

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Ramón Díaz Noriega

MODELO HIDROGEOLÓGICO DE UNA EXPLOTACIÓN MINERA SUBTERRÁNEA



GUSTAVO NICOLÁS SALAZAR FERNÁNDEZ

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

Mayo, 2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, como siempre me enseñaron, agradezco a Dios por permitirme estudiar una carrera universitaria y en segundo lugar agradecer a mi familia que siempre estuvo conmigo a pesar de ser poco comunicativo con mis temas universitarios. Agradezco a mi madre Armerita por siempre tener la palabra precisa, a mi padre Octavio por enseñarme a que todo tiene solución en esta vida, a mi hermano Benjamín que sin entender mucho de mi carrera siempre estaba atento a mi estado anímico y buscaba la forma de ayudarme, a mi hermana Macarena que en los últimos años de universidad siempre estuvo atenta y preocupada por mí y finalmente a mis abuelos Iliá y Miguel que siempre estuvieron ahí para mí, sobre todo mi tata que desde el 2018 me acompañó desde el cielo. Mención especial a la familia que me recibió en Concepción, tío Andrés y tía Mari, que se comportaron como unos padres.

Siguiendo con mi orden de prioridades en la vida, agradezco a JUPACH y toda la gente que pasó por mi vida amarilla, por formarme y hacer de mí todo lo que soy, todas mis habilidades blandas y forma de ser se las debo a JUPACH. Agradezco de manera especial a los tíos que tuve cuando fui niño, a mi mejor amigo Felipe Cerda que siempre estuvo conmigo en todo lo que hago JUPACH, familia y fútbol, a mi última colega coordinadora Cata Carrasco por escuchar siempre mis avances de tesis en las reuniones de planificación y a Cami, Ñango, Vale, Polos y todo el equipo de dirigentes de JUPACH Huépil.

Agradezco por ser parte de la primera generación de ingenieros civiles en minas de la universidad de Concepción sobre todo al mejor equipo de fútbol del DIMET, Tajo Abierto FC, y mejores amigos de la u, a las perras Petaca, Emilio, Jano, Monte, Papu, Carlitos, Gavilán, Yerka y Gabo, los mejores momentos en la u fueron con ustedes cabros tanto en la joda como en la cancha. Mención especial al team “gracias subterránea” que en los últimos años de carrera fueron un gran apoyo en mi vida estudiantil, gracias Giovi y Seba. Por último, a mis amigos y amigas Nati, Ritter, Cata, Fran y Jacke, parte importante del proceso, los quiero.

Especial también es el agradecimiento a lo más grande del fútbol de la UdeC, CIVIL DE MINAS FC que este último año me dio el regalo más lindo de mi paso por esta universidad, ser campeón de la copa centenario de la gloriosa. Gracias a todo el equipo minero en especial a Sanma, Byron y Edu. También los dos DT que marcaron mi paso por Civil de Minas, al Gran Ariel y al loco Milton.

Esta tesis no hubiese sido lo que es sin la ayuda de mi profesor guía Ramón que siempre estuvo ahí orientar mi trabajo, muchas gracias por su exigencia y por darme la oportunidad de poder viajar a Oviedo a Hydro-Geophysics and NDT Modelling Unit experiencia donde destaco la gran ayuda y acogida de Luis, Paulino y Lorena. También agradecer al profesor José Luis Arumi que me ayudaba de manera inmediata con información que no podía conseguir.

Por último, agradecer a la persona que siempre pero siempre estuvo ahí, en las buenas y en las malas, mi polola Carolina Cea que sin duda fue la persona más importante de este proceso. No te menciono más arriba porque tu englobas todo lo que mencioné, vivimos en torno a Dios, eres

parte de mi familia, compartimos el mismo sentimiento por JUPACH, eres una amiga incondicional, compartías con todos mis amigos de la universidad, me ibas a ver a los partidos por tajo abierto y civil de minas, entre otras tantas cosas que has hecho por mí. En esta tesis debe quedar escrito “gracias por todo amor, te amo demasiado”.

Finalmente dedicar este trabajo a todos los jupachinos que, por entrar a la universidad, entrar a trabajar o cualquier otra excusa barata se salían del movimiento. decirles que se puede jugar fútbol, ser un buen hijo, ser un buen amigo, salir a carretear y estudiar una carrera universitaria en Concepción sin dejar de ser jupachino.



“SI DAS TIEMPO A DIOS, ÉL TE DARÁ TIEMPO PARA TODO”

RESUMEN

En este trabajo se propone una modelación aplicada al ámbito minero haciendo uso de herramientas de simulación numérica de flujo de agua subterránea que permita obtener un conocimiento general del comportamiento hidrogeológico de la zona, optimizar la información disponible para evaluar diferentes escenarios plausibles en cuanto al impacto físico de la mina al entorno hidrogeológico, así como las afecciones que sufre la mina por el afloramiento de agua en términos piezométricos y de caudales de infiltración.

El estudio se realiza con información pública de la faena minera El Peñón, ubicada en la región de Antofagasta a 160 km de la capital regional, la cual extrae principalmente oro y plata mediante el método de explotación *Bench and Fill* y cuya operación presenta problemas por infiltración de agua subterránea que se extienden a la mayoría de las labores ubicadas por debajo de la cota 1600 m.s.n.m.

La investigación se lleva a cabo en cinco etapas, comenzando con un análisis de los antecedentes del caso de estudio y a continuación proceder a la modelización del problema formulando un modelo conceptual, matemático y numérico para finalmente obtener los resultados.

En el modelo conceptual se define un dominio ubicado dentro de la formación Augusta Victoria que abarca una superficie de 304 km² y está limitado por la falla Dominador, el acuífero Pampa Buenos Aires y el complejo de fallas La Mula. Dentro del dominio se define la Unidad Hidrogeológica 1, 2 y 3 de potencial hidrogeológico bajo (10^{-9} - 10^{-3} m/d), medio (10^{-5} -25 m/d) y alto (10 - 10^3 m/d) respectivamente. La recarga y descarga al sistema son caudales de agua subterránea, además, la estación de bombeo en la mina actúa como descarga y extrae un caudal de 1685 m³/d.

La implementación del modelo numérico establece un modelo bidimensional con una proyección horizontal donde el flujo de agua subterránea es a través de un medio poroso saturado y no confinado en régimen estacionario. La ley que rige este flujo es la ley de Darcy representada en la ecuación general de flujo de agua subterránea en un medio poroso saturado. Para simular se utiliza el código de simulación FEFLOW, a través del cual se realizan 95 simulaciones agrupadas en 6 series de simulación que a su vez se clasifican en modelos homogéneos y heterogéneos.

Los principales resultados obtenidos del análisis de las series de simulación son: (1) la conductividad hidráulica promedio del dominio es 0,1 m/d debido a la presencia de fracturas. (2) El caudal de entrada a la mina varía entre 1960-6260 m³/d (distribución heterogénea de la conductividad hidráulica) o entre 1781-5879 m³/d (distribución homogénea de la conductividad hidráulica). (3) El agua que ingresa a la mina proviene principalmente del acuífero Pampa Buenos Aires y la posible razón de la infiltración de agua en la faena El Peñón son las fracturas que conectan la formación geológica del acuífero Pampa Buenos Aires con la operación minera subterránea.

Se conoce de manera general el comportamiento hidrogeológico del sistema el cual está condicionado al potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula.

ABSTRACT

In this work, a modeling applied to mining is proposed, using numerical simulation tools for groundwater flow that would allow to obtain a general knowledge of the hydrogeological behavior of the area from poor and scattered data, optimize the available information to evaluate different plausible scenarios regarding the impact of the mine on the hydrogeological environment, as well as the affections suffered by the mine due to the water infiltration, in piezometric terms and infiltration flows.

The present study is based on public information about El Peñon mining site, located in the Antofagasta region 160 km from the regional capital which mainly which mainly extracts gold and silver using the Bench and Fill method and whose operation presents problems of underground water infiltration on almost every labor located below 1600 m.a.s.l.

The investigation will be carried out in five stages, beginning with a background analysis of the case of study, proceeding to model the problem by formulating a conceptual, mathematical and numerical model, and then finally obtain the results.

In the conceptual model, a domain is defined and located within the Augusta Victoria formation that covers an area of 304 km² and is limited by the Dominador fault, the Pampa Buenos Aires aquifer and the La Mula fault complex. Within the domain the Hydrogeological Units 1, 2 and 3 are defined with low (10^{-9} - 10^{-3} m/d), medium (10^{-5} - 25 m/d) and high (10 - 10^3 m/d) hydrogeological potential respectively. The charge and discharge of the system are underground water flows, in addition to a pumping station that acts as discharge extracting a flow of 1685 m³/d.

The implementation of the numerical model establishes a two-dimensional model with a horizontal projection where the groundwater flow is through a saturated and unconfined porous medium in steady state. The law governing this flow is Darcy's law represented in the general equation of groundwater flow in a saturated porous medium. The FEFLOW simulation code is used to simulate, through which 95 simulations grouped into 6 series are carried out, which are also classified into homogeneous and heterogeneous models.

The main results obtained from the analysis of the simulation series are: (1) the average hydraulic conductivity of the domain is 0,1 m/d due to the presence of fractures. (2) The inlet flow to the mine varies between 1960 - 6260 m³/d (heterogeneous distribution of hydraulic conductivity) or between 1781-5879 m³/d (homogeneous distribution of hydraulic conductivity). (3) The water that enters the mine comes mainly from the Pampa Buenos Aires aquifer, and the possible reason for the infiltration of water into the El Peñón are the fractures that connect the Pampa Buenos Aires aquifer with the underground mining site.

The general hydrogeological behavior of the system is known, which is conditioned to the hydraulic potential in the Buenos Aires and La Mula limits.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	14
1.1	HIPÓTESIS DE TRABAJO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo principal	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	METODOLOGÍA DE TRABAJO	16
1.4	ALCANCES Y LIMITACIONES	18
2	MARCO TEÓRICO	19
2.1	CONCEPTOS GENERALES DE HIDROGEOLOGÍA	19
2.2	MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	22
2.2.1	Modelo conceptual	22
2.2.2	Modelo matemático.....	25
2.2.3	Modelo numérico.....	30
3	ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO	35
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	35
3.2	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	36
3.3	GEOLOGÍA REGIONAL	37
3.3.1	Geología estructural del distrito El Peñón	38
3.3.2	Litologías del distrito el peñón	38
3.4	HIDROLOGÍA REGIONAL	40
3.4.1	Cuencas hidrográficas	40
3.4.2	Climatología.....	40
3.4.3	Estaciones meteorológicas.....	41
3.5	HIDROGEOLOGÍA REGIONAL	45
3.5.1	Acuíferos.....	45
4	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	48
4.1	HIPÓTESIS CONCEPTUALES GENERALES.....	48
4.2	DOMINIO ESPACIAL Y CONDICIONES DE CONTORNO	49
4.3	DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS	52
4.4	ELEMENTOS DEL BALANCE HÍDRICO	54

5	MODELOS NUMÉRICOS.....	56
5.1	DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE MODELOS.....	56
5.2	SERIES DE SIMULACIÓN.....	59
5.3	MODELOS DE SIMULACIÓN HOMOGÉNEOS.....	60
5.3.1	Serie 1 – Potencial hidráulico borde La Mula sin bombeo en la mina.....	60
5.3.2	Serie 2 – Potencial hidráulico borde La Mula con bombeo en la mina.....	64
5.4	MODELOS DE SIMULACIÓN HETEROGÉNEOS.....	68
5.4.1	Serie 3 – Conductividad Unidad Hidrogeológica 2.....	68
5.4.2	Serie 4 – Conductividad Unidad Hidrogeológica 1.....	71
5.4.3	Serie 5 – Potencial hidráulico borde La Mula sin bombeo en la mina.....	73
5.4.4	Serie 6 – Potencial hidráulico borde La Mula con bombeo en la mina.....	76
6	RESULTADOS.....	79
7	CONCLUSIONES.....	87
8	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	90
9	BIBLIOGRAFÍA.....	91
10	ANEXOS.....	94



ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: metodología de trabajo modelo hidrogeológico	17
Figura 2: tipos de acuíferos según comportamiento hidráulico [6].....	19
Figura 3: acuíferos según litología [7]	20
Figura 4: Volumen Elemental Representativo [10]	25
Figura 5: ubicación faena minera El Peñón	35
Figura 6: método de explotación Bench and Fill [19]	36
Figura 7: geomorfología región Antofagasta. Modificado de [18, p. 59].....	37
Figura 8: perfil este-oeste mina El Peñón [21, p. 17]	38
Figura 9: ubicación cuenca Quebrada La Negra y subcuencas	40
Figura 10: ubicación estaciones meteorológicas	41
Figura 11: cobertura de datos estaciones meteorológicas.....	42
Figura 12: acuíferos de interés mina El Peñón.....	45
Figura 13: ubicación pozos de sondaje	46
Figura 14: dominio zona de estudio.....	51
Figura 15: ubicación Unidades Hidrogeológicas	53
Figura 16: representación gráfica del modelo conceptual (vista isométrica).....	54
Figura 17: elementos balance hídrico	55
Figura 18: metodología modelos numéricos	56
Figura 19: simplificación espacial del dominio y Unidades Hidrogeológicas.....	57
Figura 20: visualización proceso modelo numérico.....	58
Figura 21: esquema series de simulación de modelos numéricos.....	60
Figura 22: información de entrada serie 1.....	61
Figura 23: distribución piezométrica serie 1	62
Figura 24: información de entrada serie 2.....	65
Figura 25: información de entrada serie 3.....	69
Figura 26: información de entrada serie 4.....	72
Figura 27: información de entrada serie 5.....	74
Figura 28: información de entrada serie 6.....	76

FIGURAS ANEXO C

Figura C- 1: geología simplifica del distrito El Peñón [21].....	102
Figura C- 2: geología regional Pampas El Peñón [32].....	103
Figura C- 3: geología local El Peñón [31]	104
Figura C- 4: perfil geológico escala regional orientación este-oeste El Peñón [29].....	105
Figura C- 5: vista en planta de labores mineras El Peñón [20].....	106

FIGURAS ANEXO D

Figura D- 1: perfil 1 451120E (7301000N-7299000N) [22]	107
Figura D- 2: perfil 2 7299200N (449600E-452200E) [22]	107
Figura D- 3: perfil 3 7299500N (449500E-452000E) [22]	108
Figura D- 4: perfil 4 7299500N (450000E-451500E) [22]	108
Figura D- 5: perfil 5 7300000N (449500E-452000E) [22]	109
Figura D- 6: perfil 6 7300500N (449500E-452000E) [22]	109
Figura D- 7: perfil 7 7304800N (451000E-454000E) [30]	110
Figura D- 8: perfil 8 7307300N (451500E-455000E) [30]	110
Figura D- 9: perfil 9 7308100N (452000E-455000E) [30]	111
Figura D- 10: perfil 10 452800E (7306800N-7305200N) [30]	111
Figura D- 11: perfil 11 452800E (7308500N-7306500N) [30]	112
Figura D- 12: perfil 12 7305010N (452600E-453000E) [30]	112
Figura D- 13: perfil 13 7306900N (452600E-453000E) [30]	113



ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1: ciclo mensual promedio variable temperatura (°C), estación Campamento del año 2017 [18]	43
Gráfico 2: potencial hidráulico BCLM1 serie 1	63
Gráfico 3: potencial hidráulico BCBA1 serie 1.....	64
Gráfico 4: serie 2. Conductividad hidráulica del dominio según nivel en la mina	66
Gráfico 5: serie 2. Conductividad hidráulica del dominio según caudal de entrada en la mina	66
Gráfico 6: serie 2. Potencial hidráulico del borde La Mula	67
Gráfico 7: resultados serie 3. Conductividad UH2 vs nivel en la mina.....	70
Gráfico 8: resultados serie 3. Conductividad UH2 vs caudal entrada en la mina	71
Gráfico 9: resultados serie 4.....	73
Gráfico 10: potencial hidráulico de BCLM1 serie 5	75
Gráfico 11: potencial hidráulico de BCLM1 serie 6	77
Gráfico 12: efecto del pozo de bombeo en el modelo homogéneo (serie 1 y serie 2)	80
Gráfico 13: efecto del pozo de bombeo en el modelo heterogéneo (serie 5 y serie 6)	80
Gráfico 14: caudales de entrada y salida en la mina para modelos homogéneos	83
Gráfico 15: caudales de entrada y salida en la mina para modelos heterogéneos	84
Gráfico 16: caudales en bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos homogéneos.....	85
Gráfico 17: caudales en bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos heterogéneos	86

GRÁFICOS ANEXO E

Gráfico E- 1: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1600m.....	114
Gráfico E- 2: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1650m.....	114
Gráfico E- 3: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1700m.....	115
Gráfico E- 4: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1750m.....	115
Gráfico E- 5: nivel en la mina vs conductividad hidráulica en las fracturas	116

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: principales variables distrito "Calama" [23]	41
Tabla 2: información relevante estaciones meteorológicas	42
Tabla 3: temperaturas mínimas y máximas medias (°C)	43
Tabla 4: precipitación total mensual (mm)	44
Tabla 5: coeficiente de escorrentía para cuencas rurales [18]	44
Tabla 6: información pozos de sondaje. UTM datum WGS84 19S. Modificado de [20].....	46
Tabla 7: resultados de potencial hidráulico de bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos de simulación homogéneos.....	81
Tabla 8: resultados de potencial hidráulico de bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos de simulación heterogéneos	82
Tabla 9: información geográfica de zona recomendada para medición de potencial hidráulico	90

TABLAS ANEXO A

Tabla A- 1: valores referenciales para la conductividad hidráulica k (m/d). Modificado de [26].....	94
---	----

TABLAS ANEXO B

TABLA B- 1: resumen información geográfica	95
TABLA B- 2: resumen información geológica	95
TABLA B- 3: resumen información perfiles geológicos	98
TABLA B- 4: resumen información hidrológica	100
TABLA B- 5: resumen información hidrogeológica	101

TABLAS ANEXO F

Tabla F- 1: datos de entrada de simulaciones de serie 1	117
Tabla F- 2: datos de entrada de simulaciones de serie 2	118
Tabla F- 3: datos de entrada de simulaciones de serie 3	118
Tabla F- 4: datos de entrada de simulaciones de serie 4	119
Tabla F- 5: datos de entrada de simulaciones de serie 6	120
Tabla F- 6: datos de entrada de simulaciones de serie 5	121
Tabla F- 7: datos de entrada de simulaciones de serie 7	121
Tabla F- 8: información serie de simulación de fracturas como elementos discretos	122

TABLAS ANEXO G

Tabla G- 1: resultados de niveles piezométricos de serie 1.....	124
Tabla G- 2: resultados de niveles piezométricos de serie 2.....	124
Tabla G- 3: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 3.....	125
Tabla G- 4: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 4.....	126
Tabla G- 5: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 6.....	127
Tabla G- 6: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 5.....	128
Tabla G- 7: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 7.....	128



ÍNDICE ANEXOS

ANEXO A: CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS	94
ANEXO B: RESUMEN INFORMACIÓN.....	95
ANEXO C: MAPA GEOLÓGICOS.....	102
ANEXO D: PERFILES GEOLÓGICOS	107
ANEXO E: SIMULACIONES ADICIONALES.....	114
ANEXO F: TABLAS CON INFORMACIÓN DE CADA SERIE.....	117
ANEXO G: TABLAS CON RESULTADOS DE SERIES DE SIMULACIÓN.....	124



NOMENCLATURA

UNIDAD DE MEDIDA:

- (m.s.n.m.) Metros sobre el nivel del mar
- (m) Metros
- (mm) Milímetros
- (cm) Centímetros
- (km) Kilómetros
- (m/d) Metros por día
- (mm/año) Milímetros al año
- (m²) Metros cuadrados
- (m³/d) Metros cúbicos por día
- (m³/s) Metros cúbicos por segundo

OTRAS:

- (CIREN) Centro de Información de Recursos Naturales
- (DEM) Modelo de Elevación Digital. Por sus siglas en inglés Digital Elevation Model
- (DGA) Dirección General de Agua
- (DIA) Declaración de Impacto Ambiental
- (EIA) Estudio de Impacto Ambiental
- (EPM) Medio Poroso Equivalente. Del inglés Equivalent Porous Medium
- (FEFLOW) Finite Element Modelling of Flow
- (NE) Noreste
- (NO) Noroeste
- (REV) Volumen Elemental Representativo. Del inglés Representative Elementary Volume
- (SERNAGEOMIN) Servicio Nacional de Geología y Minería
- (SMA) Superintendencia del Medio Ambiente
- (UH) Unidad Hidrogeológica
- (UTM) Universal Transverse Mercator

1 INTRODUCCIÓN

La minería ha sido un motor de desarrollo para Chile, generando un gran impacto en el ámbito económico, social, cultural y ambiental. La mayor parte de las operaciones mineras del país se encuentran ubicadas en la zona centro norte, es debido a esta localización geográfica y los efectos del cambio climático en nuestro país, que la minería desde siempre ha tenido problemas en lo que respecta a la obtención de agua, por la escasez que predomina en las regiones que conforman el norte grande y norte chico [1].

En algunas faenas mineras el problema es el inverso, se tiene que lidiar con liberación de grandes cantidades de agua no deseables. Este es el problema del drenaje minero: el de captar, transportar y eliminar hacia el entorno (al medio ambiente) flujos de agua y hacerlo de tal manera que no se ocasionen daños [2]. Es por ello que esta dificultad requiere el adecuado enfoque y planteamiento, así como su correcta gestión.

La minería se encuentra estrechamente ligada al agua; ya sea como una necesidad de utilización del recurso para el aprovechamiento en la propia mina o fuera de ella, o bien, un problema a evitar, disminuir o corregir el afloramiento e infiltración de agua subterránea en su interior dificultando las labores mineras. Este último punto, es el enfoque de interés en este trabajo.

Es sabido que la industria de la minería presenta dos tipos principales de métodos de extracción de material valioso: minería a cielo abierto y minería subterránea [3]. Para el caso de la minería subterránea el exceso de agua en las operaciones genera problemas tales como inundaciones en frentes de trabajo impidiendo el acceso al personal, inestabilidad y aumento de fortificación en labores, aumento de gastos en todo lo que respecta a tener una planificación del drenaje como también aumento de costos en explosivos resistentes al agua.

En este trabajo se propone una modelación aplicada al ámbito minero haciendo uso de herramientas de simulación numérica de flujo de agua subterránea que permita obtener un conocimiento general del comportamiento hidrogeológico de la zona a partir de datos escasos y dispersos, optimizar la información disponible para evaluar diferentes escenarios plausibles en cuanto al impacto físico de la mina al entorno hidrogeológico, así como las afecciones que sufre la mina por el afloramiento de agua en términos piezométricos y de caudales de infiltración.

El estudio se realiza con información pública de la faena minera El Peñón, mina subterránea que extrae principalmente oro y plata mediante el método de explotación *Cut and Fill*. La operación se encuentra ubicada en la región y provincia de Antofagasta, a 160 km de la ciudad de Antofagasta y presenta los problemas por infiltración de agua subterránea mencionados que se extienden a la mayoría de las labores ubicadas por debajo de la cota 1600 m.s.n.m.

1.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO

En la Faena “El Peñón” la dificultad de acceder y trabajar en niveles que se encuentran inundados parcial o totalmente, genera retrasos en distintas áreas de trabajo de la compañía, que se traducen en problemas para la producción.

A los inconvenientes dentro de la mina, se suma la falta de información hidrogeológica en el entorno.

Este trabajo apunta a resolver esta falta de información hidrogeológica en la zona y plantea estudiar desde un contexto general las posibles razones por las que la mina se ve afectada por la infiltración de agua subterránea y tiene problemas de inundación.

El enfoque principal es utilizar la modelización conceptual y posteriormente numérica, integrando los datos disponibles para obtener respuestas respecto a direcciones de flujo generales y establecer una base para futuros trabajos a escala de detalle que permitan el análisis más detallado del problema a escala de mina.

En función de esta hipótesis de trabajo se plantean los siguientes objetivos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Establecer las características y comportamiento hidrogeológico general del entorno en el que se explota la faena El Peñón y su relación con los acuíferos de la zona.

Se hace inherente el uso de herramientas de simulación de flujos de agua subterránea para obtener información como conductividades hidráulicas, valores y tipos de condiciones de borde del dominio definido, direcciones de flujo, niveles piezométricos y caudales presentes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Recopilar, estudiar y analizar antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la zona de estudio.
2. Formular un modelo conceptual de flujos de aguas subterráneas en la zona de la mina coherente con los datos disponibles.
3. Definir elementos importantes del modelo conceptual para establecer el comportamiento hidrogeológico que plantean incertidumbres debido a las limitaciones impuestas por la información.
4. Diseñar e implementar modelos numéricos de simulación de flujo de agua subterránea en función del modelo conceptual mediante la herramienta FEFLOW.
5. Plantear series de simulación que permitan analizar las incertidumbres del modelo conceptual y obtener rangos de piezometrías, caudales y direcciones de flujo en el dominio de la mina y su entorno.

Estos objetivos se alcanzan mediante las actividades que se desarrollan a lo largo de la metodología que se plantea a continuación.

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La investigación se llevará en cinco etapas, comenzando con un análisis exhaustivo de los antecedentes del caso de estudio y a continuación proceder a la modelización del problema formulando un modelo conceptual y finalmente numérico.

Etapas 1 – Recopilación y análisis de información temática

Recopilación de antecedentes de la zona en estudio incluyendo geología regional y local de la región de Antofagasta, información de estaciones meteorológicas, acuíferos y cuencas cercanas a la mina e información relevante de la faena minera.

Revisión de las distintas fuentes que entregan información pública donde se destaca el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Dirección General de Aguas (DGA), Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y el Ministerio de Medio Ambiente (MMA).

Definir el marco geológico del sector, que involucra un estudio cartográfico, análisis y determinación de tipos de rocas con sus respectivas unidades geológicas y litológicas asociadas. Desde el punto de vista estructural se analiza y recopila información respecto al grado de consolidación y/o fracturamiento del macizo en el sector, geometría de afloramiento y su disposición espacial. Además de la relación de contacto entre unidades estableciendo además los límites de contacto.

Determinar las cuencas hidrológicas, los respectivos regímenes de precipitaciones, escorrentía y evapotranspiración; utilizando información meteorológica y fluviométrica.

Determinar los niveles de agua en los acuíferos del sector a partir del catastro de pozos de la zona. Definir Unidades Hidrogeológicas obteniendo los rangos de los parámetros hidrogeológicos necesarios en la investigación, como lo es la conductividad hidráulica.

Se contextualizan las labores mineras subterráneas de la faena El Peñón y la disposición espacial del yacimiento.

Etapas 2 – Modelización conceptual

Formular un modelo conceptual de acuerdo a los objetivos establecidos y la información disponible.

Establecer el dominio de trabajo con sus respectivas condiciones de contorno para luego definir la distribución de parámetros hidrogeológicos en Unidades Hidrogeológicas.

Identificar los elementos del balance hídrico del sistema considerando aguas superficiales, precipitaciones, escorrentías, evapotranspiración, agua subterránea proveniente de acuíferos aledaños y extracciones o inyecciones de agua al sistema mediante pozos.

Etapas 3 – Modelización matemática

Definir formulación matemática del flujo de agua y seleccionar código de simulación a utilizar.

Etapa 4 – Modelización numérica

Establecer la secuencia de trabajo y planear series de simulaciones, para evaluar diferentes escenarios.

Definir una nomenclatura para las series de simulación y una estrategia de organización de información.

Elaboración digital de los elementos a considerar en los modelos.

Implementar los modelos numéricos ingresando el dominio, condiciones de contorno, parámetros y elementos del balance hídrico.

Etapa 5 – Resultados

Analizar resultados de las simulaciones y plantear trabajos futuros.

La Figura 1 muestra un esquema de la metodología aplicada en el estudio.

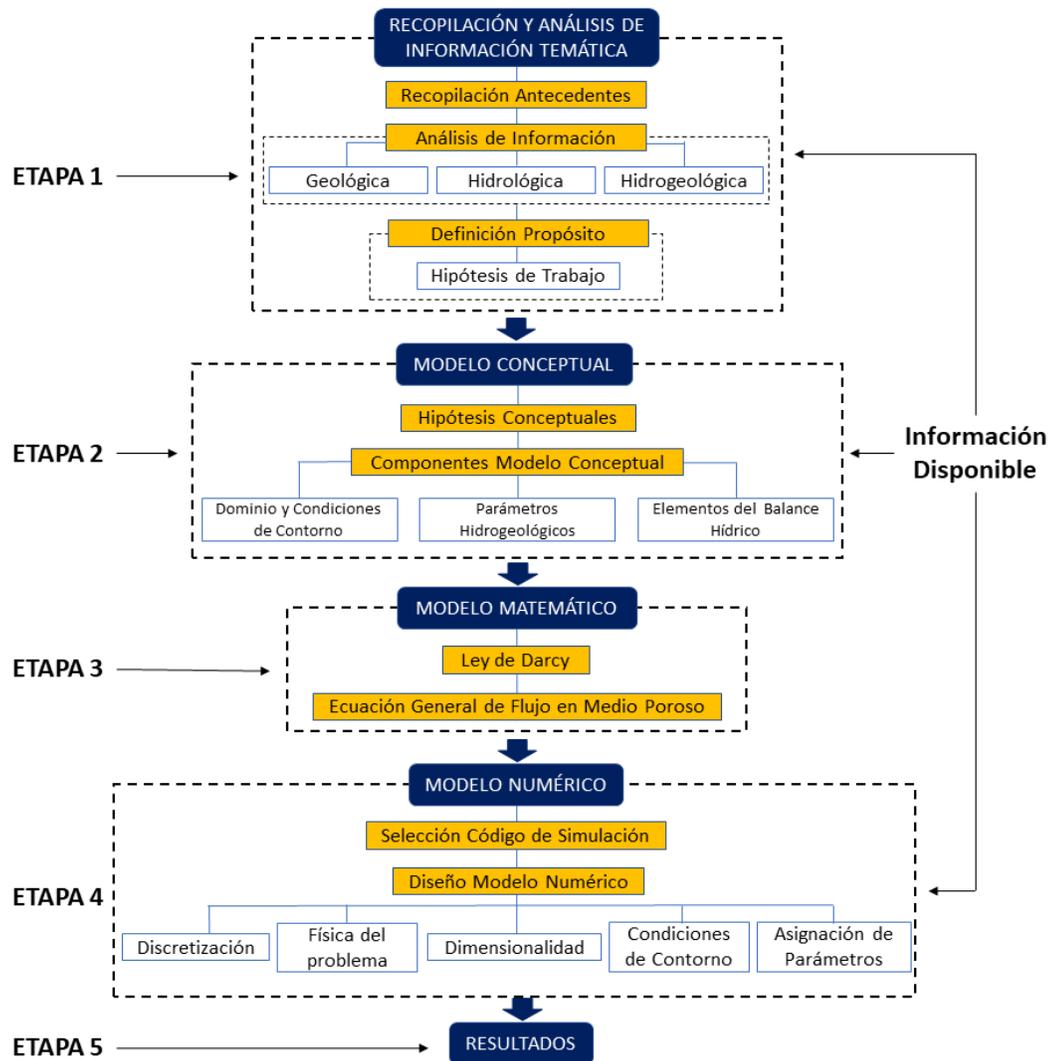


Figura 1: metodología de trabajo modelo hidrogeológico

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

Este trabajo se realiza en un contexto meramente académico y en base a información pública disponible en las diferentes fuentes de información citadas en el texto.

El carácter académico y falta de información limita cualquier posible interpretación o utilidad real en la mina seleccionada como caso de estudio.

El alcance de los análisis y resultados expuestos deben tomarse por lo tanto con cautela de acuerdo con las consideraciones anteriores.

El autor y la institución no se hacen responsables de cualquier uso inadecuado de este trabajo más allá del ámbito académico en el que se ha elaborado.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS GENERALES DE HIDROGEOLOGÍA

En la naturaleza existe una amplia gama de formaciones geológicas con capacidades muy diversas de almacenamiento y transmisión de agua. Desde el punto de vista hidrogeológico, estas formaciones se clasifican en cuatro grupos: acuitardo, acuifugo, acuícludo y acuíferos [4].

Un acuífero es una formación geológica, que contiene agua y permite se mueva a través de él en condiciones normales de campo. Los acuíferos pueden considerarse como depósitos de almacenamiento subterráneos que se recargan naturalmente mediante precipitaciones y corrientes influentes, o mediante pozos y otros métodos de recarga artificial [5].

Se denominan acuíferos libres, no confinados o freáticos, aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua, que está en contacto directo con el aire y, por lo tanto, a presión atmosférica.

Por otro lado, se denomina acuíferos cautivos, confinados o a presión, cuando el agua contenida en ellos se encuentra sometida a una presión superior a la atmosféricas y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que en la que se encuentra, saturándola totalmente.

En la Figura 2 se encuentran representados ambos tipos de acuíferos.



Figura 2: tipos de acuíferos según comportamiento hidráulico [6]

Las formaciones geológicas denominadas acuíferos, que son capaces de almacenar y transmitir agua, pueden tener propiedades hidrogeológicas diferentes dependiendo de sus características litológicas. Pueden presentar una porosidad intergranular que permiten el flujo de agua a través de ellos o bien presentar fracturas o diaclasas que permiten el flujo de agua.

La Figura 3.a muestra un acuífero poroso y la Figura 3.b un acuífero fracturado que transmite agua a través de sus fracturas.

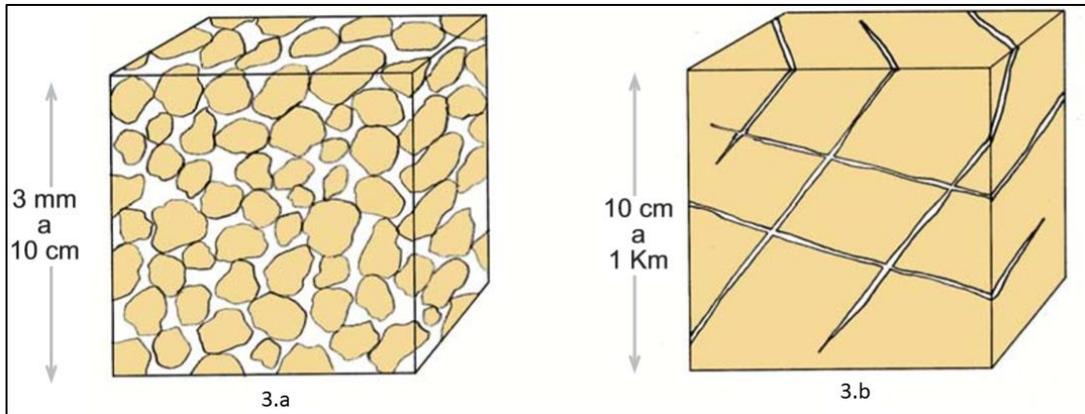


Figura 3: acuíferos según litología [7]

El fenómeno físico del movimiento del agua en los acuíferos porosos fue descrito en 1856 por la ley de Darcy que se explica a continuación.

Esta ley, experimental, establece que el caudal de agua que fluye entre los puntos a y b a través de un medio poroso saturado, es proporcional a la sección o área de paso A , al gradiente hidráulico $(\frac{\Delta h}{L})$ y la conductividad hidráulica K del medio [8].

La representación matemática de la ley de Darcy se expresa en la siguiente ecuación (1).

$$Q = K \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta h}{\Delta l}\right) \quad (1)$$

Donde:

Q [L^3/T] es el caudal

Δh [L] es la diferencia de potencial entre los puntos a y b

Δl [L] es la distancia entre a y b

A [L^2] es el área de paso

K [L/T] es la conductividad hidráulica¹ del medio poroso

La conductividad hidráulica es la capacidad de un medio poroso para transmitir agua [9] y el gradiente hidráulico se define como la pérdida de energía mecánica total por unidad de longitud recorrida por el agua.

La ley de Darcy es válida para flujos en régimen laminar, donde cada partícula describe una trayectoria con velocidad paralela a la corriente [8].

Para determinar si es o no aplicable la ley de Darcy hay que acudir al número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas de un fluido [4].

¹ Autores reconocidos en hidrogeología han estudiado las conductividades hidráulicas de distintos materiales obteniendo valores aproximados. La Tabla A- 1 de los ANEXOS presenta y compara los valores recopilados.

La ecuación (2) presenta la fórmula del número de Reynolds.

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

Donde:

v [L/T] es la velocidad de flujo

d [L] el tamaño medio de las partículas

ρ [M/L³] densidad del fluido

μ [M/T L] la viscosidad dinámica.

Dependiendo del valor de R_e se determina si la ley de Darcy es válida o no. El flujo será laminar si $R_e < 1-10$ aunque para aumentar la precisión se utiliza $R_e < 4$ [8].

Cuando la ley de Darcy se combina con una ecuación de continuidad que describe la conservación de la masa y energía del fluido a través de un Volumen Elemental Representativo de medio poroso, resulta una ecuación en derivadas parciales.

Esta ecuación es la forma más utilizada en el modelado de flujo de agua subterránea y representa el balance de flujo de un fluido monofásico (agua) a densidad constante en un medio poroso bajo la ley de Darcy [10], cumpliendo con los principios de conservación de masa y energía en un medio continuo.



2.2 MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Las etapas de la modelización hidrogeológica son recopilación y análisis de información temática y modelación conceptual, matemática y numérica. La Figura 1 presenta las etapas descritas.

A continuación, se describen las etapas de la modelación hidrogeológica.

2.2.1 MODELO CONCEPTUAL

El desarrollo de un modelo conceptual hidrogeológico es una integración de información relevante utilizando supuestos simplificadores [11]. El modelo se simplifica para incluir solo aquellos elementos importantes para el propósito definido pero que aún tienen la complejidad suficiente para representar el comportamiento del sistema [10].

El modelo conceptual se basará en información geomorfológica, geológica, climatológica, hidrológica y minera [10].

En el modelo conceptual se formula en base a unas hipótesis conceptuales, define un dominio espacial y temporal, describe las propiedades físicas del sistema y las condiciones de contorno, como se describe continuación.

Los modelos conceptuales requieren el uso de supuestos simplificadores para reducir la complejidad de la realidad hidrogeológica a un nivel manejable que pueda incorporarse a un modelo. Las suposiciones simplificadoras se hacen porque una reconstrucción completa del sistema de campo no es factible, además, porque rara vez hay datos suficientes para describir completamente el sistema [12].

La dimensionalidad del modelo depende del propósito del modelo, la complejidad de la hidrogeología y el sistema de flujo.

Cuando se trabaja en dos dimensiones, los modelos de área representan el sistema de agua subterránea como una sola capa vista en planta y los modelos de perfil representan el flujo en una sección transversal. Los efectos hidráulicos de todas las características representadas en el modelo (p. Ej., pozos de bombeo, fuentes internas de agua, como aguas superficiales y condiciones de límites perimetrales) penetran completamente en el acuífero, es decir, se extienden por toda la profundidad del acuífero [10].

Se define el alcance apropiado de modelado para establecer la complejidad y la física del problema, estado estacionario o transitorio, flujo en medio poroso o mediante una red de fracturas discretas, flujo en zona saturada o no saturada, flujo monofásico o multifásico y dimensionalidad [12].

El régimen estacionario implica que el agua que entra en un recinto acotado es igual a la que va a salir del mismo sin que varíe el agua almacenada en dicho recinto y que, por tanto, no existan variaciones del nivel piezométrico. Es decir, el nivel es independiente del tiempo y el agua entrante es igual al agua saliente [4].

Un modelo de estado estacionario suele ser el primer paso en el modelado transitorio, ya que la mayoría de estos utilizan una solución de estado estacionario como condiciones iniciales [10].

Hay tres enfoques diferentes disponibles para conceptualizar el flujo de agua subterránea en los sistemas de acuíferos naturales: medio poroso equivalente, red de fracturas discretas y medio de porosidad dual [12].

El enfoque EPM supone que el sistema del acuífero puede estar representado por un medio poroso equivalente, es decir, que el sistema del acuífero se comporta como un medio poroso y se aplican las ecuaciones de flujo descritas en el apartado 2.2.2. También se usa para describir el flujo de agua subterránea a través de un macizo rocoso fracturado en el que la porosidad primaria es muy baja y la permeabilidad efectiva está controlada por fracturas y fisuras. Pero el factor de escala que aborda el estudio es grande, no se requiere o no es posible representar tanto detalle y se simplifica la red de fracturas como un medio poroso equivalente (permeabilidad secundaria) [12].

La mayoría de los códigos de modelado de aguas subterráneas utilizan el enfoque EPM para modelar el flujo de agua subterránea [12].

El tamaño del dominio del modelo depende de la escala del proyecto (local, intermedia o regional). La documentación del modelo conceptual debe justificar la escala del dominio del modelo y discutir las posibles implicaciones para los resultados del modelado dependiente de la escala [12]. Se debe hacer una evaluación sobre qué parte del sistema de aguas subterráneas es relevante y qué parte se puede excluir dadas las características del sistema y los objetivos planteados [13].

Los dominios utilizados para el modelado de aguas subterráneas incluyen:

- Dominio en base a acuíferos: que utiliza la extensión espacial conocida (o inferida) del acuífero principal de interés para definir el dominio del modelo.
- Dominio en base a cuenca hidrográfica: que utiliza la cuenca hidrográfica en la que se ubica el proyecto como un dominio modelo conveniente.
- Dominio local: que define el dominio del modelo en función de los componentes específicos del proyecto a estudiar [12].

Los mapas topográficos y geológicos son la fuente de información básica para definir la extensión del área que se debe incluir en el estudio [12].

Conceptualmente, las condiciones de contorno establecen el estado del sistema de flujo en el borde del dominio.

Las condiciones de contorno se clasifican en tres tipos: condición de Dirichlet o tipo 1, Neumann o tipo 2 y Cauchy o tipo 3 [10].

Las condiciones de contorno tipo 1, establecen el potencial hidráulico a lo largo de un límite. La condición de contorno tipo 2 especifica un flujo de agua en el borde. La condición tipo 3 especifica el flujo a través del borde utilizando el gradiente hidráulico entre un potencial de borde especificado por el modelador y el potencial calculado por el modelo en un nodo del borde o cerca de él [10].

Estas condiciones de contorno genéricas están relacionadas con comportamientos observados en la naturaleza y permiten representarlos conceptualmente.

Los comportamientos de la naturaleza que representan las condiciones de contorno en el modelo conceptual pueden ser límites físicos o hidráulicos. Los límites físicos son contactos con unidades litológicas de baja conductividad hidráulica o elementos estructurales. Los límites hidráulicos están delineados por líneas de corriente (divisiones de agua subterránea), líneas equipotenciales o masas de agua como ríos, lagos o el mar [10].

En el apartado 2.2.2 se encuentra la representación matemática de estas condiciones de contorno.

La formulación del modelo conceptual debe considerar la distribución espacial de las principales Unidades Hidrogeológicas (UH) y sus propiedades hidráulicas.

Las Unidades Hidrogeológicas son un material geológico específico o un grupo de materiales que tiene propiedades hidráulicas suficientemente similares para considerarse una unidad hidráulica en el propósito de un estudio hidrogeológico. La selección de UH debe estar justificada y documentada [12].

El valor de los parámetros hidrogeológicos debe especificarse para cada Unidad Hidrogeológica utilizando datos de campo. Si los datos del sitio no están disponibles, los valores pueden estimarse a partir de trabajos previos de áreas cercanas al sitio y de la literatura [10] (véase Tabla A- 1).

El modelo conceptual proporciona un juicio inicial de los flujos de entrada y salida del modelo [10].

El balance de agua subterránea se desarrolla para el área o volumen representado por el modelo conceptual.

El balance del agua en su forma más simple se expresa como [10]:

$$X = Y + \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

Donde:

X corresponde al flujo de entradas o recargas.

Y es el flujo de salidas o descargas.

$\frac{dS}{dt}$ corresponde al almacenamiento dado por la diferencia entre las recargas y descargas del sistema.

Para determinar el balance es necesario identificar y cuantificar todos los elementos que constituyen las entradas y las salidas.

El flujo de entrada incluye la recarga de la precipitación, filtración de cuerpos de agua superficiales, flujo al sistema de agua subterránea desde Unidades Hidrogeológicas fuera de los límites del modelo, inyección de agua a través de pozos y cualquier otra adición de agua al sistema [10].

El flujo de salida incluye la descarga de agua subterránea a cuerpos de agua superficiales, evapotranspiración, bombeo, descarga a través de caras de filtración a lo largo de laderas y cualquier otra pérdida de agua del sistema [10].

Una vez formulado el modelo conceptual, este se traduce matemáticamente.

2.2.2 MODELO MATEMÁTICO

Los modelos matemáticos utilizados para describir la física del flujo de agua subterránea están basados en los principios de conservación de masa y energía y la ley de Darcy [10]. El modelo matemático describe mediante ecuaciones matemáticas los procesos dentro del dominio espacial del problema y las condiciones de contorno que representan procesos a lo largo de los bordes.

En este caso la formulación matemática esta descrita mediante la ecuación general de flujo de agua subterránea en medio poroso.

2.2.2.1 Flujo en medio poroso

La ecuación general de flujo en medio poroso expresa un balance de masa y energía, y se basa en el flujo de agua a través de un cubo de material poroso que es lo suficientemente grande como para ser representativo de las propiedades del medio poroso y su vez lo suficientemente pequeño como para que el cambio de potencial dentro del volumen sea relativamente limitado [10]. Este cubo de material poroso se conoce como Volumen Elemental Representativo (REV) de dimensiones Δx , Δy , Δz .

El caudal Q de fluido darcyano es expresado como caudal unitario (caudal por unidad de área) que se mueve a través de las caras del REV, como se muestra en la Figura 4.

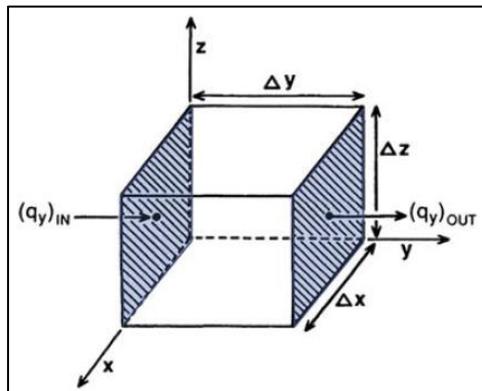


Figura 4: Volumen Elemental Representativo [10]

El flujo q a través del Volumen Elemental Representativo es un vector cuya magnitud se expresa mediante tres componentes cartesianas: q_x, q_y, q_z .

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (4)$$

Donde:

i_x, i_y, i_z son vectores unitarios a lo largo de los ejes x, y, z, respectivamente.

La conservación de masa requiere un balance hídrico dentro del REV de tal manera

$$\text{Flujo salida} - \text{Flujo entrada} = \Delta \text{Almacenamiento} \quad (5)$$

Considerando flujo a lo largo del eje y del REV (Figura 4). La diferencia de descarga específica es:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (6)$$

Que se puede escribir como

$$\frac{[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}]}{\Delta y} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (7)$$

Convirtiendo la notación de diferencia a una derivada parcial, el cambio en la descarga específica a través del REV a lo largo del eje y es:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (8)$$

Se escriben expresiones similares para el cambio en la descarga específica a lo largo de los ejes x, y, z. Usando la ecuación (5), el cambio total en la tasa de flujo es igual al cambio en el almacenamiento:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta \text{almacenamiento} \quad (9)$$

La tasa de flujo volumétrico de fuentes y sumideros está representada en la ecuación por $W^* \Delta x \Delta y \Delta z$, donde usamos la convención de que W es positivo cuando es una fuente de agua. Lo que resulta en:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + W^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta \text{almacenamiento} \quad (10)$$

El término derecho de la ecuación (10) representa el almacenamiento en la ecuación de balance.

Este término está definido por el producto entre el coeficiente de almacenamiento específico S_s , que es el volumen de agua liberada o almacenada por unidad de cambio en el potencial h y por unidad de volumen del acuífero:

$$S_s = -\frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (11)$$

Por convención en la ecuación (11) ΔV es positivo cuando Δh es negativo, es decir, el agua sale del almacenamiento cuando disminuye la carga. La tasa de cambio en el almacenamiento en el REV es:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (12)$$

Combinando las ecuaciones (10) y (12) se obtiene la forma final de la ecuación del balance hídrico:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + W^* \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

Sin embargo, esta ecuación tiene poco uso práctico, porque no podemos medir fácilmente q . El objetivo es obtener una ecuación de gobierno escrita en términos de potencial, que es una cantidad observada que se mide fácilmente en pozos. La ecuación (1) de la ley de Darcy relaciona la descarga específica q con el potencial h . Tanto q como el gradiente de h son vectores y K es el parámetro de conductividad hidráulica. Los componentes del vector de caudal específico q son:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (14)$$

Donde K_x, K_y, K_z son los componentes principales del componente de conductividad hidráulica K y $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z}$ son las componentes del vector del gradiente de potencial. La ecuación (14) se sustituye en la ecuación (13) para dar la ecuación de gobierno general que representa el flujo de

agua subterránea en régimen transitorio tridimensional (3D) para condiciones heterogéneas y anisotrópicas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W^* \quad (15)$$

La variable principal, h , es la variable dependiente; x, y, z, t son las variables independientes; K_x, K_y, K_z, S_s son parámetros; W es el término fuente. Los subíndices de K denotan las condiciones de anisotropía, lo que significa que la conductividad hidráulica puede variar con la dirección, x, y, z .

Para muchos problemas, se puede asumir como aproximación que la distribución de flujo, y por lo tanto la distribución del potencial hidráulico, no cambia con el tiempo; es decir, el problema está en régimen estacionario. Y, por lo tanto, $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, luego la ecuación (15) se convierte en [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W^* = 0 \quad (16)$$

Incluso para medios fracturados de roca el concepto de REV también puede ser aplicable, siempre que la escala del espacio vacío y la heterogeneidad² de los poros y las fracturas formen un continuo equivalente de un REV superpuesto [15].

Si el dominio es lo suficientemente grande, se puede encontrar un REV en donde los medios porosos fracturados se interpretan como un medio continuo para el cual las ecuaciones de modelado del apartado 2.2.2 son válidas [15].

El flujo de agua subterránea puede estar dominado por un número limitado de vías discretas formadas por fracturas para las cuales no existe un REV único (superpuesto) equivalente y diferente.

En el enfoque de red de fractura discreta, se supone que el flujo a través de la matriz de roca madre es insignificante y todo el flujo de agua subterránea ocurre a través de una red interconectada de fracturas [12].

El componente central en el modelado de características discretas es que sus geometrías y propiedades se incorporan explícitamente [15].

2.2.2.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno permiten definir las fronteras físicas e hidráulicas del dominio. Para resolver esta ecuación, se necesitan condiciones de contorno alrededor del dominio [12].

Hay tres tipos de condiciones de contorno.

Condición de contorno tipo 1 o de Dirichlet

² En una fractura en la escala de heterogeneidad es la distancia entre fracturas.

La carga hidráulica debe ser especificada. Cuando la carga hidráulica es especificada a lo largo de un borde del dominio, el flujo es calculado [13].

Este tipo de condición se usa para representar grandes cuerpos de agua superficial como ríos, lagos o una frontera con el mar. Del mismo modo, puede usarse para representar la carga hidráulica observada a lo largo de una divisoria de aguas o un límite del dominio computacional.

La representación matemática de las condiciones de potencial conocido se expresa como:

$$h = cte \quad (17)$$

En esta situación la carga potencial es especificada en todos los puntos de la superficie del borde y está definida por el potencial hidráulico.

Condición de contorno tipo 2 o de Neumann

Bajo esta condición, el gradiente de la carga hidráulica es especificado en la frontera lo que significa que el flujo de aguas subterráneas a través de la frontera es especificado [12].

La expresión para esta condición de contorno de flujo conocido es:

$$\frac{\partial h}{\partial n} = cte \quad (18)$$

Donde:

$\frac{\partial h}{\partial n}$ es el gradiente hidráulico

n es la dirección del gradiente hidráulico (x, y, z).

Esta condición impone un valor a $\frac{\partial h}{\partial n}$ donde, a partir de la ecuación (1) de ley de Darcy se tiene que:

$$q_n = K_n \frac{\partial h}{\partial n}$$

Como $\frac{\partial h}{\partial n} = cte$ entonces $q_n = cte$ y por consiguiente el caudal o flujo es también constante.

Condición de contorno tipo 3 o de Cauchy

En la condición de contorno tipo 3 o de Cauchy se calcula el flujo a través del borde a partir de la ley de Darcy usando un gradiente hidráulico calculado como la diferencia entre un potencial hidráulico especificado fuera del límite y el potencial hidráulico calculado por el modelo en el nodo ubicado en o cerca del límite. Este tipo de condición de límite se también se denomina condición de contorno mixta porque relaciona un potencial hidráulico de límite (h_b) con un flujo de límite.

Matemáticamente, la tasa de flujo volumétrico a través de una condición de contorno tipo 3 se calcula utilizando una ecuación de la forma general:

$$Q = C\Delta h \quad (19)$$

Donde:

$$C = KA/L \quad (20)$$

$$\Delta h = h_b - h_{i,j,k} \quad (21)$$

Donde:

Q [L^3/T] es la tasa de flujo volumétrico.

Δh [L] es la diferencia entre el potencial del borde especificado (h_b) y el potencial calculado por el modelo cerca del límite ($h_{i,j,k}$).

C [L^2/T] es la conductancia.

K [L/T] es la conductividad hidráulica representativa.

A [L^2] es un área representativa.

L [L] es la distancia entre las ubicaciones de h_b y $h_{i,j,k}$.

Una vez establecido el modelo matemático que describe la física del problema, las ecuaciones de gobierno pueden resolverse mediante métodos numéricos en computadoras.

2.2.3 MODELO NUMÉRICO

Un modelo numérico, es un código de computación que utiliza métodos numéricos para resolver las ecuaciones matemáticas que rigen el flujo de aguas subterráneas y calcula el potencial en las ubicaciones seleccionadas.

La solución numérica al modelo matemático planteado no es continua en el espacio si no que el potencial se calcula en un número determinado de puntos discretos (nodos) del dominio, por lo que es necesario como primer paso discretizar el dominio y definir los nodos para resolver la ecuación [10].

Un aspecto fundamental de los modelos numéricos es la representación del sistema hidrogeológico a través de elementos discretos. Esta discretización dentro del dominio modelado se representa mediante una malla compuesta de elementos y nodos [12].

Su importancia radica en:

- El número de nodos en la malla afecta la precisión de la solución, el tiempo de cálculo requerido para resolver el modelo y la cantidad de salidas que se generan.
- Se utiliza un generador de mallas para generar la discretización en donde el modelador debe ingresar el espacio nodal y especificar el tipo de elemento [10].

- La red nodal forma el marco computacional del modelo numérico y el espaciado nodal determina la resolución de salida en la medida en que los potenciales se calculan en los nodos y deben interpolarse entre nodos [10].
- El modelo conceptual y la ubicación de los límites del perímetro determinan las dimensiones de la discretización horizontal. Los modelos bidimensionales (2D) tienen solo una capa definida por el espaciado nodal horizontal.

La generación de la malla está sujeta a un número base de elementos y al grado de refinación definido. Los elementos tienen una geometría triangular o cuadrangular (generalmente) y presentan diferentes dimensiones en el área de modelación. Los elementos generados son definidos por los nodos de la malla.

La principal ventaja de los modelos numéricos es que se pueden asignar diferentes valores de parámetros a cada celda o elemento. Se pueden tener en cuenta las variaciones laterales y verticales en los valores de las propiedades, generando discretizaciones espaciales horizontales y verticales. Esto permite construir modelos tridimensionales que incluyan más de una capa de elementos, y la representación de acuíferos de varias capas [12].

Debido a los avances en los últimos años hay una variedad amplia de códigos que permiten resolver modelos matemáticos y por ello debe hacerse una selección del código de simulación numérica apropiado para el problema a resolver.

La selección de un código numérico de simulación de flujo de agua subterránea para una aplicación de modelado particular depende del problema a resolver, las opciones disponibles en el código para representar características especiales y el método numérico seleccionado [10].

Los métodos numéricos más utilizados en el modelado de aguas subterráneas son el Método de Diferencias Finitas (por sus siglas en inglés FDM) y el Método de Elementos Finitos (por sus siglas en inglés FEM) [10].

El método utilizado en este caso será el FEM. El dominio del problema se subdivide en elementos que están definidos por nodos. La variable dependiente (potencial) se calcula para los nodos y se interpola como una solución continua dentro de los elementos entre nodos [10].

Algunas características de FEM son:

- Ubicación de los nodos se designan utilizando las coordenadas x , y , z .
- Tanto los nodos como los elementos están numerados y la ubicación de cada elemento se define en términos de los números nodales circundantes.
- Los elementos más comunes son triangulares y cuadriláteros. Estos son líneas en una dimensión, planos en dos dimensiones y polígonos volumétricos en tres dimensiones.
- Las ecuaciones FEM se generan al introducir una solución de prueba de potencial dentro del elemento.
- La interpolación lineal es una de las funciones más utilizadas [10].

En dos dimensiones, la forma general de una función de interpolación lineal para un elemento triangular es:

$$h^e(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (22)$$

Donde $h^e(x, y)$ representa el potencial dentro del elemento y a_0 , a_1 y a_2 son coeficientes. Luego, el potencial dentro del elemento se calcula usando los potenciales en los tres nodos (i, j, m ; enumerados en sentido antihorario) que forman el elemento triangular.

$$\begin{aligned} h_i &= a_0 + a_1x_i + a_2y_i \\ h_j &= a_0 + a_1x_j + a_2y_j \\ h_m &= a_0 + a_1x_m + a_2y_m \end{aligned} \quad (23)$$

Si las ecuaciones anteriores se resuelven para a_0 , a_1 , a_2 y las expresiones se sustituyen en la primera ecuación (22), se puede reescribir como:

$$h^e(x, y) = N_i^e(x, y)h_i + N_j^e(x, y)h_j + N_m^e(x, y)h_m \quad (24)$$

Donde:

$$\begin{aligned} N_i^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e[(x_jy_m - x_my_j) + (y_j - y_m)x + (x_m - x_j)y]} \\ N_j^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e[(x_my_i - x_iy_m) + (y_m - y_i)x + (x_i - x_m)y]} \\ N_m^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e[(x_iy_j - x_jy_i) + (y_i - y_j)x + (x_j - x_i)y]} \end{aligned} \quad (25)$$

Y

$$2A^e = (x_iy_j - x_jy_i) + (x_my_i - x_iy_m) + (x_jy_m - x_my_j) \quad (26)$$

$N_i^e(x, y)$, $N_j^e(x, y)$ y $N_m^e(x, y)$ son las funciones básicas. En este caso, son funciones lineales que definen el potencial dentro del elemento triangular del área A^e en términos de los potenciales en los tres nodos de las esquinas [10, p. 89].

El programa FEFLOW, código de simulación utilizado en este trabajo, es un sistema de modelado de aguas subterráneas basado en FEM para problemas en 2D y 3D, que permite simular un medio poroso con saturación variable, en régimen de flujo transitorio o estacionario, y transporte de contaminantes [16].

FEFLOW también permite calcular la distribución espacial y temporal de contaminantes de aguas subterráneas, modela procesos geotérmicos, estima la duración y los tiempos de transporte de contaminantes en acuíferos [16]. Presenta una interfaz clara y en línea con ArcGis lo que facilita la interacción entre ambos.

FEFLOW utiliza métodos indirectos y directos para resolver la ecuación general de flujo y así obtener el potencial hidráulico. Solucionadores matriciales dan solución numérica exacta al conjunto de ecuaciones [16].

La implementación del modelo en el código de simulación FEFLOW implica traducir el modelo conceptual mediante el diseño de una malla, establecer límites, asignar valores de parámetros de acuíferos, condiciones de contorno y definir la física general del problema [10]. Cuando se dispone de datos suficientes y se pretende explotar un modelo numérico con garantías de predicción debe seguirse un proceso de calibración, comprobación y análisis de sensibilidad.

El proceso de calibración implica lograr el grado deseado de correspondencia entre los resultados de la simulación del modelo y las observaciones reales del sistema de flujo de agua subterránea [12]. El grado de dificultad de la calibración del modelo depende de la cantidad y la calidad de los datos medidos, la complejidad de los procesos que se simulan y la complejidad del modelo conceptual [12]. Durante el proceso de calibración, el modelador debe seleccionar objetivos de calibración y parámetros de calibración, y realiza la comparación del historial [10].

Los objetivos de calibración son valores observados que coinciden con los valores calculados correspondientes durante el proceso de calibración del modelo. Los objetivos de calibración se comparan con los valores simulados durante la coincidencia del historial para describir el ajuste del modelo. Por lo tanto, exigir que los valores simulados coincidan con los objetivos de calibración obliga al modelo a responder como el sistema de campo, al menos para las condiciones representadas en la simulación [10].

Los valores observados más comunes utilizados como objetivos de calibración en los modelos de flujo de agua subterránea son los potenciales hidráulicos y el flujo de agua subterránea.

Los parámetros de calibración son aquellos parámetros del modelo cuyos valores se ajustan durante el proceso de calibración [12]. Los parámetros de calibración pueden incluir cualquier entrada del modelo: conductividades hidráulicas verticales y horizontales, condiciones de contorno, tasas de recarga o descarga, así como otras fuentes y sumideros de agua [10].

La comprobación del modelo se refiere a una demostración de que el modelo calibrado coincide con un conjunto de datos de campo independientes de los datos utilizados para calibrar el modelo [10]. El grado resultante de correspondencia puede tomarse como un indicador de la incertidumbre inherente a las predicciones del modelo [12].

Si se requieren ajustes a los parámetros o condiciones de contorno para lograr la comprobación, entonces la simulación de calibración debe volver a ejecutarse y reevaluarse. Es posible que deba repetirse este proceso hasta que se identifique un conjunto de parámetros y condiciones de contorno que produzca una buena coincidencia con los conjuntos de datos de calibración y comprobación. Un conjunto de datos se refiere a todos los datos del sitio (por ejemplo, potenciales hidráulicos, flujos, geometrías de Unidades Hidrogeológicas) que son suficientes para una buena calibración del modelo [12].

El análisis de sensibilidad es el estudio de cómo varía la respuesta de un sistema con los cambios en los diversos factores de los que depende dicha respuesta. Se dice que un sistema es sensible a un factor si un pequeño cambio en este último provoca un gran cambio en la respuesta del sistema [17]. Un análisis de sensibilidad tiene por objetivo evaluar la sensibilidad de los valores predichos a los cambios en los valores de los coeficientes del modelo. Si estos efectos no son significativos, podemos aceptar los valores pronosticados y tomar decisiones. Sin embargo, si los valores predichos son sensibles a los cambios en los valores de los parámetros, debemos reducir el rango de incertidumbre en los valores de estos parámetros [17].

El análisis de sensibilidad también se puede utilizar para evaluar la fiabilidad de los parámetros determinados en la calibración, o el procedimiento de estimación de parámetros [17]. Los resultados de un análisis de sensibilidad pueden guiar las futuras actividades de recopilación de datos destinadas a reducir las incertidumbres de modelado. La información de entrada (por ejemplo, los coeficientes del modelo) a los cuales los resultados del modelo son más sensibles, requeriría reducir el rango de incertidumbre [17].



3 ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El presente estudio se realiza en base a información pública de la mina subterránea El Peñón de la empresa Minera Meridian Ltda. La operación minera está ubicada en el norte de Chile, aproximadamente a 160 km al sureste de la ciudad de Antofagasta, a una altura promedio de 1800 m.s.n.m. (Figura 5).

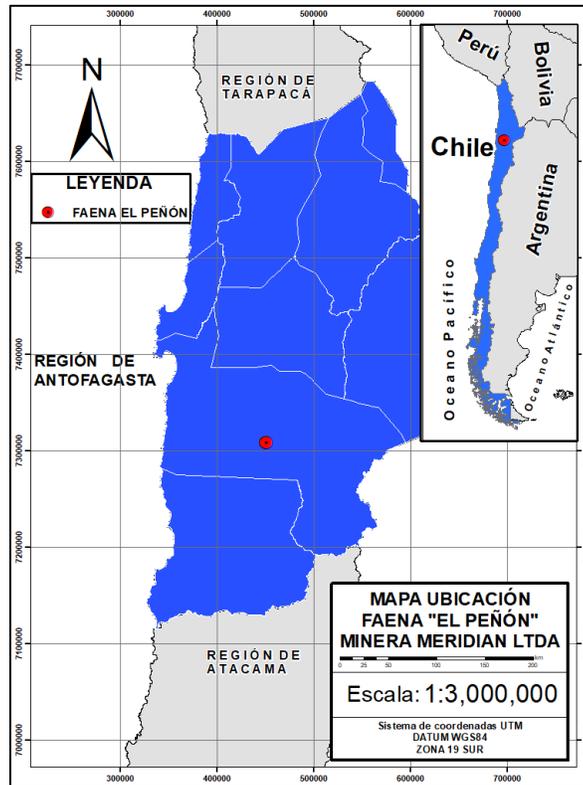


Figura 5: ubicación faena minera El Peñón

La mina explota un yacimiento de oro y plata que presenta vetas con una orientación nortesur de uno a tres metros de potencia, 10 km de largo (suma del largo de las principales vetas). El yacimiento se encuentra a una profundidad aproximada de 500 m.

El proceso de explotación subterránea de los cuerpos mineralizados se realiza mediante el método de *Cut and Fill* con sus variantes *Bench and Fill* para casi la totalidad del yacimiento y *Drift and Fill* aplicado en zonas específicas³ [18].

El método de extracción *Bench and fill* consiste en la perforación y tronadura de las vetas mediante subniveles los que se perforan verticalmente entre niveles. Como dice su nombre, luego

³ Los términos en inglés significan corte y relleno, banqueo y relleno, avance y relleno respectivamente.

de extraer el mineral y generar el caserón se procede a rellenar el nivel inferior con el estéril que se obtiene de la extracción [19] (Figura 6).

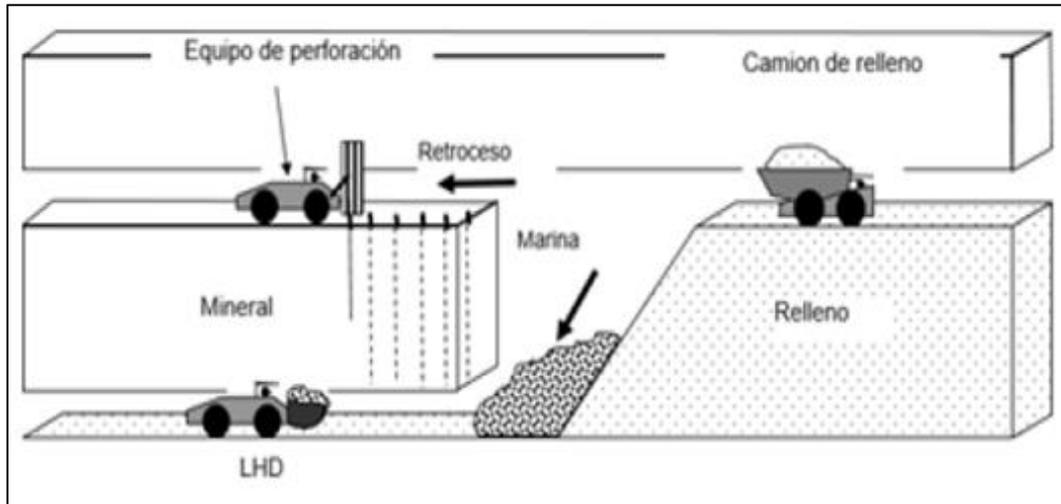


Figura 6: método de explotación Bench and Fill [19]

3.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

El caso de estudio se localiza en una zona que cuenta con siete estructuras geomorfológicas: Plataforma de Abrasión, Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko, Depresión Pre-andina, Salar de Atacama y Cordillera de los Andes (Figura 7).

La operación minera se encuentra en la depresión central del norte de Chile, ubicada entre la cordillera de la costa y la cordillera de Domeyko. Sector que se caracteriza por presentar un relieve suave con extensas llanuras entre las cuales destacan: Pampa Grande, Pampa Buenos Aires, Pampa El Peñón y Pampa Providencia [18]. Este yacimiento nace de la cordillera de Domeyko que se extiende por más de 450 Km al oeste de Los Andes y alcanza una altitud promedio de 3.500 m.s.n.m [18].

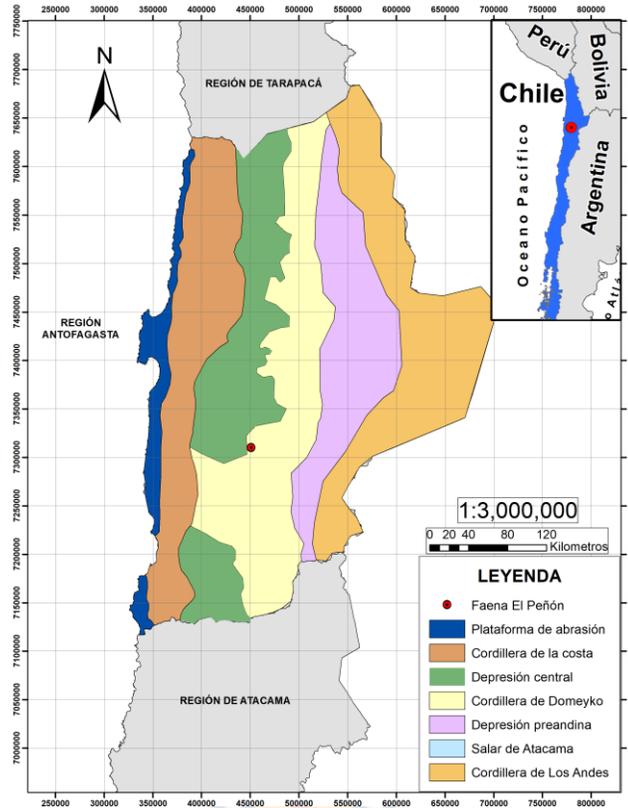


Figura 7: geomorfología región Antofagasta. Modificado de [18, p. 59]

3.3 GEOLOGÍA REGIONAL

Pampa El Peñón y en particular el yacimiento El peñón es dominado geológicamente por depósitos detríticos (cuaternarios y neógenos) y por rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Augusta Victoria de edad paleocena-eocena [20].

El depósito detrítico Cuaternario se conforma de materiales aluviales y coluviones modernos, los cuales consisten en gravas y arenas de composición polimétrica (aluviales) y monométrica (coluviones) que se disponen perimetralmente en torno a las rocas de la Formación Augusta Victoria, con espesores que varían desde los centímetros hasta los dos metros [20].

El yacimiento El Peñón se encuentra asociado a las rocas de la Formación Augusta Victoria dispuesta en una faja de 60 km de amplitud con orientación NNE. Cuya distribución ocurre a lo largo de la Depresión Intermedia y en el extremo norte de la Cordillera de Domeyko constituyendo un complejo ígneo, compuesto por lavas, tobas, brechas, aglomerados volcánicos y cuerpos sub volcánicos; asociados a domos principalmente dacíticos. El espesor estimado de esta formación es de 500 m con una disposición prácticamente horizontal [20].

Inmediatamente al norte de la Pampa El Peñón, se han identificado depósitos salinos asignados al Plioceno-Pleistoceno. Estos corresponden a nitratos y sulfatos depositados en las depresiones de la Pampa y en laderas de relieves relativamente bajos.

Al noreste (NE) y noroeste (NO) del área del proyecto afloran intrusivos del Cretácico Superior-Eoceno. En particular se identifican afloraciones en el sector NO coincidentes a las encontradas en el sector este de El Peñón identificando intrusivos dioríticos con variaciones a monzodioritas y gabros. Y hacia el sur se disponen intrusivos correspondientes a pórficos monzoníticos, monzodioritas y monzogranitos [20].

3.3.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL DISTRITO EL PEÑÓN

Las principales fallas en el sector afectan de manera directa al complejo geológico. Una de ellas es la falla Dominador ubicada al lado oeste del distrito (véase Figura 8 y ANEXO C). Esta falla tiende hacia el noreste, concentrando rocas volcánicas del cretácico temprano y tardío como también rocas intrusivas del cretácico tardío contra rocas volcánicas del paleoceno y el eoceno temprano donde además separa las unidades del paleoceno y eoceno. Esta es la falla más grande en las cercanías del yacimiento [21].

Las fallas de tendencia norte con cientos de metros de desplazamiento definen el margen este del sector y colocan intrusiones del Eoceno contra las rocas del Paleoceno y el Eoceno temprano. En todo el distrito, las fallas muestran desplazamientos tanto normales como desplazamientos inversos con menor frecuencia que exhiben compensaciones de decenas a cientos de metros presentando una orientación rumbo N10°E en promedio [21]. La falla Dominador es de tipo normal con una orientación rumbo norte (véase Figura 8).



Figura 8: perfil este-oeste mina El Peñón [21, p. 17]

3.3.2 LITOLOGÍAS DEL DISTRITO EL PEÑÓN

Las principales unidades geológicas del distrito El Peñón son:

- **Formación Aeropuerto:** perteneciente al cretácico inferior que está compuesta por areniscas fluviales, brechas con sedimentos gruesos, conglomerados y brechas volcánicas [21].
- **Formación Quebrada Mala:** generada en el cretácico superior donde se gestaron arenas, limos fluviales y lacustres, lavas y brechas de tipo andesíticas a basálticas e ignimbritas riolíticas a dacíticas [21].
- **Formación Augusta Victoria:** formada en el cretácico superior creando sanidina-biotita, riolita, ignimbritas, areniscas fluviales y lavas traquíticas; unidades volcánicas y subvolcánicas de paleoceno a eoceno que contienen lavas dacíticas o domos, flujos de andesita-ignimbritas riolíticas, brechas volcanoclásticas, sedimentos fluviales intercalados, riolitas tardías, alimentadores e intrusiones hipabisales. Además, se reconocen intrusiones del cretácico al eoceno como también existencia de dacitas y monzonitas [21].

El área de emplazamiento de Mina El Peñón se constituye por rocas pertenecientes a la Formación Augusta Victoria, complejo ígneo subdividido en dos unidades designadas: Dacitas Dominador y Riolitas Peñón [20].

La primera unidad está constituida por dacitas, flujos tobáceos andesíticos y flujos lávicos-andesíticos, la cual aflora al oeste y en contacto con la falla NNE de la zona estructural El Peñón. La segunda unidad aparece en afloramientos dispuestos en dirección NNE y está separada de la primera por brechas intrusivas, hidromagmáticas y tectónicas [20] (véase ANEXO D).

Hasta una profundidad de 500 m, en el dominio se reconocen cuatro tipos de materiales predominantes:

- Materiales de depósitos coluviales: material poco consolidado de espesor variable entre 30 y 70 m. Heteriolítico y compuesto por clastos de rocas dacíticas, riolíticas y tobácea, en una matriz compuesta por material salino. En gran parte de su extensión presenta características permeables [22].
- Tobas litocristalinas: son rocas consolidadas con un espesor promedio de 150 m compuestas por clastos líticos de composición riolítica y dacítica los cuales están inmersos en una matriz de lapillis argilizada, pero con silicificación sobreimpuesta, características permeables a parcialmente impermeable cuando su grado de silicificación es mayor [22].
- Riolitas bandeadas: son rocas sub volcánicas de carácter hipabisal con una composición ácida, de 250 m de espesor y fuertemente silicificada. Sobre sus características hidrogeológicas se puede concluir que son materiales impermeables [22].
- Dacitas y andesitas: rocas volcánicas con una composición intermedia de distribución lenticular y espesor máximo de 150 m. La alteración que presenta es propilítica homogénea y dada sus características hidrogeológicas se considera impermeable [22].

3.4 HIDROLOGÍA REGIONAL

3.4.1 CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La Región de Antofagasta está conformada por diez cuencas hidrológicas, mayoritariamente endorreicas⁴ a excepción de la cuenca del Río Loa [18].

El presente estudio se realiza en la cuenca “DGA 28”, denominada “Quebrada La Negra”. Esta cuenca, tiene su origen en la cordillera de Domeyko y limita al sur con la cuenca exorreica Quebrada de Taltal, al oeste con cuencas costeras y al este con las cuencas del Salar de Atacama y Salar de Punta Negra. Dentro de esta cuenca, existen tres subcuencas. La faena El Peñón se encuentra en la subcuenca “DGA 280” llamada “Quebrada Mateo hasta Quebrada Grande” [18] (ver Figura 9).

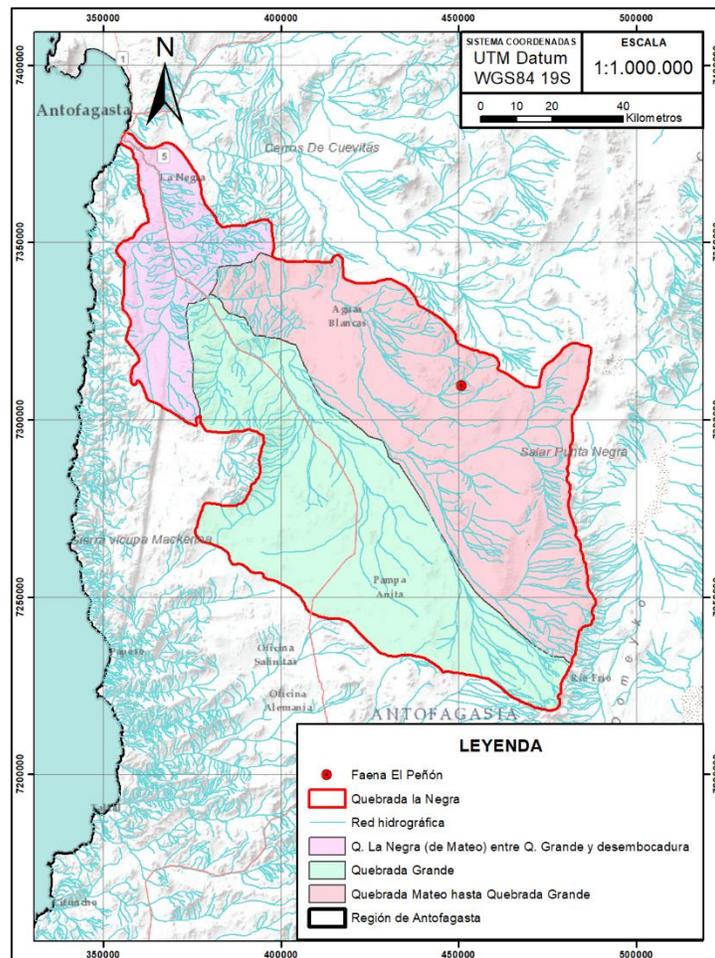


Figura 9: ubicación cuenca Quebrada La Negra y subcuencas

3.4.2 CLIMATOLOGÍA

De acuerdo con el atlas agroclimático de Chile [23], el área de emplazamiento del estudio se encuentra dentro del distrito climático denominado “Calama”, en el cual predomina un clima desértico de altura y un régimen de humedad xérico⁵ según la codificación BWHXe. Este distrito

⁴ Área en la que el agua no tiene salida fluvial hacia el océano.

⁵ Relativo o perteneciente a un hábitat con un suministro bajo de humedad.

presenta una temperatura variada, registrando un máximo de 20 °C en enero y un mínimo de -0,1 °C en julio. Además, esta área registra un periodo seco de 12 meses, con una precipitación media anual de 38 mm y un déficit hídrico de 2.058 mm/año. El período húmedo tiene una duración de 0 meses, durante los cuales se produce un excedente hídrico de 0 mm. Las principales variables climáticas se presentan segmentadas de forma mensual en la Tabla 1⁶.

Tabla 1: principales variables distrito "Calama" [23]

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
T. MAX (°C)	20	19,7	18,7	17,4	16,2	15,2	14,9	14,8	15,5	16,8	18,3	19,5	17,3
T. MIN (°C)	3,8	3,5	2,8	1,8	0,9	0,2	-0,1	0,2	0,5	1,5	2,6	3,5	1,8
T. MED (°C)	11,4	11,1	10,3	9,2	8,1	7,4	7,1	7,1	7,6	8,7	10	11	9,1
PRECIPIT. (mm)	2,2	0	0	1,1	2,2	8,9	8,9	8,9	5,5	0	0	0,4	38,1
EVAP.TRANS (mm)	194	191	184	175	165	158	156	158	165	175	184	191	2096

3.4.3 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

La faena El Peñón cuenta con una estación meteorológica dentro de las dependencias de su concesión llamada estación Campamento [18]. Sin embargo, esta es una estación privada y no se tiene acceso a la información (excepto la que aparece en los informes de DIA). Se dispone de información de la estación campamento e información de cuatro estaciones más que actualmente se encuentran en estado vigente, y emplazadas cercanas a la zona de estudio. La ubicación geográfica de cada una de estas queda representada en la Figura 10.

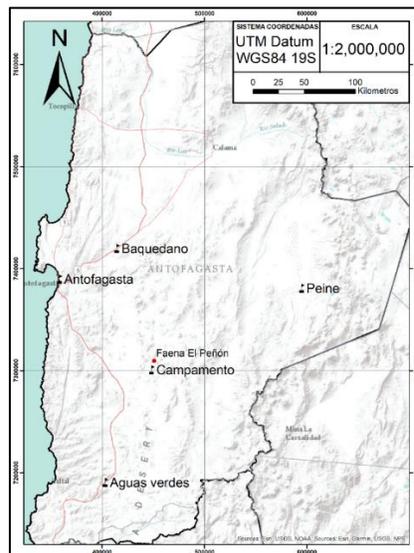


Figura 10: ubicación estaciones meteorológicas

⁶ La información por mes contempla la información de todas las estaciones meteorológicas de la región con sus respectivas ponderaciones.

Asimismo, la información de interés de las estaciones meteorológicas se resume en la Tabla 2.

Tabla 2: información relevante estaciones meteorológicas

NOMBRE ESTACIÓN	Coordenadas UTM WGS84 19S		Distancia a El Peñón (m)	Altitud (m)
	Este_X (m)	Norte_Y (m)		
Aguas Verdes	403184	7190296	128486	1560
Antofagasta	358534	7389666	122156	50
Baquedano	414538	7419580	115783	1032
Campamento	448571	7300756	0	1800
Peine	595137	7380682	160864	2460

La Figura 11 representa la información que se dispone de cada estación según los años.

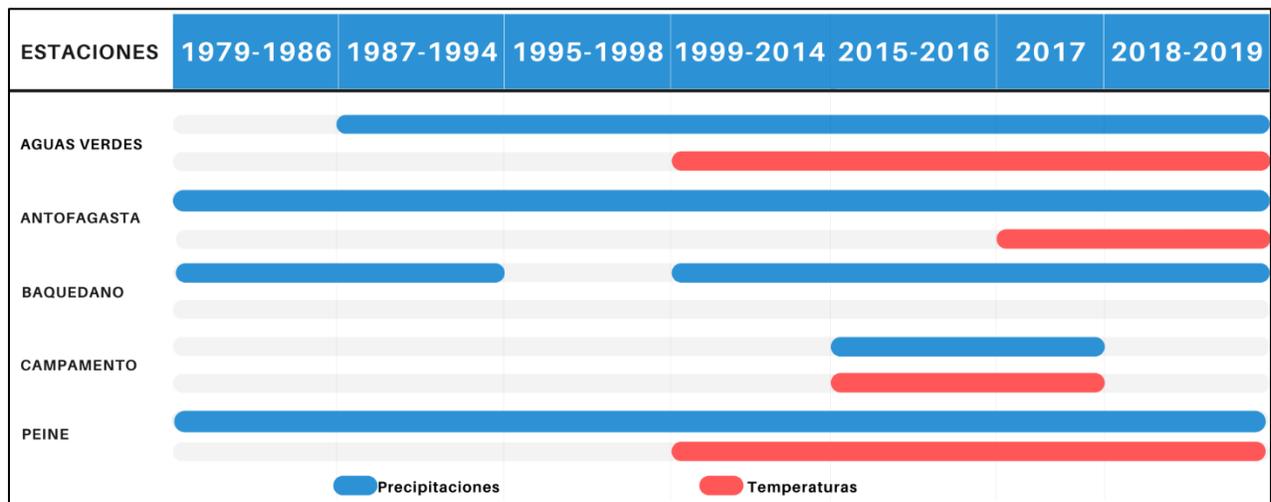


Figura 11: cobertura de datos estaciones meteorológicas

El área de emplazamiento del presente estudio presenta un ciclo mensual promedio de la variable temperatura, el cual queda representado en el Gráfico 1.

Corresponde al año 2017 y los datos se obtuvieron a través de la estación meteorológica Campamento. Se observa que a partir de enero la temperatura comienza a disminuir paulatinamente hasta mayo, alcanzando mínimas promedio de 13,8 °C. Luego, se observa un gradual aumento hasta el mes de diciembre, alcanzando máximas cercanas a los 18,4 °C [18].

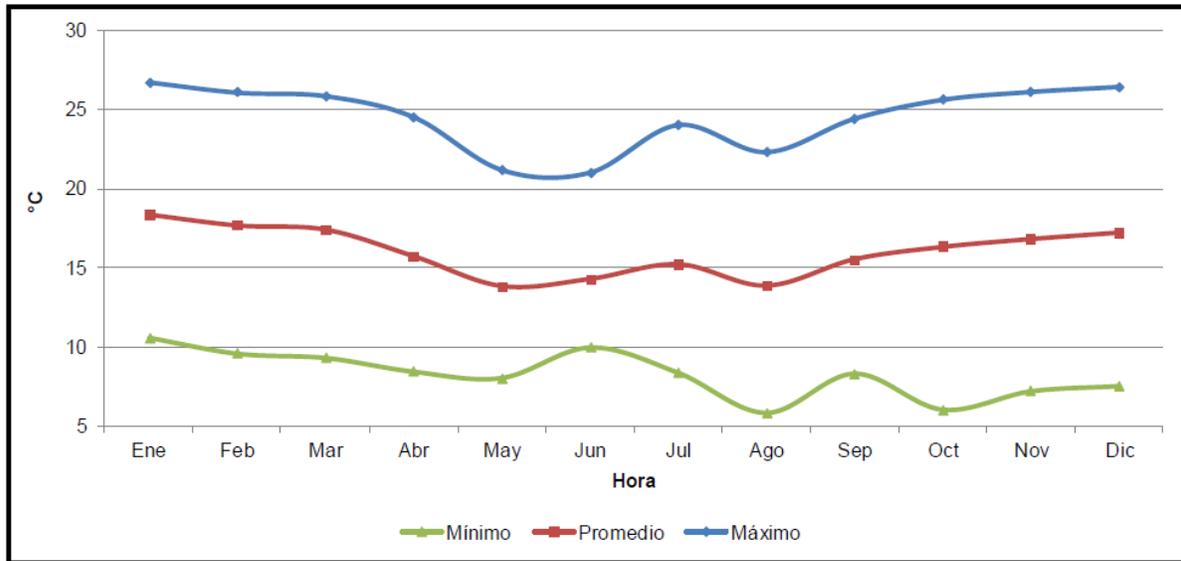


Gráfico 1: ciclo mensual promedio variable temperatura (°C), estación Campamento del año 2017 [18]

Según la información histórica de las cuatro estaciones meteorológicas ubicadas cercanas a la mina, se estima la temperatura promedio del área de estudio.

En la Tabla 3 se encuentra el resumen por mes de la información de las estaciones.

Tabla 3: temperaturas mínimas y máximas medias (°C)

ESTACIÓN	Tipo T°	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
AGUAS VERDES	MIN	7,5	7,9	7,5	5,3	3,9	2,1	1,1	1,7	2,5	3,6	4,4	6,1
	MAX	25,6	26,1	26,0	25,1	24,3	23,2	22,3	23,6	24,0	25,0	25,6	25,8
ANTOFAGASTA	MIN	18,0	18,4	18,1	16,8	14,8	12,8	12,3	12,9	13,6	14,7	15,8	17,2
	MAX	23,0	23,5	23,0	21,5	19,5	17,6	17,2	17,0	17,6	18,6	19,8	21,9
BAQUEDANO	MIN	8,0	7,7	7,5	5,0	3,5	2,1	0,9	1,4	2,5	3,9	4,8	6,7
	MAX	28,8	29,1	28,9	28,0	26,2	25,3	24,7	26,0	27,8	28,6	29,3	29,2
PEINE	MIN	12,5	12,4	11,4	9,2	6,2	4,1	3,2	5,1	6,7	8,6	9,9	11,5
	MAX	28,4	28,0	27,1	25,1	21,7	19,7	19,3	21,6	23,6	25,8	27,4	28,4

De esta tabla se obtiene que la temperatura mínima promedio del sector es 1,8 °C, la temperatura máxima promedio es de 17,3 °C y que la temperatura promedio anual es de 9,1 °C.

Las precipitaciones se presentan muy pocos días al año y con una muy baja intensidad. Así, pese a estar en presencia de un suelo permeable (de 50 m de profundidad) el cual facilita su infiltración, como consecuencia de las altas temperaturas y la poca precipitación, la cantidad de agua que llega a las labores mineras siempre tiende a cero [18].

La Tabla 4 muestra las precipitaciones mensuales promedio de las cuatro estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, las cuales presentan precipitaciones acumuladas anuales de entre 2 mm a 19 mm.

Tabla 4: precipitación total mensual (mm)

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
AGUAS VERDES	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	6
ANTOFAGASTA	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	3
BAQUEDANO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
PEINE	2	7	6	0	1	1	0	1	0	0	0	0	19

Según el atlas agroclimático de Chile [23] existe una evapotranspiración asociada a los tipos de clima, los valores según clima desértico se muestran en la Tabla 1. Esta tabla presenta la evapotranspiración total mensual [23, p. 12]. Así, se obtiene que la evapotranspiración mínima promedio es de 156 mm, la evapotranspiración máxima promedio es de 194 mm y la anual acumulada es de 2096 mm.

La zona del proyecto se caracteriza un suelo permeable (arenas), sin vegetación, no urbanizado y con pendientes suaves del orden del 2% [18].

El coeficiente de escorrentía se ha estimado en 0,35 considerando los valores para cuencas rurales de acuerdo a la Tabla 5.

Tabla 5: coeficiente de escorrentía para cuencas rurales [18]

Cobertura vegetal	Permeabilidad del suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta >20%	Media >5%	Suave >1%	Despreciable <1%
Sin vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3

3.5 HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

3.5.1 ACUÍFEROS

Existen cuatro acuíferos que rodean el sector de la mina (véase Figura 12). Aunque previamente los acuíferos Rosarios, Aguas Blancas y Buenos Aires formaban parte de un único acuífero, estudios recientes indican que las aguas subterráneas del sector Buenos Aires no circulan hacia el acuífero Aguas Blancas, conformando una unidad hidrogeológica independiente [22].

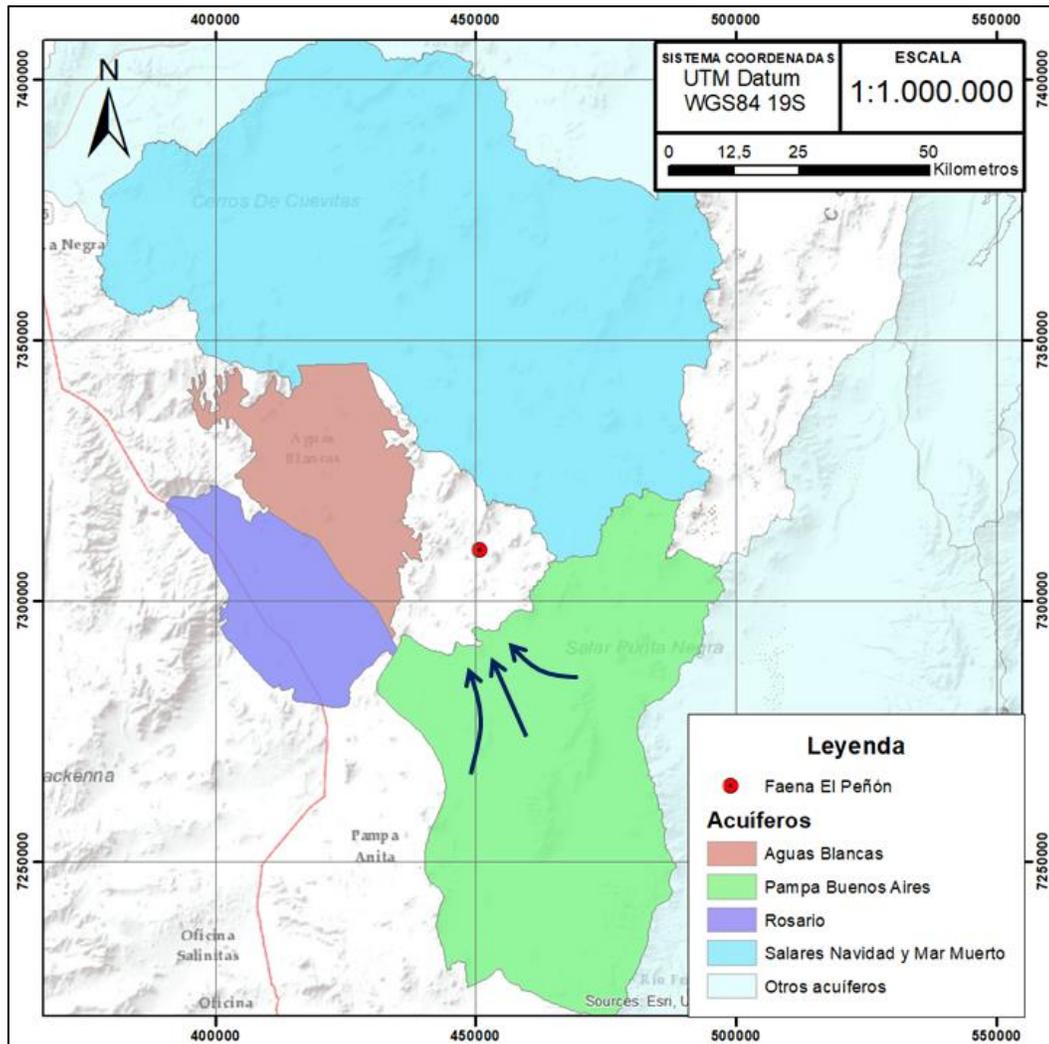


Figura 12: acuíferos de interés mina El Peñón

Todos los acuíferos que rodean el yacimiento presentan restricción para extraer agua dada la baja recarga limitando el uso de aguas subterráneas. Pampa Buenos Aires es la excepción dado que, según el estudio citado anteriormente, cuenta con caudales suficientes para su extracción sin generar pérdidas a largo plazo [22].

Las descargas del acuífero Pampa Buenos Aires van en dirección a la formación Augusta Victoria (formación donde se encuentra la operación minera) la cual funciona como una barrera natural que delimita el acuífero por su lado oeste (véase Figura 12). Si bien se puede establecer una clara diferencia de condiciones hidrogeológicas entre ambos sectores, no quiere decir que el agua

no circula hacia la mina ya que existen una serie de fracturas (ver apartado 3.3.1) que facilitan la conducción de flujos subterráneos con una dirección rumbo norte aproximadamente [22].

Se cuenta con 21 pozos de los cuales solo siete pozos que se encuentran dentro del dominio. La información de estos sondeos data del año 2007 [20]. La Tabla 6 muestra la principal información sobre cada pozo.

Tabla 6: información pozos de sondaje. UTM datum WGS84 19S. Modificado de [20]

Sondaje	Este_x (m)	Norte_y (m)	Cota terreno (m.s.n.m.)	Cota nivel estático (m.s.n.m.)	Profundidad nivel (m)
PQ004	449919	7301224	1888	1617	271
PQ005	449988	7301263	1896	1613	283
PQ010	449972	7301249	1893	1612	281
PQ012	449871	7301592	1861	1591	270
PQ013	449902	7301496	1854	1589	265
PQ023	450070	7301302	1840	1631	209
PQ043	449907	7301239	1886	1602	284

De igual manera la Figura 13 muestra la ubicación de los pozos mencionados.

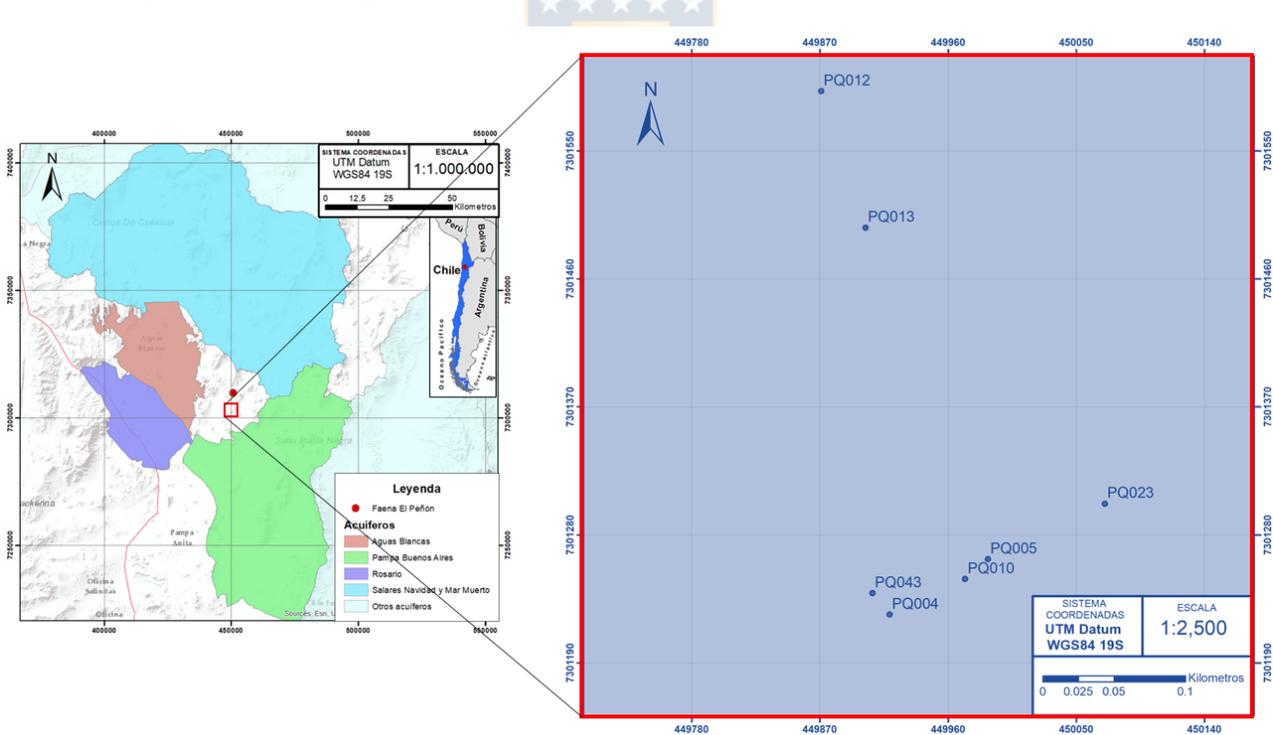


Figura 13: ubicación pozos de sondaje

En el área de la explotación minera se infiere que la napa freática del yacimiento se encuentra en la cota 1.600 m.s.n.m. [24].

El sistema de drenaje de la mina está constituido por una estación de drenaje principal ubicado en el nivel 1.578 de la rampa principal, en donde se encuentra instalada una bomba que impulsa las aguas hacia superficie. Además, el sistema está constituido por un sistema secundario de drenaje basado en 5 estaciones de drenaje con bombas similares que drenan las aguas desde los niveles inferiores hasta el nivel de drenaje principal, donde es almacenada en una piscina existente en la superficie [22].

El caudal drenado varía en el rango 1470-1900 m³/d el cual se conduce a través de las galerías de transporte hacia las estaciones de bombeo [24]. El agua drenada se utiliza en regadío de pistas y marinas, lavado de frentes, perforación de frentes y bancos con Jumbo electro-hidráulico, perforación de sondajes diamantina, perforación para equipo raise bore, nebulizadores y aspersores [18]. De existir excedente de agua drenada, es bombeada a través de cañerías hasta un estanque de almacenamiento de agua ubicado en el área Peñón, para ser utilizada en las labores de la planta de proceso [22].



4 MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

La descripción de un modelo conceptual contempla las hipótesis conceptuales que describen la física y el comportamiento del sistema, el dominio espacial de trabajo con sus respectivos límites, la distribución de los parámetros hidrogeológicos agrupados en Unidades Hidrogeológicas y los elementos del balance hídrico.

4.1 HIPÓTESIS CONCEPTUALES GENERALES

Se establecen las siguientes hipótesis conceptuales para describir la física y el comportamiento del modelo planteado.

Se asume un flujo de agua subterránea en un Medio Poroso Equivalente [10, 13, 17], debido a la escala macroscópica de estudio.

En base a los objetivos de este estudio (véase apartado 1.2), se asume un modelo en régimen de flujo estacionario como primera aproximación general válida [13].

El potencial hidráulico en las condiciones de contorno tipo 1, el caudal que extrae la mina y los resultados en términos de piezometrías y caudales representan valores promedio en el tiempo.

Se establece como simplificación un modelo bidimensional debido a que la extensión horizontal del dominio (304 km²) es mucho mayor que la profundidad (500 m) y porque las formaciones geológicas presentan propiedades hidráulicas que permiten simular solamente la formación en la que se encuentra la mina. La formación geológica considerada se asume homogénea en la vertical a la escala del estudio.

Al presentar homogeneidad vertical y un dominio de gran extensión horizontal se puede asumir que un modelo en dos dimensiones puede describir los procesos principales que controlan el flujo de agua subterránea cuya componente principal es horizontal [13].

Se asume que el flujo de agua subterránea es a través de una formación geológica no confinada, justificado por las mediciones de niveles piezométricos disponibles [5].

Se asume validez de la ley de Darcy en todo el dominio del modelo con un flujo de agua monofásico de densidad y viscosidad constante [8].

El sistema de drenaje del proyecto minero presenta más de un conducto para transportar el agua que extrae hacia la superficie (véase apartado 3.5). Se agrupan todas las extracciones de agua en un solo punto de bombeo considerando que es suficientemente representativo para evaluar el comportamiento general de la zona de acuerdo al propósito y la escala del estudio.

Se asume un medio poroso isótropo con una distribución horizontal de parámetros hidrogeológicos heterogénea asociada al tipo de roca, la cantidad de fracturas y su distribución espacial. Esta distribución se basa en los datos de referencias bibliográficas, debido a que no se cuenta con datos de conductividad hidráulica medidos en terreno [10].

4.2 DOMINIO ESPACIAL Y CONDICIONES DE CONTORNO

Los límites del dominio espacial del modelo y las condiciones de contorno que se asumen en estos límites, se definen en función del conocimiento geológico e hidrogeológico de la zona de estudio.

Se considera la superficie topográfica como límite superior del dominio y el límite inferior del dominio se establece en base a la profundidad de la formación geológica Augusta Victoria. Este contacto litológico se encuentra a 500 m de la superficie a una cota de 1400 m.s.n.m. [22].

El espesor del dominio se basa en la profundidad que alcanza la formación Augusta Victoria definido en 500 m y la superficie que abarca es de 304 km².

Se establecen tres límites que encierran el dominio del estudio y se definen como: límite Dominador (BCD), límite Buenos Aires (BCBA) y límite La Mula (BCLM).

Límite Dominador (BCD)

Este borde delimita el noroeste del dominio y está definido por la falla Dominador. Los fundamentos para elegir esta falla como límite del modelo se explican a continuación:

Falla límite entre acuíferos

Las aguas subterráneas del acuífero Pampa Buenos Aires son independientes del acuífero Rosario, es decir, no circulan de un acuífero a otro [22]. Por lo que tiene que existir un límite que separa estos dos acuíferos, límite que se deduce impermeable.

Del análisis de la geología estructural del sector se obtiene que la falla Dominador coincide con la frontera que comparten ambos acuíferos actuando como barrera sin dejar fluir las aguas de un lugar a otro.

Asumiendo que esta condición de impermeabilidad se cumple a lo largo de toda la extensión de la falla, se puede considerar como un borde del dominio de características impermeables.

Diferencias geológicas

Como muestra la Figura C- 2 la falla Dominador tiene una gran extensión a lo largo de la formación Augusta Victoria generando una discontinuidad de las formaciones geológicas. Separa las unidades del Paleoceno y las del Eoceno donde yacen las vetas de El Peñón [25].

La falla Dominador separa la formación geológica Aeropuerto, Cerro Trapecio y Quebrada Mala de la formación Augusta Victoria [20].

El perfil geológico de la Figura 8 muestra la discontinuidad de las formaciones geológicas.

El límite Dominador se considera una condición de contorno tipo 2 (en adelante denominada BCD2) de caudal nulo ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$).

Límite Buenos Aires (BCBA)

La Formación Augusta Victoria limita al sur con la formación del acuífero Pampa Buenos Aires, este límite es barrera natural impermeable entre ambas formaciones geológicas [22]. Sin embargo, debido a la intensa fracturación de la formación Augusta Victoria se produce flujo de agua a través de fracturas desde el acuífero Buenos Aires hacia la formación Augusta Victoria [22].

A lo largo del límite Buenos Aires se consideran dos zonas de comportamientos hidrogeológicos diferentes. Una zona impermeable y un sector permeable debido a la presencia de fracturas que conectan con la formación Augusta Victoria.

Se asigna una condición de contorno tipo 2 (en adelante denominada BCBA2) de caudal nulo ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$) al límite impermeable y una condición de contorno tipo 1 (en adelante denominada BCBA1) con un potencial hidráulico conocido que se ha estimado entre 1600 m y 1750 m al borde permeable.

En base a la profundidad del nivel piezométrico del acuífero Pampa Buenos Aires (55 a 75 m) y a la altura promedio de la superficie en el límite (1800 m.s.n.m.) [22].

Límite La Mula (BCLM)

Se establece como límite del dominio justificado por la existencia de un complejo de fallas llamado Complejo La Mula.

Este complejo de fallas genera una discontinuidad entre dos formaciones geológicas (véase Figura C- 4). Una perteneciente al periodo eoceno donde predominan rocas félsicas y máficas; y la otra perteneciente al paleoceno donde se encuentran flujos andesíticos, dacíticos y riolíticos [22].

Se consideran dos zonas de comportamientos hidrogeológicos diferentes a lo largo del límite La Mula. Un límite impermeable y un límite permeable que permite el flujo de agua a través de fracturas.

Al límite impermeable se le atribuye una condición de contorno tipo 2 (en adelante denominada BCLM2) de caudal nulo ($Q= 0 \text{ m}^3/\text{d}$) y al límite con presencia de fracturas se asigna una condición de contorno tipo 1 (en adelante denominada BCLM1) con un potencial hidráulico que varía entre 1400 m y 1900 m, rango estimado a partir de la profundidad del dominio (500 m) y la cota promedio en la superficie del límite (1900 m.s.n.m.).

La Figura 14 muestra los tres límites definidos en el dominio.

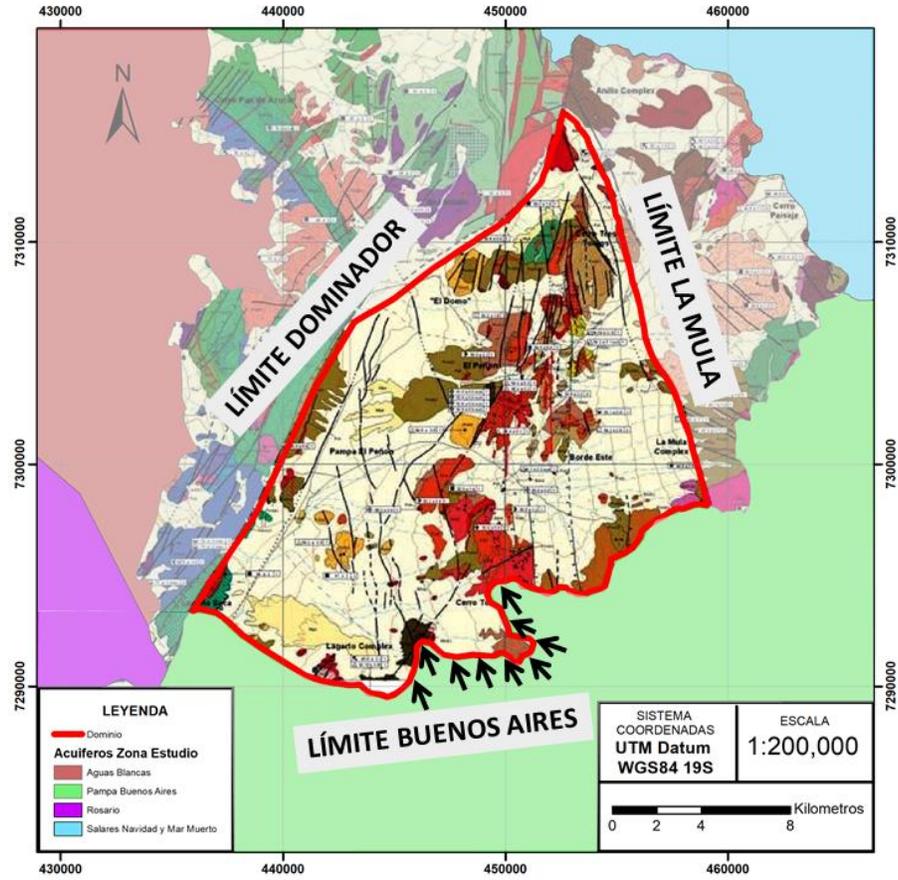


Figura 14: dominio zona de estudio

4.3 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Sobre la base de información geológica (estructural y litológica) tanto superficial como subterránea y las propiedades hidrogeológicas presentes en el dominio se definen las Unidades Hidrogeológicas.

La distribución de valores de los parámetros hidrogeológicos que describen las propiedades de las Unidades Hidrogeológicas definidas se realiza en base a información bibliográfica dado que no se cuenta con datos de campo.

Se reconocen tres Unidades Hidrogeológicas en el área de estudio:

Unidad Hidrogeológica 1 (UH1)

La extensión territorial que abarca es de 113 km² limitando al oeste con la falla Dominador, y al este con el complejo de fallas La Mula. La ubicación se puede ver en la Figura 15.

La potencia de esta Unidad Hidrogeológica es de 500 m al igual que la potencial de la formación Augusta Victoria.

Agrupar los depósitos aluviales del plioceno al cuaternario, gravas de atacama e intrusiones volcánicas pertenecientes al paleoceno superior. Las unidades geológicas estratificadas están compuestas por rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas, afloramientos de lavas y gravas semi consolidadas [18].

La distribución de conductividad hidráulica (k) en la Unidad Hidrogeológica 1 se basa en los rangos que entrega la Tabla A- 1 para rocas ígneas volcánicas sin fracturas. Autores definen el rango de conductividad hidráulica entre 10⁻⁹ m/d y 10⁻⁵ m/d [26] (véase ANEXO A).

Sin embargo, para una estimación mesurada de la conductividad hidráulica se amplía el rango a 10⁻⁹ m/d y 10⁻³ m/d, debido a que se desconoce si las rocas ígneas volcánicas de UH1 presentan fracturas, lo que generaría un aumento en la conductividad promedio.

Unidad Hidrogeológica 2 (UH2)

Esta Unidad Hidrogeológica comparte todos sus límites con la UH1 excepto al sur donde limita con el acuífero Pampa Buenos Aires. La extensión de UH2 se muestra en la Figura 15.

La potencia estimada para esta Unidad es 500 m debido a la profundidad de la formación Augusta Victoria abarcando una extensión territorial de 178 km².

Agrupar las formaciones geológicas pertenecientes al complejo ígneo (Dacitas Dominador y Riolitas Peñón) perteneciente al paleoceno superior. Contiene unidades volcánicas y subvolcánicas que a su vez contienen lavas dacíticas, flujos de andesita-ignimbritas riódacíticas, brechas volcanoclásticas, riolitas tardías e intrusiones hipabisales [21].

Esta Unidad Hidrogeológica presenta un entorno geológico fracturado. El flujo de agua subterránea a través del medio poroso fracturado se representa mediante un Medio Poroso Equivalente de conductividad hidráulica mayor a UH1.

La distribución de conductividad hidráulica (k) en la Unidad Hidrogeológica 2 se basa en los rangos que entrega la Tabla A- 1 para rocas ígneas volcánicas fracturadas. Se define un valor mínimo de conductividad hidráulica de 10^{-5} m/d y un valor máximo de 25 m/d.

Los rangos de conductividad hidráulica definidos para rocas ígneas fracturadas varían dependiendo del autor. Para una estimación medida de conductividad hidráulica se elige la mayor y la menor conductividad que establecen los autores [26] (véase ANEXO A).

Unidad Hidrogeológica 3 (UH3)

Esta Unidad Hidrogeológica está contenida dentro de UH2 como muestra la Figura 15 y presenta una extensión territorial aproximada de 13 km². Está formada por las mismas formaciones geológicas de UH2 donde predominan tobas litocristalinas, dacitas y riolitas bandeadas.

La totalidad de las labores subterráneas de la mina están contenidas en UH3 y debido al efecto del desarrollo minero subterráneo, se asocia una conductividad hidráulica dos órdenes de magnitud mayor a UH2. El rango de conductividad Hidráulica asociado a UH3 varía según esta hipótesis desde 10^{-3} m/d hasta 10^2 m/d.

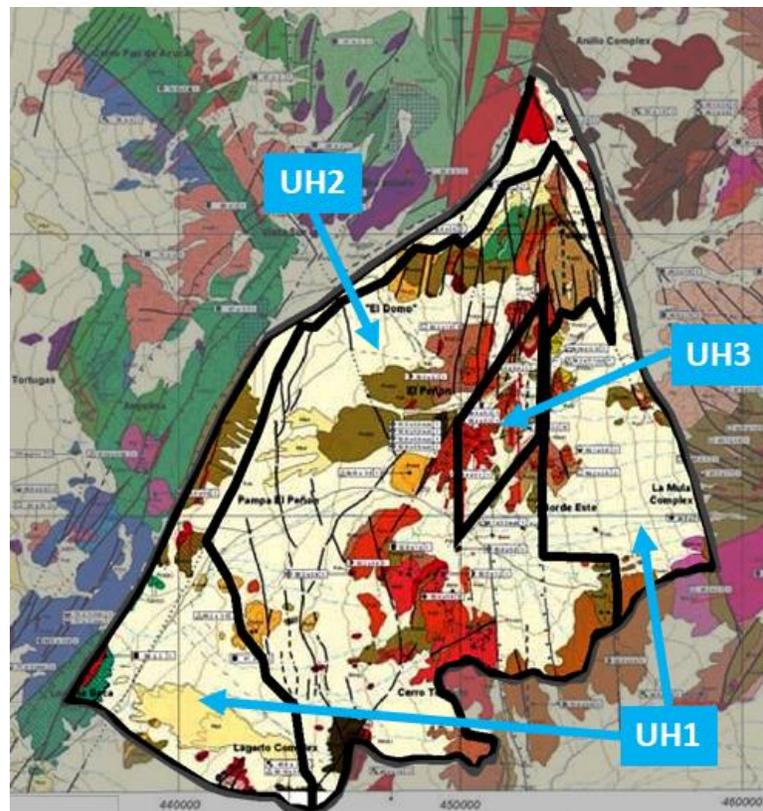


Figura 15: ubicación Unidades Hidrogeológicas

La representación espacial simplificada de las Unidades Hidrogeológicas, dominio y condiciones de contorno del modelo conceptual se muestran en la Figura 16.

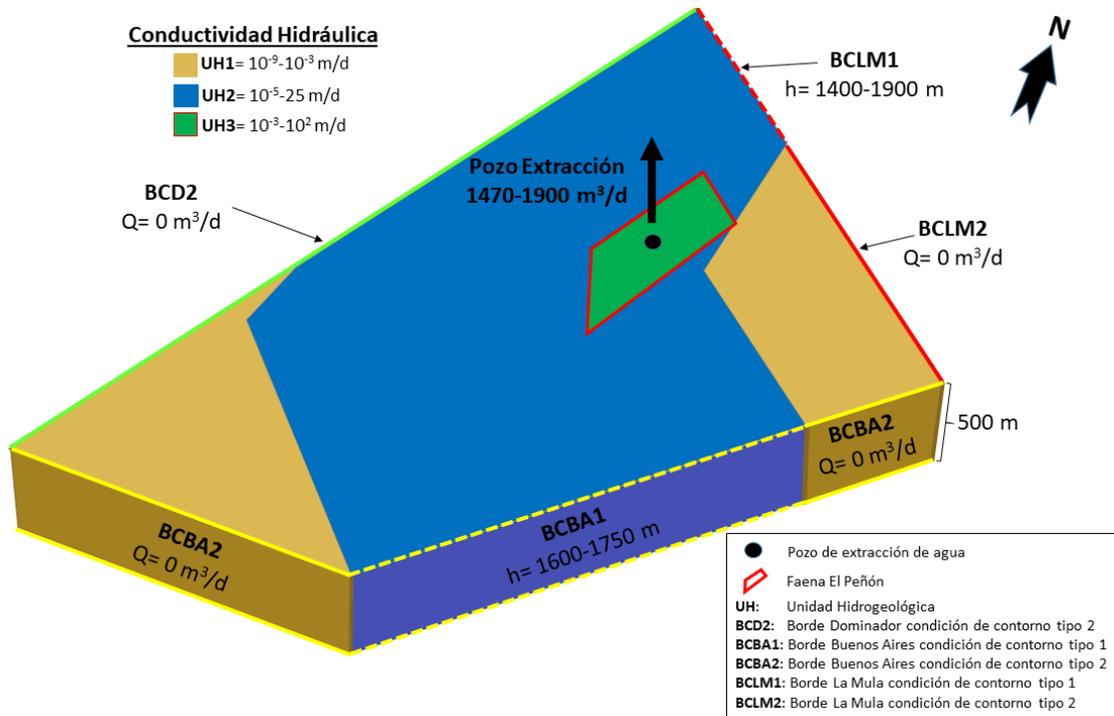


Figura 16: representación gráfica del modelo conceptual (vista isométrica)

Cabe destacar que la figura anterior muestra una representación en tres dimensiones del modelo conceptual pero solo es ilustrativo debido a que la homogeneidad atribuida al dominio permite su simplificación a un modelo 2D.

4.4 ELEMENTOS DEL BALANCE HÍDRICO

El modelo presenta un flujo de agua en régimen estacionario. Las recargas y las descargas en este tipo de régimen de flujo son iguales y el nivel piezométrico en el sistema no varía con el tiempo. Se consideran los siguientes elementos en el balance de masa del sistema.

Precipitación

Las precipitaciones no representan un sistema de recarga directo ya que la evapotranspiración del lugar es considerablemente mayor. Los 30 mm/año que precipitan, se evapotranspiran, por lo tanto, la cantidad de agua que se infiltra es nula (véase apartado 3.4).

Escurrentía superficial

La escurrentía del lugar no representa un factor de recarga debido a la baja precipitación y la alta evapotranspiración que presenta la zona. No existen aguas superficiales como ríos o canales que puedan significar algún aporte en el balance hídrico subterráneo.

Drenaje en la mina

La extracción de agua de las labores subterráneas a través del drenaje hacia la superficie se considera una salida o descarga en el balance hídrico.

La faena El Peñón cuenta con un sistema de drenaje que extrae el agua infiltrada en las labores subterráneas. El caudal que extrae varía entre 1470 m³/d y 1900 m³/d [24].

El flujo de agua subterránea se simula en régimen estacionario por lo que se utiliza el promedio del rango dado.

Al pozo de bombeo se le atribuye una condición de contorno tipo 2 con un caudal de extracción de $Q= 1685 \text{ m}^3/\text{d}$ y se ubica en el centro del proyecto minero.

Flujo de agua subterránea en los límites del dominio

El principal elemento de entrada de agua al sistema es el caudal subterráneo que proviene del acuífero Pampa Buenos Aires. La recarga se produce en la parte sur del dominio, en la intersección de la formación del acuífero Pampa Buenos Aires y la Formación Augusta Victoria.

La estimación del caudal de agua que aporta el límite Buenos Aires (sector sur) y el límite La Mula (sector norte) es parte de los objetivos del estudio.

La Figura 17 muestra los elementos del balance hídrico.

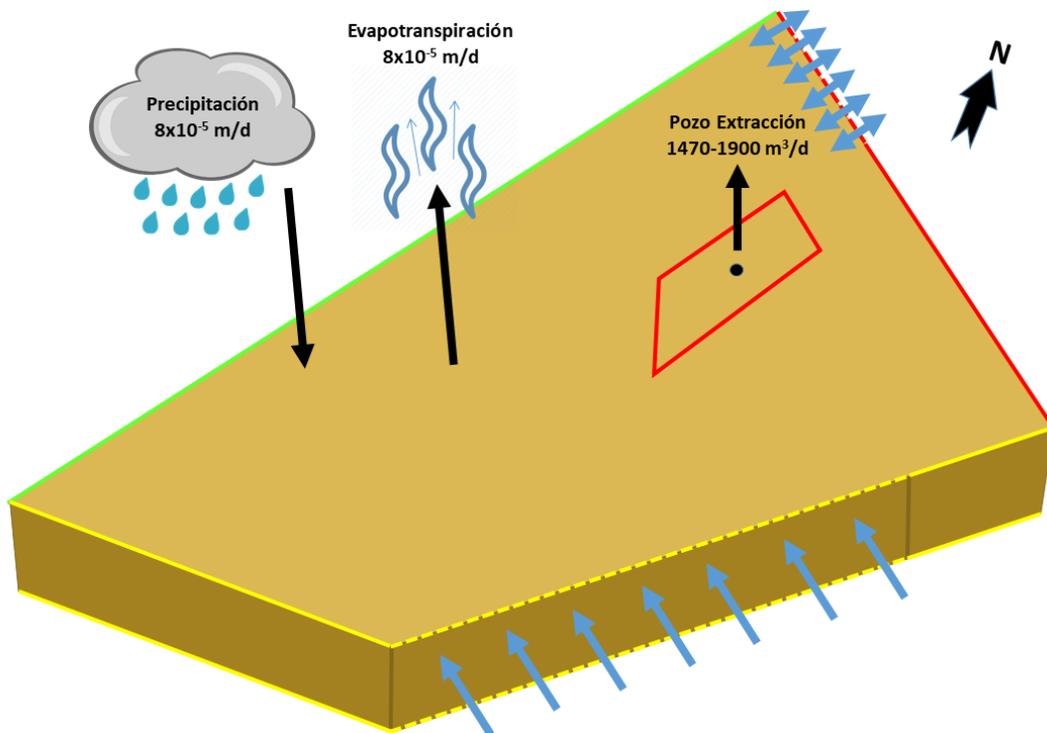


Figura 17: elementos balance hídrico

En base al modelo conceptual planteado se implementan los modelos numéricos que se desarrollan a continuación.

5 MODELOS NUMÉRICOS

5.1 DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE MODELOS

La metodología general implementada implica utilizar dos aplicaciones informáticas, ArcGIS que se utiliza para procesar la información espacial georreferenciada del modelo conceptual; y FEFLOW, un código de simulación de aguas para modelar flujos subterráneos (apartado 2.2.3).

A continuación, se discretiza el dominio incluyendo, límites entre UH y la ubicación del pozo de extracción.

Posteriormente se define el tipo de proyección (horizontal), flujo en medio saturado, flujo a través de un acuífero no confinado, régimen de flujo estacionario.

Después se contempla la asignación de las condiciones de contorno y la distribución de los parámetros hidrogeológicos.

En este caso no es posible el procedimiento habitual de calibrar un único modelo debido a la falta de datos y a las incertidumbres del modelo conceptual. Por ello en base a las capacidades interpretativas que brindan los modelos de simulación y a los objetivos del estudio se generan series de modelos con asignación condiciones de contorno y distribuciones de parámetros, para evaluar diferentes comportamientos, efecto de los elementos conceptuales importantes como es el drenaje en la mina y buscar una interpretación coherente de los datos a partir de las simulaciones.

Por último, se ejecutan las diferentes series de modelos configurados para la obtención y posterior análisis de los resultados de niveles piezométricos, caudales y direcciones de flujo en el dominio de simulación.

La Figura 18 muestra gráficamente la metodología de trabajo.

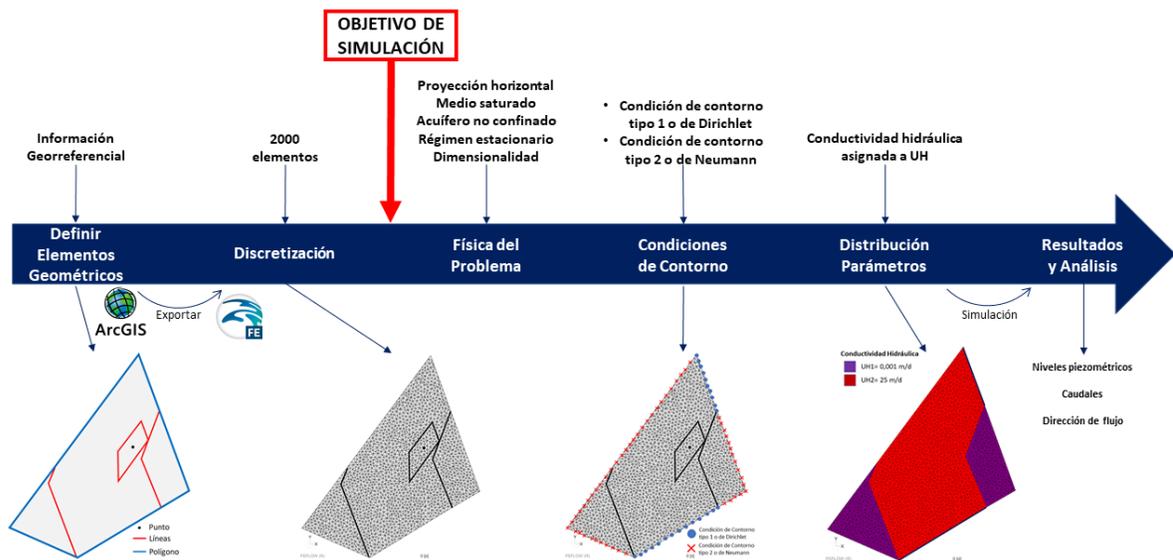


Figura 18: metodología modelos numéricos

A continuación, se describe cada etapa de la metodología para la implementación de modelos numéricos en el caso de estudio.

Etapa 1 – Definir elementos geométricos

Los principales datos utilizados se obtienen de archivos *shapefile* (.shp) de acuíferos y de imágenes (.png) de la geología del distrito El Peñón y la Formación Augusta Victoria (véase ANEXO B).

Se definen las UH y el contorno del dominio con la información anterior para crear los elementos geométricos. Se crea un polígono como contorno del dominio (en ArcGis como *polygon*) y se crean líneas como los límites de las UH (en ArcGis como *polyline*) y puntos para representar el bombeo en la mina como muestra la Figura 20(a).

Los elementos geométricos (dominio, límites y Unidades Hidrogeológicas) se simplifican como muestra la Figura 19 para disminuir los requerimientos del simulador y permitir el uso de licencias educativas de FEFLOW (limitadas en cuanto al número total de elementos del generador de mallas).

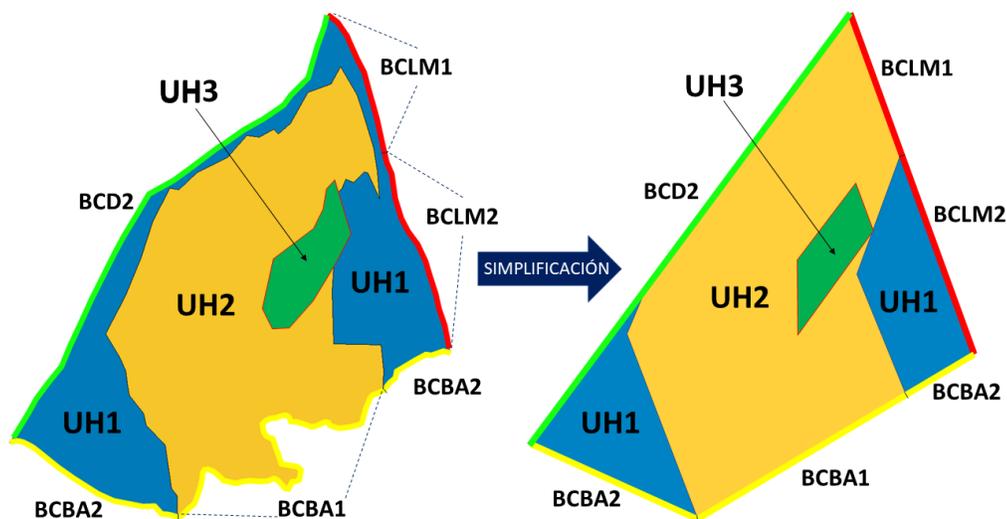


Figura 19: simplificación espacial del dominio y Unidades Hidrogeológicas

Esta etapa finaliza exportando los elementos creados a FEFLOW.

Etapa 2 – Discretización

El algoritmo utilizado para generar la malla es *triangle*. La forma de los elementos generados por este algoritmo son triángulos. Se generan 3105 elementos y 1615 nodos.

Se implementa un modelo numérico en dos dimensiones por lo que solo se discretiza horizontalmente.

La discretización se muestra en la Figura 20(b).

Etapa 3 – Física del problema

Las etapas anteriores son independientes del objetivo propuesto para el modelo numérico y transversales para todas las series de simulación.

Las condiciones aplicadas para definir el comportamiento hidrogeológico son (en FEFLOW como *problems settings*): una proyección horizontal, flujo en medio saturado, flujo a través de una formación geológica no confinada, la ecuación general de flujo de agua subterránea en medio poroso y un régimen de flujo estacionario.

La dimensionalidad del problema también se considera parte de esta etapa, estableciendo un modelo numérico en dos dimensiones.

Etapa 4 – Condiciones de contorno:

Se implementan dos tipos de condiciones de contorno (véase apartado 2.2.3): condición de contorno tipo 1 o de Dirichlet y condición de contorno tipo 2 o de Neumann.

La condición tipo 1 especifica un potencial hidráulico en el borde. Los bordes BCBA1 y BCLM1 presentan esta condición. La condición tipo 2 especifica un flujo nulo para todos los bordes (BCD, BCBA2 Y BCLM2) excepto para la estación de bombeo en la mina. La Figura 20(c) muestra gráficamente lo anterior.

Etapa 5 – Distribución de parámetros

El parámetro hidrogeológico utilizado para los modelos es la conductividad hidráulica.

Se dispone solamente de rangos de valores en función de información bibliográfica y las combinaciones de valores posibles para las UH serán evaluadas en cada serie de simulación.

La visualización de la distribución de parámetros se muestra en la Figura 20(d).

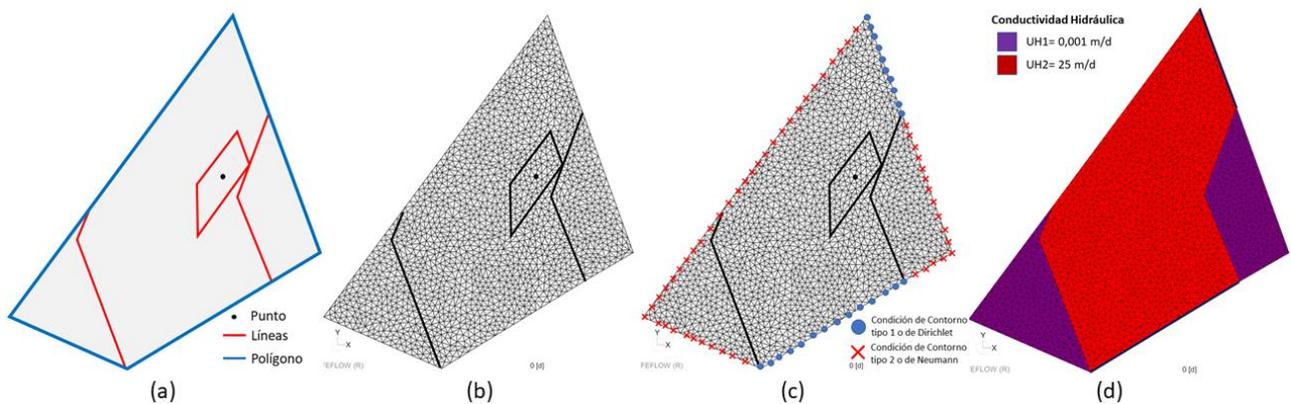


Figura 20: visualización proceso modelo numérico

Definidas todas las etapas anteriores se ejecuta la simulación.

Los resultados se representan a través de gráficos, imágenes, tablas de información.

5.2 SERIES DE SIMULACIÓN

Cada serie de simulación corresponde a un conjunto de simulaciones con un objetivo en común.

El esquema de la Figura 21 muestra la información sobre cada simulación, serie y modelo numérico realizado.

Se realizan 95 simulaciones agrupadas en 6 series de simulación que a su vez se clasifican en modelos homogéneos y heterogéneos.

Los **modelos de simulación homogéneos** tienen por objetivo evaluar los posibles comportamientos del sistema y la influencia que tiene la extracción de agua en la mina. Se plantean dos escenarios: la serie 1 no considera el pozo de bombeo y busca acotar rangos de valores de potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula y la serie 2 considera el pozo de bombeo y busca acotar los valores de conductividades hidráulicas del dominio y acotar el potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula. Comparar ambas series permitirá evaluar el efecto del pozo en el entorno hidrogeológico.

Los **modelos de simulación heterogéneos** tienen como objetivo que evaluar los distintos comportamientos que presenta el sistema debido a las posibles heterogeneidades en la conductividad hidráulica en el dominio. Se realizan cuatro series de simulación para acotar los rangos de la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y Unidad Hidrogeológica 2, acotar posibles rangos del potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula considerando el pozo de bombeo en la mina. La serie de simulación 6 busca evaluar el comportamiento del sistema para una conductividad heterogénea en el dominio sin considerar el efecto del pozo de bombeo.

La Figura 21 muestra un resumen de las series de simulación definidas para testar la influencia en los modelos de los elementos conceptuales que se considera gobiernan el comportamiento del sistema.

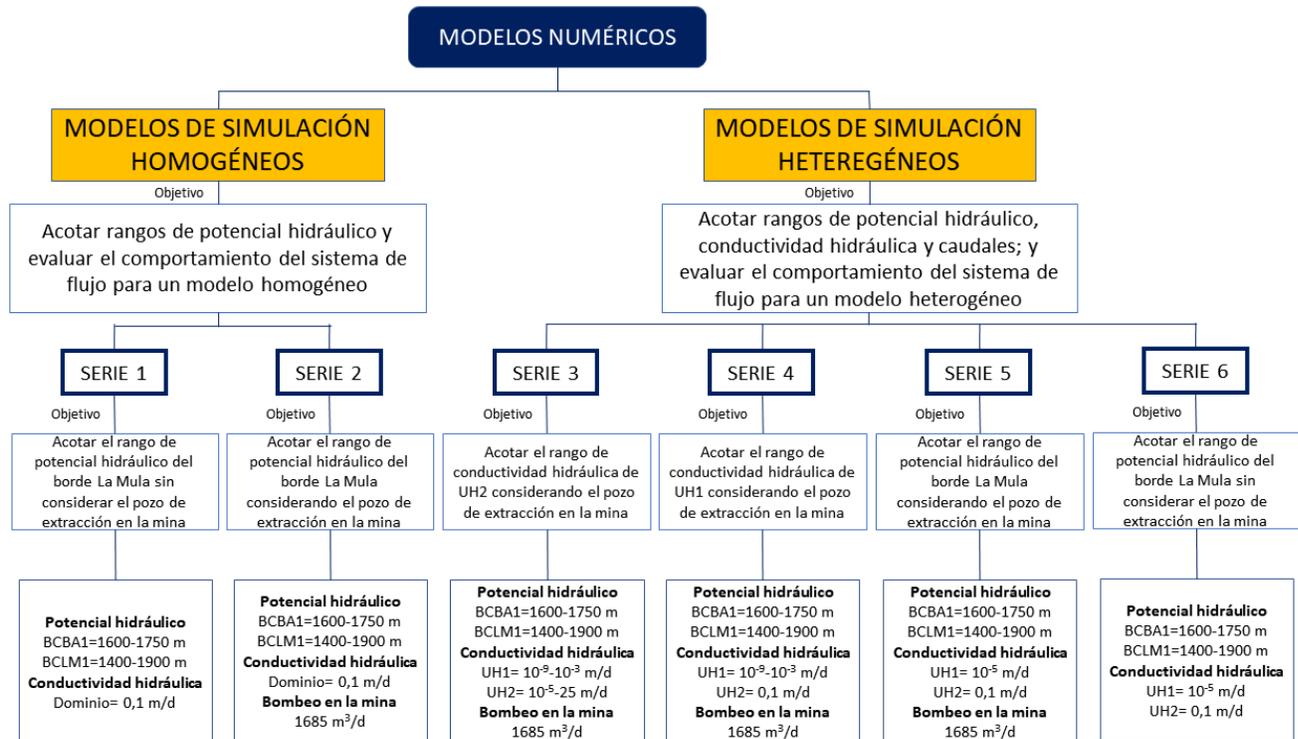


Figura 21: esquema series de simulación de modelos numéricos

5.3 MODELOS DE SIMULACIÓN HOMOGÉNEOS

Estas series de modelos consideran una conductividad hidráulica homogénea y constante en el dominio. Se variarán los niveles piezométricos de las condiciones de contorno tipo 1 y el caudal de bombeo en la mina.

Los objetivos de este modelo son:

1. Acotar rangos posibles de potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula que pueden ser coherentes con los datos disponibles.
2. Evaluar los diferentes comportamientos que podría tener el sistema de flujo ante la incertidumbre en la información disponible en los niveles piezométricos.
3. Evaluar el efecto del caudal drenado en la mina para los diferentes comportamientos posibles del sistema.

5.3.1 SERIE 1 – POTENCIAL HIDRÁULICO BORDE LA MULA SIN BOMBEO EN LA MINA

Los objetivos de esta serie de simulación son evaluar el rango de valores de potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula, definir los comportamientos posibles del sistema y acotar los valores compatibles con el nivel piezométrico observado en la mina de 1600 m.

1. Procedimiento

Manteniendo constante la conductividad hidráulica del dominio se varía el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula.

2. Descripción

Condiciones de contorno:

Rango de potencial hidráulico de borde Buenos Aires 1600 m a 1750 m.
Rango de potencial hidráulico de BCLM1 1400 m a 1900 m.

Distribución de parámetros:

Conductividad hidráulica del dominio se fija en 0,001 m/d.

La Figura 22 muestra la distribución espacial de los valores de condiciones de contorno y conductividad hidráulica que se evaluarán en esta serie.

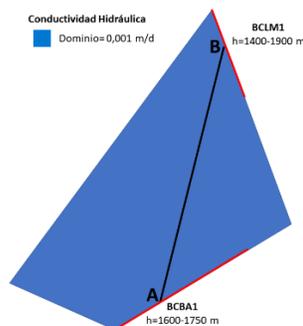


Figura 22: información de entrada serie 1

El detalle de los valores de las condiciones de contorno y distribución de parámetros de cada simulación se detalla en la Tabla F- 1 del ANEXO F.

Del análisis de 24 simulaciones realizadas en esta serie se obtienen los siguientes resultados.

3. Análisis de resultados

La distribución de *niveles piezométricos* se mantiene constante al variar la conductividad hidráulica del dominio y solo varía dependiendo del potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula. Solo se acota el rango de los potenciales hidráulicos de los bordes.

Se presentan tres posibles comportamientos del sistema: potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, potencial hidráulico igual en ambos bordes y potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$.

El escenario en que el potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, independiente de la conductividad hidráulica del dominio y el potencial en los bordes, obtiene niveles piezométricos en la mina menores a 1600 m. Se descarta como posible comportamiento.

El escenario en que el potencial hidráulico de $BCBA1 = BCLM1 = 1600$ m entrega como resultado un nivel en la mina de 1600 m, sin embargo, se descarta debido a que no existiría flujo de agua en el sistema, situación que en la realidad no sucede.

El escenario en que el potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$ entrega resultados que cumplen con el nivel establecido como referencia en la mina.

La Figura 23 muestra la distribución piezométrica de tres escenarios que entregan como resultado un nivel piezométrico en la mina de 1600 m para el comportamiento del sistema en que el potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$.

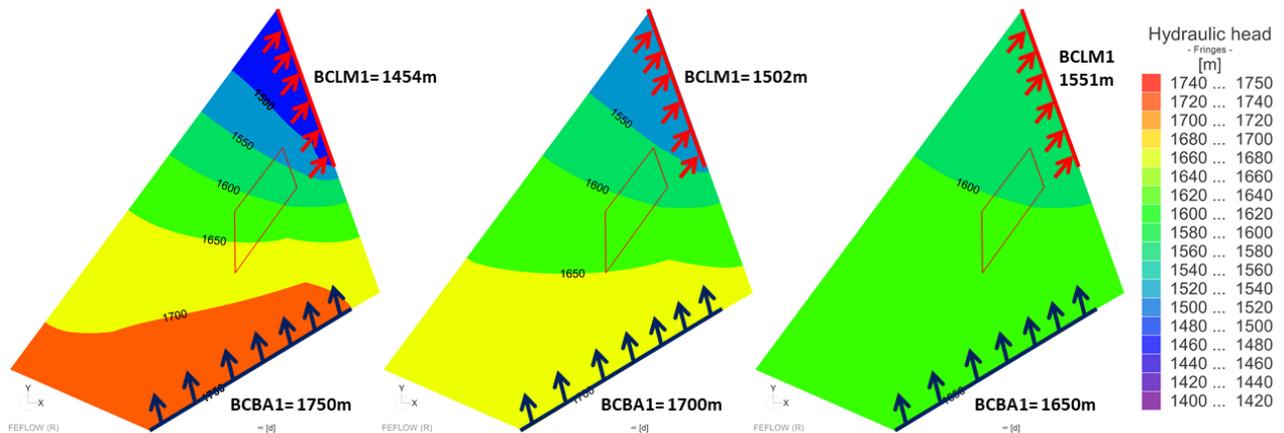


Figura 23: distribución piezométrica serie 1

Los resultados de la distribución de niveles piezométricos en la mina para cada simulación se muestra en la Tabla G- 1 del ANEXO G.

Para acotar el rango de potencial hidráulico en el borde La Mula se realizan simulaciones fijando el potencial hidráulico en el borde Buenos Aires y variando el potencial hidráulico del borde La Mula en un rango de 1400 m a 1900 m.

El Gráfico 2 muestra la relación que presenta el nivel de la mina y el potencial hidráulico del borde La Mula. El potencial del borde Buenos Aires se fija en 1750 m, 1700 m, 1650 m y 1600 m.

El gráfico muestra que simulaciones permiten obtener como resultado un nivel de 1600 m en la mina:

- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1750 m (línea azul), el potencial en el borde La Mula debe ser 1454 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1700 m (línea gris), el potencial en el borde La Mula debe ser 1502 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1650 m (línea amarilla), el potencial en el borde La Mula debe ser 1551 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1600 m (línea naranja), el potencial en el borde La Mula debe ser 1599 m.

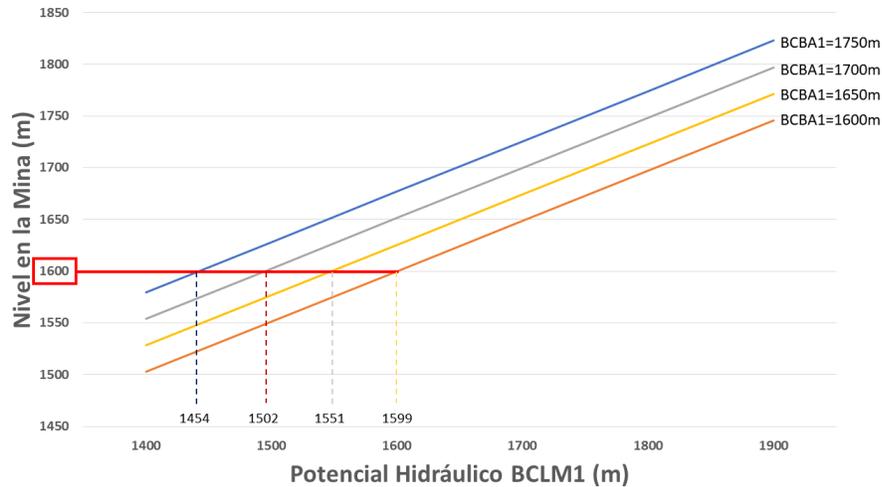


Gráfico 2: potencial hidráulico BCLM1 serie 1

Para acotar el rango de potencial hidráulico en el borde Buenos Aires se realizan simulaciones fijando el potencial hidráulico en el borde La Mula y variando el potencial hidráulico del borde Buenos Aires en un rango de 1600 m a 1750 m.

El Gráfico 3 muestra la relación que presenta el nivel de la mina y el potencial hidráulico del borde Buenos Aires. El potencial del borde La Mula se fija en 1400, 1500, 1600, 1700, 1800 y 1900 m.

Para obtener como resultado un nivel de 1600 m en la mina:

- El potencial hidráulico del borde La Mula de 1600 m (línea azul), el potencial en el borde Buenos Aires debe ser 1600 m.
- El potencial hidráulico del borde La Mula de 1500 m (línea verde), el potencial en el borde Buenos Aires debe ser 1692 m.
- El potencial hidráulico del borde La Mula de 1500 y 1400 m (entre línea verde y azul), el potencial en el borde Buenos Aires debe ser 1750 m.

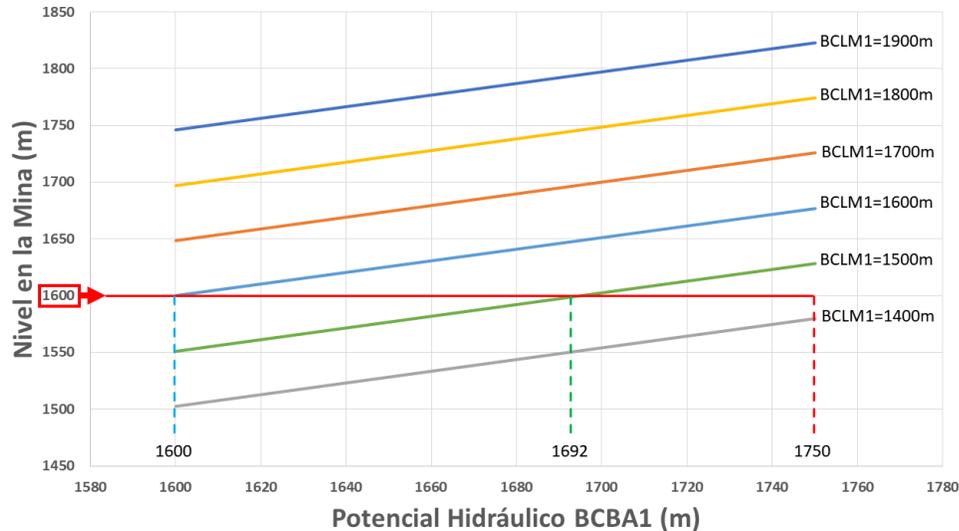


Gráfico 3: potencial hidráulico BCBA1 serie 1

En conclusión, para cualquier conductividad hidráulica en el dominio homogéneo, sin considerar la influencia que tiene la extracción de agua en la mina, el rango de potencial hidráulico en el **borde Buenos Aires no es posible acotarlo y varía entre 1600 m y 1750 m**; y el rango de potencial hidráulico en el **borde La Mula varía entre 1454 m y 1599 m**. Para estas condiciones se obtiene un nivel en la mina de 1600 m.

A continuación, se realiza la segunda serie de simulación que considera el pozo de bombeo en la mina.

5.3.2 SERIE 2 – POTENCIAL HIDRÁULICO BORDE LA MULA CON BOMBEO EN LA MINA

Los objetivos de esta serie de simulación es evaluar el efecto que genera el pozo de bombeo de la mina en la distribución de niveles piezométricos, evaluar los comportamientos del sistema frente a este elemento y acotar los valores compatibles con el nivel piezométrico observado en la mina de 1600 m. Para evaluar el efecto del pozo se comparan los resultados de esta serie con los de la serie 1.

1. Procedimiento

Manteniendo fijos los potenciales hidráulicos del borde Buenos Aires y La Mula se varía la conductividad hidráulica del dominio. Luego de estimar la conductividad, esta se mantiene constante y se varía el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula.

2. Descripción

Condiciones de contorno:

Rango de potencial hidráulico del borde Buenos Aires 1600 m a 1750 m (resultados de la serie 1).

Rango de potencial hidráulico del borde La Mula 1454 m a 1599 m (resultados de la serie 1).

Caudal de bombeo en mina $Q = 1685 \text{ m}^3/\text{d}$.

Distribución de parámetros:

Rango de conductividad hidráulica del dominio 10^{-9} m/d a 25 m/d .

La Figura 24 muestra la distribución espacial de los valores de condiciones de contorno y conductividad hidráulica que se evaluarán en esta serie.

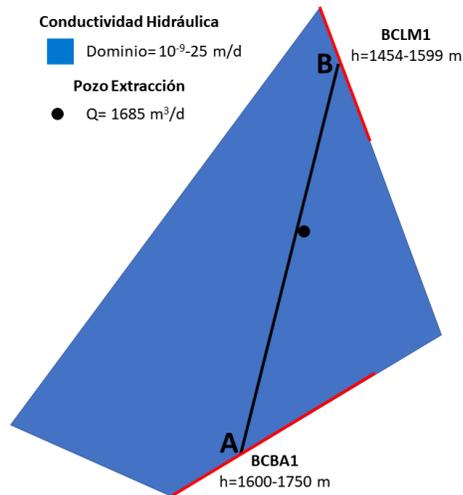


Figura 24: información de entrada serie 2

El detalle de los valores de las condiciones de contorno y distribución de parámetros de cada simulación se detalla en la Tabla F- 2 del ANEXO F.

Del análisis de 12 simulaciones se obtienen los siguientes resultados.

3. Análisis de resultados

La distribución de niveles piezométricos cambia al variar la conductividad hidráulica del dominio y al variar el potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula. Se acota la conductividad y luego los potenciales hidráulicos.

Se evalúan tres conductividades hidráulicas para el dominio ($0,01 \text{ m/d}$, $0,1 \text{ m/d}$ y 1 m/d) ya que son las que entregan resultados más cercanos a los fijados como referencia (nivel en la mina de 1600 m y caudal de entrada a la mina de $16850 \text{ m}^3/\text{d}$).

El Gráfico 4 compara la conductividad del dominio con el nivel piezométrico en la mina para distintos potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula. Se utiliza la diferencia de potencial entre el potencial de ambos bordes (Δh). El gráfico muestra que para una conductividad hidráulica de $0,01 \text{ m/d}$ el nivel piezométrico en la mina es inferior a 1600 m por lo que se descarta esa conductividad.

El Gráfico 5 compara la conductividad del dominio con el caudal de entrada a la mina para distintos potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula. Se utiliza la diferencia de

potencial entre el potencial de ambos bordes (Δh). Del gráfico se obtiene que para una conductividad hidráulica de 1 m/d el caudal de entrada es muy superior a 16850 m³/d por lo que se descarta esa conductividad.

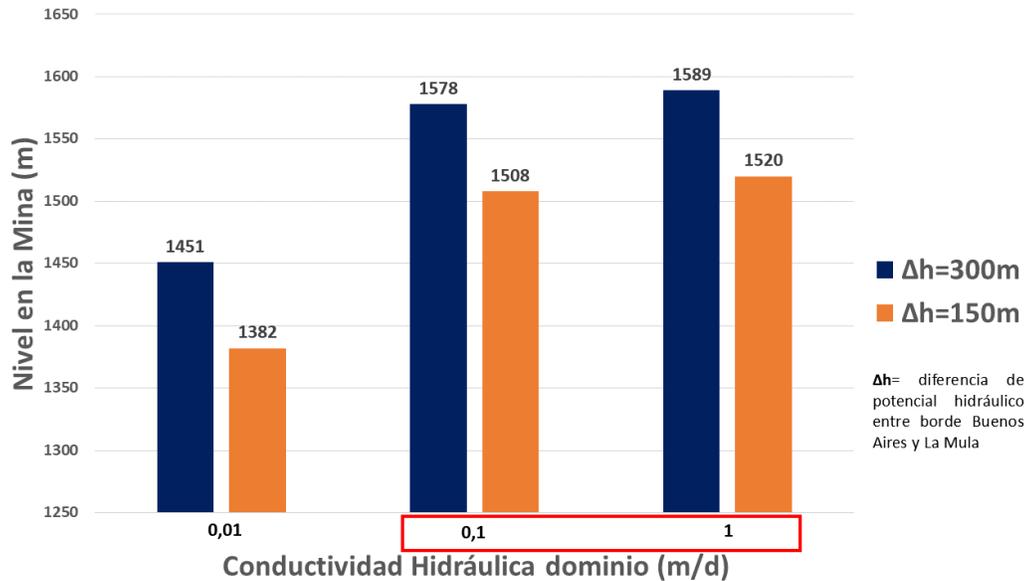


Gráfico 4: serie 2. Conductividad hidráulica del dominio según nivel en la mina

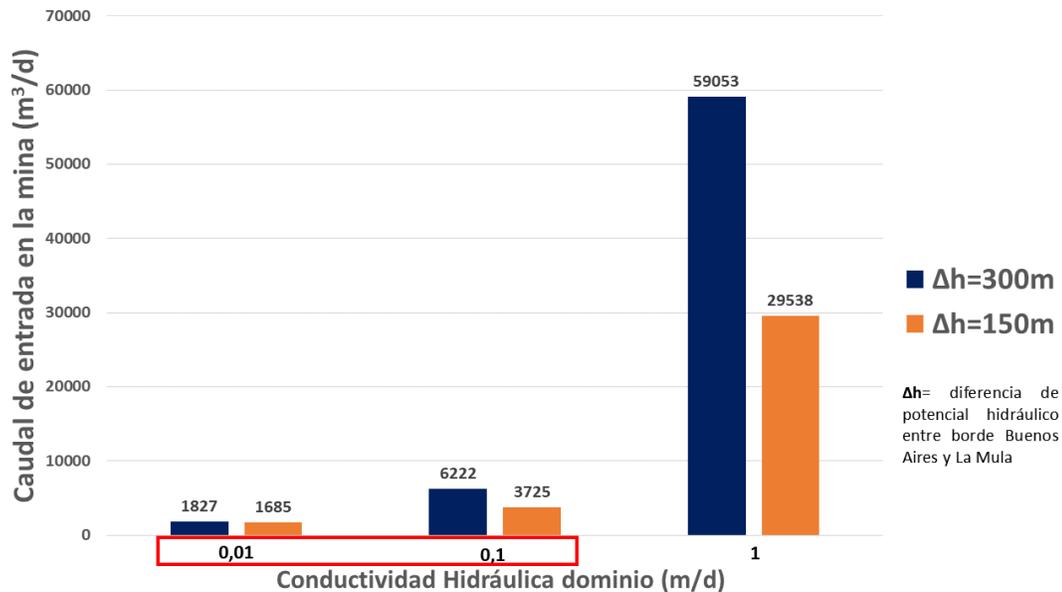


Gráfico 5: serie 2. Conductividad hidráulica del dominio según caudal de entrada en la mina

En conclusión, la conductividad hidráulica del dominio homogéneo se estima en 0,1 m/d independiente del potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula.

Obtenida la conductividad, se acotan los rangos posibles de potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula.

Se presentan tres posibles comportamientos del sistema: potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, potencial hidráulico igual en ambos bordes y potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$. Los tres comportamientos presentan resultados que cumplen con las condiciones impuestas.

La distribución de niveles piezométricos en la mina para cada simulación se muestra en la Tabla G- 2 del ANEXO G.

Para acotar el rango de potencial hidráulico en el borde La Mula se realizan dos series de simulación. Cada serie fija el potencial hidráulico en el borde Buenos Aires y hace variar el potencial hidráulico del borde La Mula en un rango de 1400 m a 1630 m.

El Gráfico 6 muestra la relación entre el nivel piezométrico de la mina (conocido e igual a 1600 m) y el potencial hidráulico del borde La Mula, fijando el potencial del borde Buenos Aires en 1750 m.

El gráfico muestra que:

- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1750 m (línea azul) el potencial en el borde La Mula debe ser 1494 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1600 m (línea naranja) el potencial en el borde La Mula debe ser 1630 m.

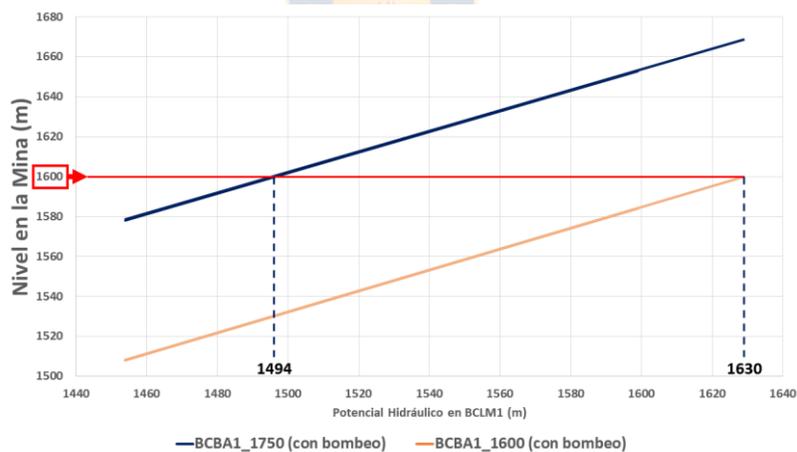


Gráfico 6: serie 2. Potencial hidráulico del borde La Mula

No es posible acotar el potencial hidráulico del borde Buenos Aires debido a que para cualquier valor de este borde existe un potencial hidráulico en el borde La Mula que tiene como resultado un nivel de 1600 m en la mina.

En conclusión, asumiendo un medio poroso de conductividad homogénea y considerando la influencia que tiene la extracción de agua en la mina, el rango de potencial hidráulico en el borde Buenos Aires puede estar entre 1600 m y 1750 m; y el rango de potencial hidráulico en el **borde La Mula varía entre 1494 m y 1630 m**. Para todas estas condiciones del sistema los modelos indican que se obtiene un nivel piezométrico en la mina de 1600 m.

5.4 MODELOS DE SIMULACIÓN HETEROGÉNEOS

Estas series de simulación consideran una conductividad hidráulica heterogénea y constante en cada Unidad Hidrogeológica. Se variarán los niveles piezométricos de las condiciones de contorno tipo 1, la conductividad hidráulica de las Unidades Hidrogeológicas y el caudal de bombeo en la mina.

Se implementan tres series de simulación. Las series de simulación buscan acotar rangos posibles de la conductividad hidráulica en la Unidad Hidrogeológica 2, la conductividad hidráulica en la Unidad Hidrogeológica 1 y potencial hidráulico del borde La Mula y borde Buenos Aires para una distribución de conductividades hidráulicas heterogéneas evaluando el efecto del pozo de bombeo en la mina.

5.4.1 SERIE 3 – CONDUCTIVIDAD UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 2

Los objetivos de esta serie de simulación son evaluar el efecto que genera la extracción de agua en la mina sobre la distribución de niveles piezométricos en la zona, definir los comportamientos posibles del sistema ante el efecto del drenaje y acotar los valores de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 compatibles con el nivel piezométrico observado en la mina de 1600 m.

1. Procedimiento

Manteniendo constante el caudal que extrae la mina se varía la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y 2; y el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula.

2. Descripción

Condiciones de contorno:

Rango de potencial hidráulico del borde Buenos Aires 1650 m a 1750 m.

Rango de potencial hidráulico del borde La Mula 1450 m a 1550 m.

Caudal de bombeo en mina $Q = 1685 \text{ m}^3/\text{d}$.

Distribución de parámetros:

Rango de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 10^{-9} m/d a $0,001 \text{ m/d}$.

Rango de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 $0,01 \text{ m/d}$ a 25 m/d .

La Figura 25 muestra la distribución espacial de los valores de las condiciones de contorno y conductividad hidráulica que se evalúan en esta serie.

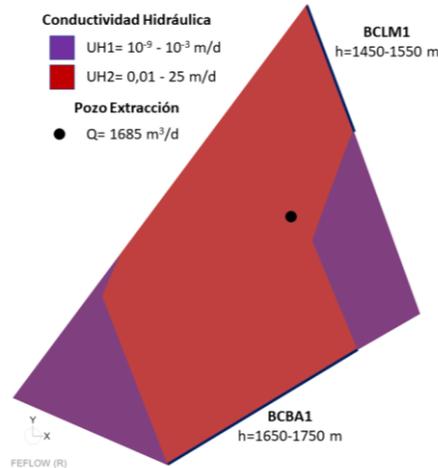


Figura 25: información de entrada serie 3

El detalle de los valores de las condiciones de contorno y distribución de parámetros de cada simulación se detalla en la Tabla F- 3 del ANEXO F.

Del análisis de 15 simulaciones se obtienen los siguientes resultados.

3. Análisis de resultados

Los resultados de la distribución de niveles piezométricos en la mina, caudal en la mina y caudal en los bordes Buenos Aires y La Mula de cada simulación se muestra en la Tabla G- 3 del ANEXO G.

Para acotar posibles rangos de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 se relaciona la conductividad con el nivel piezométrico en la mina. Después, se relaciona con el caudal de extracción en la mina. Se obtienen dos rangos diferentes pero que al intersectarlos resulta el rango definitivo para la conductividad hidráulica de UH2.

El Gráfico 7 compara el nivel en la mina con la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 para diferentes potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula. Se considera la diferencia del potencial hidráulico entre ambos bordes (Δh) debido a que esta serie de simulación busca estimar la conductividad y no el potencial en los bordes, las próximas series tienen por objetivo acotar el potencial hidráulico en los bordes.

El gráfico muestra el nivel que se obtiene como resultado en las simulaciones fijando la conductividad hidráulica de las Unidades Hidrogeológicas y variando el potencial hidráulico de los bordes. Por ejemplo, para una conductividad hidráulica de UH2= 0,1 m/d considerando una diferencia de potencial hidráulico entre los bordes Buenos Aires y La Mula de 300 m (barra azul en el gráfico) se obtiene como resultado un nivel piezométrico en la mina de 1587 m.

El Gráfico 7 muestra que para un rango de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 que fluctúe entre 0,1 m/d y 25 m/d (recuadro rojo) el nivel en la mina será de 1600 m aproximadamente. Se descarta la conductividad de 0,01 m/d ya que el nivel piezométrico en la mina que obtiene como resultado está bajo los 1600 m.

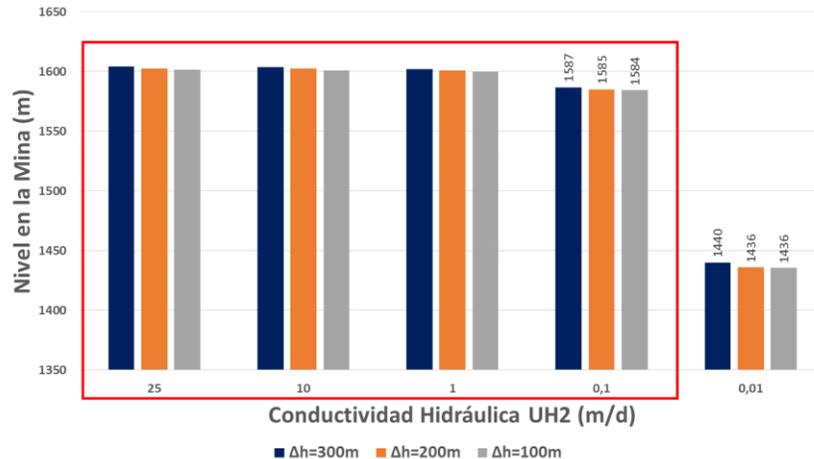


Gráfico 7: resultados serie 3. Conductividad UH2 vs nivel en la mina

El Gráfico 8 compara el caudal que se entra a la mina con la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 para diferentes potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula. Se considera la diferencia del potencial hidráulico entre ambos bordes (Δh) al igual que en el gráfico anterior.

El gráfico muestra el caudal de entrada a la mina que se obtiene como resultado en las simulaciones fijando la conductividad hidráulica de las Unidades Hidrogeológicas y variando el potencial hidráulico de los bordes. Para una conductividad hidráulica de UH2= 1 m/d considerando una diferencia de potencial hidráulico entre los bordes Buenos Aires y la Mula de 300 m (barra azul en el gráfico) se obtiene como resultado un caudal de entrada a la mina de 62650 m³/d.

El Gráfico 8 muestra que para una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 entre 1 m/d y 25 m/d el caudal de entrada a la mina presenta valores por sobre el caudal máximo establecido como referencia (16850 m³/d) descartando conductividades sobre 1 m/d.

El rango de conductividad hidráulica para la Unidad Hidrogeológica 2, considerando el caudal que entra a la mina, queda establecido según los modelos entre 0,01 m/d y 0,1 m/d.

Al intersectar ambos rangos definidos se obtiene que la **conductividad hidráulica de Unidad Hidrogeológica 2 es 0,1 m/d.**

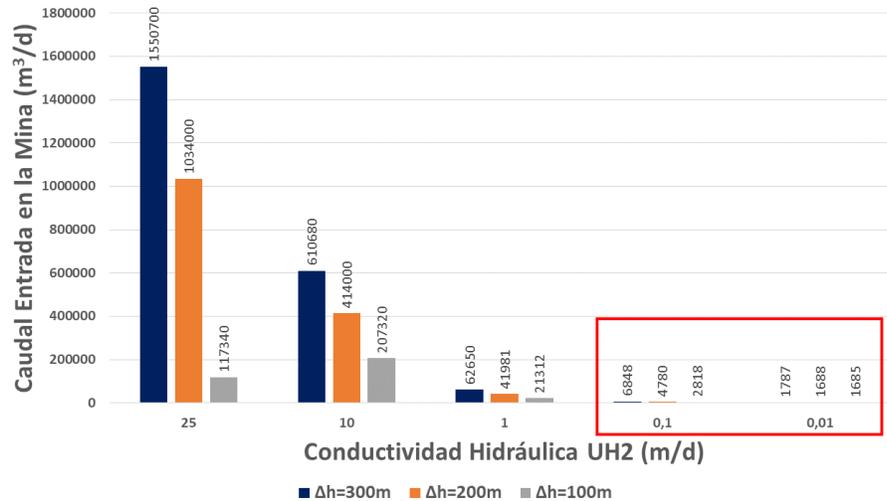


Gráfico 8: resultados serie 3. Conductividad UH2 vs caudal entrada en la mina

5.4.2 SERIE 4 – CONDUCTIVIDAD UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 1

Los objetivos de estas series de simulación son evaluar el efecto que genera la extracción de agua en la mina en la distribución de niveles piezométricos, definir los comportamientos posibles del sistema y acotar los valores de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 compatibles con el nivel piezométrico observado en la mina de 1600 m.

1. Procedimiento

Manteniendo constante el caudal que extrae la mina y la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 se varía la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula.

2. Descripción

Condiciones de contorno:

El potencial hidráulico del borde Buenos Aires se fija en 1700 m.

El potencial hidráulico del borde La Mula se fija en 100 m.

Caudal de bombeo en la mina se fija en 1685 m³/d.

Distribución de parámetros:

Rango de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 10⁻⁹ m/d a 0,001 m/d.

La conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 se fija en 0,1 m/d.

La Figura 26 muestra la distribución espacial de los valores de condiciones de contorno y conductividad hidráulica que se evaluarán en esta serie.

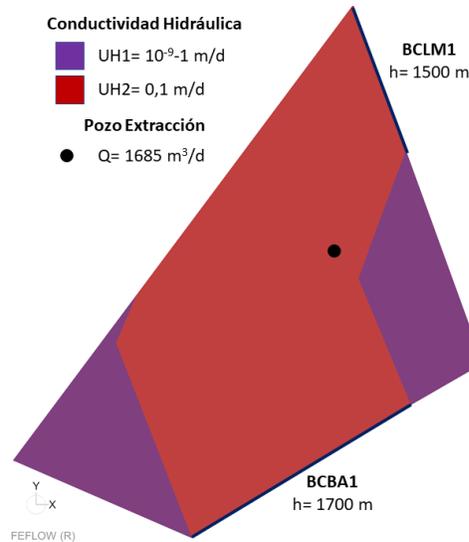


Figura 26: información de entrada serie 4

El detalle de los valores de las condiciones de contorno y distribución de parámetros de cada simulación se detalla en la Tabla F- 4 del ANEXO F.

Del análisis de 24 simulaciones se obtienen los siguientes resultados.

3. Análisis de resultados

La distribución de niveles piezométricos en la mina, caudal de entrada y salida en la mina y caudal en los bordes Buenos Aires y La Mula de cada simulación se muestra en la Tabla G- 4 del ANEXO G.

El Gráfico 9 relaciona el nivel piezométrico en la mina con la conductividad hidráulica en la Unidad Hidrogeológica 1 manteniendo constante la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2. Para una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 de 10⁻⁵ m/d y de la Unidad Hidrogeológica 2 de 0,1 m/d se obtiene como resultado un nivel en la mina de 1603 m.

Para obtener un nivel piezométrico en la mina de 1600 m considerando una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 de 0,1 m/d **el rango de conductividad de la Unidad Hidrogeológica 1 se acota a 10⁻⁹ y 10⁻⁵ m/d.**

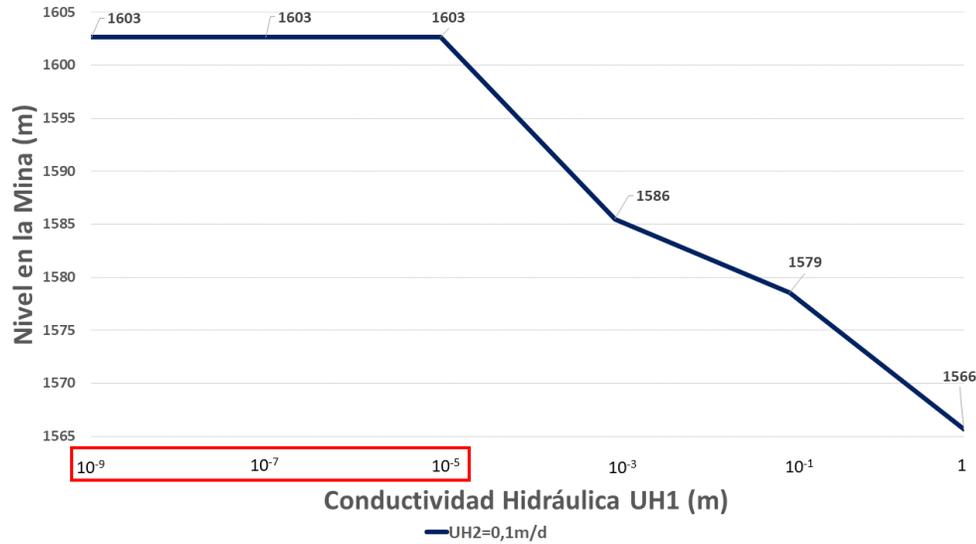


Gráfico 9: resultados serie 4

5.4.3 SERIE 5 – POTENCIAL HIDRÁULICO BORDE LA MULA SIN BOMBEO EN LA MINA

Los objetivos de estas series de simulación son definir los comportamientos posibles del sistema y acotar los valores de potencial hidráulico del borde Buenos Aires compatibles con el nivel piezométrico observado en la mina de 1600 m sin considerar el efecto que genera el pozo de bombeo de la mina.

1. Procedimiento

Manteniendo constante la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y 2 se varía el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula.

2. Descripción

Condiciones de contorno:

Rango de potencial hidráulico del borde Buenos Aires 1600 m a 1750 m.

Rango de potencial hidráulico del borde La Mula 1400 m a 1900 m.

Distribución de parámetros:

La conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 se fija en 0,00001 m/d (resultado serie 4).

La conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 se fija en 0,1 m/d (resultado serie 3).

La Figura 27 muestra la distribución espacial de los valores de condiciones de contorno y conductividad hidráulica que se evaluarán en esta serie.

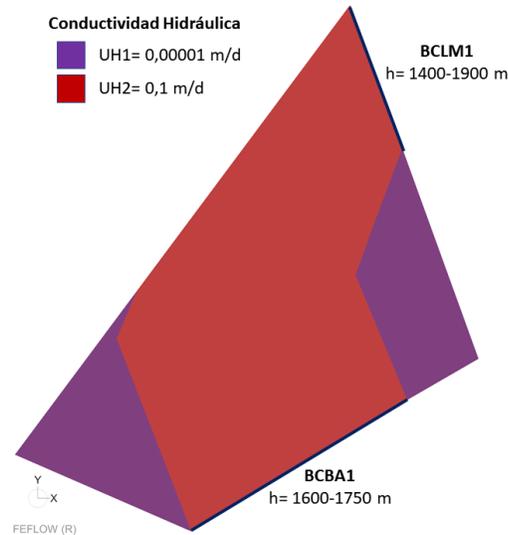


Figura 27: información de entrada serie 5

El detalle de los valores de las condiciones de contorno y distribución de parámetros de cada simulación se detalla en la Tabla F- 6 del ANEXO F.

Del análisis de 4 simulaciones se obtienen los siguientes resultados.

3. Análisis de resultados

La distribución de *niveles piezométricos* se mantiene constante al variar la conductividad hidráulica del dominio y solo varía dependiendo del potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula.

Se presentan tres posibles comportamientos del sistema: potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, potencial hidráulico igual en ambos bordes y potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$.

El escenario en que el potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, independiente de la conductividad hidráulica en las Unidades Hidrogeológicas y el potencial en los bordes, obtiene niveles piezométricos en la mina menores a 1600 m. Se descarta como posible comportamiento.

El escenario en que el potencial hidráulico de $BCBA1 = BCLM1 = 1600$ m entrega como resultado un nivel en la mina de 1600 m, sin embargo, se descarta debido a que no existiría flujo de agua en el sistema, situación que en la realidad no sucede.

El escenario en que el potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$ entrega resultados que cumplen con el nivel piezométrico de 1600 m establecido como referencia en la mina.

La distribución de niveles piezométricos en la mina, caudal de entrada y salida en la mina y caudal en los bordes Buenos Aires y La Mula de cada simulación se muestra en la Tabla G- 6 del ANEXO G.

Para acotar el rango de potencial hidráulico en el borde La Mula se realizan dos series de simulación que muestra el Gráfico 10. Cada serie fija el potencial hidráulico en el borde Buenos Aires y hace variar el potencial hidráulico del borde La Mula.

Por ejemplo, la línea azul del Gráfico 10 representa los resultados en términos de niveles piezométricos medidos en la mina de la serie en que el potencial hidráulico del borde Buenos Aires se fija en 1750 m y el potencial hidráulico del borde La Mula se hace variar en un rango de 1400 m a 1900 m.

El Gráfico 10 muestra la relación que presenta el nivel de la mina y el potencial hidráulico del borde La Mula. El potencial del borde Buenos Aires se fija en 1750 m (línea azul) y 1600 m (línea naranja).

Del análisis del gráfico se obtiene que, para alcanzar un nivel en la mina de 1600 m:

- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1750 m (línea azul), el potencial en el borde La Mula debe ser 1440 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1600 m (línea naranja), el potencial en el borde La Mula debe ser 1599 m.

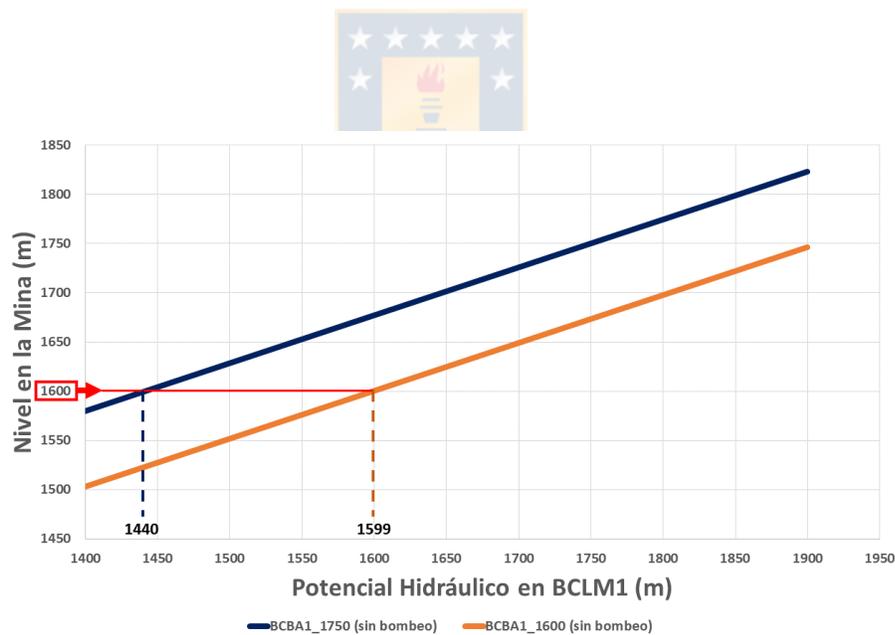


Gráfico 10: potencial hidráulico de BCLM1 serie 5

En conclusión, para una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 de 0,00001 m/d y de la Unidad Hidrogeológica 2 de 0,1 m/d **el rango de potencial hidráulico del borde La Mula se reduce de 1400-1900 m a 1440-1599 m.**

No es posible acotar el potencial hidráulico del borde Buenos Aires debido a que para cualquier valor de este borde existe un potencial hidráulico en el borde La Mula que tiene como resultado un nivel de 1600 m en la mina, al igual que en la serie 1 y la serie 2.

5.4.4 SERIE 6 – POTENCIAL HIDRÁULICO BORDE LA MULA CON BOMBEO EN LA MINA

Los objetivos de estas series de simulación son evaluar el efecto que genera la extracción de agua en la mina en la distribución de niveles piezométricos, definir los comportamientos posibles del sistema y acotar los valores de potencial hidráulico del borde Buenos Aires y La Mula compatibles con el nivel piezométrico observado en la mina de 1600 m.

1. Procedimiento

Manteniendo constante el caudal que extrae la mina, la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y 2 se varía el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula.

2. Descripción

Condiciones de contorno:

Rango de potencial hidráulico del borde Buenos Aires 1600 m a 1750 m.

Rango de potencial hidráulico del borde La Mula 1400 m a 1900 m.

Caudal de bombeo en la mina se fija en 1685 m³/d.

Distribución de parámetros:

La conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 se fija en 0,00001 m/d.

La conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 se fija en 0,1 m/d.

La Figura 28 muestra la distribución espacial de los valores de condiciones de contorno y conductividad hidráulica que se evaluarán en esta serie.

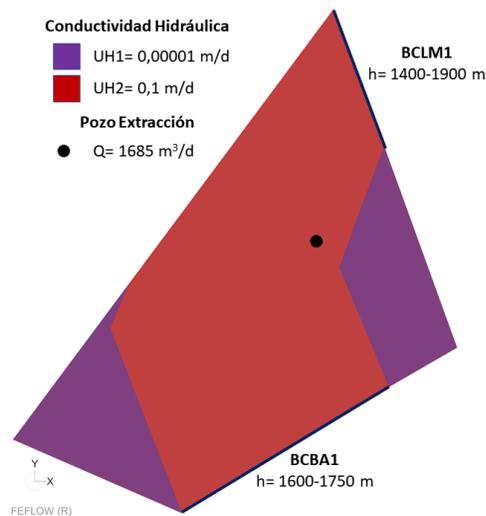


Figura 28: información de entrada serie 6

El detalle de los valores de las condiciones de contorno y distribución de parámetros de cada simulación se detalla en la Tabla F- 5 del ANEXO F.

Del análisis de 24 simulaciones se obtienen los siguientes resultados.

3. Análisis de resultados

Se presentan tres posibles comportamientos del sistema: potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, potencial hidráulico igual en ambos bordes y potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$. Los tres comportamientos presentan resultados que cumplen con las condiciones impuestas.

La distribución de niveles piezométricos en la mina, caudal de entrada y salida en la mina y caudal en los bordes Buenos Aires y La Mula de cada simulación se muestra en la Tabla G- 5 del ANEXO G.

Para acotar el rango de potencial hidráulico en el borde La Mula se realizan cuatro series de simulación. Cada serie fija el potencial hidráulico en el borde Buenos Aires y hace variar el potencial hidráulico del borde La Mula.

La línea azul del Gráfico 11 representa los resultados en términos de niveles piezométricos medidos en la mina de la serie en que el potencial hidráulico del borde Buenos Aires se fija en 1750 m y el potencial hidráulico del borde La Mula se hace variar en un rango de 1400 m a 1900 m.

El Gráfico 11 muestra la relación que presenta el nivel de la mina y el potencial hidráulico del borde La Mula. El potencial del borde Buenos Aires se fija en 1750 m, 1700 m, 1650 m y 1600 m para cada serie de simulación.

Del análisis del gráfico se obtiene que, para alcanzar un nivel en la mina de 1600 m:

- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1750 m (línea azul), el potencial en el borde La Mula debe ser 1478 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1700 m (línea naranja), el potencial en el borde La Mula debe ser 1530 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1650 m (línea gris), el potencial en el borde La Mula debe ser 1583 m.
- Para el potencial hidráulico del borde Buenos Aires de 1600 m (línea amarilla), el potencial en el borde La Mula debe ser 1635 m.

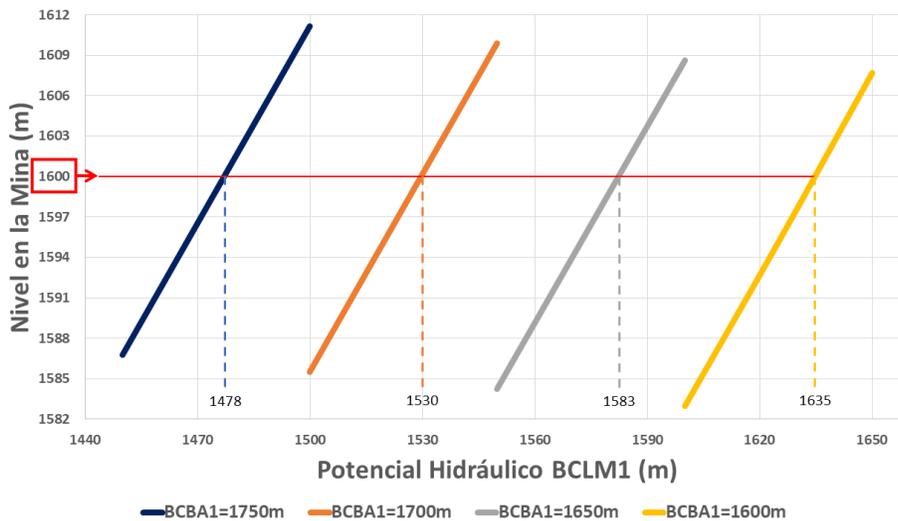


Gráfico 11: potencial hidráulico de BCLM1 serie 6

En conclusión, para una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 de 0,00001 m/d y de la Unidad Hidrogeológica 2 de 0,1 m/d, **el rango de potencial hidráulico del borde La Mula se reduce de 1400-1900 m a 1478-1635 m** considerando la influencia que tiene el pozo de bombeo en la mina.

No es posible acotar el potencial hidráulico del borde Buenos Aires puesto que para cualquier valor de este borde existe un potencial hidráulico en el borde La Mula que tiene como resultado un nivel de 1600 m en la mina, al igual que en la serie 1, serie 2 y serie 5.



6 RESULTADOS

De las seis series realizadas se obtienen los siguientes resultados:

Conductividad hidráulica del dominio

Modelos de simulación homogéneos

La conductividad hidráulica del dominio estimada considerando el dominio como un modelo homogéneo es 0,1 m/d (véase detalles en apartado 5.3).

Modelos de simulación heterogéneos

El rango de conductividad hidráulica para la Unidad Hidrogeológica 1 se acota a valores entre 10^{-9} m/d y 10^{-5} m/d respecto al rango establecido en el modelo conceptual (10^{-9} - 10^{-3} m/d).

Se obtiene como resultado la conductividad hidráulica para la Unidad Hidrogeológica 2 de 0,1 m/d.

No es posible acotar el rango de conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 3. Se realiza una serie de simulación para evaluar el efecto que genera aumentar la conductividad hidráulica en la mina, pero no se obtienen variaciones en el nivel de la mina. La única variación que se presenta es un aumento despreciable en los caudales de entrada y salida en la mina.

Se decide no considerar esta serie de simulación debido a la nula influencia en los resultados. Sin embargo, los resultados obtenidos y la información de entrada de la serie de simulación se muestran en la Tabla G- 7 del ANEXO G y Tabla F- 7 del ANEXO F.

Efecto del pozo de bombeo en la distribución de niveles piezométricos

Modelos de simulación homogéneos

El Gráfico 12 muestra el efecto que tiene el pozo de bombeo en la distribución de niveles piezométricos del dominio y de la mina. Compara los resultados de la serie 1 (modelo homogéneo que no considera el pozo) y de la serie 2 (modelo homogéneo que considera el bombeo en la mina).

Compara el nivel piezométrico en la mina con el potencial hidráulico del borde La Mula. Cada línea del gráfico muestra una serie de simulación que fija el potencial hidráulico del borde Buenos Aires y hace variar el potencial del borde La Mula.

Del gráfico se obtiene que considerar la extracción de agua en la mina, para una conductividad hidráulica del dominio de 0,1 m/d, genera una disminución de 14 m en la distribución de niveles piezométrico del dominio y de la mina.

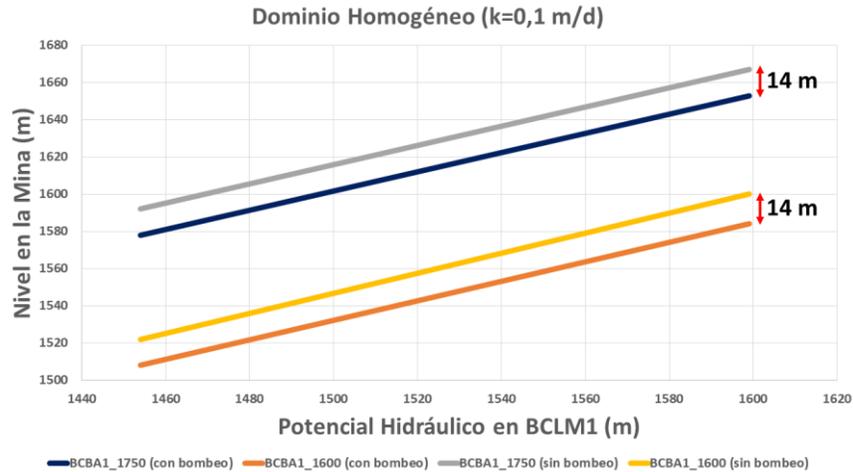


Gráfico 12: efecto del pozo de bombeo en el modelo homogéneo (serie 1 y serie 2)

Modelos de simulación heterogéneos

El Gráfico 13 muestra el efecto que tiene el pozo de bombeo en la distribución de niveles piezométricos del dominio y de la mina. Compara los resultados de la serie 5 (modelo heterogéneo que no considera el pozo) y de la serie 6 (modelo heterogéneo que considera el bombeo en la mina).

Compara el nivel piezométrico en la mina con el potencial hidráulico del borde La Mula. Cada línea del gráfico muestra una serie de simulación que fija el potencial hidráulico del borde Buenos Aires y hace variar el potencial del borde La Mula.

Del gráfico se obtiene que considerar la extracción de agua en la mina, para una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 de $0,00001$ m/d y de la Unidad Hidrogeológica 2 de $0,1$ m/d, genera una disminución de 17 m en la distribución de niveles piezométrico del dominio y de la mina.

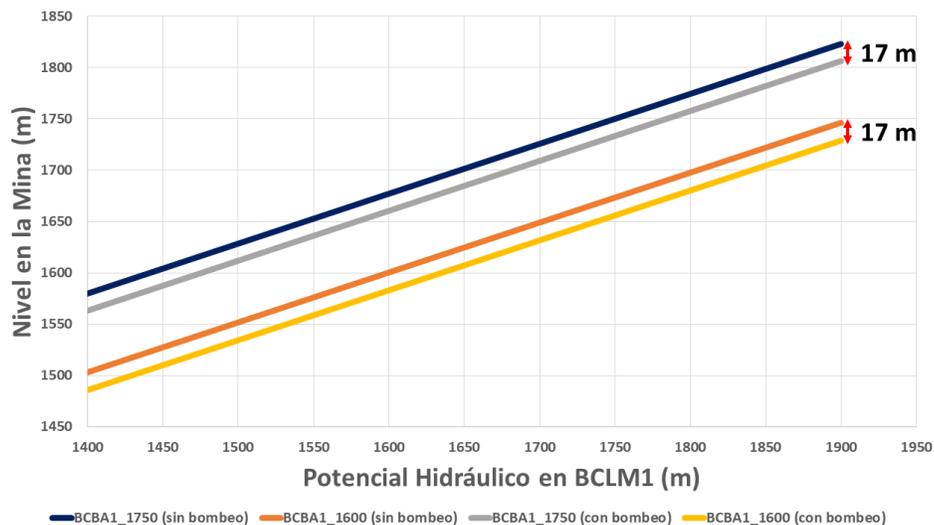


Gráfico 13: efecto del pozo de bombeo en el modelo heterogéneo (serie 5 y serie 6)

Potencial hidráulico de bordes Buenos Aires y La Mula

Se analizan los potenciales hidráulicos de los bordes Buenos Aires y La Mula para modelos homogéneos y heterogéneos:

Modelos de simulación homogéneos

Las series 1 y 2 calculan el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula planteando dos escenarios que se diferencian por la presencia del pozo de bombeo en la mina (serie 1: modelo sin estación de bombeo; serie 2: modelo con estación de bombeo). Esto permite evaluar la influencia de la mina en el entorno hidrogeológico, específicamente en el potencial hidráulico del borde La Mula.

El bombeo en la mina produce un aumento en el potencial hidráulico del borde La Mula. Para una conductividad hidráulica homogénea en el dominio de 0,1 m/d, el potencial hidráulico del borde La Mula aumenta 30 m.

Sin considerar el pozo de bombeo, el rango de potencial hidráulico varía entre 1454 m y 1600 m. Al considerar el pozo de bombeo en la mina el rango de potencial hidráulico varía entre 1494 m y 1630 m. El valor exacto depende del potencial hidráulico del borde Buenos Aires.

No es posible acotar el potencial hidráulico del borde Buenos Aires puesto que para cualquier valor de este borde existe un potencial hidráulico en el borde La Mula que tiene como resultado un nivel de 1600 m en la mina.

La Tabla 7 muestra el resultado de las posibles combinaciones del potencial hidráulico de ambos bordes.

Tabla 7: resultados de potencial hidráulico de bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos de simulación homogéneos

Potencial Hidráulico BCBA1 (m)	Potencial Hidráulico BCLM1 (m)		Diferencia de potencial (m)
	Sin bombeo	Con bombeo	
1750	1454	1494	30
1700	1502	1532	30
1650	1551	1581	30
1600	1600	1630	30

Modelos de simulación heterogéneos

Las series 5 y 6 calculan el potencial hidráulico de los bordes Buenos Aires y La Mula planteando dos escenarios que se diferencian en la presencia del pozo de bombeo en la mina (serie 5: modelo sin estación de bombeo; serie 6: modelo con estación de bombeo). Esto permite evaluar la influencia de la mina en el entorno hidrogeológico, específicamente en el potencial hidráulico del borde La Mula.

El bombeo en la mina produce un aumento en el potencial hidráulico del borde La Mula. Para una conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 de 0,00001 m/d y una conductividad

hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 de 0,1 m/d, el potencial hidráulico mínimo del borde La Mula aumenta 38 m y el potencial hidráulico máximo aumenta 35 m.

Sin considerar el pozo de bombeo el rango de potencial hidráulico varía entre 1440 m y 1600 m. Al considerar el pozo de bombeo en la mina el rango de potencial hidráulico varía entre 1478 m y 1635 m. El valor exacto depende del potencial hidráulico del borde Buenos Aires.

No es posible acotar el potencial hidráulico del borde Buenos Aires puesto que para cualquier valor de este borde existe un potencial hidráulico en el borde La Mula que tiene como resultado un nivel de 1600 m en la mina.

La Tabla 8 muestra el resultado de las posibles combinaciones del potencial hidráulico de ambos bordes.

Tabla 8: resultados de potencial hidráulico de bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos de simulación heterogéneos

Potencial Hidráulico BCBA1 (m)	Potencial Hidráulico BCLM1 (m)		Diferencia de potencial (m)
	Sin bombeo	Con bombeo	
1750	1440	1478	38
1700	1494	1530	38
1650	1548	1583	35
1600	1600	1635	35

Caudal de entrada y salida en la mina

Modelos de simulación homogéneos

El Gráfico 14 relaciona el nivel piezométrico en la mina y los caudales de entrada y salida en la mina para los modelos homogéneos. En el gráfico, estos caudales están representados por un área que contiene todos los escenarios de simulación posibles que cumplen con las siguientes condiciones:

- Caudal bombeado en la mina de 1685 m³/d.
- Potencial hidráulico en el borde Buenos Aires entre 1600 m y 1750 m.
- Potencial hidráulico en el borde La Mula entre 1494 m y 1630 m.
- Conductividad hidráulica del dominio de 0,1 m/d.

Para obtener los resultados de rango de caudales del gráfico se debe ingresar el nivel piezométrico que se desea conseguir en la mina. Por ejemplo, para obtener un nivel en la mina de 1600 m el caudal mínimo que entra a la mina (área naranja) es de 1781 m³/d.

Del gráfico se obtiene, para el modelo homogéneo considerando el pozo de bombeo en la mina, el caudal de agua que entra a la mina varía entre 1781 m³/d y 5879 m³/d. El caudal de agua se sale de la mina varía entre 96 m³/d y 4194 m³/d.

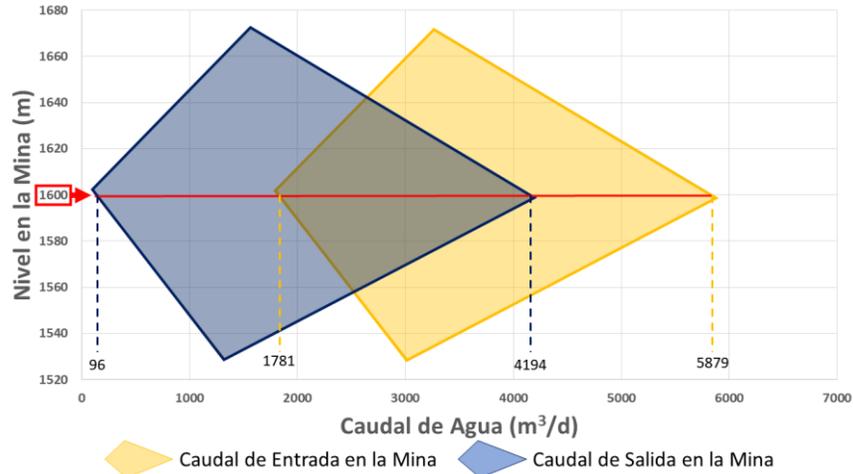


Gráfico 14: caudales de entrada y salida en la mina para modelos homogéneos

Modelos de simulación heterogéneos

El Gráfico 15 relaciona el nivel piezométrico en la mina y los caudales de entrada y salida en la mina. En el gráfico, estos caudales están representados por un área que contiene todos los escenarios de simulación posibles que cumplen con las siguientes condiciones:

- Caudal bombeado en la mina de 1685 m³/d.
- Potencial hidráulico en el borde Buenos Aires entre 1600 m y 1750 m.
- Potencial hidráulico en el borde La Mula entre 1478 m y 1635 m.
- Conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y 2 de 0,00001 m/d y 0,1 m/d respectivamente.

Para obtener los resultados de rango de caudales del gráfico se debe ingresar el nivel piezométrico que se desea obtener en la mina. Por ejemplo, para obtener un nivel en la mina de 1600 m el caudal mínimo que entra a la mina (área naranja) es de 1961 m³/d.

Del gráfico se obtiene, para el modelo heterogéneo considerando el pozo de bombeo en la mina, el caudal de agua que entra a la mina varía entre 1961 m³/d y 6264 m³/d. El caudal de agua se sale de la mina varía entre 246 m³/d y 4579 m³/d.

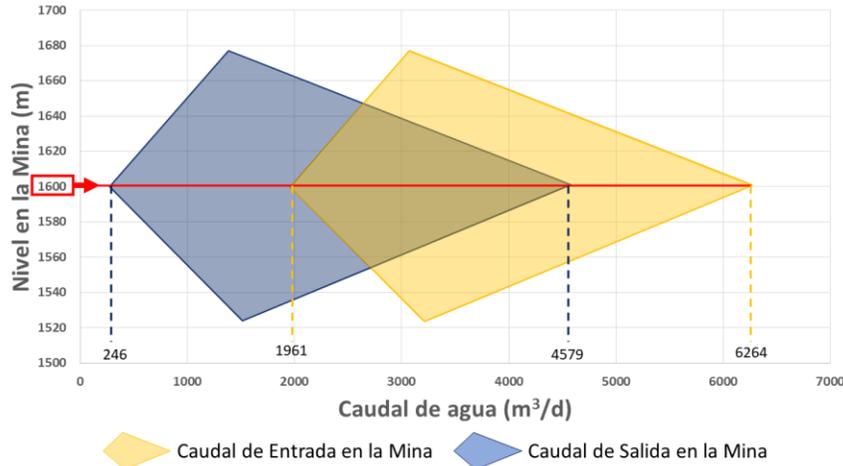


Gráfico 15: caudales de entrada y salida en la mina para modelos heterogéneos

Caudal en los bordes Buenos Aires y La Mula

Modelos de simulación homogéneos

El Gráfico 16 relaciona el nivel piezométrico en la mina y los caudales en el borde Buenos Aires y La Mula. En el gráfico, estos caudales están representados por un área que contiene todos los escenarios de simulación posibles que cumplen con las siguientes condiciones:

- Caudal bombeado en la mina de 1685 m³/d.
- Potencial hidráulico en el borde Buenos Aires entre 1600 m y 1750 m.
- Potencial hidráulico en el borde La Mula entre 1494 m y 1630 m.
- Conductividad hidráulica del dominio de 0,1 m/d.

Para obtener los resultados de rango de caudales del gráfico se debe ingresar el nivel piezométrico que se desea conseguir en la mina. Por ejemplo, para obtener un nivel en la mina de 1600 m el caudal mínimo del borde Buenos Aires (área naranja) es de 1453 m³/d.

Del gráfico se obtiene, para el modelo homogéneo considerando el pozo de bombeo en la mina, el caudal de agua en el borde Buenos Aires varía entre 1453 m³/d y 19836 m³/d. El caudal de agua en el borde La Mula varía entre 3138 m³/d y 18151 m³/d.

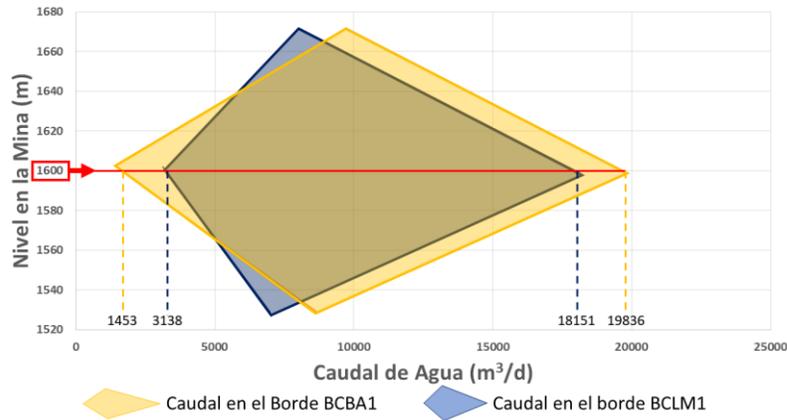


Gráfico 16: caudales en bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos homogéneos

No se especifica si estos caudales corresponden a recargas o descargas del sistema debido a que dependen del comportamiento del sistema que controlan los potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula.

Cuando el potencial hidráulico de BCBA1 > BCLM1, el rango de caudal del borde Buenos Aires representa una recarga al sistema y el rango de caudal del borde La Mula representa una descarga al sistema.

Cuando el potencial hidráulico de BCBA1 = BCLM1, el rango de caudal del borde Buenos Aires y La Mula representan una recarga al sistema.

Cuando el potencial hidráulico de BCBA1 < BCLM1, el rango de caudal del borde Buenos Aires representa una descarga al sistema y el rango de caudal del borde La Mula representa una recarga al sistema.

Modelos de simulación heterogéneos

El Gráfico 17 relaciona el nivel piezométrico en la mina y los caudales en el borde Buenos Aires y La Mula. En el gráfico, estos caudales están representados por un área que contiene todos los escenarios de simulación posibles que cumplen con las siguientes condiciones:

- Caudal bombeado en la mina de 1685 m³/d.
- Potencial hidráulico en el borde Buenos Aires entre 1600 m y 1750 m.
- Potencial hidráulico en el borde La Mula entre 1478 m y 1635 m.
- Conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 1 y 2 de 0,00001 m/d y 0,1 m/d respectivamente.

Para obtener los resultados de rango de caudales del gráfico se debe ingresar el nivel piezométrico que se desea conseguir en la mina. Por ejemplo, para obtener un nivel en la mina de 1600 m el caudal mínimo del borde Buenos Aires (área naranja) es de 739 m³/d.

Del gráfico se obtiene, para el modelo heterogéneo considerando el pozo de bombeo en la mina, el caudal de agua en el borde Buenos Aires varía entre $739 \text{ m}^3/\text{d}$ y $13336 \text{ m}^3/\text{d}$. El caudal de agua en el borde La Mula varía entre $2424 \text{ m}^3/\text{d}$ y $11651 \text{ m}^3/\text{d}$.

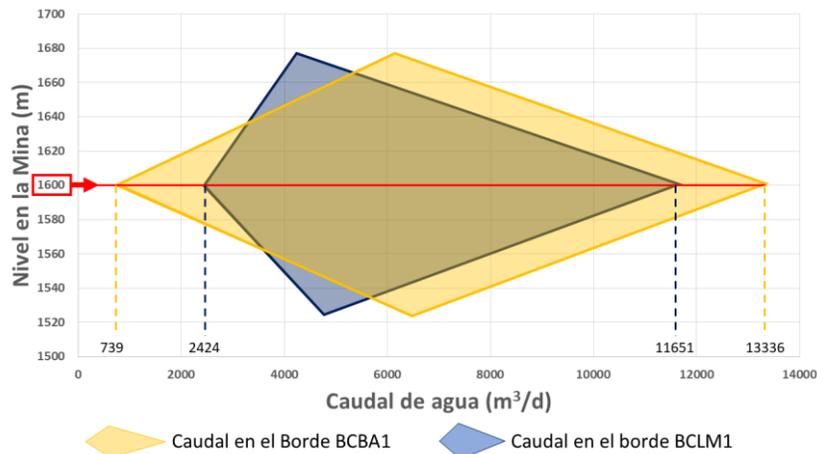


Gráfico 17: caudales en bordes BCBA1 y BCLM1 para modelos heterogéneos

No se especifica si estos caudales corresponden a recargas o descargas del sistema debido a que dependen del comportamiento del sistema que controlan los potenciales hidráulicos en los bordes Buenos Aires y La Mula.

Cuando el potencial hidráulico de $BCBA1 > BCLM1$, el rango de caudal del borde Buenos Aires representa una recarga al sistema y el rango de caudal del borde La Mula representa una descarga al sistema.

Cuando el potencial hidráulico de $BCBA1 = BCLM1$, el rango de caudal del borde Buenos Aires y La Mula representan una recarga al sistema.

Cuando el potencial hidráulico de $BCBA1 < BCLM1$, el rango de caudal del borde Buenos Aires representa una descarga al sistema y el rango de caudal del borde La Mula representa una recarga al sistema.

7 CONCLUSIONES

A partir del análisis de los antecedentes del caso de estudio, se ha formulado un modelo conceptual hidrogeológico implementando diferentes modelos numéricos para extraer las siguientes conclusiones sobre el comportamiento hidrogeológico general del entorno de la faena El Peñón y evaluar las posibles razones por las que la operación minera se ve afectada por la infiltración de agua:

Comportamiento hidrogeológico general

De acuerdo a la caracterización hidrogeológica, el dominio establecido se divide en dos zonas diferenciadas de acuerdo a sus características hidrogeológicas (unidades hidrogeológicas 1 y 2). La conductividad hidráulica promedio de la Unidad Hidrogeológica 1 presenta valores entre 10^{-9} m/d y 10^{-5} m/d; y la Unidad Hidrogeológica 2 presenta una conductividad hidráulica promedio de 0,1 m/d. Ambas unidades presentan formaciones geológicas de características impermeables, sin embargo, la capacidad de transmitir agua de la Unidad Hidrogeológica 2 (unidad que contiene las labores subterráneas y las instalaciones mineras) es mayor debido a la presencia de un macizo rocoso fracturado.

La conductividad hidráulica estimada considerando un modelo homogéneo es 0,1 m/d. Al comparar los resultados de simulación de los modelos homogéneos y heterogéneos se puede concluir que los resultados son poco sensibles a la conductividad de la Unidad Hidrogeológica 1 y sensibles a la conductividad de la Unidad Hidrogeológica 2.

La formación Augusta Victoria es una formación geológica de características hidrogeológicas “no confinada” y sus rocas son aparentemente poco permeables, sin embargo, a nivel macroscópico formación Augusta Victoria es portadora y transmisora de agua subterránea debido a su intensa fracturación.

La dirección del flujo de agua subterránea tiende a una orientación rumbo norte que se origina por la recarga que aporta el acuífero Pampa Buenos Aires desde el sur a la formación Augusta Victoria. La dirección de flujo preferencial en el dominio depende del potencial hidráulico en los bordes Buenos Aires y La Mula. Se presentan tres comportamientos del sistema: (1) cuando el potencial hidráulico del borde Buenos Aires es mayor al potencial en el borde La Mula, (2) cuando el potencial hidráulico del borde Buenos Aires es menor al potencial en el borde La Mula y (3) cuando el potencial hidráulico en ambos es igual.

La cantidad de agua que entra al dominio desde el acuífero Pampa Buenos Aires se estima en un caudal mínimo de 740 m³/d y un caudal máximo de 13340 m³/d para el modelo heterogéneo. La cantidad de agua que entra al dominio homogéneo desde el acuífero Pampa Buenos Aires se estima en un caudal mínimo de 1453 m³/d y un caudal máximo de 19836 m³/d para el modelo heterogéneo. La diferencia entre estos caudales es baja por lo que se puede concluir que la conductividad hidráulica de la Unidad Hidrogeológica 2 es poco sensible a los resultados de caudales.

El caudal en el sector norte del dominio heterogéneo (límite La Mula) se estima que varía entre 2420 m³/d y 11650 m³/d. El caudal en el límite La Mula del dominio homogéneo se estima que varía entre 3138 m³/d y 18151 m³/d. Dependiendo del potencial hidráulico en los límites que permiten el flujo de agua, el caudal del límite La Mula puede considerarse una recarga al sistema o una descarga.

El análisis de resultados del modelo heterogéneo, permite concluir que el caudal de agua subterránea que ingresa a la mina lo hace principalmente por el sector sur y la cantidad de agua que ingresa varía entre 1960 m³/d y 6220 m³/d.

El análisis de resultados del modelo homogéneo, permite concluir que el caudal subterráneo que ingresa a la mina lo hace principalmente por el sector sur y la cantidad de agua que ingresa varía entre 1781 m³/d y 5879 m³/d.

En cuanto a los potenciales hidráulicos en los límites que permiten el flujo de agua a través de ellos, se estiman en un rango para el límite La Mula que varía entre 1478 m y 1635 m.

La variación en el potencial hidráulico y los caudales mencionados está ligada a los potenciales hidráulicos en los límites definidos con flujo de agua, específicamente al potencial hidráulico del límite Buenos Aires. Este límite presenta un rango de potencial hidráulico entre 1600 m y 1750 m (rango calculado en base al potencial hidráulico del acuífero Buenos Aires en el sector que comparte con la formación Augusta Victoria) que no fue posible acotar, debido a esto, todos los resultados de caudales, niveles piezométricos y potenciales hidráulicos se calculan en base a la variación de potencial en el borde Buenos Aires. Si se quisiera obtener resultados exactos de los caudales de entrada a la mina y la dirección de flujo preferencial se deben realizar mediciones de campo en el límite Buenos Aires para determinar su potencial hidráulico y, en consecuencia, determinar los caudales, distribución piezométrica y dirección de flujo de manera exacta o mucho más acotada.

Del estudio se concluye, en relación a los acuíferos que rodean la mina (Aguas Blancas, Rosario, Salares Navidad y Mar Muerto y Pampa Buenos Aires), que el agua que se infiltra en las labores mineras subterráneas proviene principalmente del acuífero Pampa Buenos Aires. Los acuíferos Aguas Blancas y Rosario no aportan agua ya que, entre la mina y los acuíferos, se encuentra la falla Dominador que actúa como una barrera natural impermeable.

Infiltración de agua en la mina

En base al modelo hidrogeológico realizado se concluye que la principal posible causa de la infiltración de agua en las labores subterráneas, es la existencia de fallas y/o fracturas que conectan directamente el acuífero Buenos Aires con la faena El Peñón. La conductividad hidráulica de las rocas del entorno de la mina es muy baja, del orden de 10⁻⁵ m/d, razón por lo cual la formación geológica Augusta Victoria no se considera un acuífero. Sin embargo, la conductividad promedio aumenta a 0,1 m/d debido a la presencia de fracturas lo que a su vez genera un aumento en el caudal de entrada a la mina.

En este tipo de yacimientos mineros, donde las vetas de oro se encuentran dentro de fracturas en la mayoría de los casos, el flujo de agua a través de estas genera inundaciones por infiltración de agua en los frentes de trabajo generando el cierre de labores y disminuyendo la producción.



8 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con base en los resultados y las conclusiones anteriormente señaladas es posible establecer un conjunto de recomendaciones y una base de trabajos futuros para un análisis hidrogeológico más detallado de la mina:

Los caudales y niveles piezométricos que se obtuvieron como resultado están limitados por el potencial hidráulico del límite Buenos Aires. Se recomienda, si se desea conocer con mayor detalle el comportamiento hidráulico y su sistema hidrogeológico, realizar mediciones en terreno (piezómetros) para determinar el potencial hidráulico en el límite Buenos Aires.

Se aconseja realizar como mínimo dos mediciones a lo largo de la línea formada por los puntos A y B. La Tabla 9 muestra la información geográfica de los puntos establecidos como referencia.

Tabla 9: información geográfica de zona recomendada para medición de potencial hidráulico

Puntos	Coordenadas UTM WGS84 19S	
	Este_X (m)	Norte_Y (m)
A	445000	7290000
B	455500	7296000

El elemento crítico en el flujo de agua subterránea son las fracturas por lo que se recomienda, para futuros trabajos, considerar este elemento con un enfoque de simulación basado en una red de fracturas discretas para evaluar el efecto que genera las características de estas en el comportamiento hidrogeológico. Para esto se debe realizar una caracterización de las fracturas para determinar propiedades como abertura, coeficientes de rugosidad, orientación, profundidad y espaciamiento.

En este estudio se consideró esta opción, pero los resultados obtenidos no fueron los deseados debido a que no se contaba con información detallada de las fracturas, solo se disponía de la información que entregaban los mapas geológicos.

Las simulaciones y los resultados obtenidos de estas se muestran en la Tabla F- 8 y en el ANEXO E.

Se recomienda evaluar la condición de impermeabilidad asumida en el límite La Mula, para calcular el impacto que tiene esta condición de contorno en los resultados del estudio.

Este trabajo entrega como resultado el comportamiento hidráulico general del entorno hidrogeológico de la faena El Peñón en términos de piezometrías y caudales. Para obtener resultados que tengan relación con el comportamiento hidrogeológico en la mina, se recomienda realizar un modelo hidrogeológico con un dominio de trabajo más acotado y cercano al yacimiento para estimar la recarga de agua y los sectores potenciales a ser inundados, y así realizar una planificación del sistema de drenaje más eficiente.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), «Agricultura Chilena - Reflecciones y desafíos al 2030,» 2017.
- [2] Fundación Chile para Servicio nacional de geología y minería (SERNAGEOMIN), «Catastro de medidas y tecnologías para la prevención, control y tratamiento del drenaje minero,» 2015.
- [3] V. M. López Aburto, Manual para la selección de métodos de explotación de minas, 1994.
- [4] L. Gonzalez de Vallejo, «Hidrogeología,» de *Ingeniería Geológica*, Madrid, Pearson Education, 2002, pp. 264-267.
- [5] J. Bear, «Dynamics of fluids in porous media,» Department of civil engineering, Israel Institute of technology, Haifa, Israel, 1972.
- [6] Dirección General de Escuelas, Departamento General de Irrigación, Aquabook, «Clasificación de los acuíferos, Recursos Hídricos Subterráneos,» Mendoza, 2019.
- [7] F. J. Sánchez San Román, «Conceptos Fundamentales de Hidrogeología,» de *Hidrología Superficial y Subterránea*, Salamanca, Universidad de Salamanca, 2017, p. 5.
- [8] E. Custodio y M. R. Llamas, "Hidrología subterránea", Segunda ed., vol. I, Barcelona: Ediciones Omega, 1983, pp. 249-279.
- [9] Servicio de Evaluación Ambiental, SEA, «Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA,» 2012.
- [10] M. P. Anderson, W. W. Woessner and R. J. Hunt, Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport, Second edition ed., Elsevier, 2015.
- [11] C. Zheng y G. Bennett, Applied Contaminant Transport Modeling, Second edition ed., New York, 2002.
- [12] C. Wels, "Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities," Robertson GeoConsultants Inc., British Columbia, 2012.
- [13] Sinclair Knight Merz and National Centre for Groundwater Research and Training, "Australian groundwater modelling guidelines," Australia, 2012.
- [14] J. W. Mercer y C. R. Faust, Ground-Water Modelling: Mathematical Models, vol. 18, 1980.
- [15] H.-J. G. Diersch, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer, 2014.

- [16] FEFLOW 7.2, «Introductory Tutorial,» MIKE by DHI, Horsholm, 2018.
- [17] J. Bear and A. Cheng, Modeling Groundwater Flow and Contaminat Transport, Springer, 2010.
- [18] Amec Foster Wheeler, «Caracterización ambiental proyecto continuidad operacional El Peñón,» Antofagasta, 2018.
- [19] M. A. Jorquera Villaroel, «Método de explotación Bench and Fill y su aplicación en minera Michilla,» Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 2015.
- [20] Golder Associates S.A, «ANEXO A - Declaración de Impacto Ambiental de Ampliación y Optimización Faenas Mina El Peñón,» 2007.
- [21] P. I. Warren, «Geology, geochemistry, and genesis of the El Peñón epithermal Au-Ag deposit,» Auckland, 2005.
- [22] García y García consultores, «Anexo IV: Estudios Hidrogeológicos - DIA expansión depósito de relave filtrado faena El Peñón,» Antofagasta, 2010.
- [23] Centro de agricultura y medio ambiente, Atlas Agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima -, vol. TOMO I, Santiago, 2017.
- [24] Minera Meridian Ltda., «Informe consolidado de la evaluación de la Declaración de Impacto Ambiental del proyecto "Extensión n° 2 explotación subterránea mina El Peñón",» 2020.
- [25] J. I. Zuluaga, «Geología y mineralización del Distrito El Peñón, segunda región de Antofagasta,» Antofagasta, 2006.
- [26] F. J. Sánchez San Román, «Exploración hidrogeológica para la captación de agua subterránea,» de *Hidrología superficial y subterránea*, Salamanca, Universidad de Salamanca, 2017.
- [27] P. A. Domenico and F. W. Schwartz, "Physical and Chemical hydrogeology," John Wiley and Sons, 1997.
- [28] R. A. Freeze and J. A. Cherry, Groundwater, Prentice Hall, 1979.
- [29] YAMANA GOLD, «Estudio de estabilidad de botadero estéril Bonanza,» Antofagasta, 2018.
- [30] Minera Meridian Ltda., «Extensión Área de Explotación, Obras de Apoyo y Botadero Sector Bonanza y Ampliación del Manejo y Transporte de Explosivos Mina El Peñón,» 2009.
- [31] RPA (Roscoe Postle Associates Inc.), "Technical Report on the El Peñón mine (NI 43-101 report)," Toronto, 2018.
- [32] Rouge Resources Ltd., "Technical report on the pampas El Peñón," Surrey, 2016.

- [33] F. J. Sanchez San Román, «Ley de Darcy,» Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, 2007.
- [34] J. Bear, *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press, Inc., 1993.
- [35] J. Bear, C.-F. Tsang y G. d. Marsily, «Capítulo 4: Stochastic Models of Fracture Systems and Their Use in Flow and Transport Modeling,» de *Flow and Contaminat Transport in Fractured Rock*, Academic Press, Inc., 1993.



10 ANEXOS

ANEXO A: CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS

Tabla A- 1: valores referenciales para la conductividad hidráulica k (m/d). Modificado de [26]

Materiales no consolidados	Schwartz [27]	Domenico [27]	Smith &W	Freeze [28]	Sanders
Grava	49-183	25-2500	$100-10^5$	10^2-10^6	
Arena gruesa	24-41	0,1-500	$10^{-2}-10^3$	$1-10^3$	$1-10^2$
Arena media	20-29	0,1-50	$10^{-2}-10^3$	$1-10^3$	
Arena fina	8-16	0,02-20	$10^{-2}-10^3$	$1-10^3$	$10^{-2}-1$
Arena arcillosa	6-29			$10^{-2}-10^2$	$10^{-2}-1$
Silt, loess	0,3-1,2	$10^{-4}-2$	$10^{-4}-1$	$10^{-4}-1$	$10^{-4}-1$
Arcilla	3×10^{-4}	$10^{-6}-4 \times 10^{-4}$	$10^{-7}-10^{-3}$		$10^{-6}-10^{-3}$
Arcilla marina inalterada		$10^{-7}-2 \times 10^{-4}$		$10^{-11}-10^{-7}$	
Rocas sedimentarias					
Calizas carstificadas		0,1-2000	0,05-0,5	$0,1-10^3$	$0,1-10^7$
Calizas dolomías		$10^{-4}-0,5$	$10^{-3}-0,5$	$10^{-4}-1$	$10^{-4}-1$
Areniscas		$3 \times 10^{-5}-0,5$	$10^{-5}-1$	$10^{-5}-1$	
Argilitas		$10^{-6}-10^{-3}$			
Pizarras sedimentarias intactas		$10^{-8}-2 \times 10^{-4}$	$10^{-8}-10^{-4}$	$10^{-8}-10^{-4}$	$10^{-8}-10^{-4}$
Pizarras sedimentarias fracturada/alterada			$10^{-4}-1$		
Rocas cristalinas					
Basalto inalterado, sin fracturar			$10^{-6}-10^{-3}$		$10^{-6}-10^{-3}$
Basalto fracturado/ vesicular cuaternario			$10-10^3$		$0,1-10^6$
Escorias basálticas			$10^{-3}-10^3$		
Basalto permeable		0,03-2000		$0,02-10^3$	
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturas		$10^{-9}-10^{-5}$	$10^{-9}-10^{-5}$	$10^{-9}-10^{-5}$	$10^{-9}-10^{-5}$
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas		$10^{-3}-25$	$10^{-5}-1$	$5 \times 10^{-4}-20$	$10^{-5}-1$
Granito alterado		0,3-5			
Gabro alterado		0,05-0,3			

ANEXO B: RESUMEN INFORMACIÓN

TABLA B- 1: resumen información geográfica

Nombre archivo	Fuente	Año	Otra información	Calidad
Figura 1: ubicación general del proyecto	DIA del proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-Formato: PDF -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Vista en planta	Buena
Figura 2: explotación subterránea	DIA del proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-Formato: PDF -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Se puede observar la disposición espacial vista en planta de las labores subterráneas de todo el proyecto	Buena
Figura 3: Aleste y Martillo Flat	DIA del proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-Formato: PDF -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Disposición espacial detallada del sector Aleste y Martillo Flat	Media
Figura 2: mina El Peñón disposición general actuales y nuevas explotaciones subterráneas	DIA del proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-Formato: PDF -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Vista en planta de todas las labores subterráneas -Escala: 1:1000 -Imagen de excelente calidad y con mucha información referencial	Excelente

TABLA B- 2: resumen información geológica

Nombre archivo	Fuente	Año	Otra información	Calidad
Apartado de geomorfología	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto "continuidad operacional El Peñón"	2018	-Formato: PDF -5 página de información	Excelente
Apartado de geomorfología	Anexo C línea base de proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-Formato: PDF -1 página de información	Media

Apartado de geomorfología	Anexo IV estudios hidrogeológicos de DIA del proyecto “expansión de depósitos de relave El Peñón”	2010	-Formato: PDF -1 página de información -Geomorfología de la pampa Buenos Aires	Mala
Figura 5-37: geomorfología región Antofagasta	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto “continuidad operacional El Peñón”	2018	-Formato: PNG -Bien explicada, pero con información no relevante	Buena
Geological setting and mineralization	Technical report of the El Peñón mine	2016	-Formato: PDF -14 página de información -Idioma: inglés -Geología regional y local	Excelente
Apartado de geología	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto “continuidad operacional El Peñón”	2018	-Formato: PDF -10 página de información -Geología distrital	Excelente
Antecedentes geológicos	Anexo 7 PAS 136 de DIA del proyecto “estudio de estabilidad de botadero estéril Bonanza”	2018	-Formato: PDF -5 páginas de información -Geología regional y local junto a 4 perfiles geológicos	Buena
Apartado geología	Anexo C línea base de DIA del proyecto “ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón”	2007	-Formato: PDF -5 páginas de información -Geología regional y local (formación Victoria Augusta)	Buena
Apartado geología estructural	Anexo C método de explotación de DIA del proyecto “extensión área de explotación obras de apoyo y botadero sector bonanza y ampliación del manejo y transporte de explosivos mina El Peñón”	2009	-Formato: PDF -5 páginas de información -Contiene 6 perfiles geológicos de los cuales 4 son útiles debido a que se pueden georreferenciar.	Media
Apartado geología	Características ambientales de DIA del proyecto “expansión Deposito de Relave Filtrado Faena El Peñón”	2010	-Formato: PDF -2 páginas de información -Información geológica de formación Augusta Victoria.	Excelente

Geology of the El Peñón District	Geology, geochemistry, and genesis of the El Peñón epithermal	2005	-Formato: PDF -14 páginas de información -Idioma: inglés -Imágenes de geología (sin Sistema de coordenadas) con perfiles -Geología regional y distrital	Excelente
Geological setting and mineralization	Technical report on the El Peñón mine	2018	-Formato: PDF -7 páginas de información -Idioma: inglés -Vistas en plana de geología con leyenda detallada -Geología regional	Excelente
Geología y mineralización del distrito el peñón, segunda región de Antofagasta	Paper de José I. Zuluaga, universidad católica del norte	2004	-Formato: PDF -3 páginas de información -Información incompleta debido a que solo es un paper	Buena
Figura 5-33: Geología simplificada del distrito	Caracterización ambiental del proyecto "continuidad operacional El Peñón"	2018	-Formato: JPG -Escala 1:50000 -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S	Media
Figure 7.3: simplified regional geology of Chile, region II	Technical report of the El Peñón mine	2016	-Formato: JPG -Escala: 1:75000 -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Mapa geológico con leyenda detallada -Visualización de falla dominador	Excelente
Figure 7-2A local geology	Technical report of the El Peñón mine	2018	-Formato: JPG -Escala: 1:40000 -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Mapa geológico con leyenda detallada	Excelente

TABLA B- 3: resumen información perfiles geológicos

Nombre perfil	Fuente	Año	Otra información	Calidad
Perfil 1	Anexo III informe técnico de DIA del proyecto “expansión de depósito de relaves”	2010	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 451120E entre 7301000N y 7299000N -Contiene información escrita sobre tipos de rocas	Excelente
Perfil 2	Anexo III informe técnico de DIA del proyecto “expansión de depósito de relaves”	2010	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7299200N entre 449600E y 452200E -Contiene información escrita sobre tipos de rocas	Excelente
Perfil 3	Anexo III informe técnico de DIA del proyecto “expansión de depósito de relaves”	2010	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7299500N entre 449500E y 452000E -Contiene información escrita sobre tipos de rocas	Excelente
Perfil 4	Características ambientales de DIA del proyecto “Expansión Deposito de Relave Filtrado Faena El Peñón”		-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7299500N entre 450000E y 451500E	Buena
Perfil 5	Anexo III informe técnico de DIA del proyecto “expansión de depósito de relaves”	2010	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7300000N entre 449500E y 452000E -Contiene información escrita sobre tipos de rocas	Excelente
Perfil 6	Anexo III informe técnico de DIA del proyecto “expansión de depósito de relaves”	2010	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7300500N entre 449500E y 452000E -Contiene información escrita sobre tipos de rocas	Excelente

Perfil 7	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto “Continuidad operacional El Peñón”	2018	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7304800N entre 451000E y 454000E	Buena
Perfil 8	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto “Continuidad operacional El Peñón”	2018	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7307300N entre 451500E y 455000E	Buena
Perfil 9	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto “Continuidad operacional El Peñón”	2018	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7308100N entre 452000E y 455000E	
Perfil 10	Anexo C método de explotación de DIA del proyecto “extensión área de explotación obras de apoyo y botadero sector bonanza y ampliación del manejo y transporte de explosivos mina El Peñón”	2009	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 452800E entre 7306800N y 7305200N -Muestra nivel freático	Excelente
Perfil 11	Anexo C método de explotación de DIA del proyecto “extensión área de explotación obras de apoyo y botadero sector bonanza y ampliación del manejo y transporte de explosivos mina El Peñón”	2009	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 452800E entre 7306500N y 7308500N -Muestra nivel freático	Excelente
Perfil 12	Anexo C método de explotación de DIA del proyecto “extensión área de explotación obras de apoyo y botadero sector bonanza y ampliación del manejo y transporte de explosivos mina El Peñón”	2009	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7305010N entre 452600E y 453000E	Buena
Perfil 13	Anexo C método de explotación de DIA del proyecto “extensión área de explotación obras de apoyo y botadero sector bonanza y ampliación del manejo y transporte de explosivos mina El Peñón”	2009	-Formato: JPG -Sistema de coordenadas UTM WGS94 19S -Ubicación: 7306900N entre 452600E y 453000E	Buena
Perfil 14	Technical report of the El Peñón mine	2018	-Formato: JPG -Sin Sistema de coordenadas	Buena

TABLA B- 4: resumen información hidrológica

Nombre	Fuente	Año	Otra Información	Calidad
Apartado 5.6: hidrología	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto "Continuidad operacional El Peñón"	2018	-12 páginas de información -Formato: pdf -Contiene: estaciones, precipitaciones, evaporación, escorrentía, cuencas	Buena
Apartado 5.1: clima y meteorología	Anexo 6 caracterización ambiental de DIA del proyecto "Continuidad operacional El Peñón"	2018	-26 páginas de información -Formato: pdf -Contiene: climatología, precipitaciones, temperaturas y humedad según estación campamento	Buena
Apartado 2.2: meteorología	Anexo C línea base de DIA del proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-4 páginas de información -Formato: pdf -Contiene: temperaturas, precipitaciones y evaporación donde compara 5 estaciones	Buena
Precipitaciones mensuales	DGA Información oficial hidrometeorología en línea	1979-2019	-Formato: xls -precipitaciones mensuales por año de 5 estaciones meteorológicas http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes	Excelente
Precipitaciones diaria	DGA Información oficial hidrometeorología en línea	1979-2019	-Formato: xls -precipitaciones diarias por año de 5 estaciones meteorológicas http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes	Excelente
Precipitaciones anuales	DGA Información oficial hidrometeorología en línea	1979-2019	-Formato: xls -precipitaciones diarias por año de 5 estaciones meteorológicas http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes	Excelente
Temperaturas extremas	DGA Información oficial hidrometeorología en línea	2009-2019	-Formato: xls -temperaturas mensuales por año de 5 estaciones meteorológicas http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes	Excelente

TABLA B- 5: resumen información hidrogeológica

Nombre	Fuente	Año	Otra información	Calidad
Apartado 5.7: hidrogeología	Anexo caracterización ambiental de DIA del proyecto "Continuidad operacional El Peñón"	6 2018	-3 páginas de información -Formato: pdf -Imagen de acuíferos	Buena
Figura 5-39: bloque norte	Anexo caracterización ambiental de DIA del proyecto "Continuidad operacional El Peñón"	6 2018	-Formato: pdf -perfil geológico con nivel freático de bloque norte	Media
Apartado 2.10: hidrogeología	Anexo C línea base de DIA del proyecto "ampliación y optimización de faenas mineras El Peñón"	2007	-4 páginas de información -Formato: pdf -Análisis hidrogeológico de la mina y laguna seca -Incluye pozos de sondeo	Buena
Apartado 3: análisis técnico	Anexo IV: estudios hidrogeológicos de DIA del proyecto "expansión de depósito de relaves"	2010	-4 página de información -Formato: pdf -Información sobre acuíferos que rodean yacimiento	Media
Análisis cuenca pampa Buenos Aires	Anexo IV: estudios hidrogeológicos de DIA del proyecto "expansión de depósito de relaves"	2010	-3 páginas de información -Formato: pdf -contiene mapa con direcciones de flujos subterráneos y conclusiones hidrogeológicas	Buena
Hidrogeología de cuencas	Anexo IV: estudios hidrogeológicos de DIA del proyecto "expansión de depósito de relaves"	2010	-9 páginas de información -Formato: pdf -Contiene análisis hidrogeológico de cuenca Buenos Aires y pampa Lidia -programa de explotación y pozos de sondeo	Buena
Línea base ambiental	DIA del proyecto "prospección sector Fortuna"	2006	-5 páginas de información -Formato: doc -Contiene pozos de sondeo	Buena
Pozos de sondeo	DGA Información oficial hidrometeorología en línea	2009 - 2019	-Formato: xls -20 Pozos de sondeo con niveles estático de 10 años http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes	Buena

ANEXO C: MAPA GEOLÓGICOS

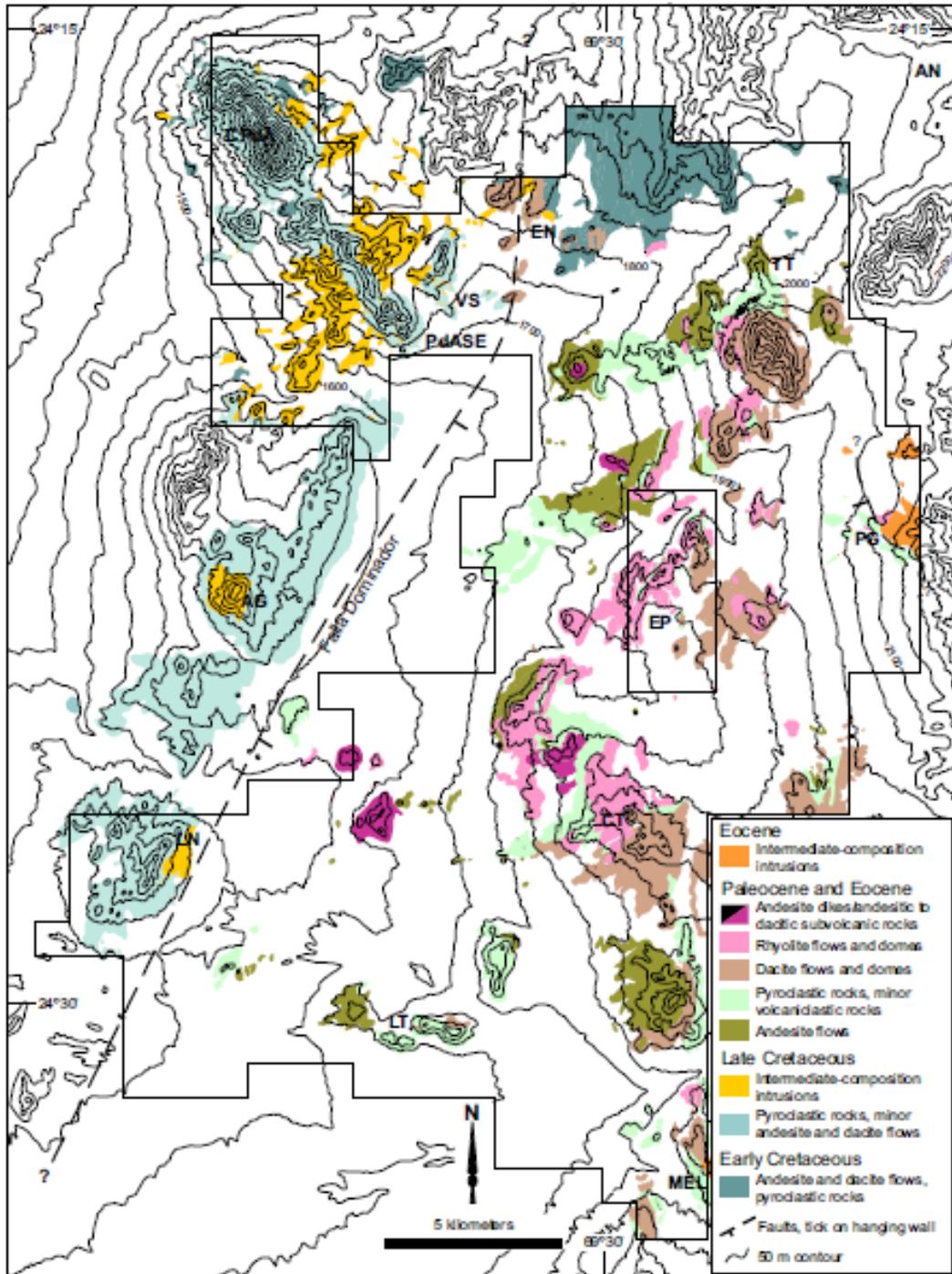


Figura C- 1: geología simplificada del distrito El Peñón [21]

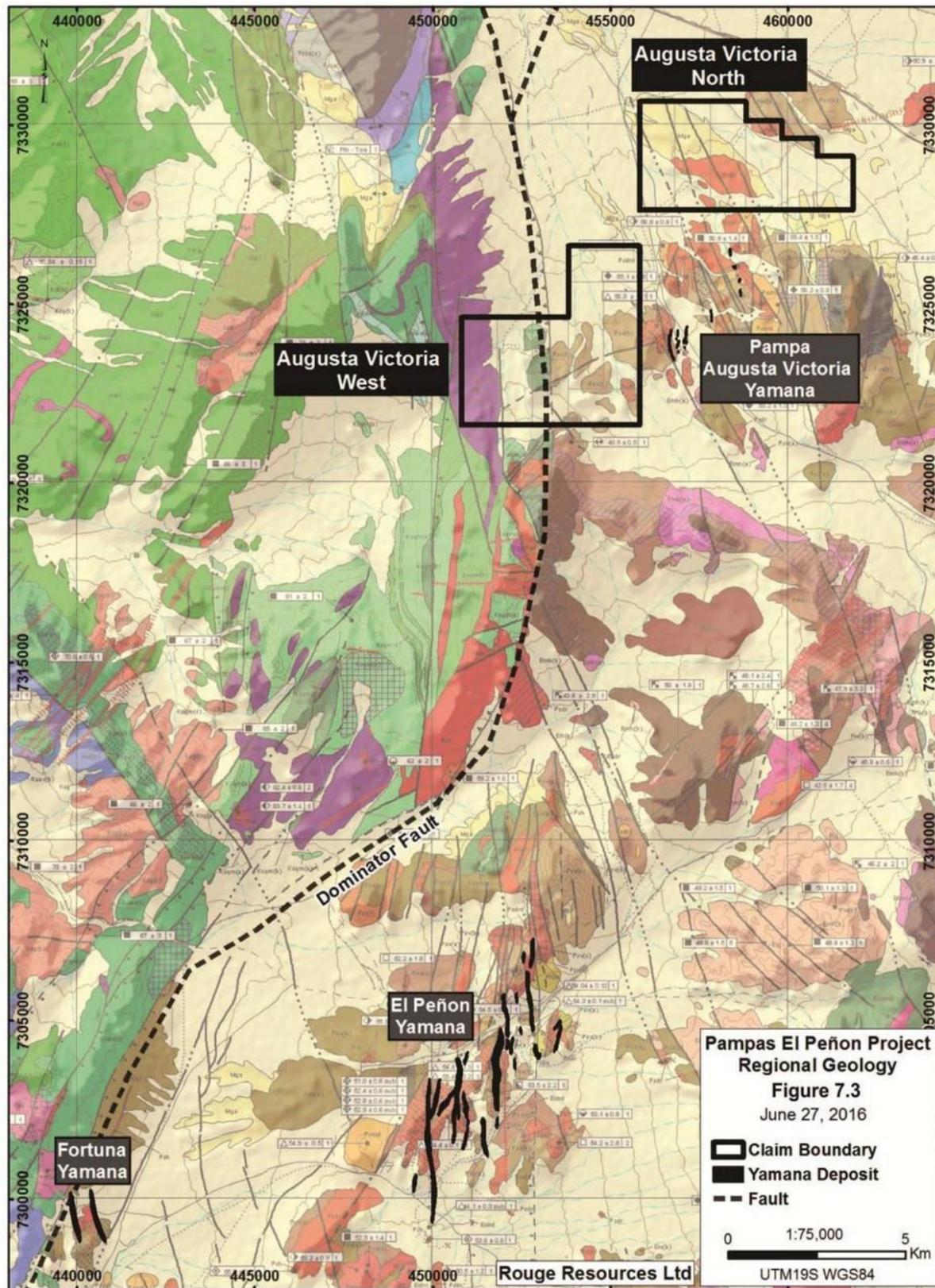


Figura C- 2: geología regional Pampas El Peñón [32]

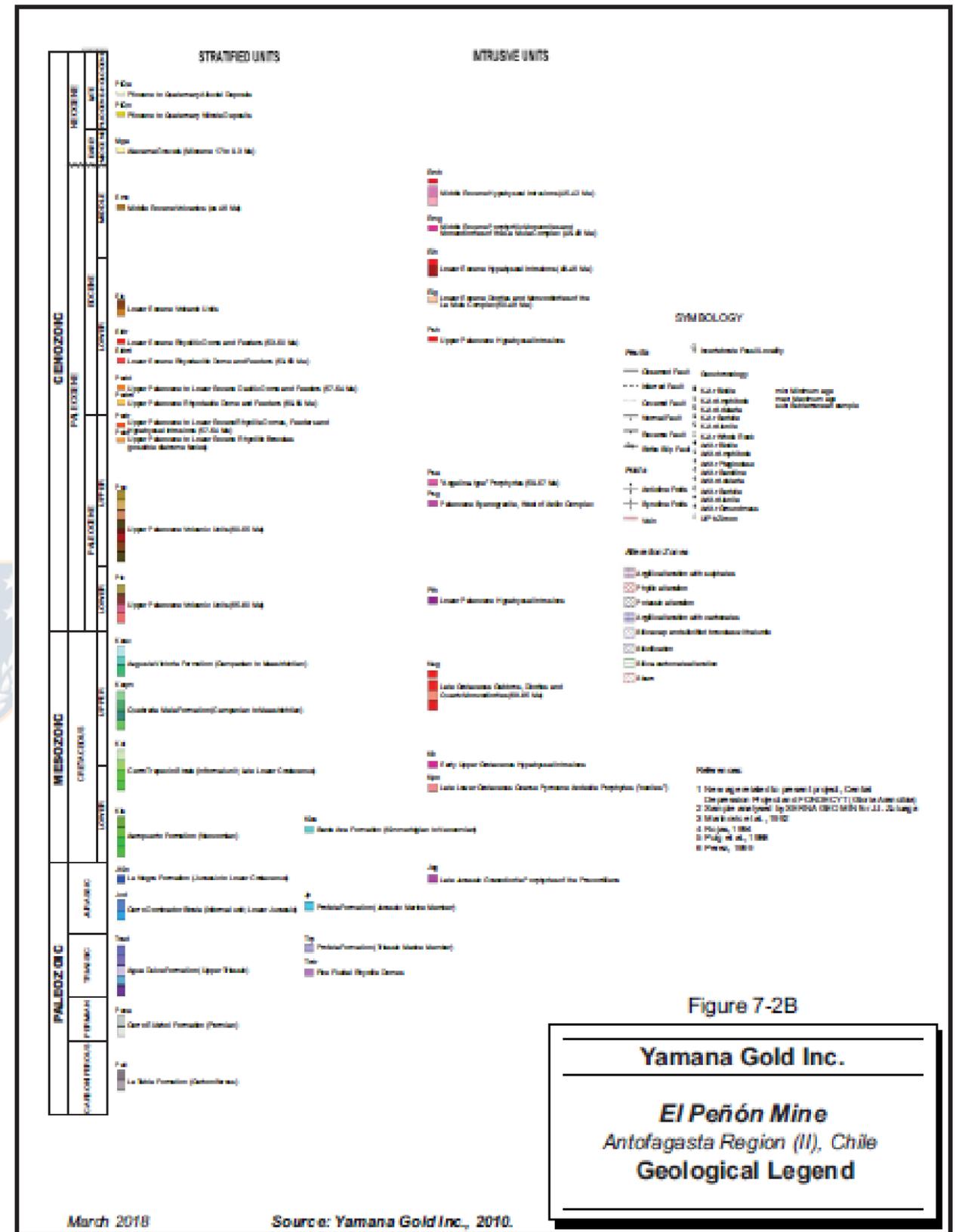
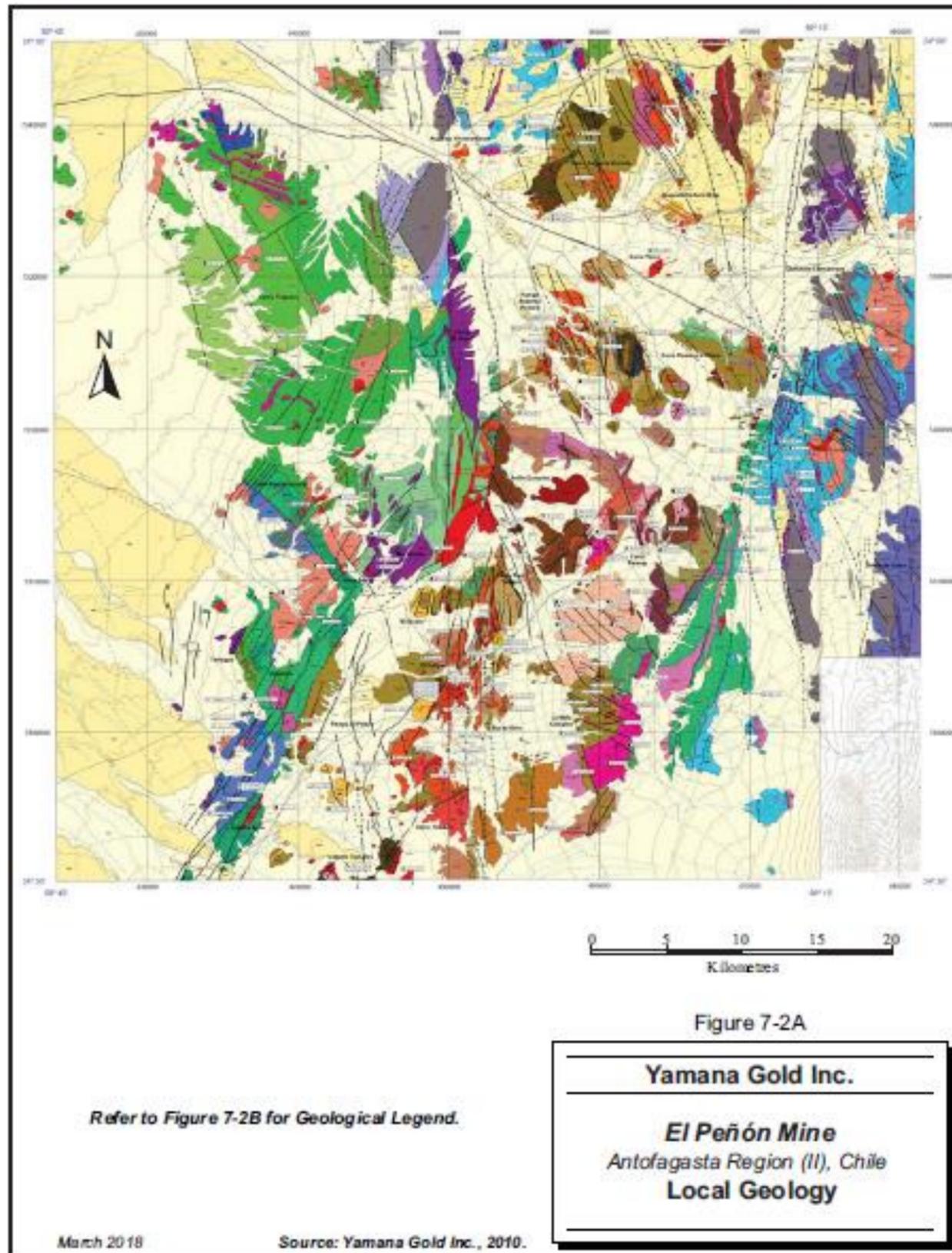


Figura C-3: geología local El Peñón [31]

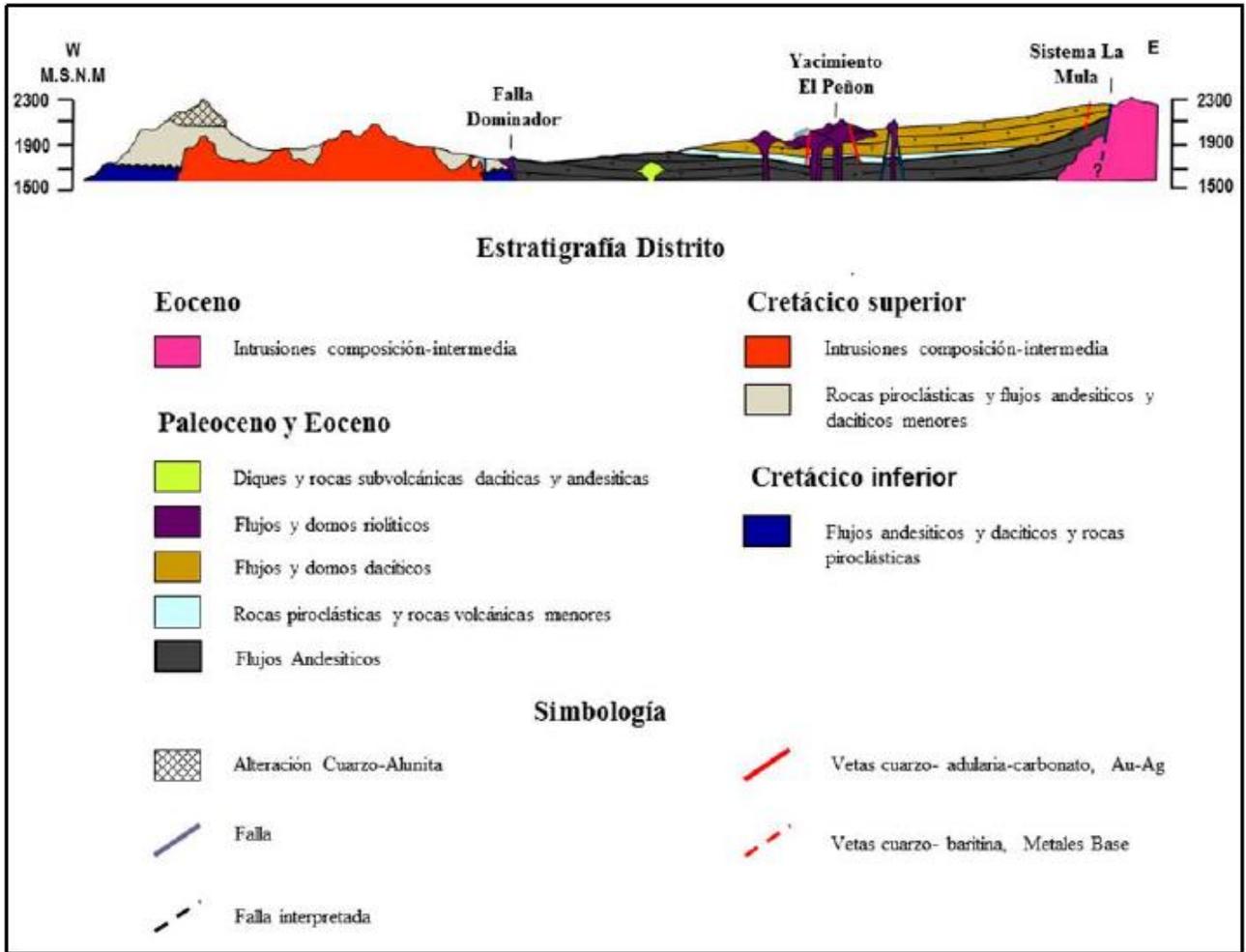


Figura C- 4: perfil geológico escala regional orientación este-oeste El Peñón [29]

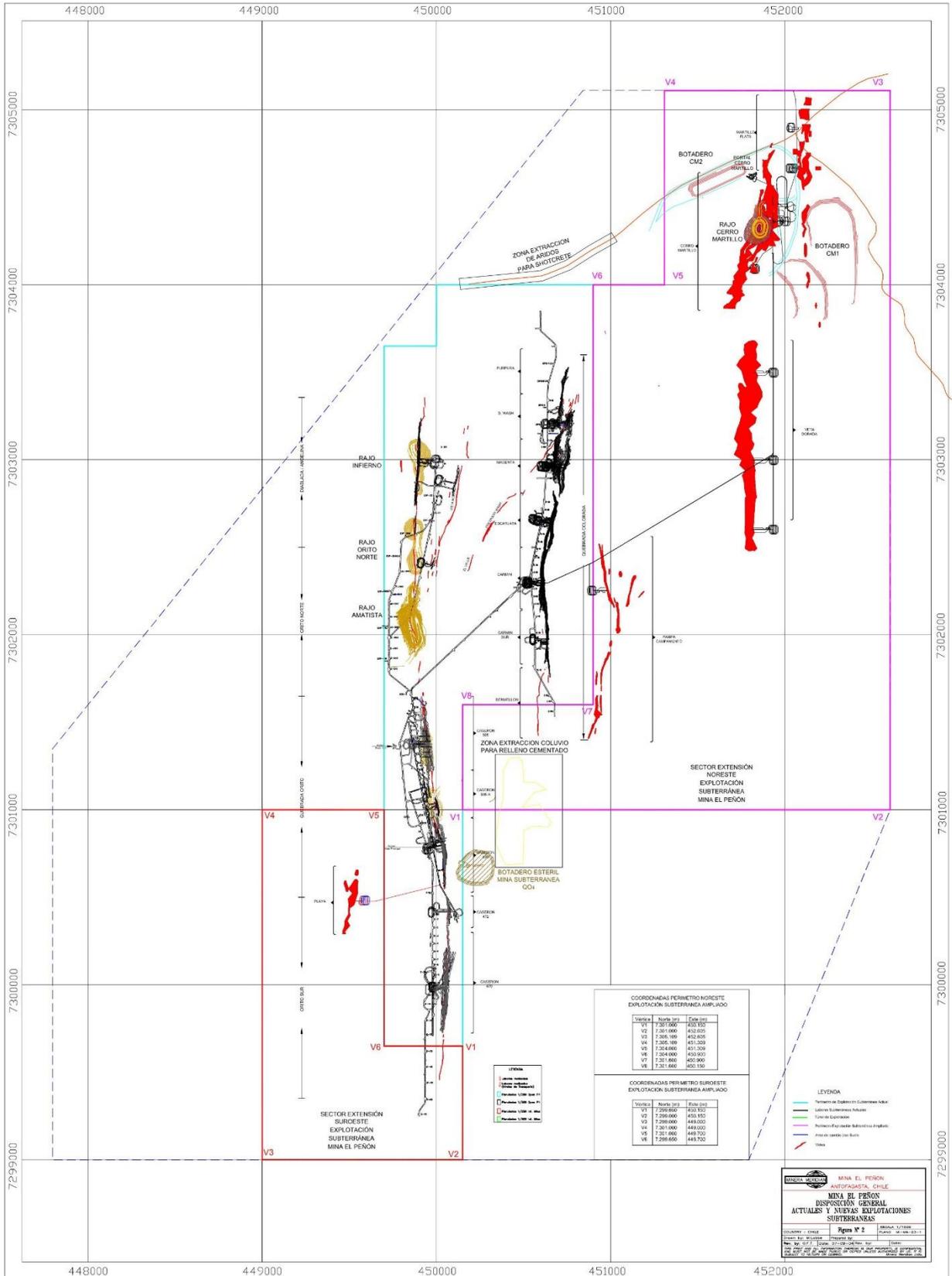


Figura C- 5: vista en planta de labores mineras El Peñón [20]

ANEXO D: PERFILES GEOLÓGICOS



Figura D- 1: perfil 1 451120E (7301000N-7299000N) [22]

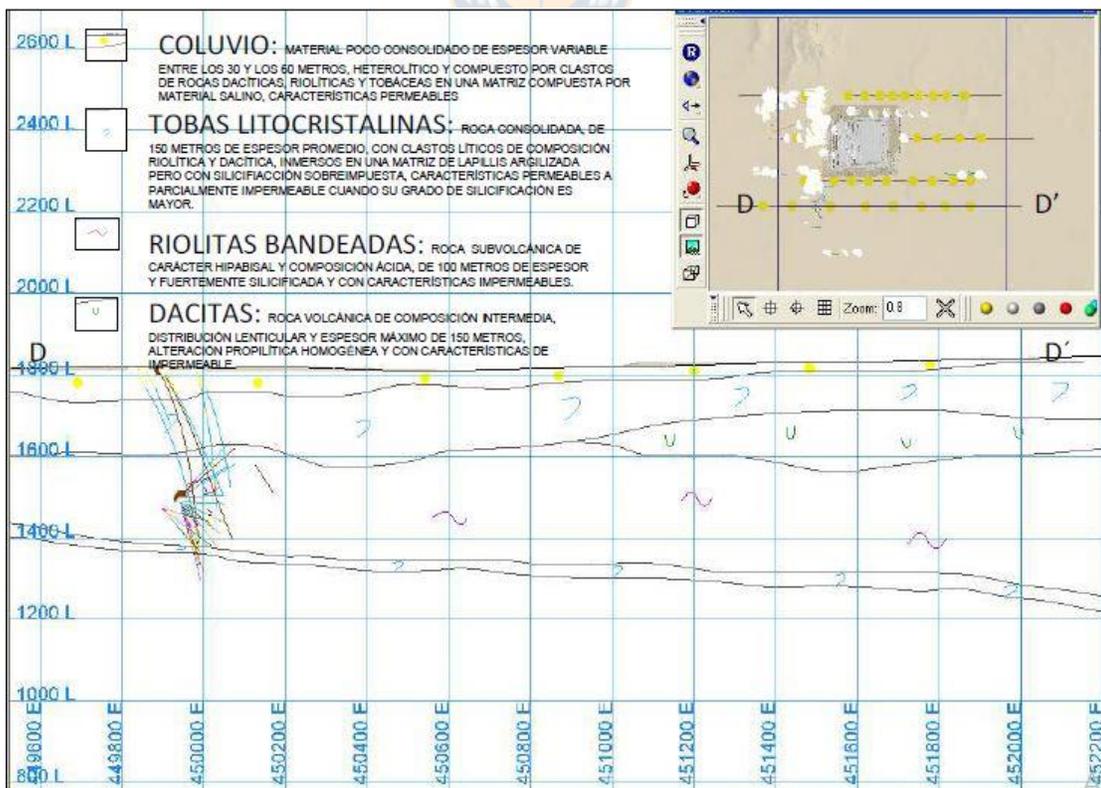


Figura D- 2: perfil 2 7299200N (449600E-452200E) [22]

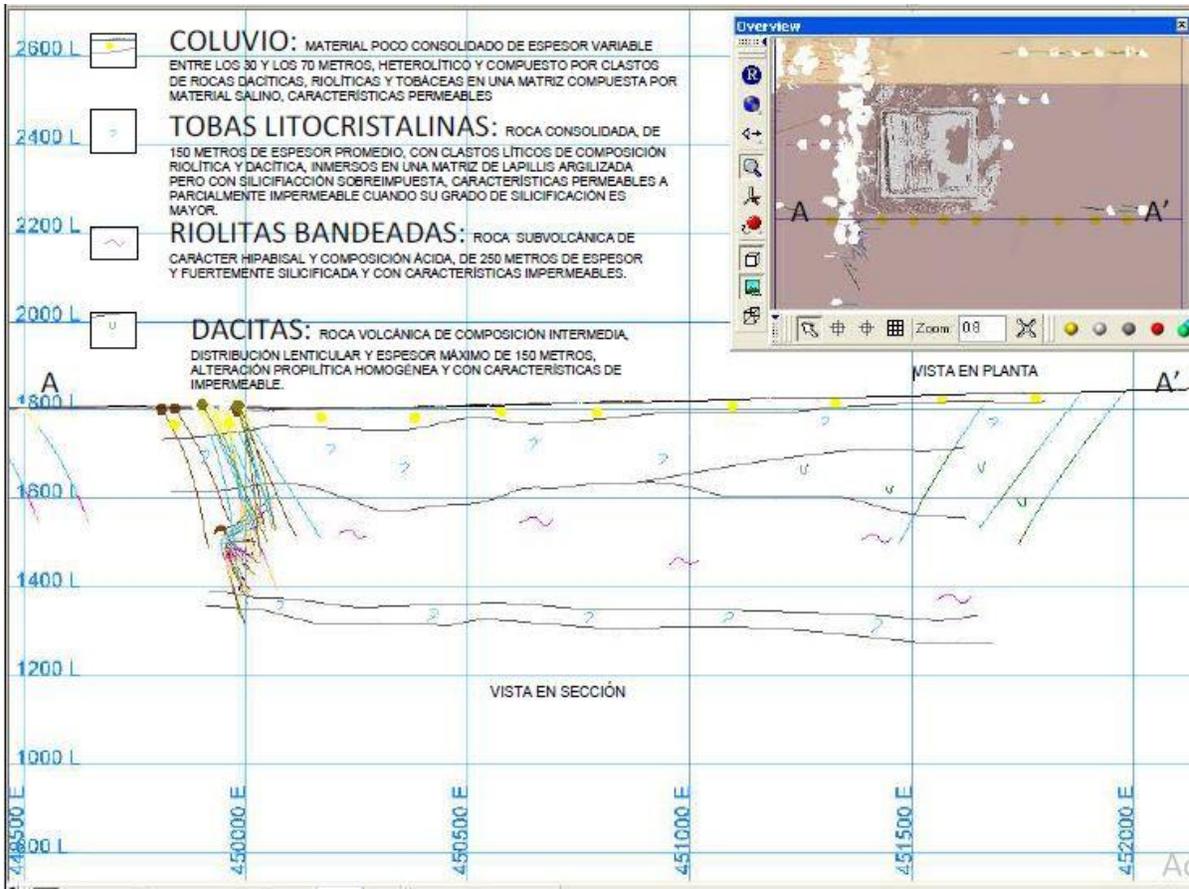


Figura D- 3: perfil 3 7299500N (449500E-452000E) [22]

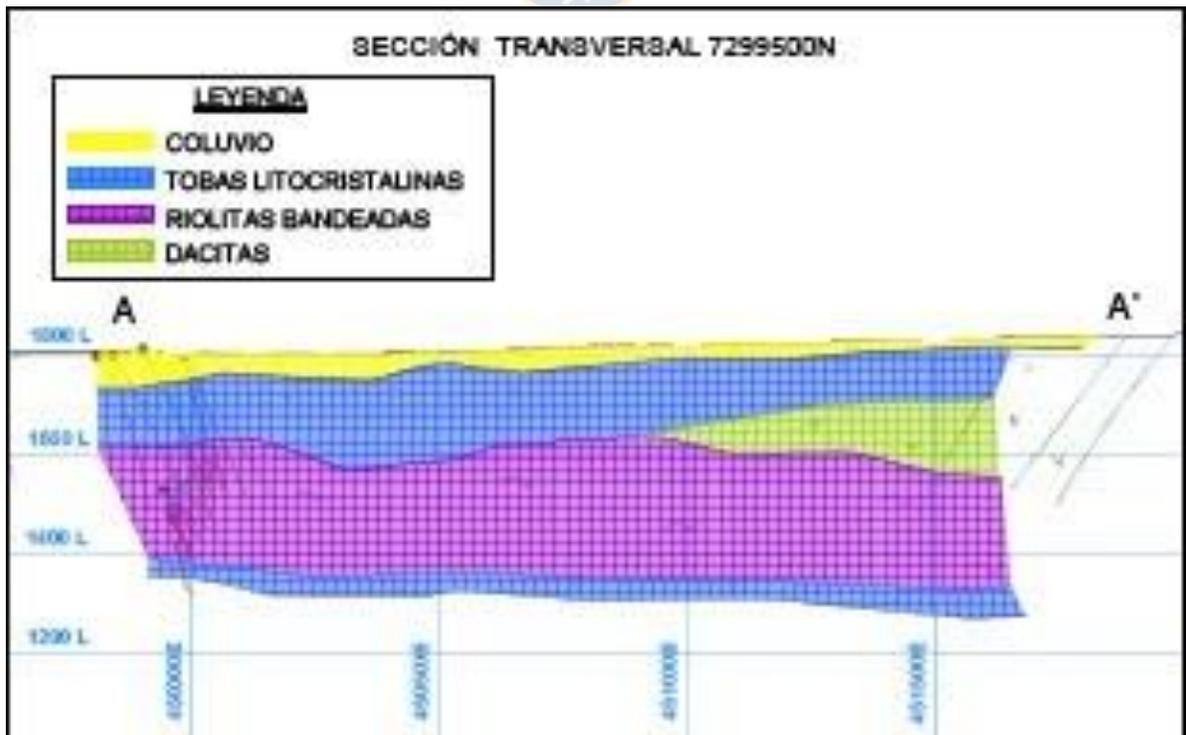


Figura D- 4: perfil 4 7299500N (450000E-451500E) [22]

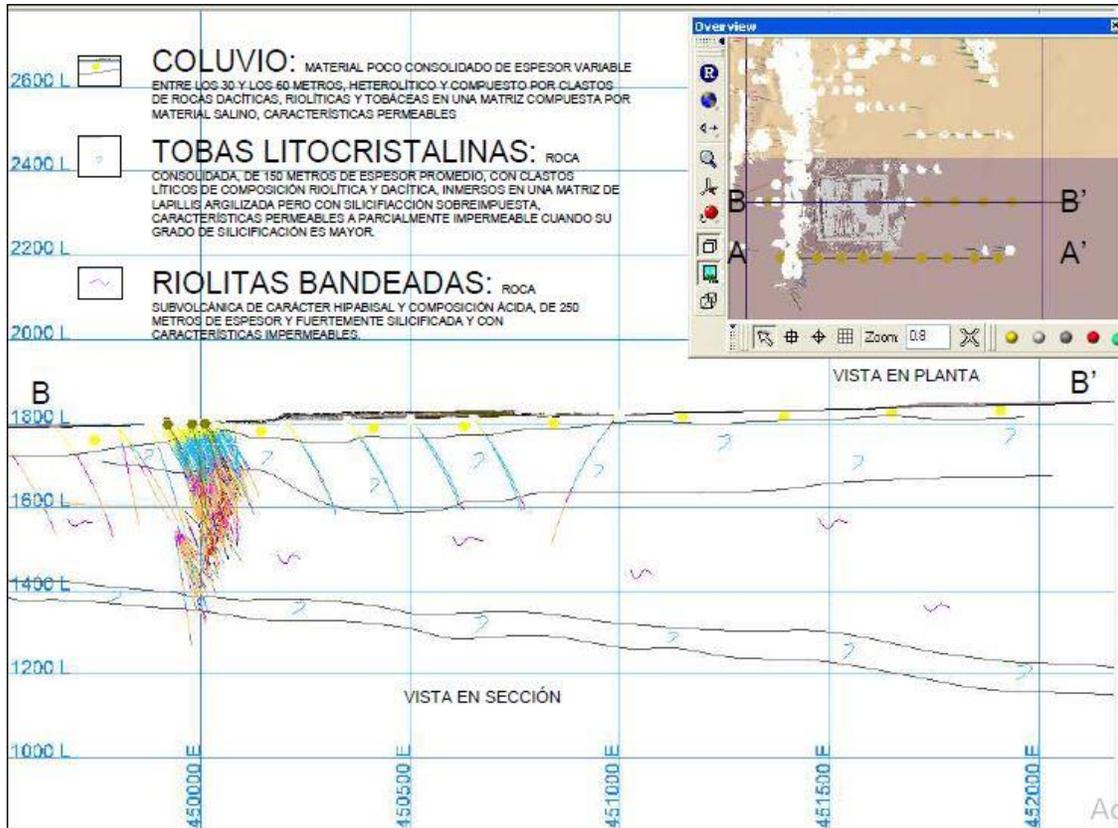


Figura D- 5: perfil 5 7300000N (449500E-452000E) [22]

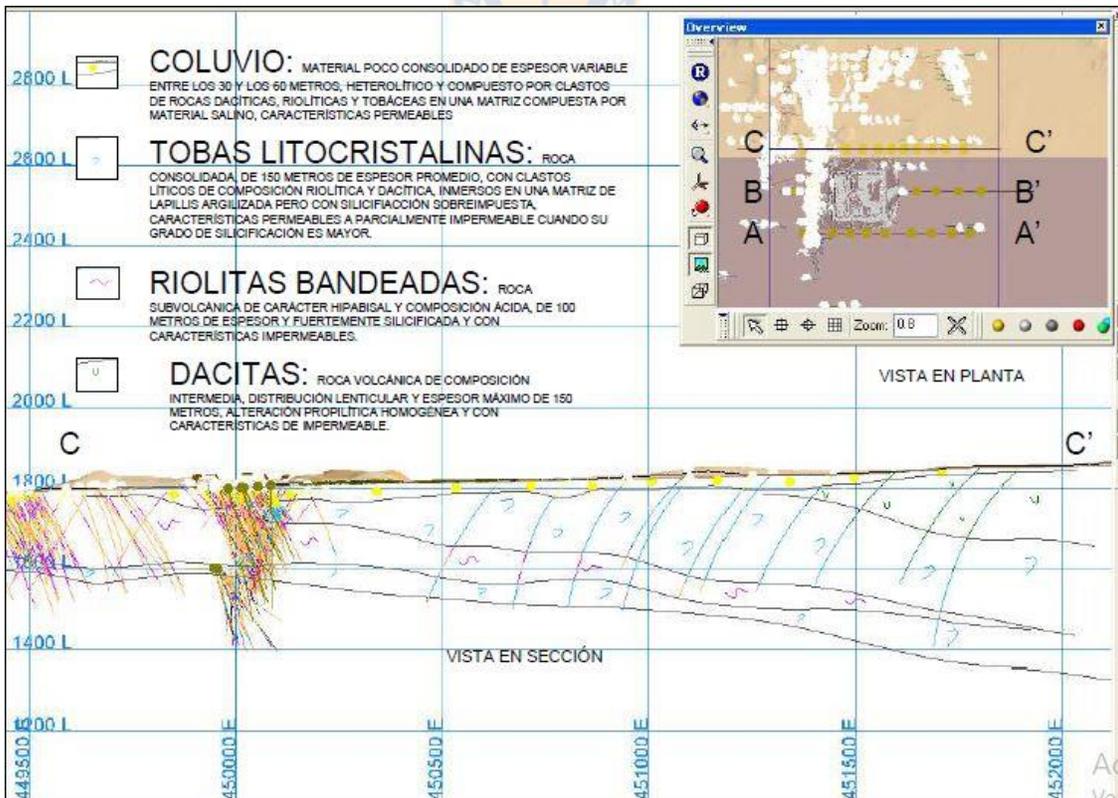


Figura D- 6: perfil 6 7300500N (449500E-452000E) [22]

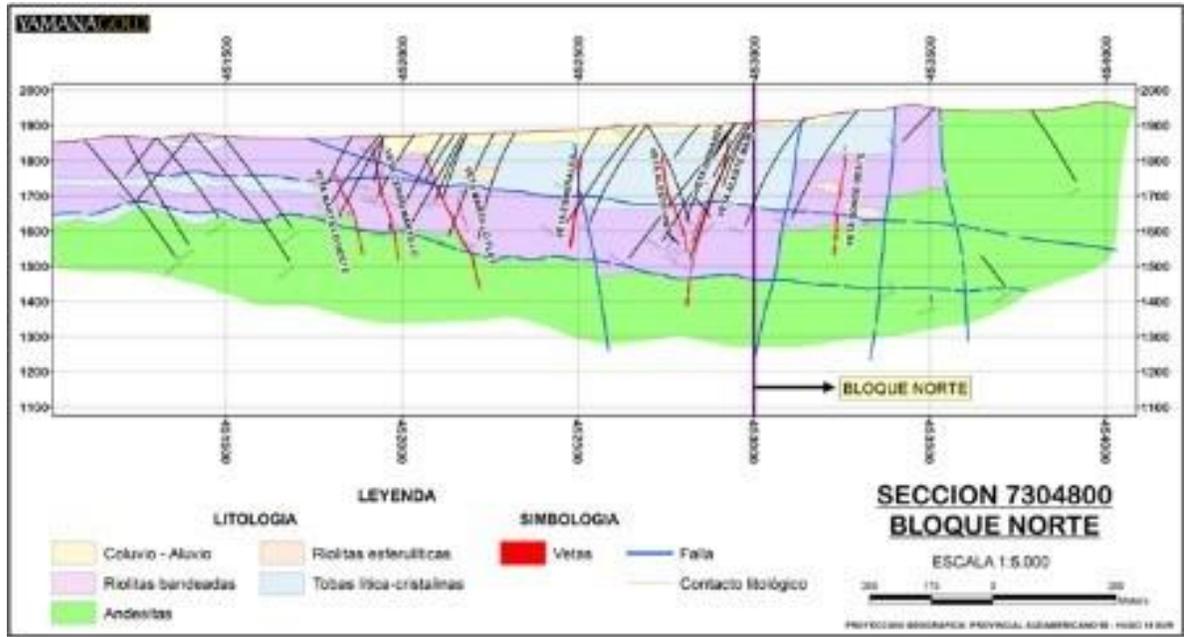


Figura D- 7: perfil 7 7304800N (451000E-454000E) [30]

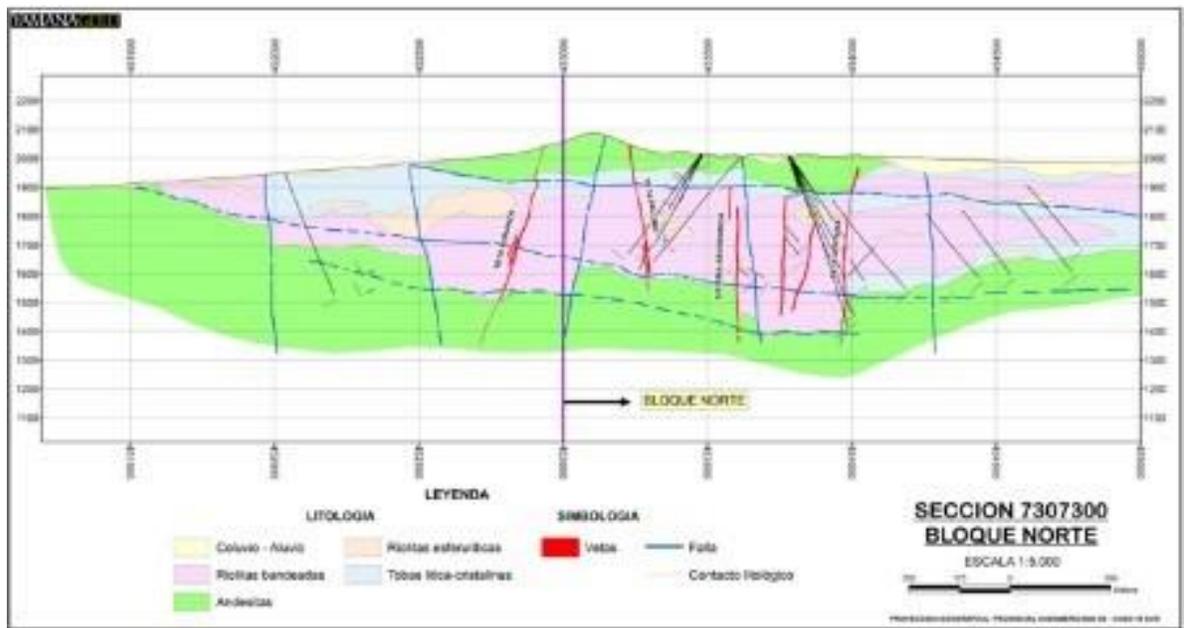


Figura D- 8: perfil 8 7307300N (451500E-455000E) [30]

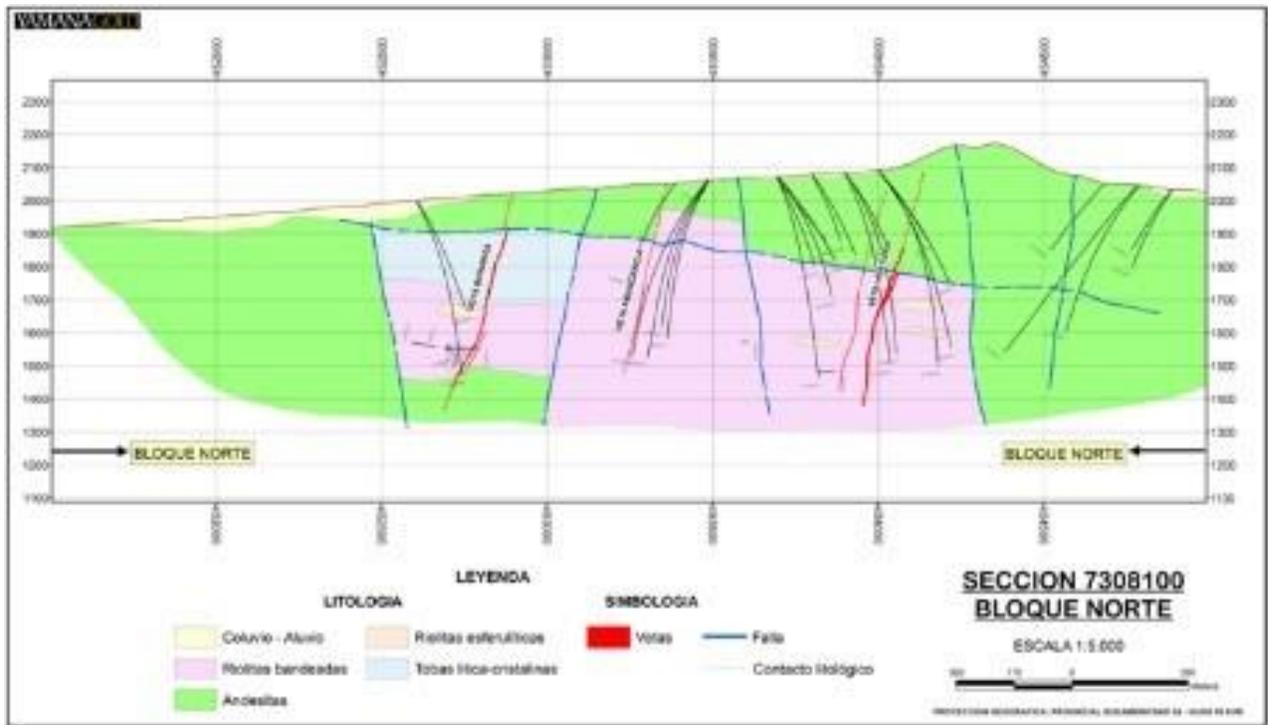


Figura D- 9: perfil 9 7308100N (452000E-455000E) [30]

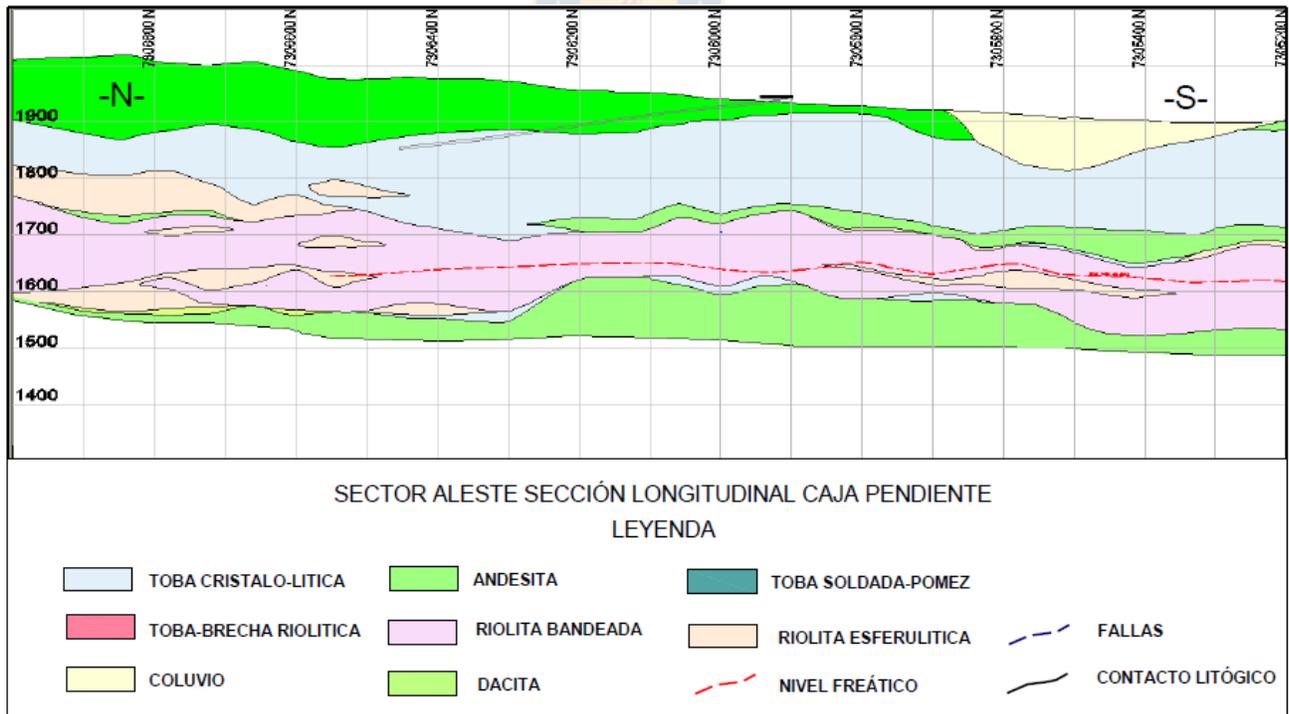


Figura D- 10: perfil 10 452800E (7306800N-7305200N) [30]

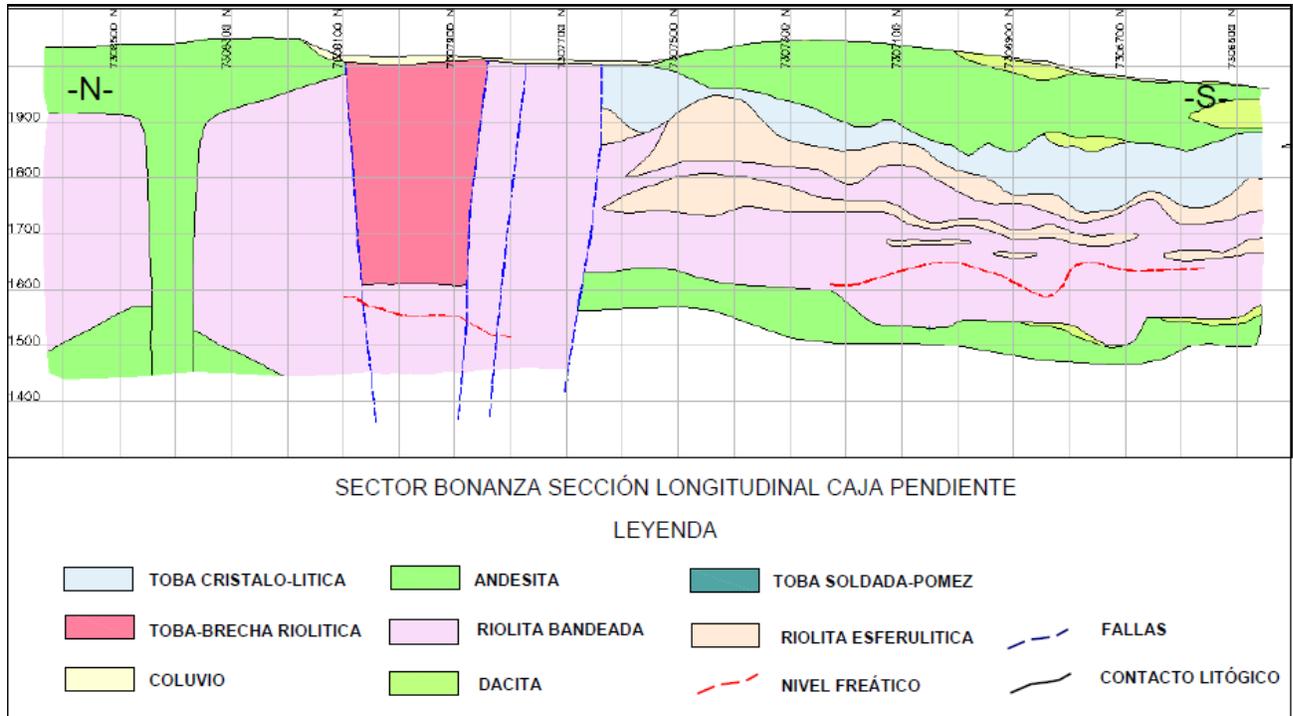


Figura D- 11: perfil 11 452800E (7308500N-7306500N) [30]

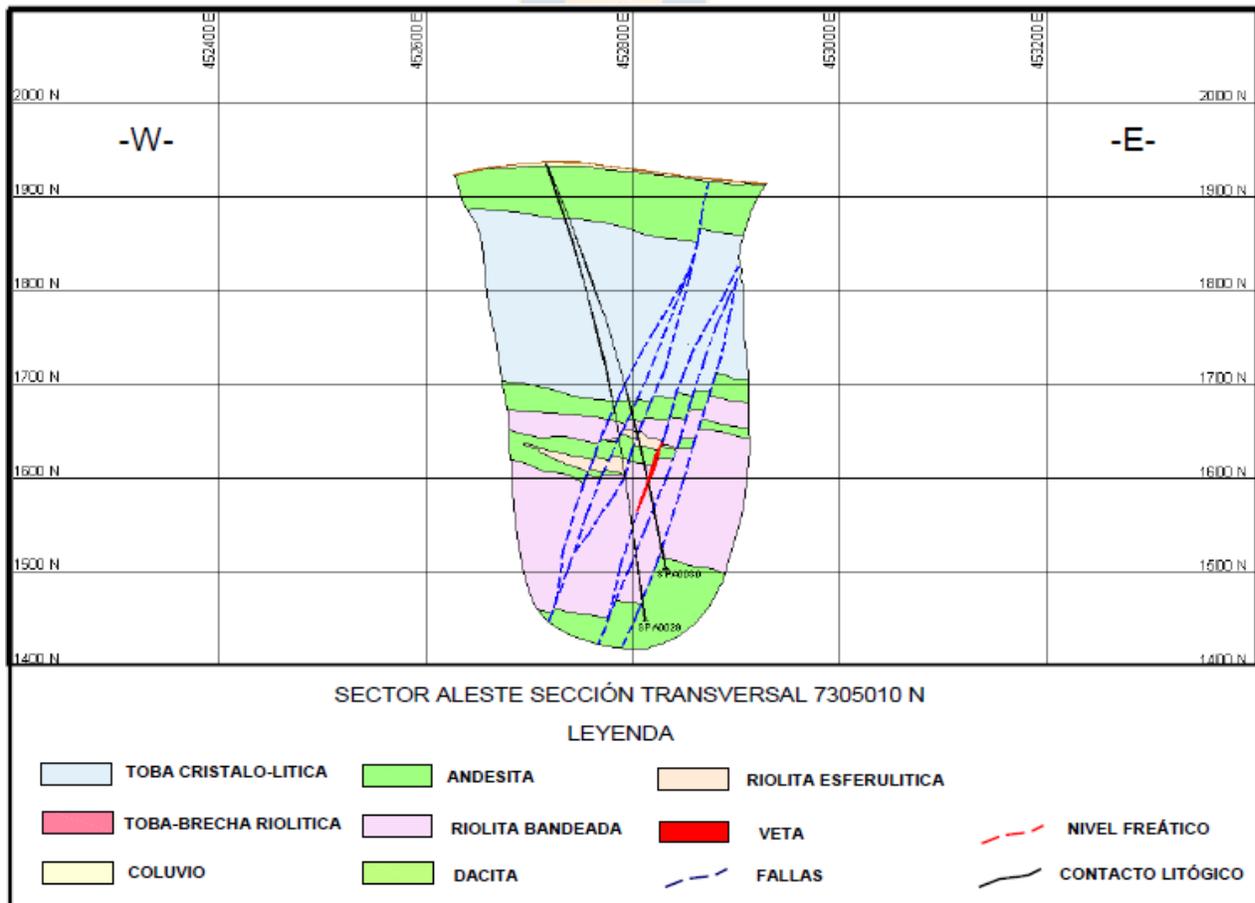


Figura D- 12: perfil 12 7305010N (452600E-453000E) [30]

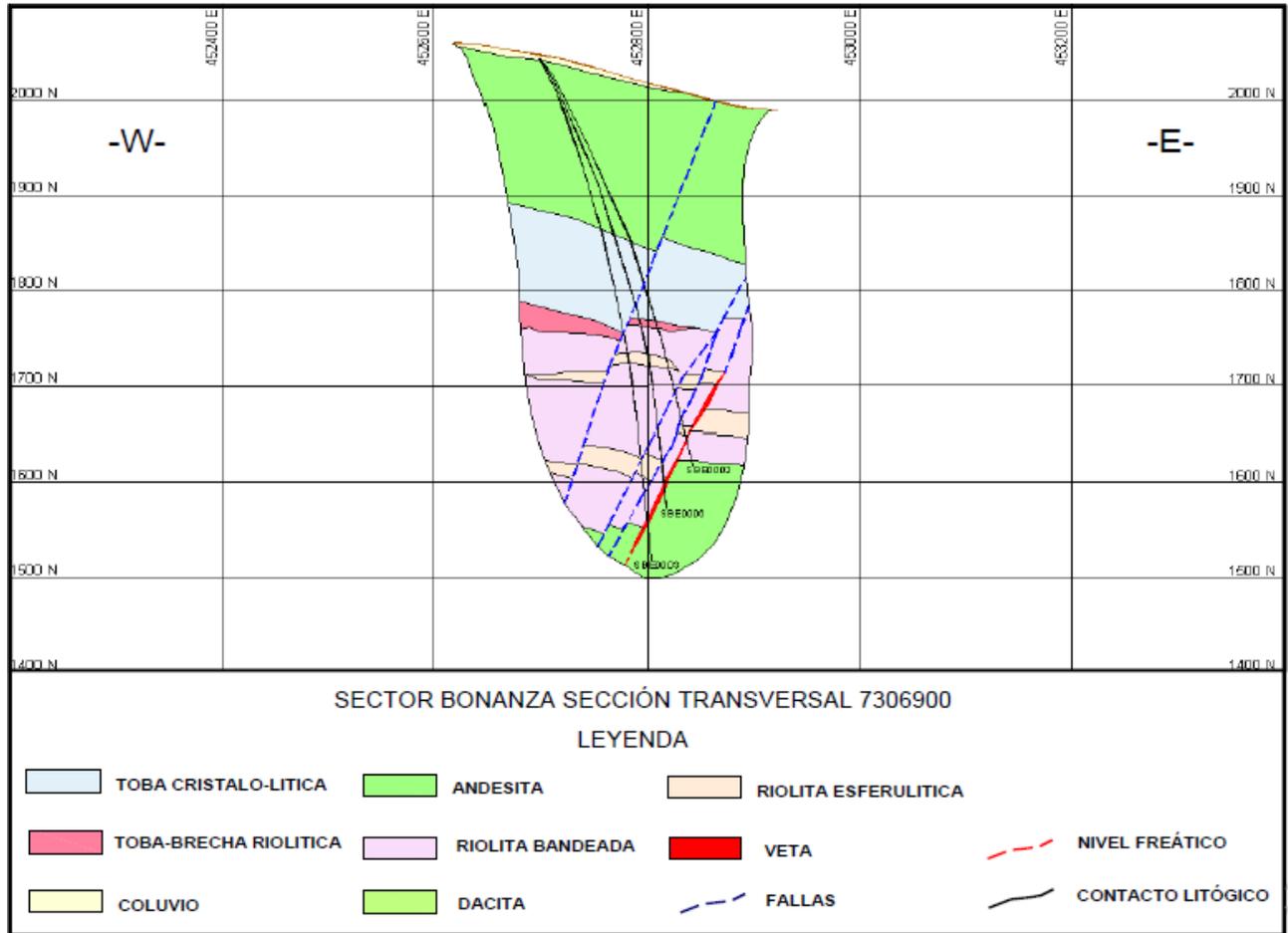


Figura D- 13: perfil 13 7306900N (452600E-453000E) [30]

ANEXO E: SIMULACIONES ADICIONALES
 SERIE 7 – FRACTURAS COMO ELEMENTOS DISCRETOS

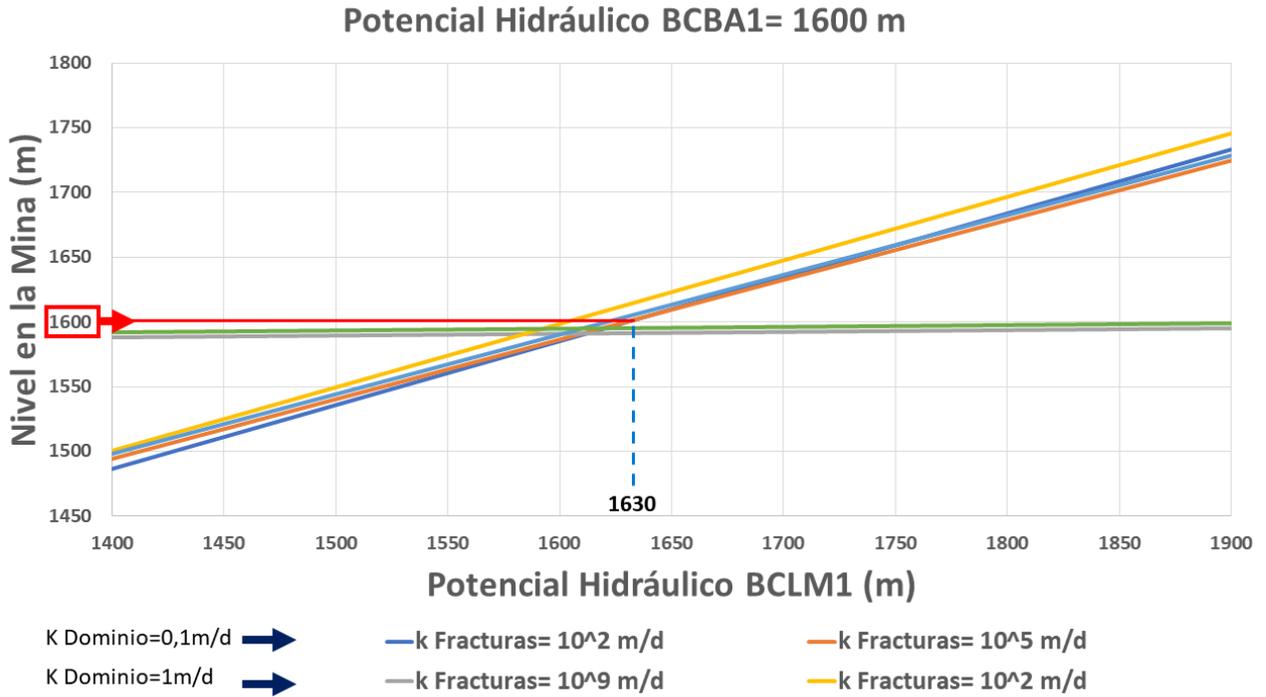


Gráfico E- 1: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1600m

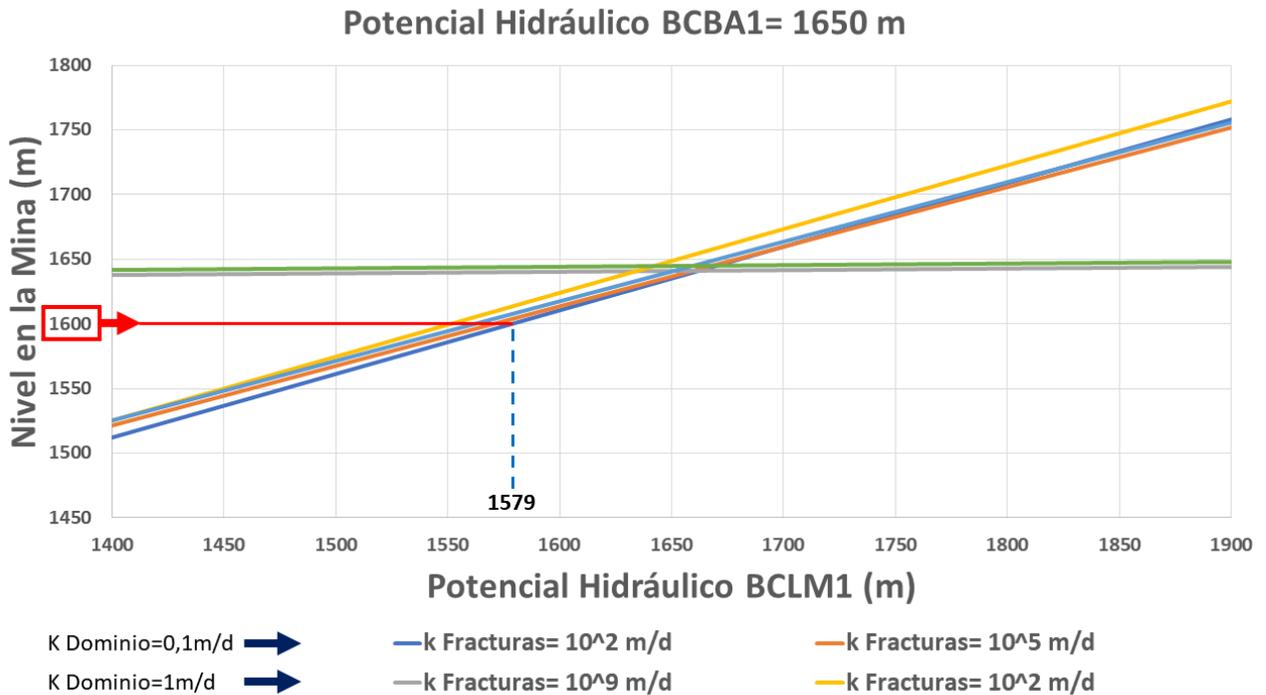


Gráfico E- 2: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1650m

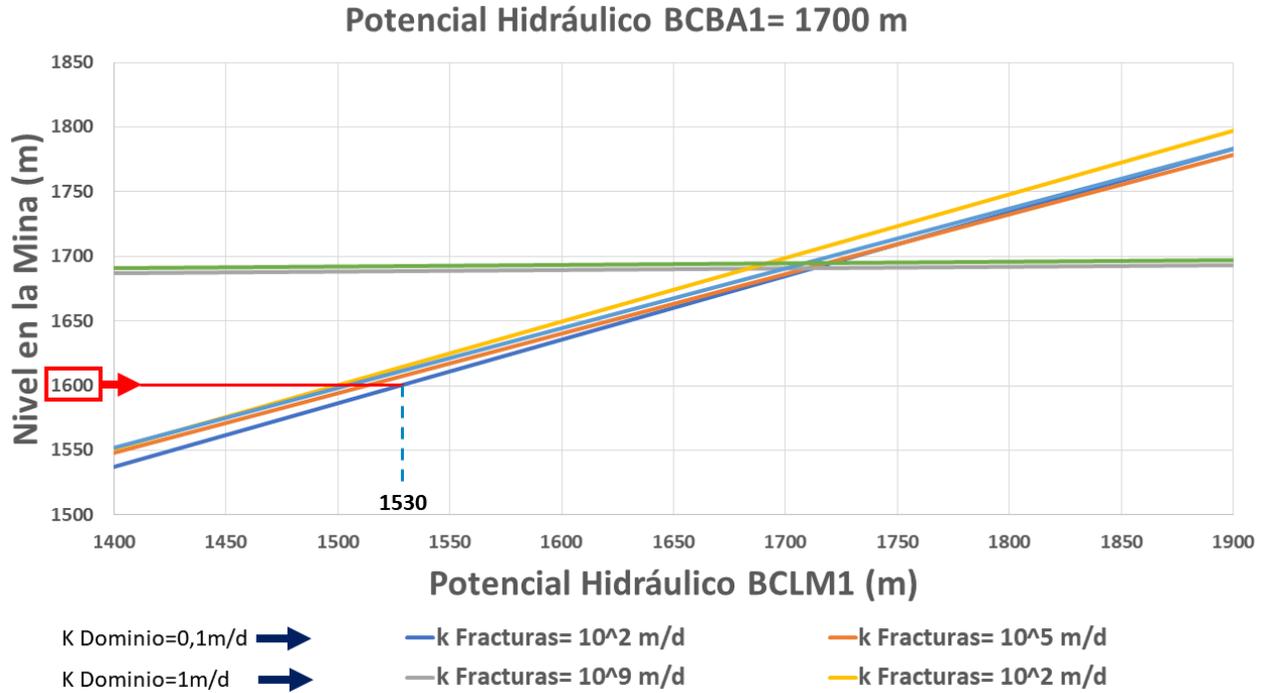


Gráfico E- 3: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1700m

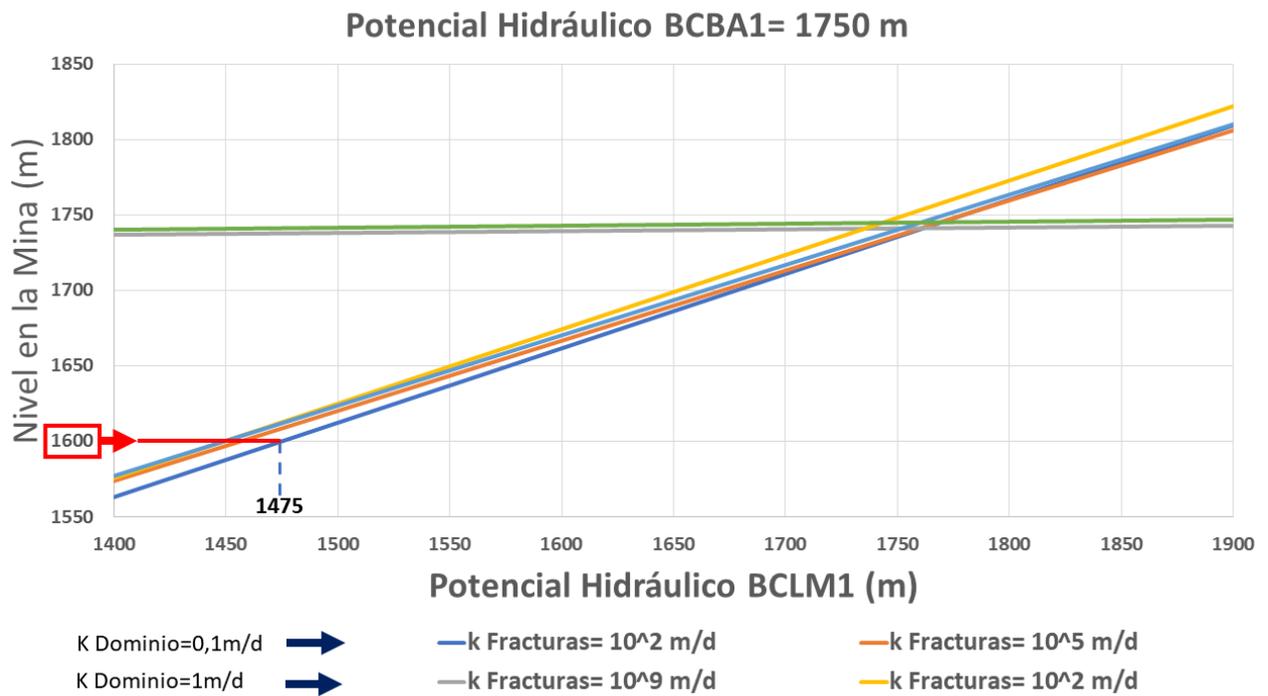


Gráfico E- 4: nivel en la mina vs potencial hidráulico en BCLM1 para BCBA1=1750m

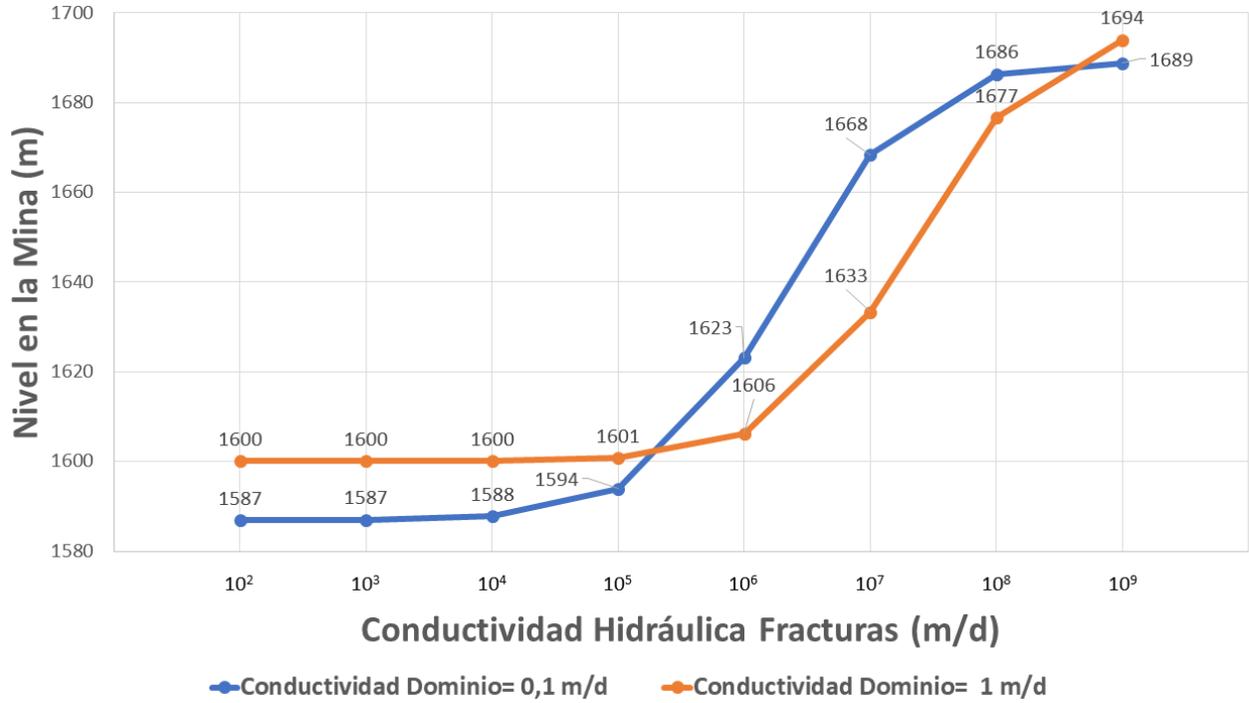


Gráfico E- 5: nivel en la mina vs conductividad hidráulica en las fracturas



ANEXO F: TABLAS CON INFORMACIÓN DE CADA SERIE

Tabla F- 1: datos de entrada de simulaciones de serie 1

	VARIABLE	BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Dominio (m/d)
	RANGO	0	1600 - 1750	0	1400 - 1900	0	0,1
SERIE	SIMULACIÓN						
SERIE 1	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1400	0	1750	0	1400	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1500	0	1750	0	1500	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1600	0	1750	0	1600	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1700	0	1750	0	1700	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1800	0	1750	0	1800	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1900	0	1750	0	1900	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1400	0	1700	0	1400	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	0	1700	0	1500	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1600	0	1700	0	1600	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1700	0	1700	0	1700	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1800	0	1700	0	1800	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1900	0	1700	0	1900	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1400	0	1650	0	1400	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1500	0	1650	0	1500	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1600	0	1650	0	1600	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1700	0	1650	0	1700	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1800	0	1650	0	1800	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1900	0	1650	0	1900	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1400	0	1600	0	1400	0	0,1
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1500	0	1600	0	1500	0	0,1
S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1600	0	1600	0	1600	0	0,1	
S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1700	0	1600	0	1700	0	0,1	
S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1800	0	1600	0	1800	0	0,1	
S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1900	0	1600	0	1900	0	0,1	

Tabla F- 2: datos de entrada de simulaciones de serie 2

VARIABLE		Pozo extracción (m ³ /d)	BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Dominio (m/d)
RANGO		1685	0	1600 - 1750	0	1454 - 1599	0	0,1
SERIE	SIMULACIÓN							
SERIE 2	S2_k_01BCBA1_1750BCLM1_1454	1685	0	1750	0	1454	0	0,1
	S2_k_01BCBA1_1750BCLM1_1599	1685	0	1750	0	1599	0	0,1
	S2_k_01BCBA1_1600BCLM1_1454	1685	0	1600	0	1454	0	0,1
	S2_k_01BCBA1_1600BCLM1_1599	1685	0	1600	0	1599	0	0,1

Tabla F- 3: datos de entrada de simulaciones de serie 3

VARIABLE		Pozo extracción (m ³ /d)	BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Conductividad hidráulica UH1 (m/d)	Conductividad hidráulica UH2 (m/d)
RANGO		1685	0	1650 - 1750	0	1450 - 1550	0	0,001	0,01 - 25
SERIE	SIMULACIÓN								
SERIE 3	S3_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	25
	S3_UH1_0001UH2_10BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	10
	S3_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	1
	S3_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	0,1
	S3_UH1_0001UH2_001BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	0,01
	S3_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	25
	S3_UH1_0001UH2_10BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	10
	S3_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	1
	S3_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	0,1
	S3_UH1_0001UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	0,01
	S3_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	25
	S3_UH1_0001UH2_10BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	10
	S3_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	1
	S3_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	0,1
	S3_UH1_0001UH2_001BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	0,01

Tabla F- 4: datos de entrada de simulaciones de serie 4

VARIABLE		Pozo extracción (m ³ /d)	BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Conductividad hidráulica UH1 (m/d)	Conductividad hidráulica UH2 (m/d)
RANGO			0	1700	0	1500	0	10 ⁻⁹ 1	0,01 - 25
SERIE	SIMULACIÓN								
SERIE 4	S4_UH1_000000001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,000000001	25
	S4_UH1_00000001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,0000001	25
	S4_UH1_000001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,00001	25
	S4_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	25
	S4_UH1_01UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,1	25
	S4_UH1_1UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	1	25
	S4_UH1_0000000001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,000000001	1
	S4_UH1_00000001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,0000001	1
	S4_UH1_000001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,00001	1
	S4_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	1
	S4_UH1_01UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,1	1
	S4_UH1_1UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	1	1
	S4_UH1_0000000001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,000000001	0,1
	S4_UH1_00000001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,0000001	0,1
	S4_UH1_000001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,00001	0,1
	S4_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	0,1
	S4_UH1_01UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,1	0,1
	S4_UH1_1UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	1	0,1
	S4_UH1_0000000001UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,000000001	0,01
	S4_UH1_00000001UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,0000001	0,01
S4_UH1_000001UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,00001	0,01	
S4_UH1_0001UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	0,01	
S4_UH1_01UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,1	0,01	
S4_UH1_1UH2_001BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	1	0,01	

Tabla F- 5: datos de entrada de simulaciones de serie 6

VARIABLE		Pozo extracción (m ³ /d)	BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Conductividad hidráulica UH1 (m/d)	Conductividad hidráulica UH2 (m/d)
RANGO		1685	0	1600-1750	0	1400-1900	0	0,001	0,1 - 1
SERIE	SIMULACIÓN								
SERIE 6	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1475	1685	0	1750	0	1475	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1500	1685	0	1750	0	1500	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1525	1685	0	1700	0	1525	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1550	1685	0	1700	0	1550	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1575	1685	0	1650	0	1575	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1600	1685	0	1650	0	1600	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1600	1685	0	1600	0	1600	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1625	1685	0	1600	0	1625	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1650	1685	0	1600	0	1650	0	0,001	0,1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1425	1685	0	1750	0	1425	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1450	1685	0	1750	0	1450	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1475	1685	0	1750	0	1475	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1475	1685	0	1700	0	1475	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	1685	0	1700	0	1500	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1525	1685	0	1700	0	1525	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1525	1685	0	1650	0	1525	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1550	1685	0	1650	0	1550	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1575	1685	0	1650	0	1575	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1600BCLM1_1595	1685	0	1600	0	1595	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1600BCLM1_1600	1685	0	1600	0	1600	0	0,001	1
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1600BCLM1_1605	1685	0	1600	0	1605	0	0,001	1

Tabla F- 6: datos de entrada de simulaciones de serie 5

VARIABLE		BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Conductividad hidráulica UH1 (m/d)	Conductividad hidráulica UH2 (m/d)
RANGO		0	1600-1750	0	1400-1900	0	0,00001	0,1
SERIE	SIMULACIÓN							
SERIE 5	S5_UH1_000001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1400	0	1750	0	1400	0	0,00001	0,1
	S5_UH1_000001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1900	0	1750	0	1900	0	0,00001	0,1
	S5_UH1_000001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1400	0	1600	0	1400	0	0,00001	0,1
	S5_UH1_000001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1900	0	1600	0	1900	0	0,00001	0,1

Tabla F- 7: datos de entrada de simulaciones de serie 7

VARIABLE		Pozo extracción (m ³ /d)	BCD (m ³ /d)	BCBA1 (m)	BCBA2 (m ³ /d)	BCLM1 (m)	BCLM2 (m ³ /d)	Conductividad hidráulica UH1 (m/d)	Conductivida d hidráulica UH2 (m/d)	Conductividad hidráulica UH3 (m/d)
RANGO		1685	0	1600-1750	0	1478-1635	0	0,00001	0,1	10-1000
SERIE	SIMULACIÓN									
SERIE 7	S7_UH1_000001UH2_01UH3_10BCBA1_1750BCLM1_1478	1685	0	1750	0	1478	0	0,00001	0,1	10
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_10BCBA1_1750BCLM1_1635	1685	0	1750	0	1635	0	0,00001	0,1	10
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_10BCBA1_1600BCLM1_1478	1685	0	1600	0	1478	0	0,00001	0,1	10
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_10BCBA1_1600BCLM1_1635	1685	0	1600	0	1635	0	0,00001	0,1	10
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_100BCBA1_1750BCLM1_1478	1685	0	1750	0	1478	0	0,00001	0,1	100
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_100BCBA1_1750BCLM1_1635	1685	0	1750	0	1635	0	0,00001	0,1	100
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_100BCBA1_1600BCLM1_1478	1685	0	1600	0	1478	0	0,00001	0,1	100
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_100BCBA1_1600BCLM1_1635	1685	0	1600	0	1635	0	0,00001	0,1	100
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1000BCBA1_1750BCLM1_1478	1685	0	1750	0	1478	0	0,00001	0,1	1000
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1000BCBA1_1750BCLM1_1635	1685	0	1750	0	1635	0	0,00001	0,1	1000
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1000BCBA1_1600BCLM1_1478	1685	0	1600	0	1478	0	0,00001	0,1	1000
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1000BCBA1_1600BCLM1_1635	1685	0	1600	0	1635	0	0,00001	0,1	1000

Tabla F- 8: información serie de simulación de fracturas como elementos discretos

Pozo Extracción (m ³ /d)	Conductividad (m/d)			Potencial hidráulico (m)		Nivel en la mina (m)
	DOMINIO	FRACTURAS	ÁREA FRACTURA (m ²)	BCBA1	BCLM1	
1685	0,1	100	1	1750	1400	1563
1685	0,1	100000	1	1750	1400	1575
1685	0,1	10000000	1	1750	1400	1701
1685	0,1	1000000000	1	1750	1400	1737
1685	0,1	100	1	1750	1630	1676
1685	0,1	100000	1	1750	1630	1681
1685	0,1	10000000	1	1750	1630	1727
1685	0,1	1000000000	1	1750	1630	1740
1685	0,1	100	1	1600	1400	1487
1685	0,1	100000	1	1600	1400	1494
1685	0,1	10000000	1	1600	1400	1568
1685	0,1	1000000000	1	1600	1400	1588
1685	0,1	100	1	1600	1630	1600
1685	0,1	100000	1	1600	1630	1600
1685	0,1	10000000	1	1600	1630	1594
1685	0,1	1000000000	1	1600	1630	1591
1685	1	100	1	1750	1400	1576
1685	1	100000	1	1750	1400	1577
1685	1	10000000	1	1750	1400	1634
1685	1	1000000000	1	1750	1400	1740
1685	1	100	1	1750	1630	1689
1685	1	100000	1	1750	1630	1690
1685	1	10000000	1	1750	1630	1710
1685	1	1000000000	1	1750	1630	1746
1685	1	100	1	1600	1400	1500
1685	1	100000	1	1600	1400	1501
1685	1	10000000	1	1600	1400	1533

1685	1	1000000000	1	1600	1400	1594
1685	1	100	1	1600	1630	1613
1685	1	100000	1	1600	1630	1613
1685	1	10000000	1	1600	1630	1609
1685	1	1000000000	1	1600	1630	1600



ANEXO G: TABLAS CON RESULTADOS DE SERIES DE SIMULACIÓN

Tabla G- 1: resultados de niveles piezométricos de serie 1

SERIE	SIMULACIÓN	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 1	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1400	1579,73
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1500	1628,38
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1600	1677,03
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1700	1725,68
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1800	1774,33
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1750BCLM1_1900	1822,98
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1400	1554,05
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1500	1602,70
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1600	1651,35
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1700	1700,00
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1800	1748,65
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1700BCLM1_1900	1797,30
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1400	1528,38
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1500	1577,03
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1600	1625,68
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1700	1674,33
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1800	1722,98
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1650BCLM1_1900	1771,63
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1400	1502,7
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1500	1551,35
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1600	1600
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1700	1648,65
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1800	1697,3
	S1_UH1_0001UH2_25BCBA1_1600BCLM1_1900	1745,95

Tabla G- 2: resultados de niveles piezométricos de serie 2

SERIE	SIMULACIÓN	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 2	S2_k_01BCBA1_1750BCLM1_1454	1578
	S2_k_01BCBA1_1750BCLM1_1599	1653
	S2_k_01BCBA1_1600BCLM1_1454	1508
	S2_k_01BCBA1_1600BCLM1_1599	1584

Tabla G- 3: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 3

SERIE	SIMULACIÓN	CAUDAL BCBA1 (m ³ /d)	CAUDAL BCLM1 (m ³ /d)	CAUDAL ENTRADA MINA (m ³ /d)	CAUDAL SALIDA MINA (m ³ /d)	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 3	S3_UH1_0001UH2_25BCBA 1_1750BCLM1_1450	3439300	3437600	1550700	1549000	1604
	S3_UH1_0001UH2_10BCBA 1_1750BCLM1_1450	1376300	1374600	610680	618990	1604
	S3_UH1_0001UH2_1BCBA1 _1750BCLM1_1450	138500	136820	62650	60965	1602
	S3_UH1_0001UH2_01BCBA 1_1750BCLM1_1450	14720	13035	6848	5163,2	1587
	S3_UH1_0001UH2_001BCB A1_1750BCLM1_1450	2326	641,01	1787	102,01	1440
	S3_UH1_0001UH2_25BCBA 1_1700BCLM1_1500	2293200	2291500	1034000	1032300	1603
	S3_UH1_0001UH2_10BCBA 1_1700BCLM1_1500	917820	916140	414000	412320	1603
	S3_UH1_0001UH2_1BCBA1 _1700BCLM1_1500	92623	90938	41981	40296	1601
	S3_UH1_0001UH2_01BCBA 1_1700BCLM1_1500	10101	8416,2	4780	3095,4	1585
	S3_UH1_0001UH2_001BCB A1_1700BCLM1_1500	1834,3	149,26	1688	2,56	1436
	S3_UH1_0001UH2_25BCBA 1_1650BCLM1_1550	1147000	1145300	117340	515650	1601
	S3_UH1_0001UH2_10BCBA 1_1650BCLM1_1550	459340	457660	207320	205640	1601
	S3_UH1_0001UH2_1BCBA1 _1650BCLM1_1550	46744	45059	21312	19627	1600
	S3_UH1_0001UH2_01BCBA 1_1650BCLM1_1550	5482,4	3797,4	2818	1132,7	1584
	S3_UH1_0001UH2_001BCB A1_1650BCLM1_1550	1342,5	342,48	1685	0	1436

Tabla G- 4: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 4

SERIE	SIMULACIÓN	CAUDAL BCBA1 (m ³ /d)	CAUDAL BCLM1 (m ³ /d)	CAUDAL ENTRADA MINA (m ³ /d)	CAUDAL SALIDA MINA (m ³ /d)	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 4	S4_UH1_000000001UH2_25 BCBA1_1700BCLM1_1500	2293100	2291415	1034000	1032315	1603
	S4_UH1_00000001UH2_25B CBA1_1700BCLM1_1500	2293100	2291415	1034000,00	1032315	1603
	S4_UH1_000001UH2_25BCB A1_1700BCLM1_1500	2293100	2291415	1034000	1032315	1603
	S4_UH1_0001UH2_25BCBA1 _1700BCLM1_1500	2293200	2291515	1034000	1032315	1603
	S4_UH1_01UH2_25BCBA1_1 700BCLM1_1500	2300000	2298315	1034200	1032515	1603
	S4_UH1_1UH2_25BCBA1_17 00BCLM1_1500	2361000	2359315	1035600	1033915	1602
	S4_UH1_000000001UH2_1 BCBA1_1700BCLM1_1500	92554	90869	41978	40293	1603
	S4_UH1_00000001UH2_1BC BA1_1700BCLM1_1500	92554	90869	41978	40293	1603
	S4_UH1_000001UH2_1BCBA 1_1700BCLM1_1500	92555	90870	41977	40292	1603
	S4_UH1_0001UH2_1BCBA1_ 1700BCLM1_1500	92623	90938	41981	40296	1601
	S4_UH1_01UH2_1BCBA1_17 00BCLM1_1500	99200	97515	42071	40386	1599
	S4_UH1_1UH2_1BCBA1_170 0BCLM1_1500	149850	148165	40167	38482	1591
	S4_UH1_0000000001UH2_01 BCBA1_1700BCLM1_1500	10034	8349	4776,3	3091,3	1603
	S4_UH1_00000001UH2_01B CBA1_1700BCLM1_1500	10034	8349	4776,3	3091,3	1603
	S4_UH1_000001UH2_01BCB A1_1700BCLM1_1500	10035	8350	4776,3	3091,3	1603
	S4_UH1_0001UH2_01BCBA1 _1700BCLM1_1500	10101	8416	4780,4	3095,4	1586
	S4_UH1_01UH2_01BCBA1_1 700BCLM1_1500	15667	13982	4781,8	3096,8	1579
	S4_UH1_1UH2_01BCBA1_17 00BCLM1_1500	54218	52533	4403,1	2718,1	1566

Tabla G- 5: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 6

SERIE	SIMULACIÓN	CAUDAL BCBA1 (m ³ /d)	CAUDAL BCLM1 (m ³ /d)	CAUDAL ENTRADA MINA (m ³ /d)	CAUDAL SALIDA MINA (m ³ /d)	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 6	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1450	14720	13035	6848	5163	1586,76
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1475	13565	11880	6331,2	4646,2	1598,95
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1750BCLM1_1500	12411	10726	5814,3	4129,3	1611,14
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1500	10101	8416	4780,4	3095,4	1585,5
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1525	8946,5	7261,5	4263,4	2578,4	1597,7
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1700BCLM1_1550	7791,8	6106,8	3755,2	2070,2	1609,88
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1550	5482,4	3797,4	2817,7	1132,7	1584,25
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1575	4327,7	2642,7	2400,6	715,6	1596,44
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1650BCLM1_1600	3173	1488	2042,7	357,7	1608,63
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1600	863,65	821,35	1700,7	15,7	1583
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1625	291,04	1976,04	1705,7	20,7	1595,18
	S6_UH1_0001UH2_01BCBA1_1600BCLM1_1650	1445,7	3130,7	2202,2	2202,2	1607,7
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1425	149970	148285	67817	66132	1590,15
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1450	138500	136815	62650	60965	1602,32
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1750BCLM1_1475	127030	125345	57482	55797	1614,48
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1475	104090	102405	47148	45463	1588,81
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1500	92623	90938	41981	40296	1600,98
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1700BCLM1_1525	81153	79468	36813	35128	1613,14
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1525	58214	56529	26479	24794	1587,47
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1550	46744	45059	21312	19627	1599,64
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1650BCLM1_1575	35274	33589	16145	14460	1611,8
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1600BCLM1_1595	3159	1474	2041,5	356,5	1595,86
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1600BCLM1_1600	865,1	819,9	1701,7	16,7	1598,29
	S6_UH1_0001UH2_1BCBA1_1600BCLM1_1605	1428,8	3113,8	2205	520	1600,73

Tabla G- 6: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 5

SERIE	SIMULACIÓN	CAUDAL BCBA1 (m ³ /d)	CAUDAL BCLM1 (m ³ /d)	CAUDAL ENTRADA MINA (m ³ /d)	CAUDAL SALIDA MINA (m ³ /d)	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 5	S5_UH1_000001UH2_01BCB A1_1750BCLM1_1400	16047	16047	7434	7434	1580
	S5_UH1_000001UH2_01BCB A1_1750BCLM1_1900	6877	6877	3100	3100	1823
	S5_UH1_000001UH2_01BCB A1_1600BCLM1_1400	9170	9170	4134	4134	1503
	S5_UH1_000001UH2_01BCB A1_1600BCLM1_1900	13754	13754	6200	6200	1746

Tabla G- 7: resultados de caudales y niveles piezométricos serie 7

SERIE	SIMULACIÓN	CAUDAL BCBA1 (m ³ /d)	CAUDAL BCLM1 (m ³ /d)	CAUDAL ENTRADA MINA (m ³ /d)	CAUDAL SALIDA MINA (m ³ /d)	NIVEL PIEZOMÉTRICO MINA (m)
SERIE 7	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 0BCBA1_1750BCLM1_1478	19047	17362	15767	14082	1615
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 0BCBA1_1750BCLM1_1635	8564	6879	7172	5487	1689
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 0BCBA1_1600BCLM1_1478	9032	7347	7556	5871	1536
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 0BCBA1_1600BCLM1_1635	1451	3136	2756	1071	1610
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 00BCBA1_1750BCLM1_1478	19329	17644	16209	14524	1615
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 00BCBA1_1750BCLM1_1635	8865	7180	7363	5678	1689
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 00BCBA1_1600BCLM1_1478	9160	7475	7758	6073	1536
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 00BCBA1_1600BCLM1_1635	1484	3169	2803	1118	1610
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 000BCBA1_1750BCLM1_1478	19359	17674	16256	14571	1615
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 000BCBA1_1750BCLM1_1635	8698	7013	7383	5698	1689
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 000BCBA1_1600BCLM1_1478	9174	7489	7779	6094	1536
	S7_UH1_000001UH2_01UH3_1 000BCBA1_1600BCLM1_1635	1487	3172	2808	1123	1610