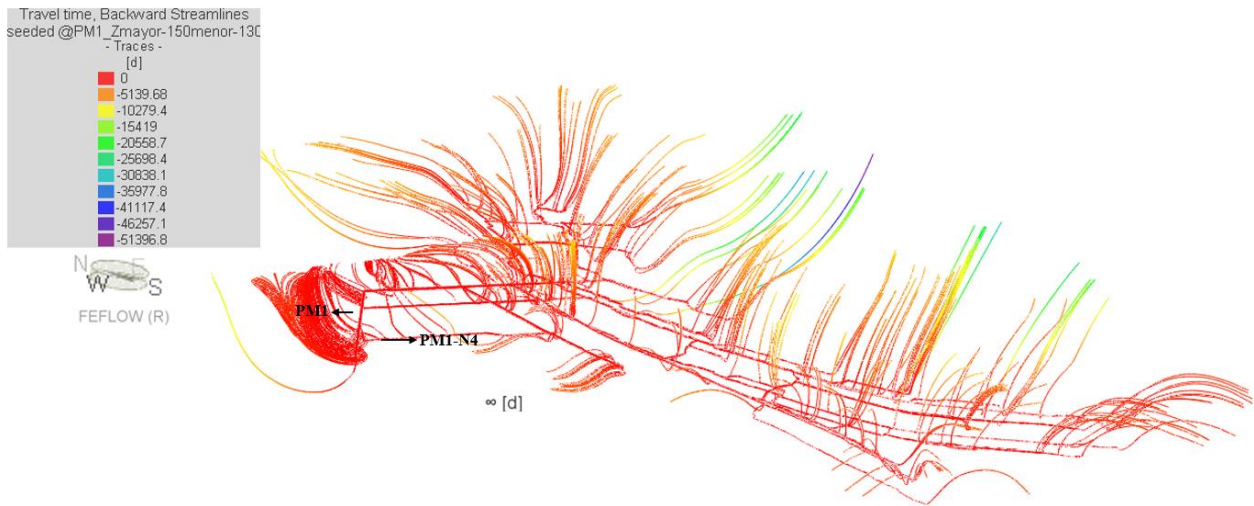


Figura 8.110 Líneas de flujo afluentes (backward) de PM1 (sección N5). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

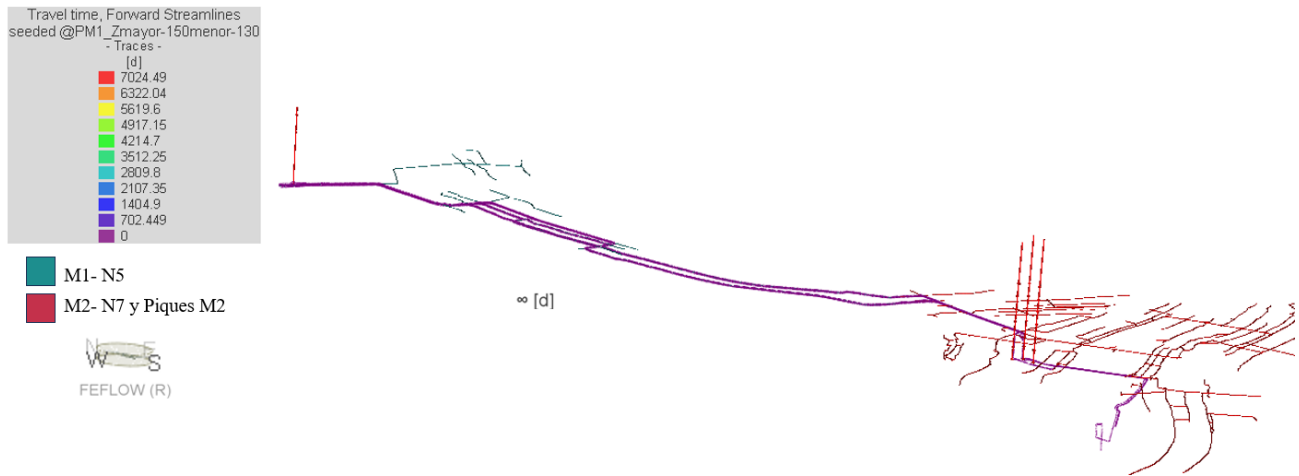


Figura 8.111 Líneas de flujo (forward) de PM1 sección N5. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

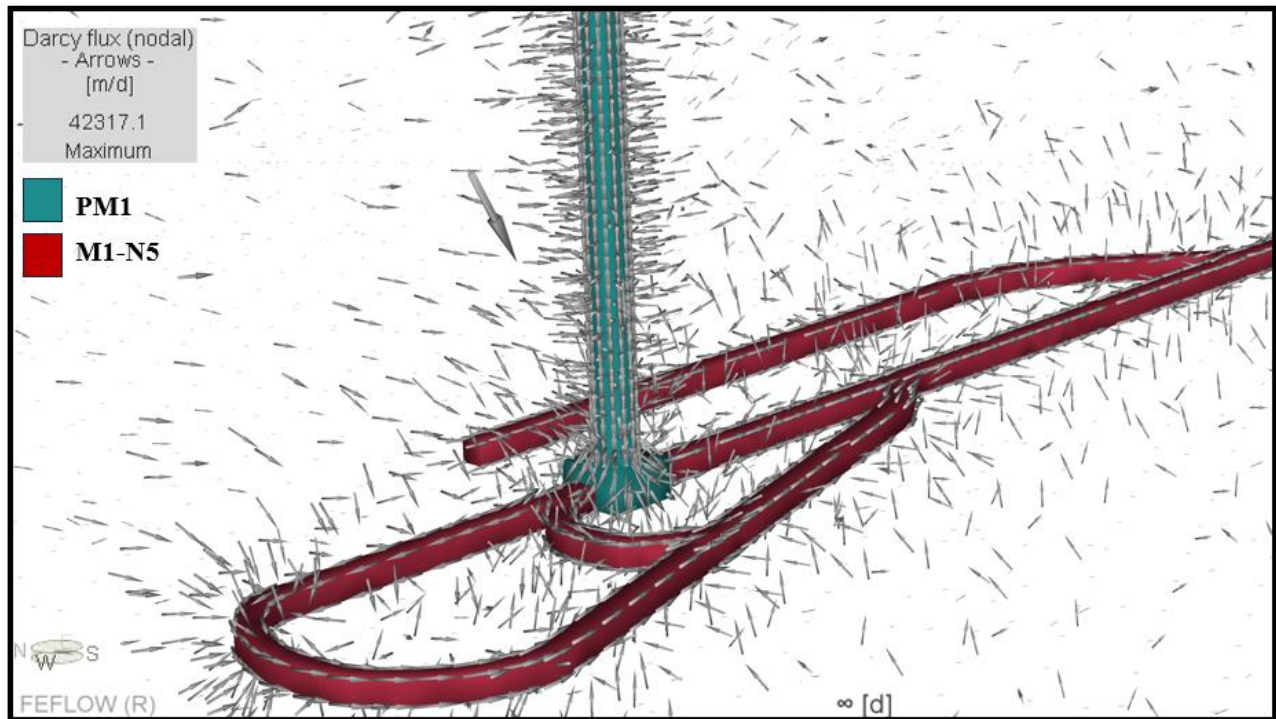


Figura 8.112 Vectores de velocidad de Darcy. PM1, cercanías de Nivel 5. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

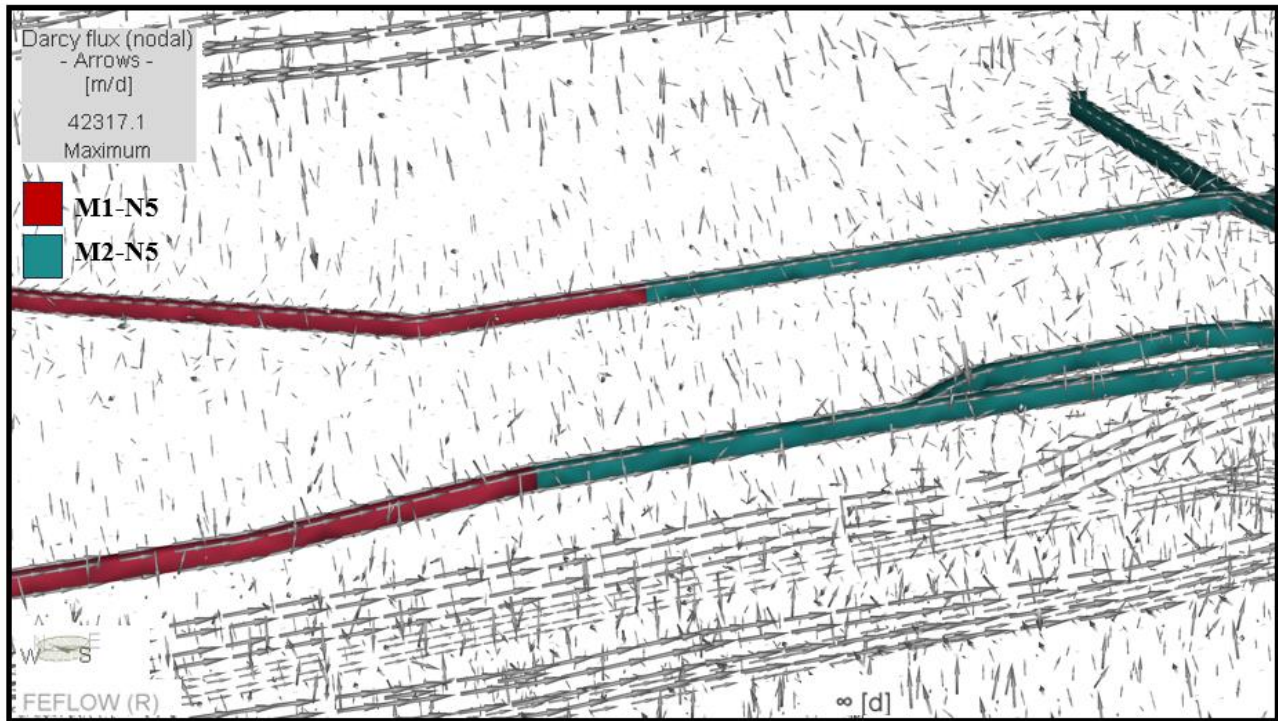


Figura 8.113 Vectores de velocidad de Darcy. Conexión directa entre M1-N5 y M2-N5. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

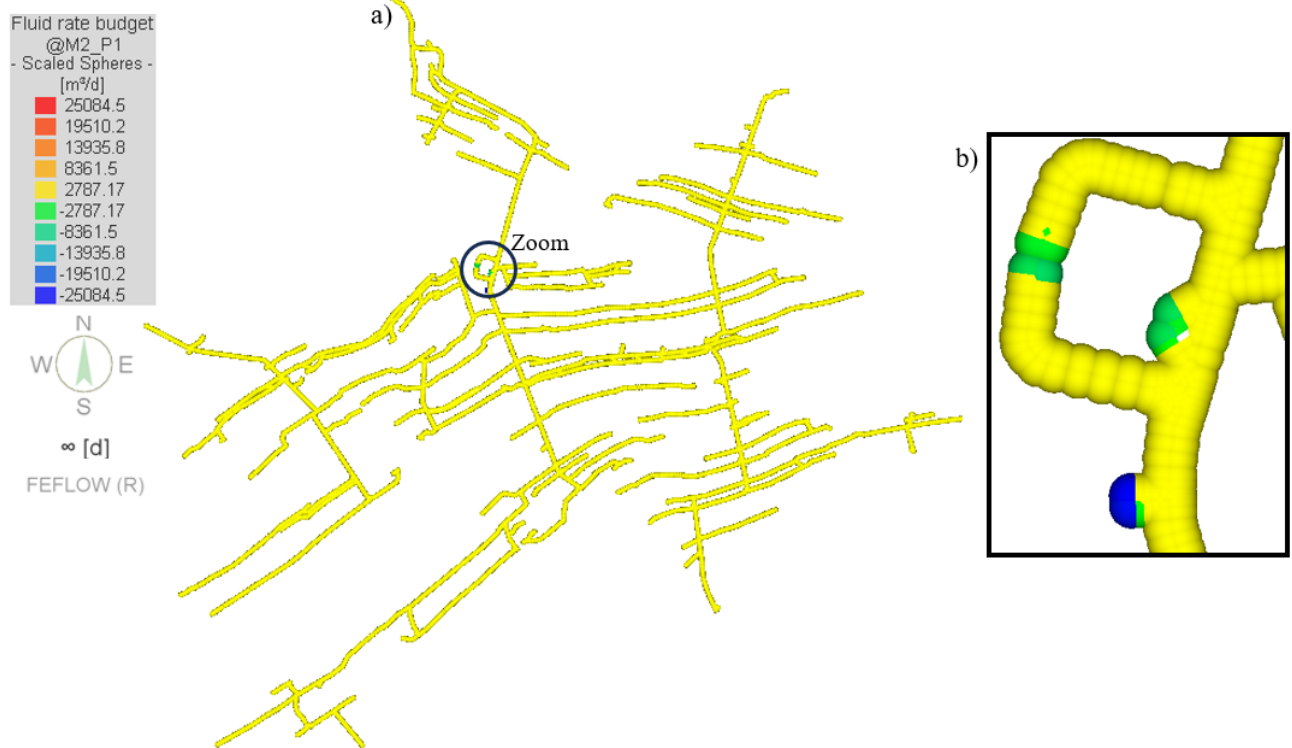


Figura 8.114 Rate Budget, Mina 2-N1 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

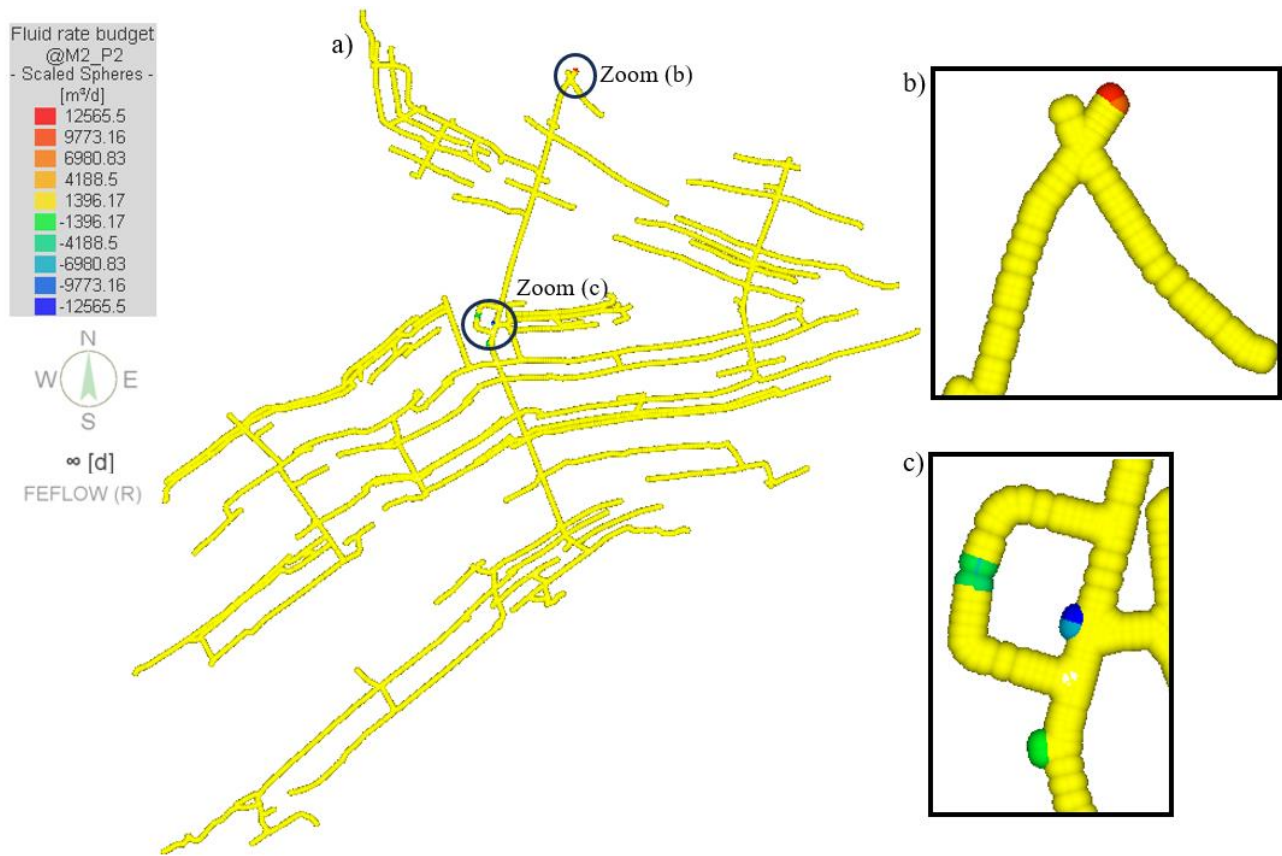


Figura 8.115 Rate Budget, Mina 2-N2 (a). Zum en conexión directa con M1-N3 (b). Zum en cercanías de Piques M2 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

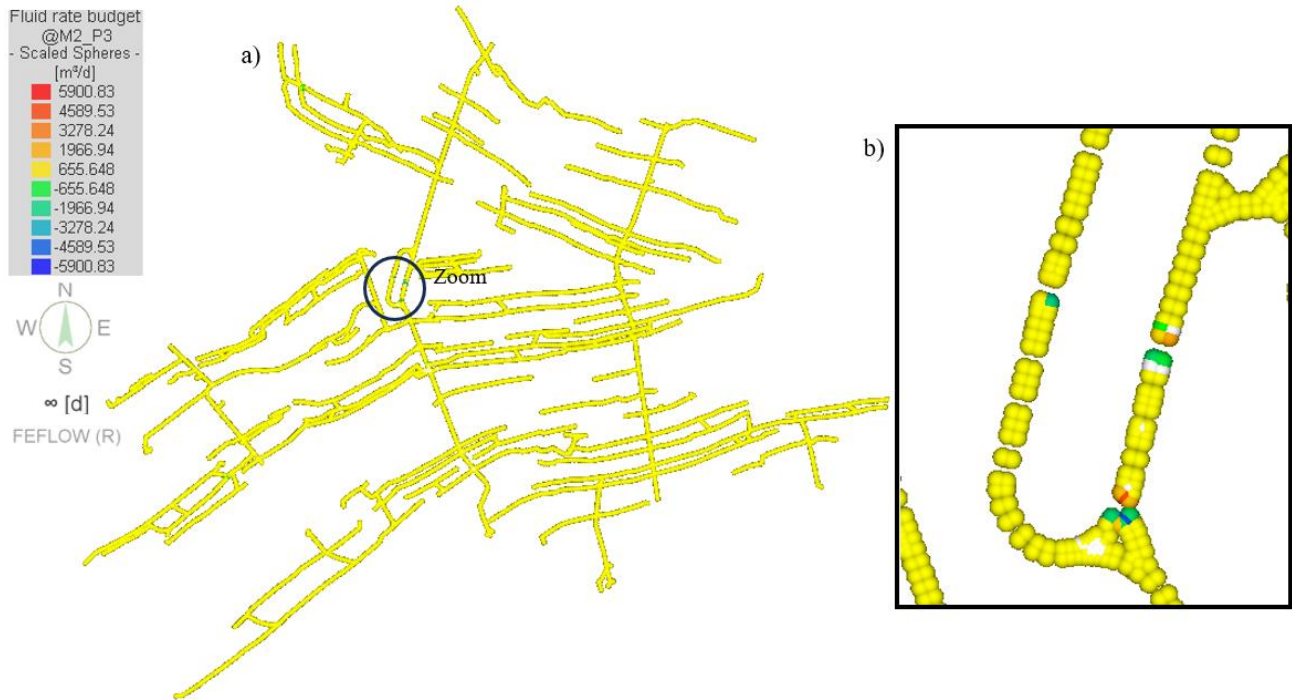


Figura 8.116 Rate Budget, Mina 2-N3 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

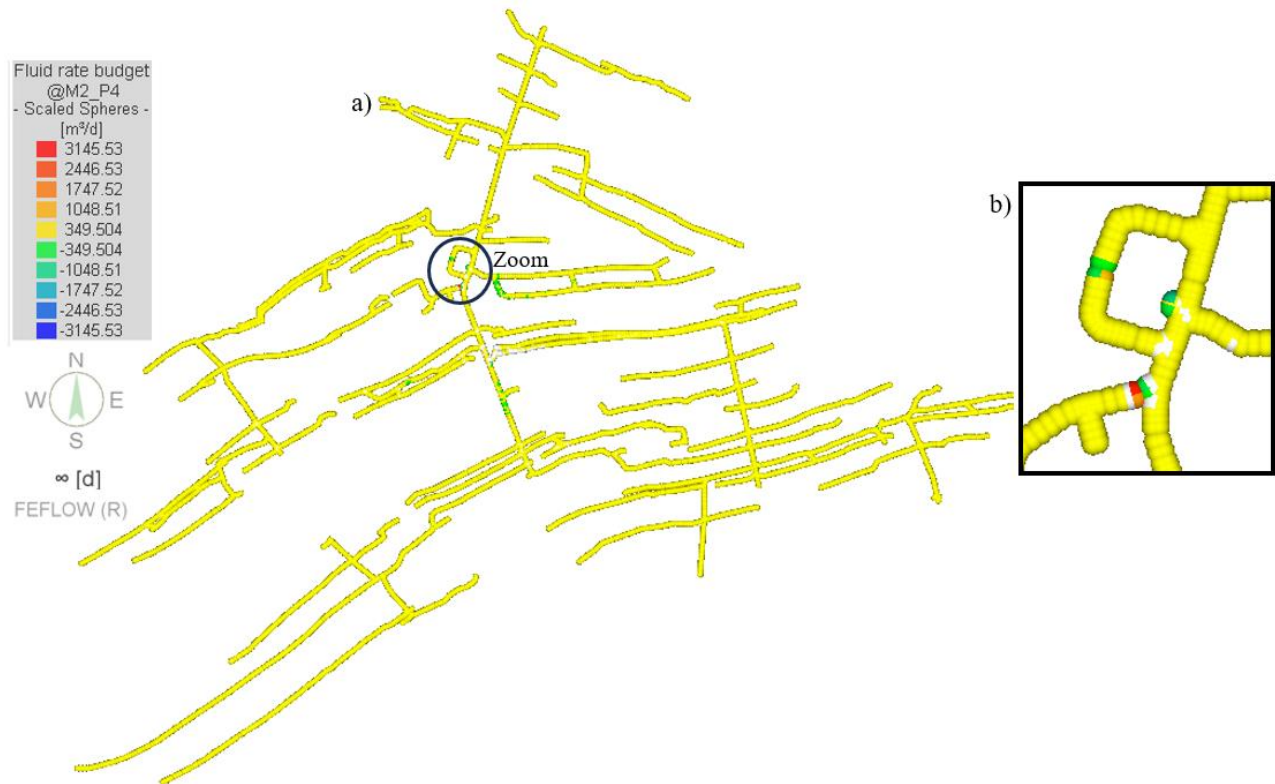


Figura 8.117 Rate Budget, Mina 2-N4 (a). Zoom en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario

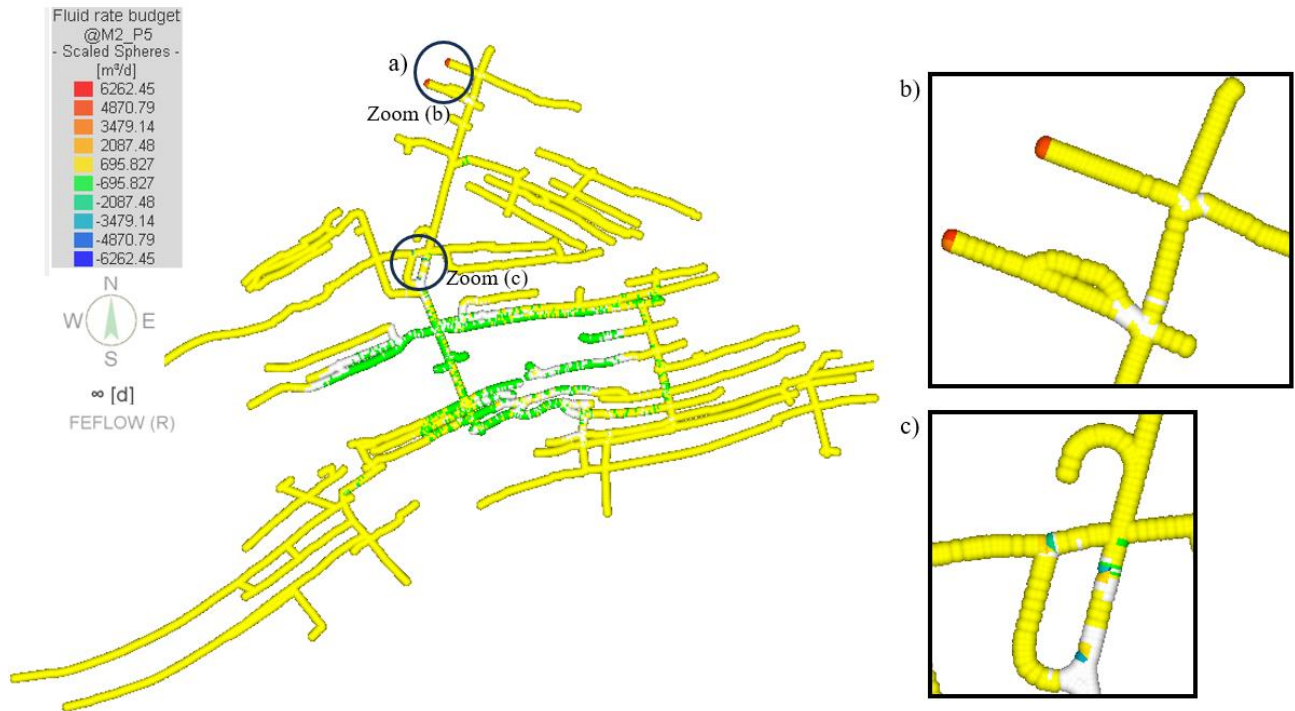


Figura 8.118 Rate Budget, Mina 2-N5 (a). Zum en conexión directa con M1-N5 (b). Zum en cercanías de Piques M2 (c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

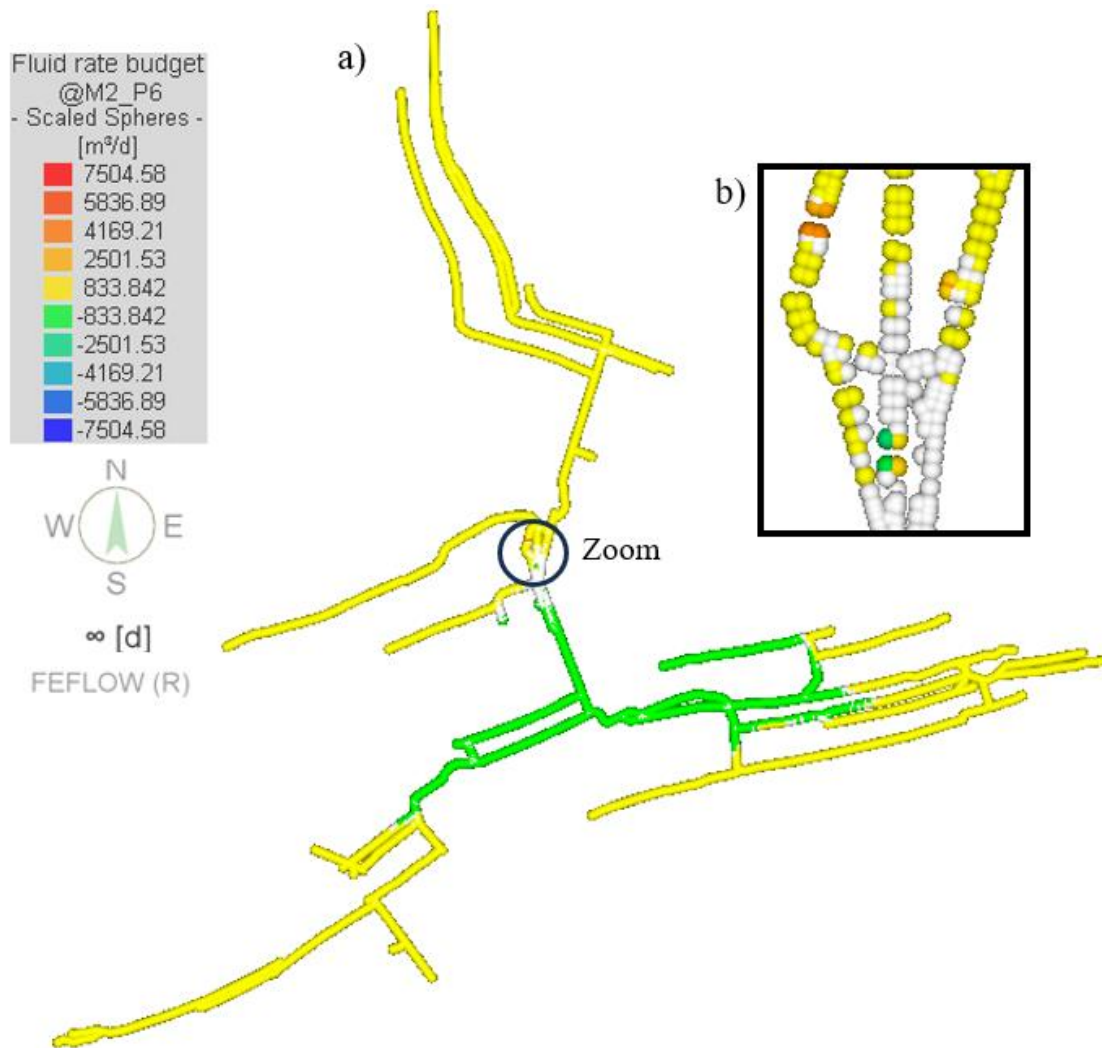


Figura 8.119 Rate Budget, Mina 2-N6 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

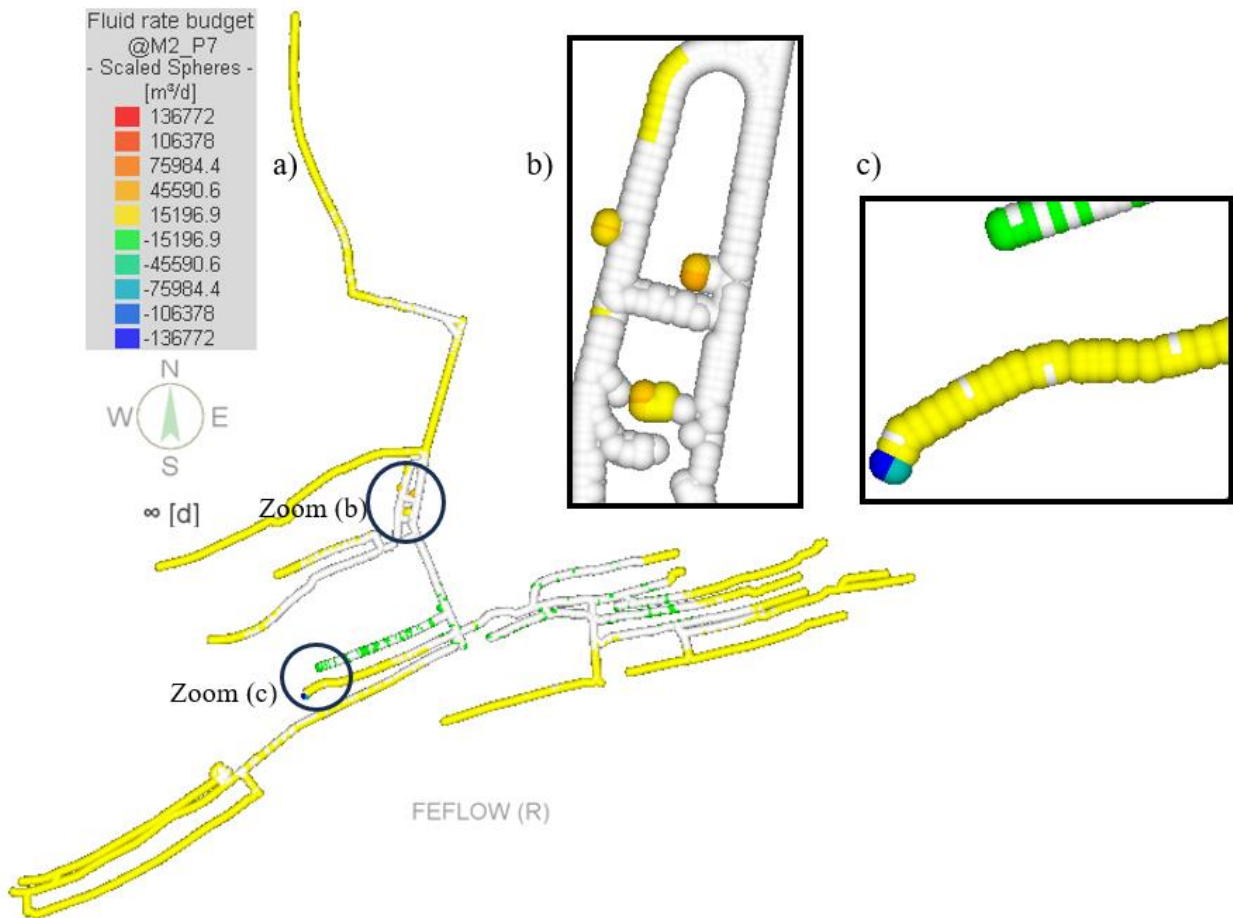


Figura 8.120 Rate Budget, Mina 2-N7 (a). Zum en cercanías de Piques M2 (b). Zum en cercanías de rampa de acceso a M2-N8(c). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

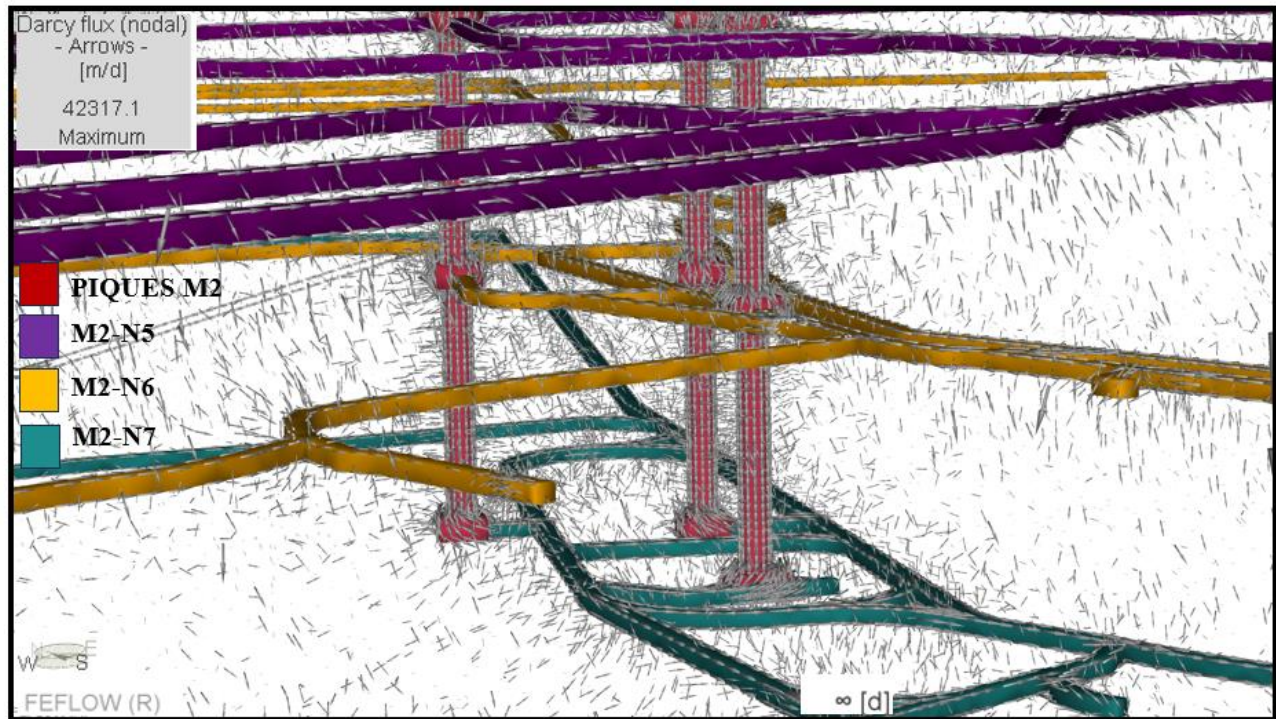


Figura 8.121 Vectores de velocidad de Darcy. PM2, cercanías de piques de M2 y Nivel 7. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

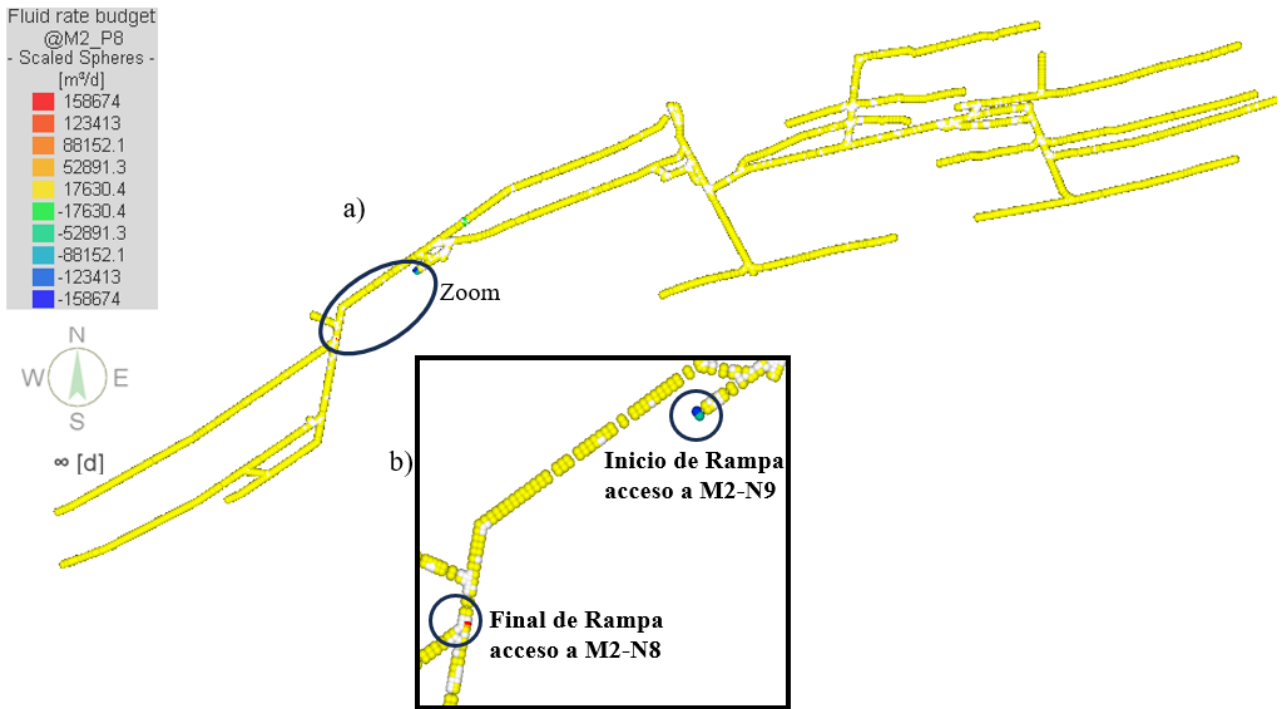


Figura 8.122 Rate Budget, Mina 2-N8 (a). Zum en cercanías de rampas de acceso a M2-N8 y M2-N9 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

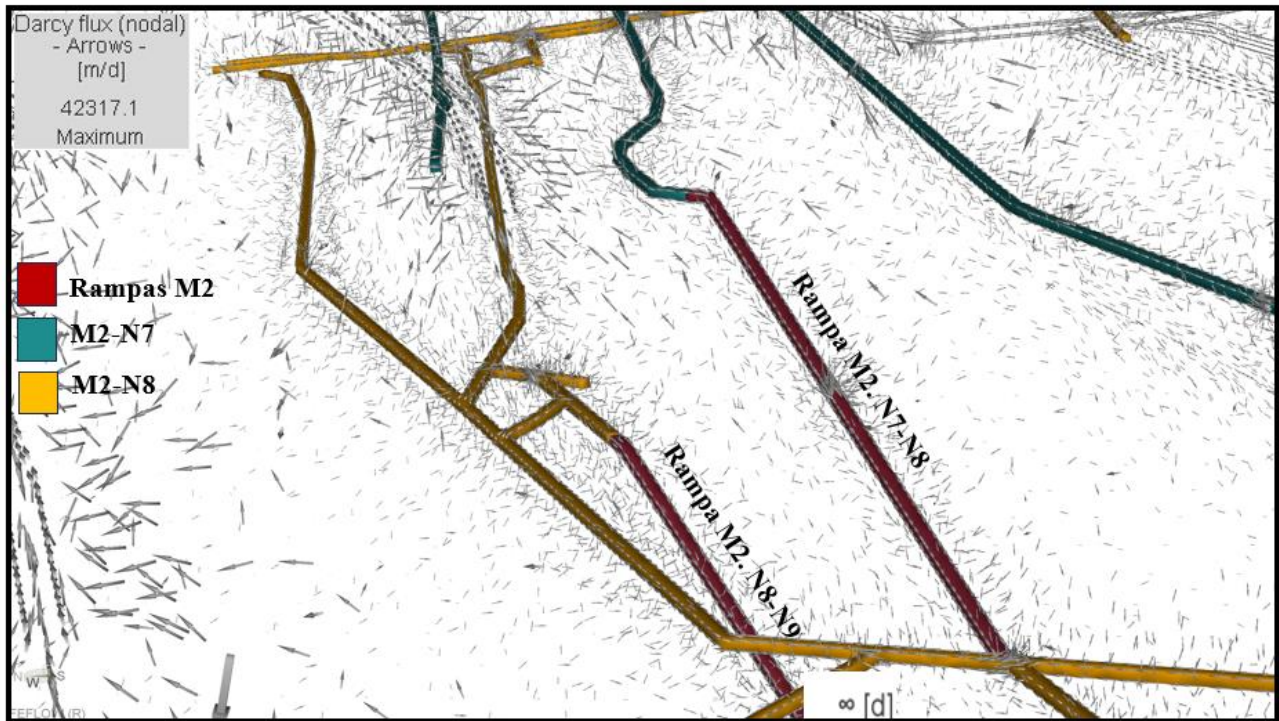


Figura 8.123 Vectores de velocidad de Darcy. PM2, cercanías de rampas N7-N8 y N8-N9 de M2. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

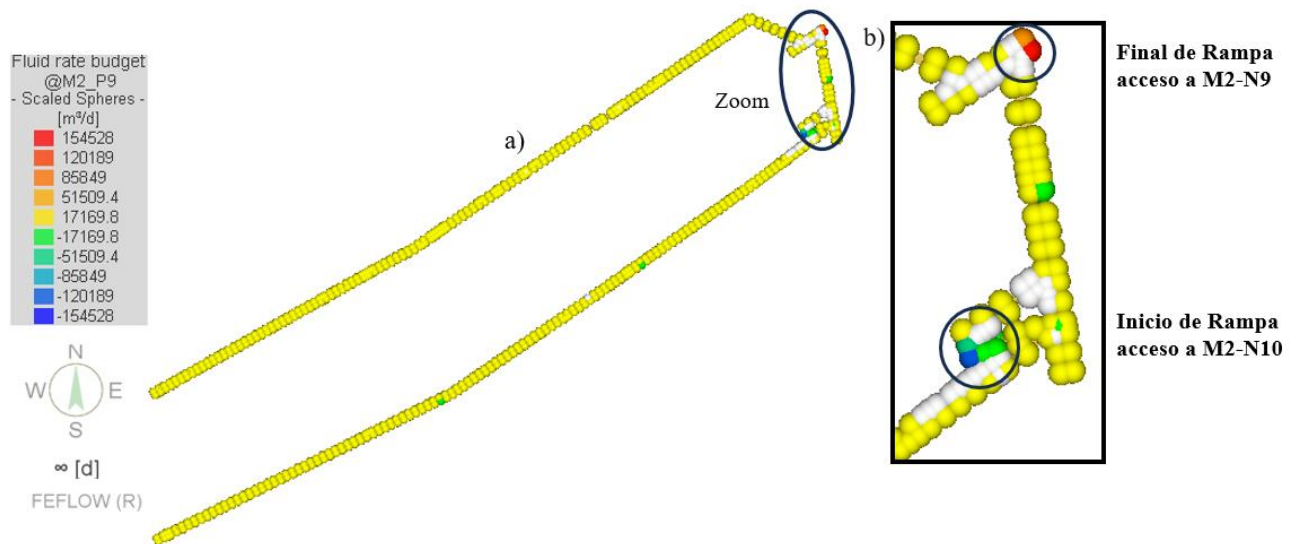


Figura 8.124 Rate Budget, Mina 2-N9 (a). Zum en cercanías de rampas de acceso a M2-N9 y M2-N10 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

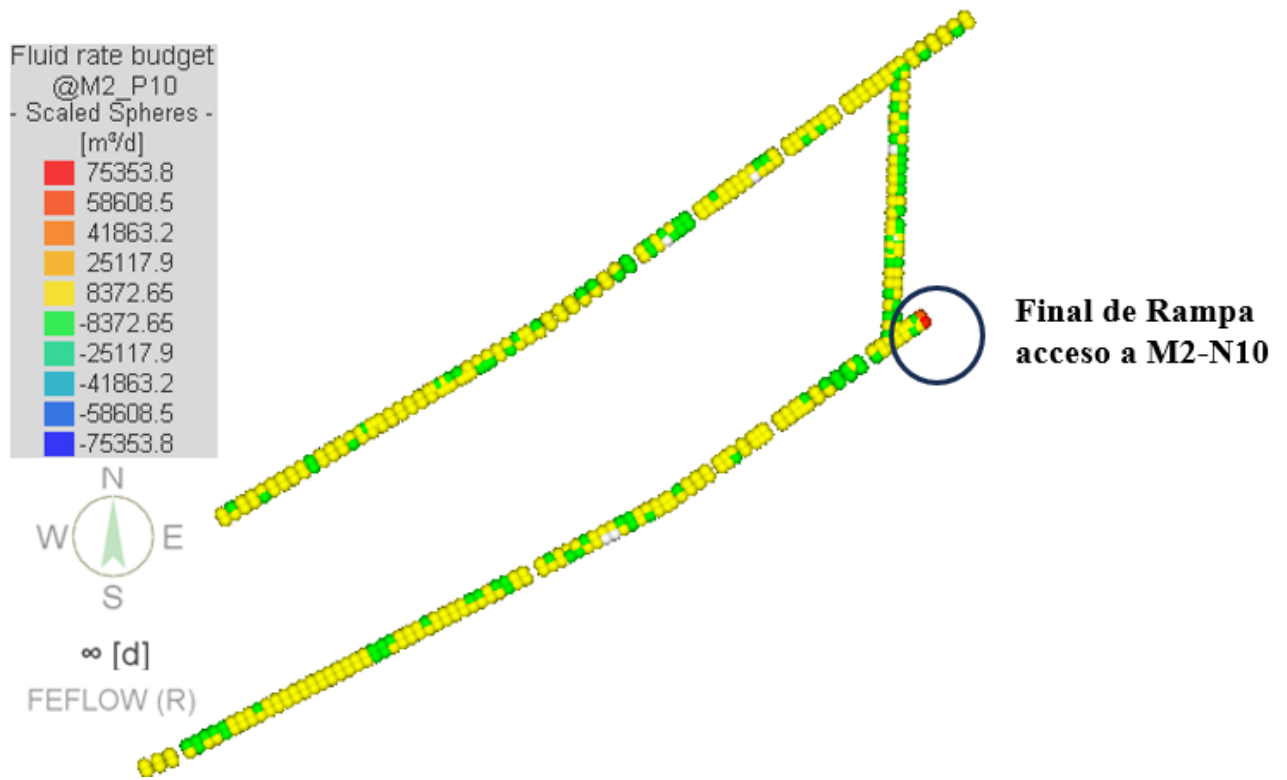


Figura 8.125 Rate Budget, Mina 2-N10 (a). Zoom en cercanías de rampas de acceso a M2-N9 y M2-N10 (b). Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

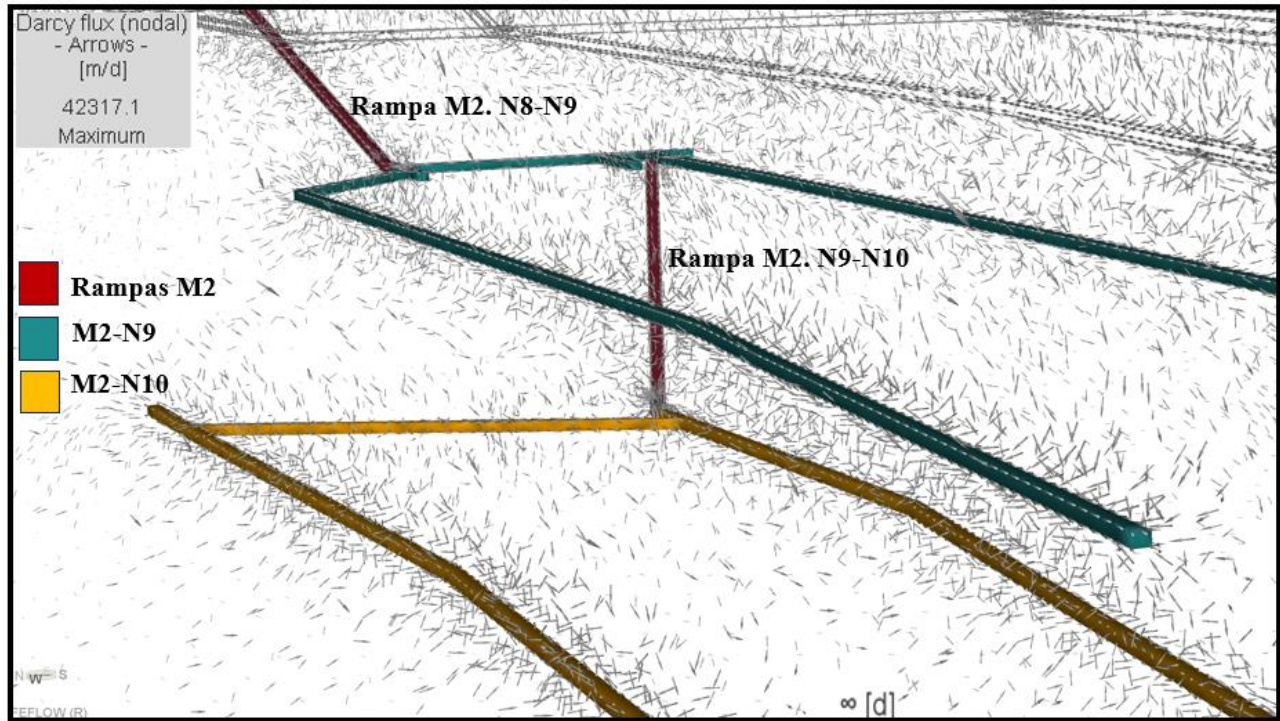


Figura 8.126 Vectores de velocidad de Darcy. PM2, cercanías de rampas N8-N9 y N9-N10 de M2.
Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.



Figura 8.127 Flujo de Darcy (en elementos). Sección M2. Nótese que las altas velocidades coinciden con las direcciones preferenciales del flujo. Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

Anexo W7. Flujo saliente de labores subterráneas del Complejo Minero

Tabla 8.10 Flujo saliente de labores subterráneas del Complejo Minero, Modelo 1-k₁-B, régimen estacionario.

Labor	Flujo saliente [$\frac{m^3}{d}$]
M1 - N1	21713
M1 - N2	13043
M1 - N3	51768
M1 - N4	7375

M1 - N5	33110
M1 - Rampa	4398
PM1	39901
ZE 1	2020
ZE 2	1138
ZE 3	288
ZE 4	1093
ZE 5	52
ZE 6	93
ZE 7	813
ZE 8	13
ZE 9	736
ZE 10	1005
ZE 11	885
M2 - N1	154310
M2 - N2	100098
M2 - N3	60865
M2 - N4	32725
M2 - N5	71540
M2 - N6	29030
M2 - N7	405500
M2 - N7, extensión Norte	602
M2 - N8	409460
M2 - N9	410960
M2 - N10	181100
M2 - Rampa N7 – N8	403800
M2 – Rampa N8 – N9	410280

M2 – Rampa N9 - N10	411830
P1M2	119640
P2M2	184020
P3M3	134160
ZE M1 (ZE agrupadas)	8137
M1	84617
M2	436690
Complejo Minero, sin ZE	419780
Complejo Minero, con ZE	422490

Anexo X Calibración manual

Anexo X1. Niveles piezométricos del proceso de inundación real

Tabla 8.11 Niveles piezométricos del proceso de inundación real.

Día	Nivel piezométrico [m]. Mina 1	Nivel piezométrico [m]. Mina 2
129	-126.5	-152.21
135	-126.35	-138.7
143	-126.4	-128.8
150	-126.41	-125.55
157	-126.4	-123.4
167	-123.95	-120.56
176	-119.54	-115.66
182	-114.7	-110.55
192	-102.9	-98.9
199	-94.18	-90.2
206	-85.68	-81.7
213	-80.74	-76.85
220	-77.15	-73.27
227	-73.7	-69.73
240	-61.04	-56.94
248	-48.92	-43.85
255	-42.82	-36.5
262	-29.3	-24.4
272	-12.77	-9.01
283	19.2	24.1
290	26.05	30.5

Anexo X2. Análisis de la sensibilidad de los parámetros a calibrar

La calibración manual avanzó en conjunto con el análisis de sensibilidad. Los parámetros a calibrar y que fueron analizados corresponden a la porosidad, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. El rango de valores utilizado en el análisis de sensibilidad para cada parámetro hidráulico corresponde al conjunto de valores reales y teóricos en las zonas hidráulicas respectivas (los valores han sido señalados en secciones previas del presente texto).

En primera instancia se realizó una normalización de variaciones puesto que estas no eran uniformes. Así se estandarizaron los resultados según las siguientes ecuaciones:

$$R_p = \frac{P_i - P_{base}}{P_{base}} \quad (1)$$

Donde R_p es el cambio relativo del parámetro hidráulico, P_i es el valor del parámetro hidráulico en la simulación y P_{base} el valor base del parámetro hidráulico.

$$R_E = \frac{E_i - E_{base}}{E_{base}} \quad (2)$$

Donde R_e es el cambio relativo del error, E_i es el valor del error correspondiente a P_i y E_{base} el error del modelo con los parámetros base.

Luego,

$$S_i = \frac{R_E}{R_p} \quad (3)$$

Donde S_i es la sensibilidad para cada punto (sensibilidad relativa). Finalmente se agrupan los S_i según parámetro y zonas hidráulicas y se obtiene el promedio de los S_i correspondientes (\bar{S}). De esta forma se puede comparar entre diferentes parámetros hidráulicos y zonas modeladas.

La Tabla **8.12** presenta un ejemplo de los valores de sensibilidad relativas para diferentes variaciones del coeficiente de almacenamiento en la zona fracturada. Por otro lado, la Tabla 8.13 presenta algunos valores de sensibilidad promedio obtenidos.

Se debe resaltar que la sensibilidad promedio no es la única medida utilizada en el análisis de sensibilidad, puesto que esta incluye la variabilidad en ambos piques, por lo que también se analizaron los cambios en los niveles piezométricos de los piques de forma independiente, con el objetivo de evitar los casos en que los niveles reportados en un pique tengan errores muy bajos y en los otros piques errores excesivamente altos. A lo anterior se le suma las características reales del fenómeno de inundación, puesto que en la realidad se observan niveles similares en los piques de observación (diferencias de no más de 5 metros). El análisis de los piques de forma independiente fue realizado tomando como base el error cuadrático medio reportado en cada pique y midiendo que la diferencia del nivel piezométrico reportado entre ambos piques fuera cercano a la realidad, debido a la extensión de la memoria de título y las limitaciones de tiempo de esta, este análisis es omitido del documento.

Tabla 8.12 Ejemplo de valores de sensibilidad relativa obtenidos (S_i)

C. almacenamiento [1/m], Zona fracturada	Error cuadrático medio	Sensibilidad relativa (valor absoluto)
2.00E-04 (valor inicial)	28.8	
1.00E-04	179.0	10.4
1.00E-03	200.8	1.5
5.00E-04	130.4	2.3
2.50E-04	18.4	1.4

Tabla 8.13 Ejemplo de valores de sensibilidad promedio obtenidos (\bar{S})

Parámetro hidráulico	Zona modelada	Sensibilidad promedio (\bar{S})
C. almacenamiento [1/m]	Zona fracturada	3.9
C. almacenamiento [1/m]	Minas	7E-04
C. almacenamiento [1/m]	Zona no fracturada	0.89
Conductividad hidráulica [m/s]	Zona fracturada	0.36
Conductividad hidráulica [m/s]	Minas	0.53

Anexo X3. Velocidades de ascenso de datos reales y zonas de subdivisión de zona fracturada (radio de 10 metros alrededor de labores)

Tabla 8.14 Velocidades de ascenso de piezometría a partir de datos reales (velocidades acotadas en colores según criterios del autor).

Datos reales			Velocidad ascenso (m/d)	
Mina 1	Mina 2	Día	Mina 1	Mina 2
-126.33	-167.41	122		
-126.5	-152.21	129	0.024	2.17
-126.35	-138.7	135	0.025	2.25
-126.4	-128.8	143	0.0062	1.23
-126.41	-125.55	150	0.0014	0.46
-126.4	-123.4	157	0.0014	0.30
-123.95	-120.56	167	0.24	0.28
-122.15	-118.25	171	0.45	0.57
-119.54	-115.66	176	0.52	0.51
-114.7	-110.55	182	0.80	0.85
-111.16	-107.2	184	1.77	1.67
-102.9	-98.9	192	1.032	1.03
-94.18	-90.2	199	1.24	1.24
-85.68	-81.7	206	1.21	1.21
-80.74	-76.85	213	0.70	0.69
-77.15	-73.27	220	0.51	0.51
-73.7	-69.73	227	0.49	0.50
-69.08	-65.3	234	0.66	0.63
-61.04	-56.94	240	1.34	1.39
-48.92	-43.85	248	1.51	1.63
-42.82	-36.5	255	0.87	1.05

-29.3	-24.4	262	1.93	1.72
-12.77	-9.01	272	1.65	1.53
-0.35	4.82	276	3.10	3.45
19.2	24.1	283	2.79	2.75
26.05	30.5	290	0.97	0.91
29.1	35.2	297	0.43	0.67
151.65	156.44	412	1.06	1.05

Tabla 8.15 Subdivisiones de macizo alterado en radio de 10 metros de labores subterráneas (colores relacionados con velocidades de Tabla 8.14).

Zonas propuestas				
Nomenclatura			Mina 1	Mina 2
k1-B.1	k1-A		] -inf,-128]	] -inf,-175]
k1-B.2	k2		] -128,-125]	] -175,-126]
	k3			] -126,-122]
	k4		] -125,-112]	] -122,-109]
	k5		] -112,-81]	] -109,-81]
	k6		] -81,-62]	] -81,-62]
	k7		] -62,-5]	] -62,-5]
	k8		] -5,+25]	] -5,+25]

Anexo X4. Parámetros hidráulicos resultantes de calibración manual

Tabla 8.16 Parámetros hidráulicos resultantes de calibración manual (sin subdivisiones de zona fracturada).

Macizo no alterado	Macizo alterado (sin subdivisiones)	Zonas de explotación	Complejo minero
--------------------	-------------------------------------	----------------------	-----------------

Coefficiente de almacenamiento [1/m]	1.00 E-06	2.00 E-04	1.00 E-04	1.00 E-0.8
Conductividad [m/s]	1.00 E-7	1.00 E-05	5.00 E-0.6	100

Tabla 8.17 Coeficiente de almacenamiento en zonas de ajuste (subdivisiones de zona fracturada en radio de 10 metros alrededor de labores mineras).

Zona Ajuste (10 [m])	C. Almace. [1/m]
k1-A	2.00E-05
k1-B.1	2.00E-03
k1-B.2	2.00E-04
k2	2.00E-08
k3	5.00E-04
k4	4.00E-04
k5	3.00E-04
k6	2.00E-04
k7	3.00E-04
k8	2.00E-04
k9	2.00E-04

Anexo Y Resultados régimen transitorio calibrado

Anexo Y1. Balance hídrico

Domain of Interest (DOI)	
Domain	
<input checked="" type="checkbox"/> Active	[m ³ /d] Fluid
Dirichlet BCs	
Neumann BCs	
Cauchy BCs	
-1.3063e+05	+1.1147e+05
Wells	
Distributed Sink(-)/Source(+)	
-1.9152e-13	+35107
Storage Capture(-)/Release(+)	
-15946	+8.34e-09
Imbalance	
-0.082235	

Figura 8.128 Balance hídrico, régimen transitorio calibrado.

Anexo Y2. Nivel piezométrico simulado en función del tiempo

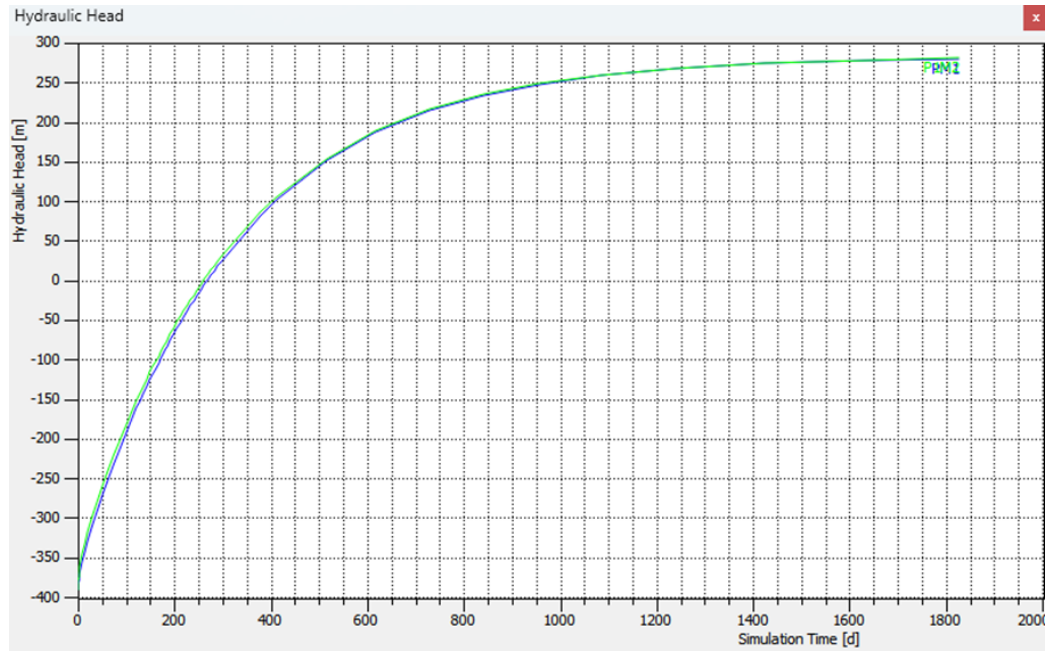


Figura 8.129 Nivel piezométrico simulado en función del tiempo. PM1 en azul y P1M2 en verde.

Modelo transitorio calibrado.

Anexo Y3. Time steps

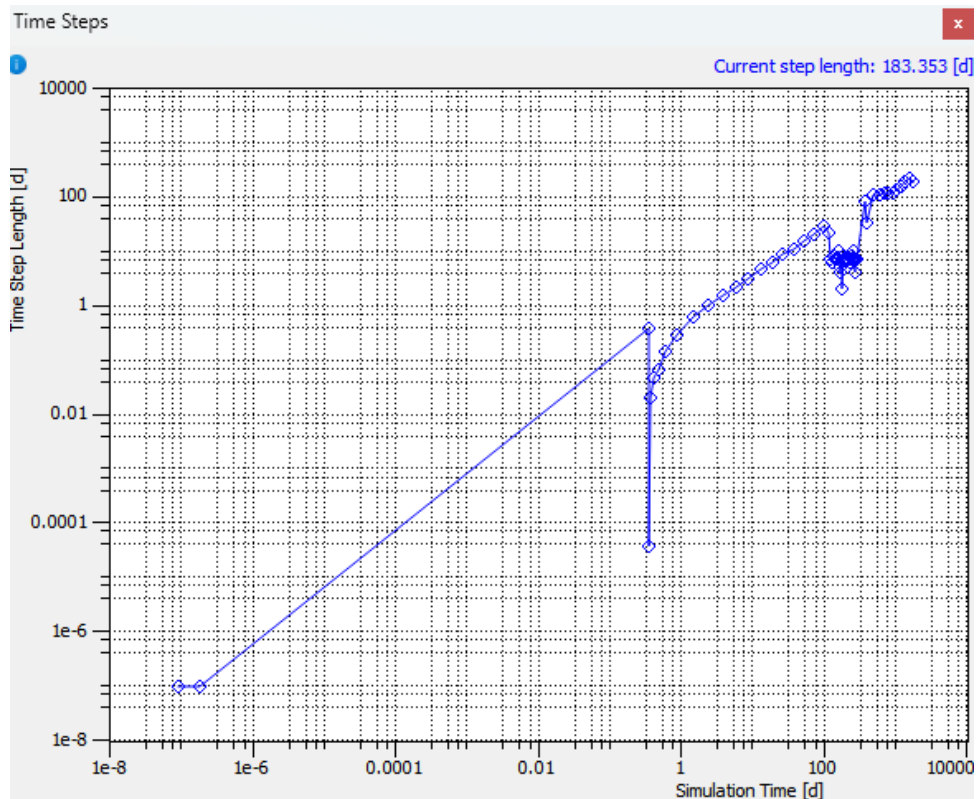


Figura 8.130 Time steps simulación régimen transitorio. Modelo calibrado.

Anexo Y4. Piezometría de la inundación de las minas modeladas.

Tabla 8.18 Piezometría en función del tiempo del proceso de inundación de las minas modeladas (5 años).

Tiempo de simulación [d]	Nivel piezométrico [m]	
	PM1	P1M2
0	-390.8941345	-391.234375
9.40505E-08	-390.8941345	-391.234375
1.88101E-07	-390.8941345	-391.234375
0.360495763	-386.9327393	-385.1438293
0.360531676	-386.9318848	-385.1426086
0.380158238	-386.6550903	-384.6680908
0.425511019	-386.2435913	-383.9598999
0.4900296	-385.7686462	-383.1453857

0.625101432	-384.8816223	-381.6465759
0.907598188	-383.2529907	-379.0389709
1.497338654	-380.3174438	-374.7099915
2.449595114	-376.2351074	-369.2298584
3.894827294	-370.8684692	-362.5765076
5.999182144	-364.0622864	-354.5991516
9.051038255	-355.4046326	-344.8718567
13.44792713	-344.3733521	-332.9512939
19.59625164	-330.5579834	-318.5487976
27.85093101	-313.6506348	-301.4022522
38.73217459	-292.987793	-280.7947388
53.25112046	-267.1799011	-255.2773895
73.14258891	-234.1186829	-222.7432556
101.1326879	-191.1967926	-180.6384583
122	-161.6282501	-151.6816254
129	-152.1361237	-142.388916
135	-144.1573181	-134.5771942
143	-133.7446136	-124.3831406
150	-124.8448257	-115.6717453
157	-116.1390457	-107.151825
167	-104.0281754	-95.30158997
171	-99.28907776	-90.6650238
176	-93.44715118	-84.94975281
182	-86.55483246	-78.20717621
184	-84.2857132	-75.98741913
192	-75.34770203	-67.24411774
199	-67.70624542	-59.76945496
206	-60.22860718	-52.45528412
213	-52.91100693	-45.29784775
220	-45.74977875	-38.29351044
227	-38.74142838	-31.43881989
234	-31.88261223	-24.73048592
240	-26.12025642	-19.09461784
248	-18.60066223	-11.74015903
255	-12.17134666	-5.452092648
262	-5.879181862	0.701791286
272	2.878013611	9.26647377
276	6.305815697	12.61890411
283	12.20416546	18.38754082
290	17.97704887	24.03345108
297	23.62690544	29.55902481
379.7248538	82.22199249	86.8646698

412	101.2175751	105.4420547
514.7528636	150.6812592	153.8167725
617.5057273	186.5164948	188.8631287
729.0931755	214.1440735	215.8825073
840.6806238	233.5587921	234.8698273
956.9434451	247.8729095	248.8688202
1086.713666	259.0280762	259.7783813
1239.952292	267.7794189	268.3370972
1424.183415	274.1932678	274.6097412
1641.646937	278.3317261	278.657074
1825	280.1844482	280.4689941

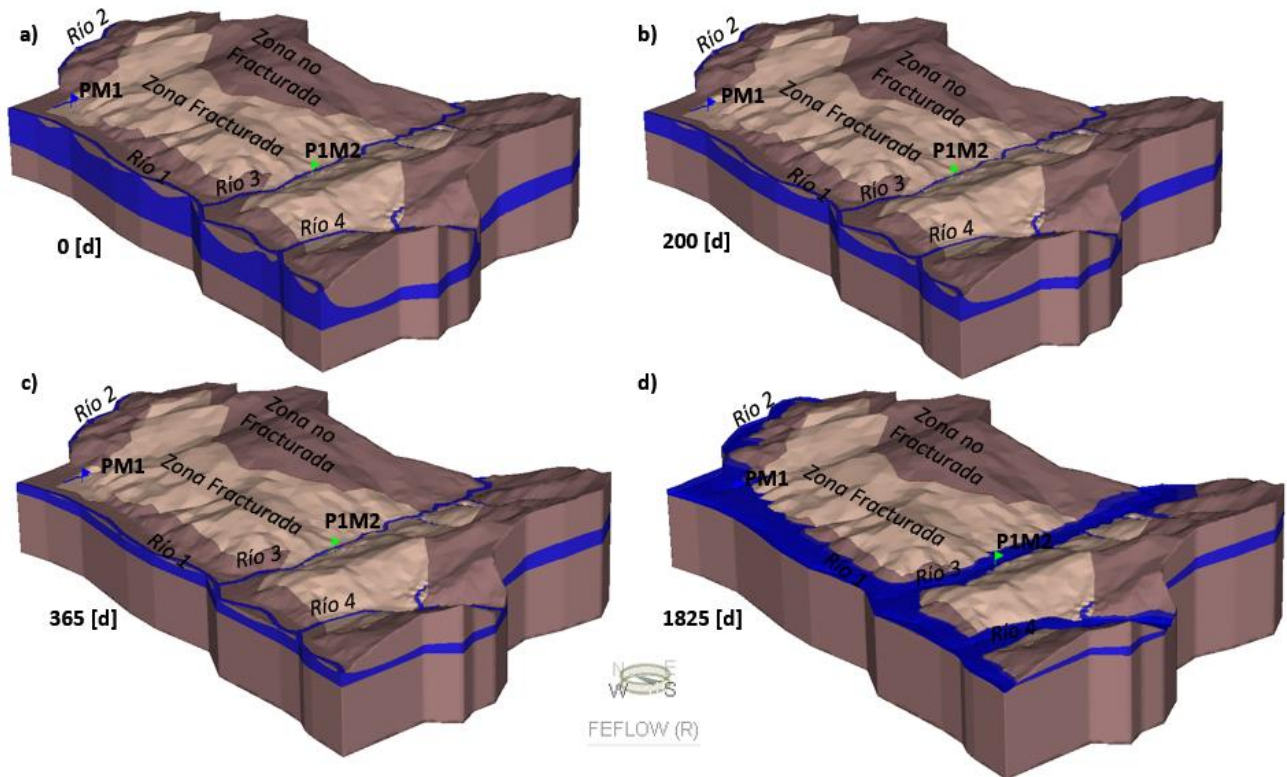


Figura 8.131 Aumento progresivo del nivel freático y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación.

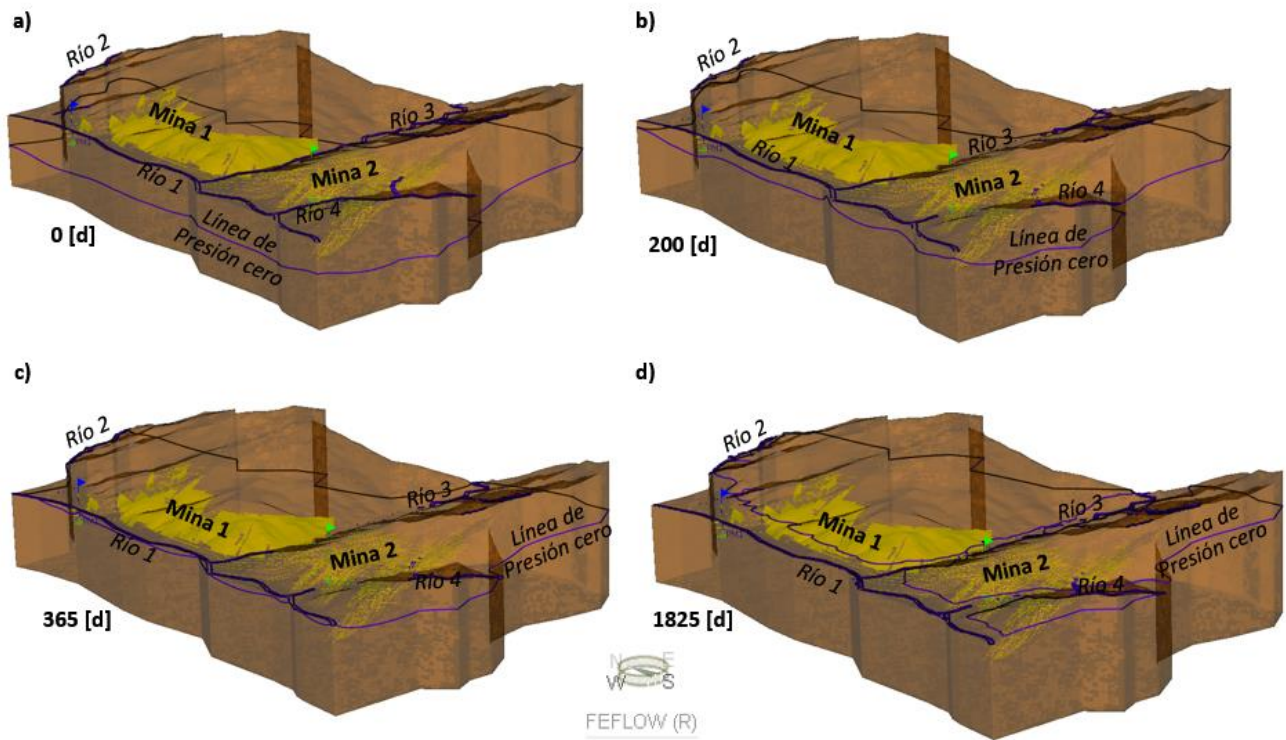


Figura 8.132 Aumento progresivo del nivel freático y rebalse de mina debido a fenómeno de inundación. Vista interior.

Anexo Y5. Comparación con datos reales

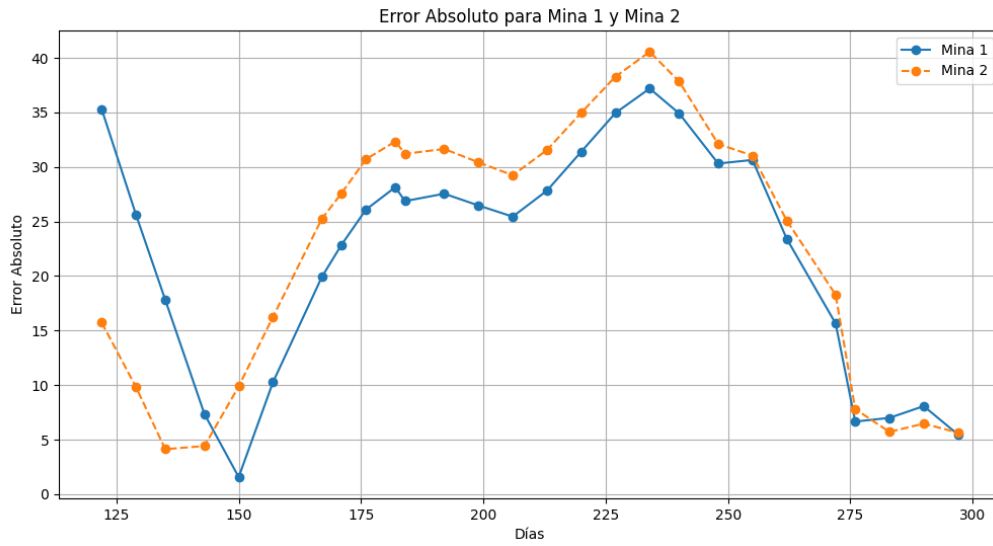


Figura 8.133 Error absoluto de la simulación.

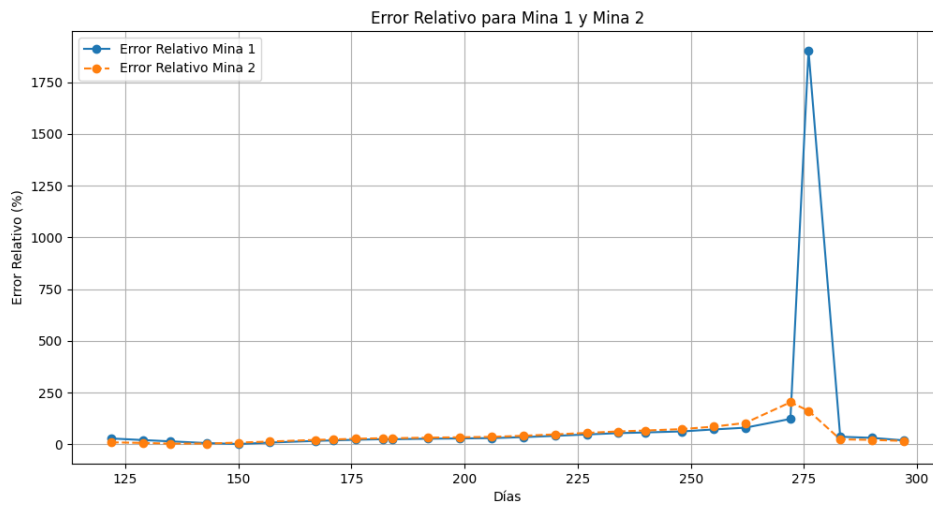


Figura 8.134 Error relativo de la simulación (en porcentaje).

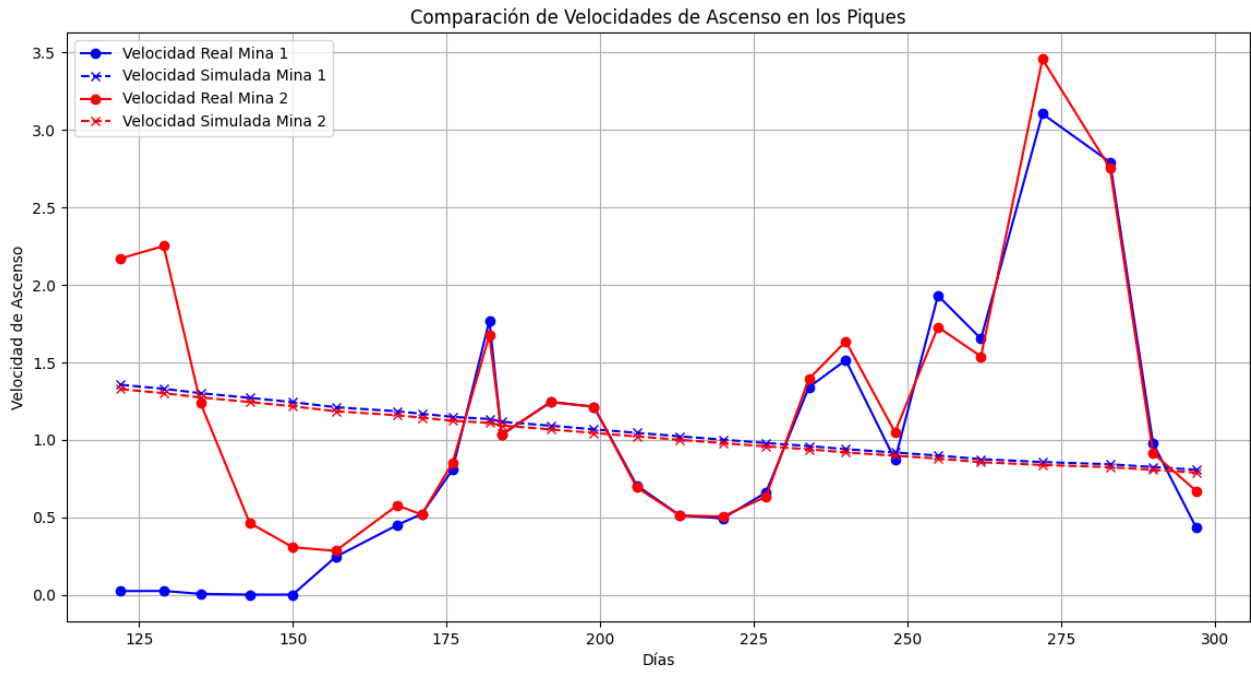





Figura 8.135 Velocidades reales v/s simuladas (comparadas en intervalos de datos reales de piezometría).

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Simulación del proceso de inundación de una mina subterránea mediante modelos numéricos.		
Nombre Memorista: SEBASTIÁN ANTONIO ZAMORA RISCO		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. Ramón Díaz Noriega
Calificación	7.0	
Fecha	29-01-2025	
  Prof. Ramón Díaz N.			Ingeniero Supervisor:
		Institución: Universidad de Concepción
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Gómez P.		 Prof. Cristian Vera S.
Resumen		
<p>En esta memoria se desarrollaron modelos numéricos desestructurados en FEFLOW para simular el fenómeno de inundación de dos minas subterráneas de carbón, denominadas confidencialmente Mina 1 y Mina 2, las cuales presentan interdependencia hidrogeológica. Ambas minas, actualmente cerradas e inundadas, cuentan con drenaje constante debido al riesgo de rebalse durante su proceso de inundación, como resultado de la recuperación del nivel freático o rebote de agua.</p> <p>La metodología incluyó la contextualización del caso, generación del modelo conceptual, construcción de las mallas, creación de modelos numéricos, simulaciones en régimen estacionario y transitorio, y la calibración manual de parámetros hidráulicos para un periodo de cinco años.</p> <p>El modelo conceptual hidrogeológico abarcó un dominio espacial de 26.8 [km²], definido por la topografía, hidrogeología y geología estructural, e incluyó cuatro unidades hidrogeológicas: macizo no fracturado, macizo fracturado, labores subterráneas y talleres de explotación de Mina 1.</p> <p>Con base en este modelo conceptual, se generó el modelo numérico desestructurado en FEFLOW, lo que implicó diseñar una malla que representara el dominio, límites internos y externos, cumpliendo criterios topológicos y capturando la complejidad tridimensional de las labores subterráneas.</p> <p>Finalmente, el modelo fue resuelto en régimen estacionario y transitorio, calibrando manualmente los parámetros y simulando el proceso de inundación con un error aproximado de 20 metros, atribuible a las simplificaciones y consideraciones detalladas en el desarrollo de la memoria. A pesar de las limitaciones de precisión, el modelo logra reproducir de forma adecuada el fenómeno de rebalse de las minas y la interacción hidráulica entre los niveles piezométricos de ambas minas.</p> <p>Para este trabajo se emplearon los softwares AutoCAD 2021, Civil 3D 2021 y ArcGIS Desktop (10.8) en distintas etapas del proceso, adaptándose a las necesidades específicas de cada fase.</p>		

