

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor patrocinante:
Sr. Ramón Díaz Noriega

**ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL
IMPACTO EN EL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA
SUBTERRÁNEA DE UN ACUÍFERO POR EL DRENAJE DE UNA
MINA A CIELO ABIERTO**



JASON MARTÍNEZ ORELLANA

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

ABRIL 2021

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores del DIMET que fueron un aporte a mi formación profesional, a mi profesor guía Ramón Díaz, a mis amigos de la carrera, los centralazos, los QCTG, a los sacasa, los MF, a mis amigos y amigas de infancia de Nacimiento, al choco, la leti, a mi hermana Geraldine, a mis sobrinos Alinne y Mario, a mi familia por su apoyo incondicional y por sobre todo a mis padres Luis Fernando y Verónica que han sido un pilar fundamental durante este proceso y en mi vida.

Agradecimientos también a la empresa *DHI Water & Environment* por el apoyo entregado y la facilitación de licencias para el uso de FEFLOW y FePEST, herramientas que fueron fundamentales para el desarrollo de esta memoria de título.





RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo se plantea una modelación hidrogeológica aplicada al sector minero haciendo uso de herramientas de simulación numérica de flujo de agua subterránea, que permita obtener conocimiento de características y comportamiento hidrogeológico del sector de estudio, del impacto físico que tiene el desarrollo de una mina a cielo abierto en el entorno hidrogeológico, optimizando la información disponible para evaluar diferentes posibles escenarios. El estudio se realiza con información pública de la faena minera Radomiro Tomic, ubicada en la región de Antofagasta en la comuna de Calama, yacimiento explotado a rajo abierto para la obtención de minerales oxidados, y cuyas operaciones presentan problemas por el afloramiento de agua subterránea en el piso del rajo.

La investigación se lleva a cabo en seis etapas, comenzando con la búsqueda de información y análisis de los antecedentes del caso de estudio, para luego realizar la modelización del problema formulando el modelo conceptual, matemático y numérico, luego el modelo pasa por un proceso de calibración para finalmente ejecutar las simulaciones y obtener los resultados. En el modelo conceptual se define un dominio ubicado dentro de la formación Acuífero Calama. Dentro del dominio se definen las unidades hidrogeológicas A y C de conductividad hidráulica media (10^{-5} - 10^1 m/d), y la unidad hidrogeológica B de conductividad hidráulica baja (10^{-9} - 10^{-1} m/d). El balance hídrico del sistema se caracteriza en función de las estimaciones de la recarga y descarga de agua subterránea, donde la estación de bombeo en la mina actúa como principal elemento de descarga del sistema extrayendo un caudal de $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

La implementación del modelo numérico considera un modelo tridimensional donde se asume que el flujo de agua subterránea es a través de un medio poroso saturado, no confinado y en régimen estacionario gobernado por la ley de Darcy, representada en la ecuación general de flujo de agua subterránea en medios porosos saturados. Para las simulaciones se utiliza el código de simulación FEFLOW con el que se realizan 234 simulaciones agrupadas en 4 series de simulación clasificadas en modelos homogéneos y heterogéneos. Para la calibración de modelos se utiliza la herramienta FEPEST estimando la conductividad hidráulica en el dominio definido de acuerdo a los datos disponibles de piezometrías en el entorno de la mina.

Los resultados obtenidos de las simulaciones permiten determinar el comportamiento general del flujo de agua subterránea en la zona y el papel que juega la mina en el comportamiento del sistema. Los modelos indican que el agua que ingresa a la mina proviene principalmente de la unidad hidrogeológica denominada acuífero inferior (UH-5) del Acuífero Calama y que la causa de afloramientos de agua en la mina está relacionada con zonas de alta conductividad hidráulica asociadas a las familias de fracturas que afectan a la unidad UH-6a en la zona del rajo.

ABSTRACT

In the present work, a hydrogeological modeling applied to the mining sector is proposed using numerical simulation tools of groundwater flow, which allow obtaining knowledge of the characteristics and hydrogeological behavior of the study sector, of the physical impact that the development of a mine has. in the open sky in the hydrogeological environment, optimizing the information available to evaluate different possible scenarios. The study is carried out with public information from the Radomiro Tomic mining site, located in the Antofagasta region in the Calama commune, an open-pit mine to obtain oxidized minerals, and the operations present problems due to the outcrop of underground water in the pit floor.

The research is carried out in six stages, starting with the search for information and analysis of the background of the case study, to then carry out the modeling of the problem formulating the conceptual, mathematical and numerical model, then the model goes through a process of calibration to finally run the simulations and obtain the results. The conceptual model defines a domain located within the Calama aquifer formation. Within the domain, hydrogeological units A and C of medium hydraulic conductivity (10^{-5} - 10^1 m / d), and hydrogeological unit B of low hydraulic conductivity (10^{-9} - 10^{-1} m / d) are defined. The water balance of the system is characterized based on the estimates of groundwater recharge and discharge, where the pumping station in the mine acts as the main discharge element of the system, extracting a flow of 172.8 m³/d.

The implementation of the numerical model considers a three-dimensional model where it is assumed that the groundwater flow is through a saturated, unconfined and stationary porous medium governed by Darcy's law, represented in the general groundwater flow equation in saturated porous media. For the simulations, the FEFLOW simulation code is used, with which 234 simulations are carried out grouped into 4 simulation series classified into homogeneous and heterogeneous models. For the calibration of models, the FEPEST tool is used, estimating the hydraulic conductivity in the defined domain according to the available piezometric data in the mine environment.

The results obtained from the simulations make it possible to determine the general behavior of the groundwater flow in the area and the role that the mine plays in the behavior of the system. The models indicate that the water that enters the mine comes mainly from the hydrogeological unit called the lower aquifer (UH-5) of the Calama aquifer and that the cause of water outcrops in the mine is related to areas of high hydraulic conductivity associated with the families of fractures affecting unit UH-6a in the pit area.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2	HIPOTESIS DE TRABAJO	1
1.3	OBJETIVOS.....	2
1.3.1	Objetivo general.....	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	2
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO	2
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1	CONCEPTOS GENERALES DE MINERÍA.....	4
2.1.1	Minería a cielo abierto	4
2.1.2	Presencia de agua en minería a cielo abierto	4
2.1.3	Impactos de un rajo minero en recursos hídricos subterráneos	5
2.2	DRENAJE DE MINAS A CIELO ABIERTO	5
2.2.1	Métodos de control de drenaje en minería a cielo abierto	5
2.2.2	Impactos físicos en aguas subterráneas ocasionados por el drenaje de minas.	6
2.3	CONCEPTOS GENERALES DE HIDROGEOLOGÍA	7
2.3.1	Formaciones geológicas según comportamiento hidrogeológico	7
2.3.2	Conductividad hidráulica.....	8
2.3.3	Potencial y gradiente hidráulico.....	9
2.4	MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	9
2.4.1	Modelo conceptual	9
2.4.2	Modelo matemático.....	13
2.4.3	Modelo numérico.....	16
3.	ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO	18
3.1	LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA.....	18
3.2	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE MINA.....	18
3.3	GEOLOGÍA.....	19
3.3.1	Unidades geológicas.....	19
3.3.2	Geología estructural.....	19

3.4	HIDROGEOLOGÍA	21
3.4.1	Acuíferos.....	21
3.4.2	Unidades hidrogeológicas del sector de estudio	21
3.5	HIDROLOGÍA	25
3.5.1	Hidrología Regional	25
3.5.2	Cuencas hidrográficas	25
3.5.3	Hidrología del Sector RT	25
4.	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO	26
4.1	HIPÓTESIS CONCEPTUALES.....	26
4.2	DOMINIO DE MODELACIÓN Y CONDICIONES DE CONTORNO	27
4.2.1	Borde Oeste.....	27
4.2.2	Borde Cere.....	28
4.2.3	Borde Mesabi	28
4.2.4	Borde Este	28
4.2.5	Borde Norte.....	28
4.3	DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS.....	29
4.3.1	Unidades Hidrogeológicas.....	29
4.4	COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO.....	30
5.	MODELOS NUMÉRICOS.....	31
5.1	DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE MODELOS	31
5.2	SERIES DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	34
5.3	MODELOS DE SIMULACIÓN HOMOGENEOS.....	34
5.3.1	SERIE 1 – Sistema homogéneo sin pozo de bombeo	35
5.3.2	SERIE 2 – Sistema homogéneo con pozo de bombeo	36
5.4	MODELOS DE SIMULACIÓN HETEROGENEOS.....	38
5.4.1	SERIE 3 - Sistema heterogéneo sin pozo de bombeo.....	38
5.4.2	SERIE 4 - Sistema heterogéneo con pozo de bombeo	40
6.	CALIBRACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS	43
6.1	CONFIGURACIÓN PREVIA A CALIBRACIÓN EN FEPEST	44
6.2	CALIBRACIÓN SISTEMA HOMOGÉNEO	46

6.3	CALIBRACIÓN SISTEMA HETEROGÉNEO	48
7.	RESULTADOS	51
7.1	Conductividad hidráulica en el dominio.....	51
7.2	Potencial hidráulico en Borde Norte	51
7.3	Efecto de labor a cielo abierto y drenaje en distribución de niveles piezométricos	52
7.4	Caudal en Borde Norte y Borde Este	54
7.5	Caudal de entrada y salida en el rajo minero.....	56
8.	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	57
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	61
10.	ANEXOS	64



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: metodología de trabajo.....	3
Figura 2: corta Minera.....	4
Figura 3: perforación de pozos interiores de bombeo [8]	6
Figura 4: posibles afecciones de una mina a cielo abierto a las aguas subterráneas [12].	6
Figura 5: porosidad intergranular y por fisuración) [16].....	7
Figura 6: tipos de acuíferos según comportamiento hidráulico [16].....	8
Figura 7: ley de Darcy [17].....	9
Figura 8: REV ($\Delta x \Delta y \Delta z$) y componentes del flujo en eje de coordenadas y [4].	13
Figura 9: localización de mina RT.	18
Figura 10: mapa geológico sector RT y tranque Talabre [31]	20
Figura 11: acuíferos en área de estudio (modificado de [33]).	21
Figura 12: mapa hidrogeológico del sector RT [35]	24
Figura 13: perfil hidrogeológico A-A'' [35]	24
Figura 14: perfil hidrogeológico B-B' [35]	24
Figura 15: dominio de modelación (modificado de [31])	27
Figura 16: modelo conceptual rajo RT	30
Figura 17: componentes del balance hídrico en el modelo	31
Figura 18: metodología de diseño de modelos numéricos.....	32
Figura 19: simplificación de elementos geométricos.....	32
Figura 20: diseño del rajo minero en VULCAN y exportación a FEFLOW.....	33
Figura 21: metodología de realización de series de simulación	34
Figura 22: conductividad hidráulica y condiciones de contorno en modelo homogéneo.....	35
Figura 23: gráfico nivel piezométrico en rajo v/s potencial hidráulico en CC1BN	36
Figura 25: potencial hidráulico CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT	37
Figura 24: potencial hidráulico CC1BN v/s caudal de entrada en rajo RT.....	37
Figura 26: conductividad hidráulica y condiciones de contorno en modelo heterogéneo	38
Figura 27: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(UH-A) < k(UH-B)$ 39	
Figura 28: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(UH-A) > k(UH-B)$ 40	
Figura 29: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(UH-6) = 0.1$ m/d 41	
Figura 31: potencial hidráulico en CC1BN v/s caudal entrada en rajo RT para $k(UH-6) = 0.01$ m/d ... 42	
Figura 30: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico rajo RT para $k(UH-6) = 0.01$ m/d .. 42	
Figura 32: metodología de construcción de modelos numéricos previo a calibración	44
Figura 33: puntos piloto generados con distribución uniforme en el dominio de modelación	45
Figura 34: pozos de observación exportados a FEPEST	45
Figura 35: resultados de calibración en base a modelo homogéneo para a) escenario 1 ; b) escenario 2	47

Figura 36: resultados de calibración en base a modelo heterogéneo para a) escenario 1 ; b) escenario 2 49

Figura 37: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT en serie 1 y serie 2 (sistema homogéneo)..... 52

Figura 38: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT en serie 3 y serie 4 (sistema heterogéneo) 53

Figura 39: potencial hidráulico CC1BN v/s caudal de agua en CC1BN (azul) y CC1BE (rojo) (sistema homogéneo) 54

Figura 40: potencial hidráulico CC1BN v/s caudal de agua en CC1BN y CC1BE (sistema heterogéneo)..... 55



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: clasificación de sistemas de drenaje en Minería a Cielo Abierto	5
Tabla 2: formaciones geológicas y sus características.	7
Tabla 4: correlación entre unidades hidrogeológicas y geológicas del área de estudio	23
Tabla 5: valores meteorológicos medios mensuales y anuales en el distrito Calama	25
Tabla 6: estaciones pluviométricas en zona de estudio [36].	64
Tabla 7: distribución de conductividad hidráulica	29
Tabla 8: potencial hidráulico de CC1BN, nivel en mina, y caudal en rajo en modelo homogéneo. ..	51
Tabla 9: potencial hidráulico en CC1BN, caudal y nivel piezométrico en rajo para modelo heterogéneo	52
Tabla 10: efecto del drenaje en nivel piezométrico del rajo RT para modelo calibrado en base a sistema homogéneo	53
Tabla 11: efecto del drenaje en nivel piezométrico del rajo RT para modelo calibrado en base a sistema heterogéneo.....	54
Tabla 12: caudales en Borde Norte y Borde Este en modelo calibrado respecto a sistema homogéneo	55
Tabla 13: caudales Borde Norte y Borde Este en modelo calibrado respecto a sistema heterogéneo	56
Tabla 14: caudal de entrada y salida en rajo y piso del rajo, en modelo calibrado respecto a modelo homogéneo	56
Tabla 15: caudal de entrada y salida en rajo y piso del rajo, en modelo calibrado respecto a modelo heterogéneo	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO B: perfiles geológicos en sector RT.	65
ANEXO C: perfiles geotécnicos del rajo mina RT.....	69
ANEXO D: acuíferos región de Antofagasta	72
ANEXO E: estaciones meteorológicas y años con estadística de precipitaciones y temperatura	73
ANEXO F: curvas equipotenciales del acuífero inferior (acuífero de Calama).....	75
ANEXO G: mapa de micro-cuencas de pampa Cere- RT.....	76
ANEXO H: geomorfología región de Antofagasta y sector Radomiro Tomic	77
ANEXO I: caudales de drenaje mina Radomiro Tomic	78
ANEXO J: pozos de observación de nivel piezométrico en sector mina Radomiro Tomic.....	80
ANEXO K: parámetros geométricos de rajo minero Radomiro Tomic	81
ANEXO L: metadatos de modelo digital de elevaciones	82
ANEXO M: configuración de interpolación por kriging en FEPEST.....	82
ANEXO N: información de entrada en series de simulación	83
ANEXO O: resultados de series de simulación	89
ANEXO P: direcciones de flujo.....	95
ANEXO Q: resultados distribución espacial de niveles piezométricos.....	97
ANEXO R: interpolación de potencial hidráulico en el límite Borde Norte.....	99
ANEXO S: condiciones de contorno en rajo minero posterior a calibración	99

FIGURAS EN ANEXOS

Figura A- 1: sub-cuencas hidrográficas de la zona de estudio [26].....	64
Figura A- 2: áreas de escurrimiento a mina Radomiro Tomic [25]	64
Figura B- 1: perfil geológico A-A'' [35]	65
Figura B- 2: perfil geológico B-B'' [35].....	65
Figura B- 3: perfil geológico B-B'''''' [35]	66
Figura B- 4: perfil geológico C-C'''''' [35].....	67
Figura B- 5: perfil geológico D-D''' [35].....	67
Figura B- 7: perfil geológico A-A''' [35].....	68
Figura B- 6: perfil geológico E-E''' [35].....	68
Figura C- 1: perfil 2; talud oeste, distribución unidades geotécnicas y niveles piezométricos [34]	69
Figura C- 2: perfil 7; talud oeste, distribución unidades geotécnicas y niveles piezométricos [34]	70
Figura C- 3: perfil 8; talud oeste, distribución unidades geotécnicas y niveles piezométricos [34]	71
Figura D- 1: mapa de acuíferos en región de Antofagasta [42]	72
Figura E- 1: estaciones meteorológicas en región de Antofagasta [29]	73
Figura F- 1: curvas equipotenciales del acuífero inferior en sector RT [30]	75
Figura F- 2: curvas equipotenciales sector rajo minero RT [40]	76

Figura G- 1: mapa de microcuencas de pampa Cere- sector RT [30]	76
Figura H- 2: Geomorfología sector Mina RT - tranque Talabre [31]	77
Figura H- 1: geomorfología región de Antofagasta [31]	77
Figura I- 1: caudales de drenaje en mina Radomiro Tomic [42]	78
Figura I- 2: coordenadas de sondajes de investigación hidrogeológica en piso del rajo RT [34]	79
Figura I- 3: resultados de desarrollo y caudal estimado de pozos de bombeo en rajo RT [34]	79
Figura K- 1: parámetros geotécnicos y de diseño minero de rajo abierto Radomiro Tomic [43]	81
Figura M- 1: configuración de interpolación por kriging en FEPEST	82
Figura P- 1: direcciones de flujo en modelo heterogéneo: a) sin bombeo; b) con bombeo	95
Figura P- 2: direcciones de flujo en modelo heterogéneo (vista rajo RT): a) sin bombeo; b) con bombeo	95
Figura P- 3: direcciones de flujo en modelo heterogéneo con bombeo (vista 3D en dirección Norte-Sur)	95
Figura P- 6: direcciones de flujo en modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea con bombeo (vista 3D en dirección Norte-Sur).....	96
Figura P- 5: direcciones de flujo en modelo heterogéneo (vista rajo RT): a) sin bombeo; b) con bombeo	96
Figura P- 4: direcciones de flujo en modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea: a) sin bombeo; b) con bombeo	96
Figura Q- 1: distribución de niveles piezométricos en modelo heterogéneo: a) sin bombeo; b) con bombeo	97
Figura Q- 2:distribución de niveles piezométricos en modelo heterogéneo con bombeo (vista en sección rajo RT)	97
Figura Q- 3: niveles piezométricos en modelo calibrado a partir de sistema homogéneo en escenario 2 con drenaje (vista en sección del rajo abierto)	98
Figura Q- 4: niveles piezométricos en modelo calibrado a partir de sistema heterogéneo en escenario 2 con drenaje (vista en sección del rajo abierto).....	98

TABLAS EN ANEXOS

Tabla A- 1: estaciones pluviométricas en zona de estudio [36].	64
Tabla E- 1: años con estadística de precipitaciones y temperatura [31]	73
Tabla E- 2: precipitaciones medias mensuales y anuales (mm) [33]	74
Tabla E- 3: temperaturas mínimas medias (°C) [33].....	74
Tabla E- 4: temperaturas máximas medias (°C) [33]	74
Tabla J- 1: sondajes alrededor del rajo [9]	80
Tabla J- 2: sondajes dentro del rajo [9]	80
Tabla L- 1: metadatos del modelo digital de elevaciones [39].....	82

Tabla N- 1: datos de entrada para simulaciones en serie 1 83

Tabla N- 2: datos de entrada para simulaciones en serie 2 83

Tabla N- 3: datos de entrada para simulaciones en serie 3 84

Tabla N- 4: datos de entrada para simulaciones en serie 4 86

Tabla O- 1: datos de salida en simulaciones de serie 1 89

Tabla O- 2: datos de salida en simulaciones de serie 2 89

Tabla O- 3: datos de salida en simulaciones de Serie 3 90

Tabla O- 4: datos de salida en simulaciones de serie 4 92



NOMENCLATURA

Unidades de Medida:

[cm] centímetros

[km] kilómetros

[ktpd] kilo toneladas por día

[l/s] litros por segundo

[m.s.n.m.] metros sobre el nivel del mar

[m/d] metros por día

[m] metros

[m²] metros cuadrados

[m³/d] metros cúbicos por día

[m³/s] metros cúbicos por segundo

[m³] metros cúbicos

[mm/año] milímetros al año

[mm] milímetros



Abreviaciones y acrónimos

1-ARC 1 Arco-segundo (resolución de 30x30 m)

1D unidimensional

2D bidimensional

3D tridimensional

3-ARC 3 Arco-segundo (resolución de 90x90 m)

CODELCO Corporación Nacional del Cobre.

DEM *Digital Elevation Model* (modelo digital de elevaciones)

DGA Dirección General de Aguas

DIA Declaración de Impacto Ambiental

E Este

EPM Medio Poroso Equivalente

FD *Finite Difference* (diferencias finitas)

FE *Finite Element* (elementos finitos)

FEM *Finite Element Model* (modelo de elementos finitos)

FEFLOW *Finite Element Flow* (flujo elementos finitos)

N Norte

NE Noreste

NO Noroeste

O Oeste

REV *Representative Elemental Volume* (Volumen Elemental Representativo)

RQD *Rock Quality Designation* (índice de calidad de roca).

RT Radomiro Tomic

S Sur

SE Sureste

SEA Servicio de Evaluación Ambiental

SEIA Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

SERNAGEOMIN Servicio Nacional de Geología y Minería

SO Suroeste

UG Unidad Geológica

UH Unidad Hidrogeológica

USGS Servicio Geológico de los Estados Unidos



1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La minería juega un rol importante en la economía nacional, no obstante puede impactar negativamente en el medio ambiente [1]. El agotamiento de los depósitos minerales próximos a la superficie ha obligado a considerar los yacimientos profundos, con condiciones geológicas más complejas y situaciones más desfavorables, en cuanto a relación estéril/mineral, estabilidad de taludes y aguas subterráneas [2]. Uno de los impactos más significativos de la minería a cielo abierto es su efecto sobre los acuíferos subterráneos [1]. La actividad minera puede producir impactos físicos y químicos en los acuíferos circundantes a escala local y regional.

Los desarrollos de minas a cielo abierto con sistemas de drenaje para poder trabajar bajo el nivel freático cambian el gradiente hidráulico en la zona, y afectan al régimen del flujo de aguas subterráneas [3]. El flujo de agua puede ser inducido desde el acuífero circundante hacia las excavaciones mineras, lo que implica diseñar sistemas de drenaje y bombear cantidades considerables de agua. Bajo estas circunstancias, pueden producirse repercusiones hidrogeológicas en el entorno, que requieren la adopción de una estrategia adecuada de gestión del agua y reducir los impactos [3]. La evaluación del drenaje en las minas, y los efectos que produce en los niveles de agua subterránea son aspectos para los cuales se recurre a estudios que incluyen en muchos casos el uso de modelos de simulación numérica [4]. La utilización de modelos numéricos de flujo subterráneo aplicados a minería ha aumentado considerablemente en la últimas décadas [5]. Una de las herramientas de simulación más extendidas a nivel mundial en problemas hidrogeológicos mineros es el código de simulación FEFLOW, empleado en minas como “La Respina” en España [6], la mina “Gavorrano” en Italia [7], o la mina “Cottbus-Nord” en Alemania [8] entre otros muchos.

En este trabajo se lleva a cabo una modelización hidrogeológica con FEFLOW de la mina a cielo abierto Radomiro Tomic en el norte de Chile. El estudio se desarrolla a partir de la información pública disponible y se enfoca en la evaluación del impacto físico de la excavación minera y del drenaje asociado en las aguas subterráneas del sector.

1.2 HIPOTESIS DE TRABAJO

La mina RT presenta varias áreas de acumulación de agua superficial en el fondo del rajo. La profundización del rajo podría producir condiciones de tronaduras húmedas y condiciones semi-saturadas a lo largo del frente de minería activo del rajo, complicando el normal funcionamiento de las operaciones mineras [9]. Por otra parte, la profundización del rajo puede generar un impacto ambiental hidrogeológico, por el descenso local de las piezometrías debido al drenaje [9]. A lo anterior, se suma la falta de información hidrogeológica en el entorno. El presente trabajo suplirá la falta de información hidrogeológica en el sector de estudio, mediante modelos numéricos que simularán el sistema de drenaje de la mina y permitirán analizar los fenómenos hidrogeológicos que

afectan al rajo minero y su repercusión en el entorno. En función de la hipótesis de trabajo se proponen los siguientes objetivos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Establecer y analizar las características físicas que determinan macroscópicamente el comportamiento hidrogeológico del entorno del rajo minero Radomiro Tomic, y evaluar mediante modelos numéricos de simulación el impacto del rajo sobre las aguas subterráneas.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar el sector de interés.
2. Recopilar y analizar la información pública disponible de la faena minera, los antecedentes geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos.
3. Formular un modelo conceptual hidrogeológico a partir de la información recabada considerando las características fundamentales de la zona de estudio.
4. Diseñar modelos numéricos de simulación que representen las características hidrogeológicas del modelo conceptual formulado.
5. Definir series de simulación que permitan evaluar y reducir la incertidumbre de la información del modelo conceptual, acotando rangos de conductividad hidráulica, rangos de potencial hidráulico, caudales y direcciones de flujo en el dominio de modelación.
6. Realizar una calibración de los modelos definidos, integrando datos disponibles de mediciones en terreno para la estimación de parámetros en el dominio de estudio.
7. Determinar el alcance y limitaciones del modelo de simulación numérica debidas a la disponibilidad de información, y a las capacidades del software a utilizar.
8. Establecer el impacto de la mina en el sistema de flujo de agua subterránea.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

1. Definir el caso de estudio

Búsqueda e identificación de las bases de datos con la información pública disponible de la mina y su área de influencia.

2. Recopilación de información temática y antecedentes del caso de estudio

Mediante una revisión bibliográfica se procede a contextualizar la problemática y determinar la cantidad, calidad y tipologías de información disponible. Se recopila información minera, geomorfológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica tanto a escala local como regional, sector mina y región de Antofagasta.

3. Modelización conceptual

A partir de la información recabada se desarrolla un modelo conceptual para el caso de estudio, definiendo un dominio espacial, sus condiciones de contorno y la distribución de unidades

hidrogeológicas presentes. Se identifican los elementos del balance hídrico correspondiente al dominio de modelación.

4. Modelización matemática

Se define la formulación matemática en función de las hipótesis definidas en el modelo conceptual, para definir posteriormente el código de simulación adecuado.

5. Modelización numérica

Se elaboran modelos numéricos del caso de estudio en base al modelo conceptual y la información recabada en la revisión de antecedentes. Es utilizado el código de simulación FEFLOW.

6. Calibración

Se calibran los modelos realizando una estimación de parámetros hidrogeológicos en el dominio de estudio utilizando datos de mediciones en terreno. Se utiliza la herramienta FEPEST.

7. Análisis de Resultados de modelación

Se ejecutan los modelos de simulación para conocer objetivamente como son afectados los acuíferos subterráneos por el desarrollo del rajo minero en el sector de estudio, esto se realiza bajo diferentes escenarios de interés, logrando identificar problemas y limitaciones de la aplicación del software en función de la información disponible, con lo que se concluye y se plantean consideraciones para trabajos futuros.

El siguiente diagrama de flujo (Figura 1) muestra el orden en que se llevaran a cabo las diferentes partes que componen a la metodología de trabajo.

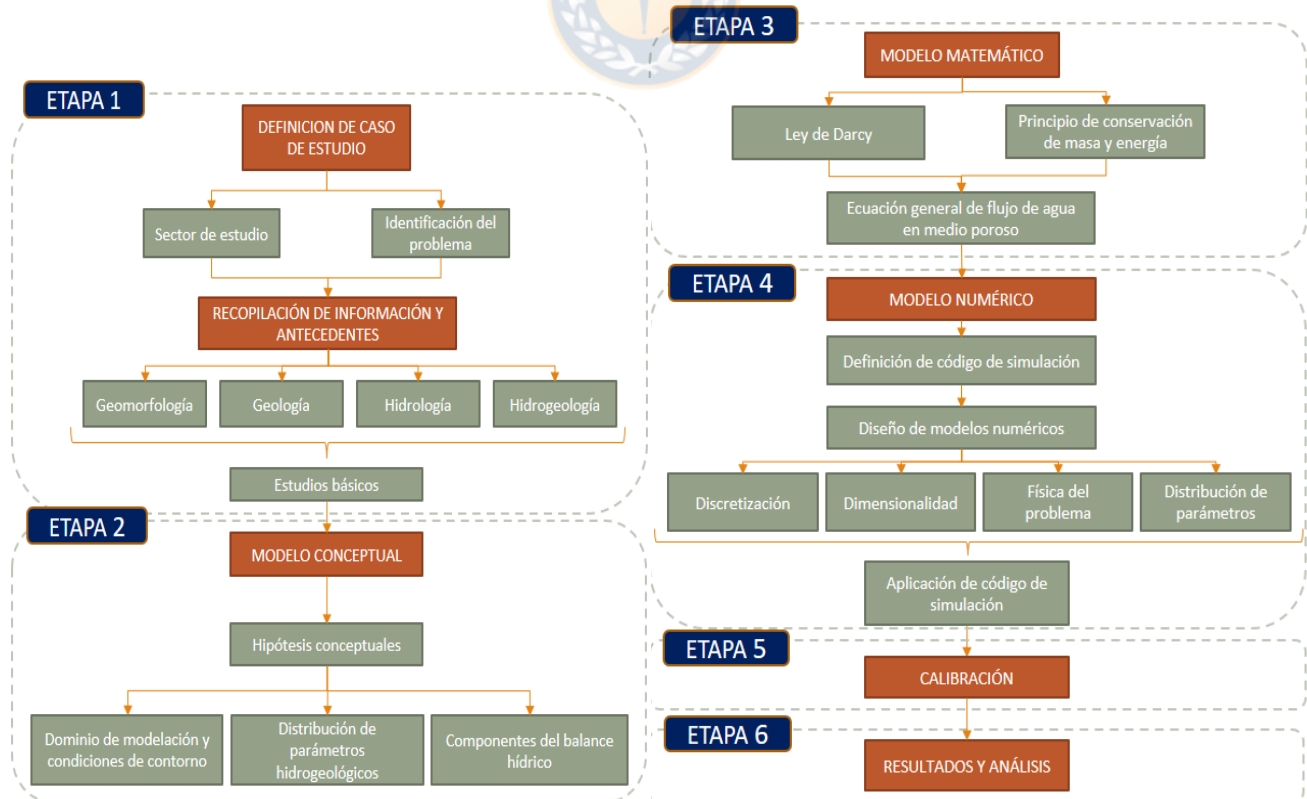


Figura 1: metodología de trabajo

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS GENERALES DE MINERÍA

2.1.1 Minería a cielo abierto

Los yacimientos explotables por minería a cielo abierto pueden clasificarse por su forma, relieve del terreno original, proximidad a la superficie, inclinación, complejidad de mineralizaciones, distribución de la calidad del mineral, y/o por el tipo de roca dominante [10]. La extracción del mineral es llevada a cabo por una secuencia de procesos, comenzando por la *perforación* de huecos donde se alojan las cargas de explosivo y sus accesorios iniciadores, esto para dar paso a la *tronadura* que corresponde al proceso de fragmentación de la roca mediante el uso de explosivos [11]. Luego sigue el *carguío del material* que consiste en excavar el frente del rajo y disponer el material en el elemento receptor, y finalmente se realiza el *transporte del material* mineralizado del yacimiento desde el rajo hasta la planta de procesamiento, botadero, o pila de acopio de material [2].

El método de corta minera se lleva a cabo por banqueo descendente, con secciones verticales en forma troncocónica y un número de bancos capaces de soportar el transporte del material extraído (Figura 2).

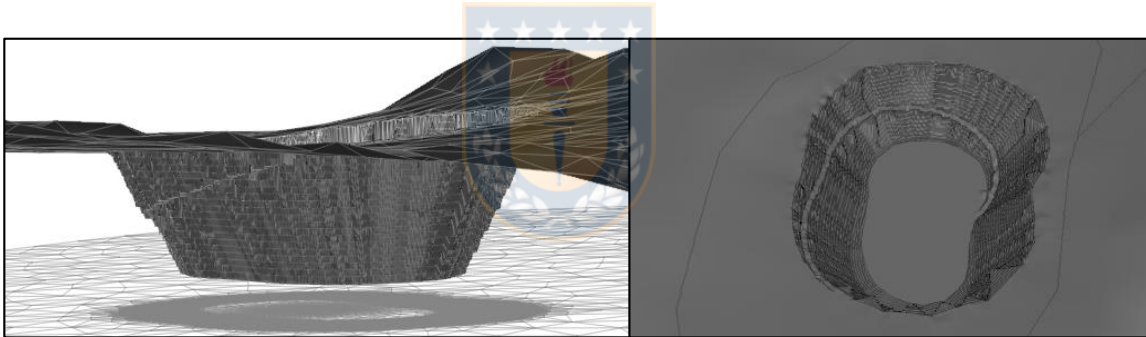


Figura 2: corta Minera

2.1.2 Presencia de agua en minería a cielo abierto

El agua en la minería plantea problemas relativos al medio ambiente y la gestión de los recursos hídricos [3]. Todo proyecto minero que en el desarrollo de sus labores interfiera con el nivel freático de aguas subterráneas presentes, requerirá la implementación de algún tipo de drenaje. Las aguas que afectan el normal desarrollo de un proyecto y requieren ser captadas pueden tener distintas procedencias [12].

- Aguas pluviales que precipitan directamente en la excavación.
- Aguas de escorrentía superficial no desviadas que entran en el perímetro de la excavación.
- Aguas subterráneas que se filtran en forma de manantial al profundizar la excavación.

Los ingresos de agua a través de infiltraciones pueden ser lentos e imperceptibles, sin embargo la cantidad total de agua que involucran puede ser significativa [12].

2.1.3 Impactos de un rajo minero en recursos hídricos subterráneos

Las minas a cielo abierto involucran la excavación del macizo rocoso, aplicando métodos que pueden inducir cambios considerables en las propiedades físicas de suelos y rocas situados alrededor del rajo. Lo anterior se le atribuye principalmente a dos procesos [12].

- Los procesos de tronadura.
- La extracción de bancos, que induce fracturas por descompresión en las rocas situadas inmediatamente alrededor del rajo minero.

La cantidad de agua subterránea en el entorno de la mina puede verse afectada por diversos factores. Los sistemas de drenaje y la extracción del agua, generan un descenso en la capa freática cambiando la forma en que el agua subterránea fluye en el subsuelo. Además el proceso de minería puede generar fenómenos de subsidencia que alteran el flujo de agua subterránea [1].

2.2 DRENAJE DE MINAS A CIELO ABIERTO

En el plano operativo de una explotación, el objetivo principal del drenaje es conseguir que las aguas que entren en contacto con la mina, sean las mínimas posibles, y se realice de la manera más controlada posible. El estudio de los problemas de drenaje de mina tiene dos aspectos, el primero es el de mantener condiciones adecuadas de trabajo, para lo que es frecuente la necesidad de bombeo del agua, y el segundo es la gestión de las interferencias de la operación en la hidrosfera. Esta gestión tiene normalmente los siguientes objetivos [13].

- Minimizar la cantidad de agua en circulación en las áreas operativas.
- Aprovechar el agua en el proceso industrial.
- Eliminar contaminantes para que no afecten la calidad del cuerpo de agua receptor.

2.2.1 Métodos de control de drenaje en minería a cielo abierto

Los sistemas exteriores a la explotación se construyen de forma periférica a la explotación, y son construidos para tener una vida útil duradera. Los sistemas interiores se implantan cuando aguas de escorrentía superficial y aguas subterráneas, no pueden ser interceptadas por los sistemas exteriores, para captar y dirigir las aguas fuera de la explotación. Los sistemas de drenaje se clasifican según la localización y el modo de actuación (véase Tabla 1) [12].

Tabla 1: clasificación de sistemas de drenaje en Minería a Cielo Abierto

ACTUACIÓN	LOCALIZACIÓN	
	EXTERIOR	INTERIOR
PREVENTIVA	- Desvíos de cauces. - Canales perimetrales	- Cunetas de banco.
ACTIVA	- Sondeos desde superficie. - Pozos y galerías Zanjás de coronación.	- Sondeos verticales con bombas de fondo. - Zanjás. - Sondeos horizontales.

Específicamente los pozos interiores de bombeo, como los utilizados en la mina RT, consisten en perforaciones de sondeos o pozos desde la superficie superior del talud o desde el mismo talud y extraen el agua mediante bombeo con bombas sumergibles emplazadas en la parte inferior de los pozos y consiguen el descenso del nivel freático en las proximidades del talud (Figura 3).

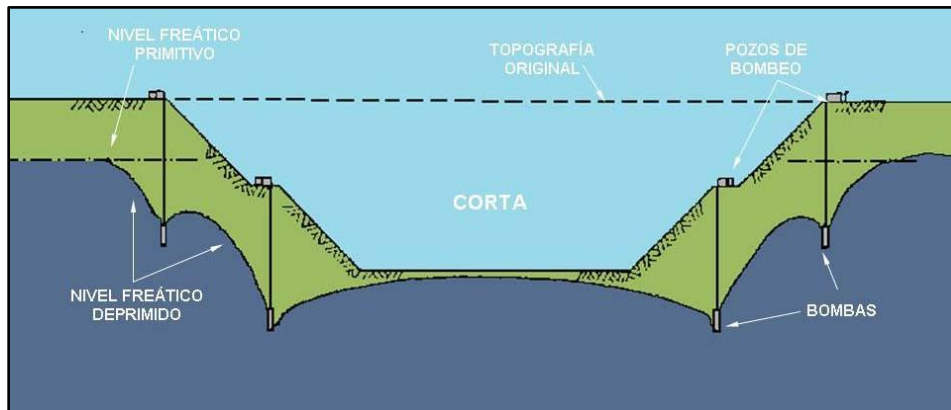


Figura 3: perforación de pozos interiores de bombeo [8]

2.2.2 Impactos físicos en aguas subterráneas ocasionados por el drenaje de minas.

El drenaje de minas ocasiona el descenso del nivel de agua en los alrededores de la mina. Los principios básicos enunciados en el año 1940 por Theis, señalan que cualquier extracción de agua subterránea ocasionará alguna o la combinación de las siguientes consecuencias [12]:

- Decrecimiento en el volumen de almacenamiento natural del agua subterránea.
- Incremento en el caudal de recarga del agua subterránea.
- Decrecimiento en el caudal de descarga natural del agua subterránea.

Los decrecimientos en el almacenamiento se manifiestan en el descenso del nivel de agua. El descenso del nivel de agua provoca consecuencias socio-ambientales (como el desecamiento de lagos, humedales), pudiendo generar un impacto grave (Figura 4) [12].

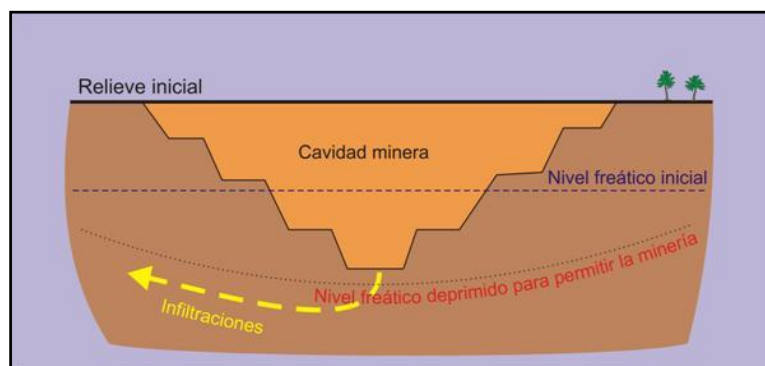


Figura 4: posibles afecciones de una mina a cielo abierto a las aguas subterráneas [12].

2.3 CONCEPTOS GENERALES DE HIDROGEOLOGÍA

La Hidrología Subterránea o Hidrogeología es aquella parte de la Hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico, el medio biológico y sus reacciones con la acción del hombre [14].

2.3.1 Formaciones geológicas según comportamiento hidrogeológico

En la naturaleza hay una amplia gama de formaciones geológicas con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua; desde el punto de vista hidrogeológico [15]. Estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: formaciones geológicas y sus características.

	CAPACIDAD DE ALMACENAR	CAPACIDAD DE TRANSMITIR	FORMACIONES CARACTERÍSTICAS
ACUÍFEROS	Alta	Alta	Gravas, arenas, calizas
ACUÍTARDOS	Alta	Baja	Limos, arenas, limosas y arcillosas
ACUÍCLUDOS	Alta	Nula	Arcillas
ACUÍFUGOS	Nula	Nula	Granitos, gneises, mármoles

Los acuíferos, son formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. Se pueden clasificar su textura, comportamiento hidráulico y estructural [15].

Según su textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos.

1. *Acuíferos porosos*, cuya permeabilidad es debida a su porosidad intergranular, entre ellos se encuentran todos los materiales detríticos con tamaño de grano de arena como mínimo.
2. *Acuíferos en medios fracturados o karstificados*, cuya permeabilidad es debida a fracturas, o fenómenos de karstificación.
3. Acuíferos cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores (Figura 5) [15].

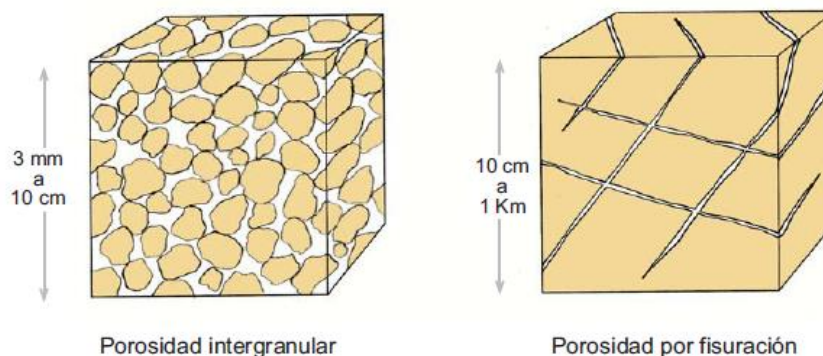


Figura 5: porosidad intergranular y por fisuración) [16]

Según su comportamiento hidráulico y estructura los acuíferos pueden funcionar de tres formas (Figura 6).

1. *Acuíferos libres*, en los que el nivel piezométrico se encuentra por debajo del techo de la formación permeable.
2. *Acuíferos confinados*, que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. A diferencia de los acuíferos libres, el nivel piezométrico en los acuíferos confinados está por encima del techo del acuífero.
3. *Acuíferos semiconfinados*, los materiales que los rodean no son completamente impermeables, y tienen intercambios de agua con otros acuíferos [15].

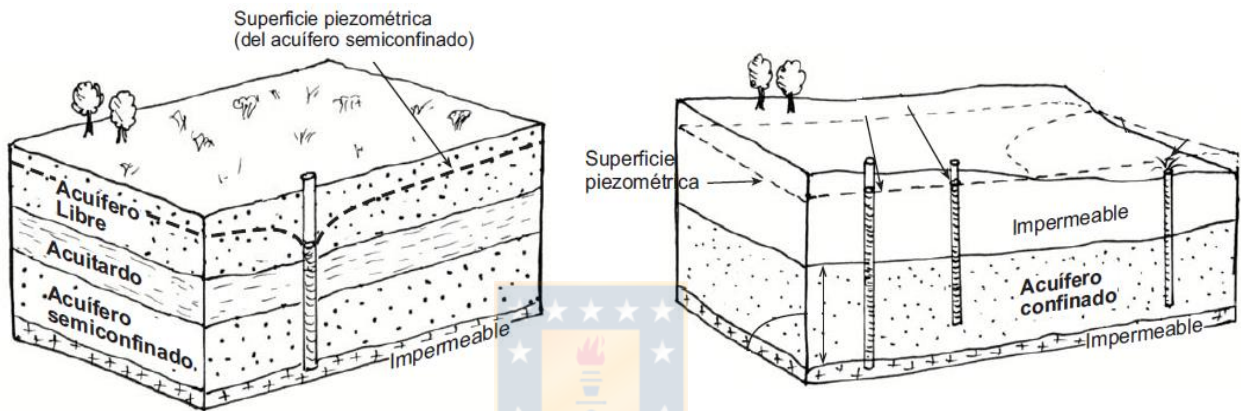


Figura 6: tipos de acuíferos según comportamiento hidráulico [16]

2.3.2 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se define como el caudal de agua que pasa a través de una superficie unitaria de acuífero bajo un gradiente hidráulico a una temperatura fija o determinada. En 1856, el ingeniero francés Henry Darcy, descubrió la ley (Figura 7) que regula el movimiento de las aguas subterráneas midiendo el caudal Q en función de la conductividad hidráulica de los materiales estudiados [14]. La expresión matemática que representa la denominada Ley de Darcy está definida por la siguiente ecuación:

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

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 hidráulica del medio poroso

La expresión $\left(\frac{\Delta h}{\Delta l} \right)$ es conocida como *gradiente hidráulico*.

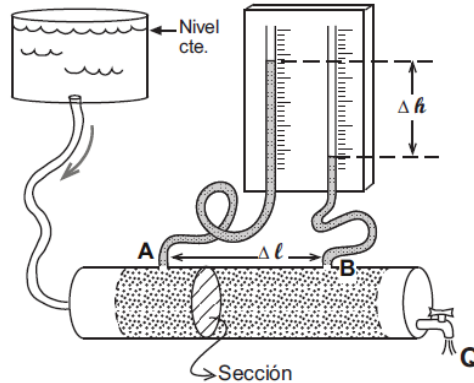


Figura 7: ley de Darcy [17]

En la práctica puede asumirse que la Ley de Darcy es aplicable en la totalidad de los medios con porosidad intergranular y en la mayoría de los medios fisurados en los que el grado de fracturación permita su asimilación a medios intergranulares [18]. Se debe considerar también que el cumplimiento de la ley de Darcy exige que exista una relación lineal entre velocidad y gradiente hidráulico. El parámetro que mide dicha linealidad (flujo laminar) es el número de Reynolds [18].

2.3.3 Potencial y gradiente hidráulico

La energía mecánica total de una unidad de masa de agua es la suma de la energía potencial, energía de presión y energía cinética. Ésta última en hidrogeología debido a que la velocidad del agua subterránea es lenta se considera despreciable. Luego, la energía total por unidad de masa se denomina *potencial hidráulico*, y es igual a la altura de una columna de agua “ h ” (respecto a un nivel de referencia considerado) multiplicada por la aceleración de gravedad “ g ”.

$$\text{Potencial hidráulico} = h \cdot g \quad (2)$$

Dado que g es prácticamente constante en una zona, la variación de h refleja exactamente la variación del potencial hidráulico, a dicha variación se le conoce como *gradiente hidráulico* [19].

2.4 MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Para llevar a cabo una modelización hidrogeológica se precisa en primer lugar la realización de un modelo conceptual, después plantear el modelo matemático y por último el modelo numérico.

2.4.1 Modelo conceptual

Un modelo conceptual hidrogeológico es una representación cualitativa y cuantitativa simplificada de un sistema de flujo de agua subterránea [4]. Consiste en un conjunto de supuestos que reducen un problema real en un dominio espacial y temporal a una simplificación satisfactoria en vista de los objetivos de la modelación [20]. Este incluye solo aquellos aspectos importantes para abordar el propósito del modelo con la complejidad suficiente para representar el comportamiento del sistema [4]. Las componentes del modelo conceptual a realizar se definen a continuación.

A. Hipótesis conceptuales

Las simplificaciones se introducen en un conjunto de supuestos que expresa la comprensión del sistema y su comportamiento [20], que se realizan ya que no es factible una representación real del sistema, y porque rara vez hay datos suficientes para describir el sistema completamente [21].

Se establece la complejidad de modelación designando una dimensionalidad 1D, 2D o 3D, un régimen estacionario o transitorio, un enfoque en medio poroso equivalente o en red de fracturas discretas, flujo en zona saturada o variablemente saturada, y un flujo monofásico o multifásico.

Existen tres enfoques diferentes disponibles para conceptualizar el flujo de agua subterránea en los sistemas acuíferos, estos son medio poroso equivalente, red de fracturas discretas y medio de porosidad dual [21]. Los acuíferos de roca fracturada se pueden modelar como medios porosos equivalentes, esta suposición generalmente es válida para modelos de flujo de agua subterránea a gran escala [22]. Este enfoque supone que el sistema del acuífero se comporta como un medio poroso y pueden aplicarse las ecuaciones del apartado 2.4.2 [21]. Se usa comúnmente para describir el flujo de agua subterránea a través del macizo rocoso fracturado en el que la porosidad primaria es muy baja y la permeabilidad efectiva está controlada por fracturas y fisuras. El enfoque EPM se basa en la suposición de que a una escala suficientemente grande (volumen elemental representativo o REV) el macizo rocoso se comporta como un medio poroso descrito por parámetros como la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la porosidad [21].

En términos temporales hay dos opciones para representar un sistema de flujo de agua subterránea.

- i) Modelos en régimen de flujo transitorio
- ii) Modelos en régimen de flujo estacionario

Los modelos en régimen transitorio permiten describir variaciones temporales en la distribución del potencial hidráulico del sistema. Necesarios cuando las tendencias temporales y las fluctuaciones en los niveles y flujos de agua subterránea son importantes [21].

Los modelos en régimen estacionario no consideran variaciones temporales, se pueden construir con entradas promediadas en el tiempo y las salidas del modelo ilustran el flujo de agua subterránea y los potenciales hidráulicos que surgirían cuando el sistema se haya equilibrado a las condiciones de contorno y tensiones definidas [22]. Estos suelen ser el primer paso para un modelado transitorio que utilizan una solución en régimen estacionario como condición inicial [4].

La mayoría de los modelos tradicionales de aguas subterráneas simulan el flujo saturado, es decir, el movimiento del agua en la zona saturada debajo de la capa freática. En este enfoque, se ignora el movimiento del agua en la zona no saturada (por encima del nivel freático) [21].

Luego, el uso de flujo variablemente saturado para modelos a gran escala de flujo de agua subterránea es poco común y no recomendado [21].

En cuanto a la dimensionalidad, la excavación de un rajo y el desagüe asociado tienden a crear una reducción significativa en el acuífero circundante [21]. En la mayoría de los proyectos mineros, los pozos abiertos alcanzan profundidades significativas y es importante una representación del campo de flujo vertical [21]. El drenaje por topografía originado por una corta y bombeo desde capos de pozos de bombeo crean un campo de flujo complejo que está mejor representado mediante un modelo 3D [21].

B. Dominio y condiciones de contorno

Los modelos de flujo de agua subterránea requieren información sobre flujo o potencial hidráulico en los límites del dominio. Existen tres tipos de condiciones de borde o contorno [22].

- i) Tipo 1, Dirichlet: se especifica el valor del potencial hidráulico en el borde del modelo. Cuando se especifica el potencial a lo largo de una sección del borde del modelo, se puede calcular el flujo a través de este borde.
- ii) Tipo 2, Neumann: se especifica el valor del flujo en el borde del modelo.
- iii) Tipo 3, Cauchy: se especifican tanto el valor del potencial como del flujo en el borde del modelo. En los modelos de flujo, este tipo de condición límite se implementa de manera indirecta especificando un potencial y una conductancia o resistencia hidráulica, los que representan efectos de características que se encuentran fuera del dominio del modelo.

Estas condiciones de contorno genéricas están relacionadas con comportamientos observados en la naturaleza y permiten representarlos conceptualmente para definir los límites espaciales del dominio del modelo. Dentro de estos, los más utilizados para el modelado de agua subterránea en los proyectos a gran escala se incluyen los siguientes [21].

- Divisoria de cuencas de aguas subterráneas (que representa líneas de divergencia de flujo).
- Grandes cuerpos de agua como el océano, lagos, ríos y acuíferos (que representan áreas con potencial hidráulico constante y/o conocida).
- Límites geológicos, como el contacto entre rocas con propiedades hidrogeológicas muy diferentes o las fallas (que representan características a gran escala del comportamiento hidráulico conocido o supuesto).

Los límites pueden clasificarse en límites físicos e hidráulicos [4]. Los *límites físicos* son el tipo más robusto y defendible ya que representan características físicas que se identifican fácilmente en el campo [4].

Contactos con unidades geológicas de baja conductividad hidráulica

Las unidades de baja conductividad hidráulica pueden formar límites sin flujo. Los límites laterales sin flujo pueden ubicarse en afloramientos de roca relativamente impermeable. El límite inferior de la mayoría de los modelos se especifica una condición sin flujo en el contacto con material relativamente impermeable. Cuando hay al menos dos órdenes de magnitud de contraste en la

conductividad hidráulica entre unidades hidrogeológicas, el flujo a lo largo del contacto es predominantemente horizontal y el contacto puede representarse como un límite sin flujo.

Zonas de fallas

Las fallas son fracturas a lo largo de las cuales el movimiento ha desplazado los materiales geológicos. Por lo general, se alteran las conductividades hidráulicas de los materiales geológicos cerca de la zona de falla, creando brechas de conductividad más alta o más baja [4].

Los *límites hidráulicos* quedan definidos por líneas de corriente (divisorias de agua subterránea) y líneas equipotenciales (líneas de potencial hidráulico constante). [4].

Líneas equipotenciales (potencial hidráulico constante o flujo constante)

Se puede usar una línea de potencial hidráulico constante, para formar un límite o se puede calcular los caudales especificados a través de la línea equipotencial y usarlos para especificar flujos límite. Estos son poco estables en el espacio y tiempo [4].

C. Distribución de parámetros hidrogeológicos

La formulación del modelo conceptual debe incluir y describir la existencia y distribución espacial de las principales UH y sus propiedades hidráulicas [21]. Las unidades hidrogeológicas son un material geológico específico (o un grupo de materiales) que tiene propiedades hidráulicas suficientemente similares que pueden considerarse una unidad hidráulica para el propósito de un estudio hidrogeológico [21]. Varias formaciones geológicas pueden combinarse en una sola UH [4]. Las estimaciones de las propiedades hidrogeológicas de cada UH deben derivarse de las pruebas in situ, análisis del material de perforación y/o mediciones geofísicas. En ausencia de dicha información, se utilizan valores utilizados en estudios anteriores o sugeridos por la literatura basada en la geología conocida [22].

D. Componentes del balance hídrico

Un balance hídrico es un componente fundamental del modelo conceptual de un sistema de agua subterránea [21]. Se desarrolla para el área o volumen representado por el modelo [4], y proporciona un vínculo cuantitativo entre los diferentes aspectos del modelo conceptual, es decir, la recarga (entrada), el flujo a través de diferentes UH y la descarga (salida) de agua subterránea [21].

La ecuación del balance hídrico en su forma más simple es [4]:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta \text{Almacenamiento} \quad (3)$$

Donde las entradas y salidas están dadas por las siguientes componentes [21].

- 1) Entradas: recarga de agua subterránea desde los bordes, desde la infiltración de agua procedente de las precipitaciones o desde una masa de agua.

- 2) Salidas: salida de agua subterránea en los bordes, extracción de agua subterránea (por bombeo), evapotranspiración, salida de agua subterránea a la superficie (filtraciones y manantiales).

El cambio en el almacenamiento ocurre en los modelos en régimen transitorio cuando el flujo de entrada y salida no está equilibrado, resultando en una pérdida o ganancia en el almacenamiento de agua subterránea dentro del dominio, esto acompañado del cambio en la altura del nivel piezométrico [4]. En algunos casos, un balance de agua sin variación en el almacenamiento, es decir en régimen estacionario, es adecuado para la formulación de un modelo conceptual [21].

2.4.2 Modelo matemático

Los modelos matemáticos más utilizados en hidrogeología se formulan a partir de ecuaciones generales en derivadas parciales que describen el comportamiento físico de flujos darcianos en medios porosos. Además de considerar la ley de Darcy estos modelos matemáticos están basados en los principios de conservación de masa y energía [23].

La ecuación que rige el flujo a través de un medio poroso se deriva tradicionalmente al referirse al flujo de agua a través de un cubo de material poroso. Este cubo se conoce como volumen elemental representativo (REV) el cual tiene un volumen igual a $\Delta x \Delta y \Delta z$ (Figura 8). El caudal Q de fluido darciano 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 8 [4].

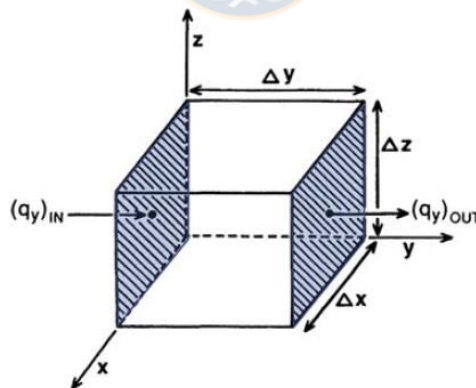


Figura 8: REV ($\Delta x \Delta y \Delta z$) y componentes del flujo en eje de coordenadas y [4].

El flujo q a través del REV, 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 tal que,

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

Considerando flujo a lo largo del eje y del REV (Figura 8). 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 del 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 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:

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

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 se puede medir fácilmente q . Es preferible una ecuación de gobierno escrita en términos de potencial, porque es una cantidad observada que se mide fácilmente en pozos. La ley de Darcy (1) relaciona la descarga específica q con el potencial h . Tanto q como el gradiente de h son vectores y K la 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 de la 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 hidráulico. La ecuación (14) sustituye en la ecuación (13) para dar la ecuación de gobierno general que representa el flujo de agua subterránea en régimen transitorio tridimensional 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 de interés, h , es la variable dependiente, mientras que x, y, z, t son las variables independientes, K_x, K_y, K_z, S_s son parámetros, y W es el término fuente. Los subíndices en K denotan las condiciones anisotrópicas, lo que significa que la conductividad puede variar con la dirección, x, y, z .

La ecuación (14) se usa en la mayoría de los códigos numéricos de flujo de agua subterránea. Ésta se simplifica cuando el problema es un estado estacionario ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$) y/o cuando es bidimensional (2D). Por ejemplo, dado un problema de estado estacionario la ecuación (15) se convierte en (16) [24].

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

Para la resolución de esta ecuación, se necesitan condiciones de contorno alrededor del dominio [21]. Las condiciones de borde más comunes para el flujo saturado son las siguientes [4].

Tipo 1, Borde de potencial hidráulico (h) especificado (condición de Dirichlet)

Donde el potencial hidráulico a lo largo del límite se establece con un valor conocido. Un límite de carga constante es un caso especial de límite de tipo 1 donde los potenciales a lo largo del límite se establecen en el mismo valor [4].

$$h = \text{constante} \quad (17)$$

Tipo 2, Borde de flujo especificado (condición de Neumann)

Donde se especifica la derivada de la carga hidráulica (gradiente hidráulico) en el límite, así el flujo es también especificado. Luego para un límite de flujo constante especificado, se tiene [25] :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = \text{constante} \quad (4)$$

Donde $\frac{\partial h}{\partial n}$ es el gradiente hidráulico, y n es la dirección del gradiente hidráulico (coordenadas cartesianas). Como $\frac{\partial h}{\partial n}$ es un valor conocido, de la ley de Darcy (1) se tiene que:

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

Como $\frac{\partial h}{\partial n} = \text{constante}$, entonces $q_n = \text{constante}$, de esta forma el flujo es también constante.

Tipo 3, Borde de potencial y flujo especificado (condición de Cauchy)

Donde el flujo a través del límite se calcula a partir de la ley de Darcy (1) usando un gradiente calculado como la diferencia entre una carga hidráulica especificada fuera del límite y la carga calculada por el modelo en el nodo ubicado en o cerca del límite. Este tipo de condición límite a veces se denomina condición límite mixta porque relaciona un potencial hidráulico en el borde (h_b) a un flujo en el límite [4]. Matemáticamente, la tasa de flujo volumétrico Q [L^3/T] a través de una condición de contorno tipo Cauchy se calcula utilizando una ecuación de la forma general [4]:

$$Q = C\Delta h = h_b - h_{i,j,k} \quad (5)$$

Donde:

$$C = KA/L \quad (6)$$

Δh 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 es la conductancia [L^2/T], K es la conductividad hidráulica representativa [L/T], A es un área representativa y L es la distancia entre h_b y $h_{i,j,k}$.

2.4.3 Modelo numérico

Un modelo numérico utiliza métodos numéricos para resolver las ecuaciones que rigen el flujo de aguas subterráneas [21]. Una solución numérica no es continua en el espacio o el tiempo; el potencial hidráulico se calcula en puntos discretos (nodos) en el espacio [4],[22]. Los métodos numéricos más utilizados en el modelado de aguas subterráneas son el método de elementos finitos (FE) y el método de diferencias finitas (FD) [4]. En el método FE, el dominio se subdivide en

elementos definidos por nodos. La variable dependiente se define como una solución continua dentro de los elementos. La solución FE es continua por partes, ya que los elementos individuales se unen a lo largo de los bordes. Es posible una variedad de formas de elementos, los más comunes son triangulares y cuadriláteros. Las ecuaciones FE se generan al introducir una solución de prueba de potencial hidráulico dentro del elemento. Típicamente, se elige una función de interpolación lineal. En dos dimensiones, la forma general de una función de interpolación lineal es:

$$h^e(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (20)$$

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 anti-horario) que forman el elemento triangular.

$$\begin{aligned} h_i &= a_0 + a_1x_i + a_2y_i \\ h_j &= a_0 + a_1x_j + a_2y_j \\ h_m &= a_0 + a_1x_m + a_2y_m \end{aligned} \quad (21)$$

Si las ecuaciones anteriores se resuelven para a_0 , a_1 , a_2 y las expresiones se sustituyen en la primera ecuación (20), se puede reescribir como:

$$h^e(x, y) = N_i^e(x, y)h_i + N_j^e(x, y)h_j + N_m^e(x, y)h_m \quad (22)$$

Donde:

$$\begin{aligned} N_i^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e[(x_jy_m - x_my_j) + (y_j - y_m)x + (x_m - x_j)y]} \\ N_j^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e[(x_my_i - x_iy_m) + (y_m - y_i)x + (x_i - x_m)y]} \\ N_m^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e[(x_iy_j - x_jy_i) + (y_i - y_j)x + (x_j - x_i)y]} \end{aligned} \quad (23)$$

y

$$2A^e = (x_iy_j - x_jy_i) + (x_my_i - x_iy_m) + (x_jy_m - x_my_j) \quad (24)$$

$N_i^e(x, y)$, $N_j^e(x, y)$ 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 término de los potenciales en los tres nodos de las esquinas.

El presente trabajo consta de la utilización del código de modelación hidrogeológica FEFLOW, escogido en función de los objetivos del estudio. FEFLOW es un sistema interactivo de modelación de aguas subterráneas que permite modelar de forma tridimensional y bidimensional, regional y transversal (horizontal, vertical o eje asimétrico), en estado transitorio o estacionario, considerar flujos y edad del agua subterránea [26]. Este resuelve las ecuaciones de flujo en medios porosos y fracturados mediante un FEM multidimensional para situaciones geométricas y paramétricas complejas [27]. FEFLOW se puede usar de manera eficiente para describir la distribución espacial y temporal del agua subterránea [27].

3. ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA

Las instalaciones de la mina a cielo abierto Radomiro Tomic se localizan a 40 km al noreste de la ciudad de Calama, en la provincia de El Loa, Región de Antofagasta (Figura 9), a una altura promedio de 3000 m.s.n.m. Se encuentra en un valle limitado al este por los cerros de Chuquicamata, al oeste por la Sierra San Lorenzo, formando parte de la subcuenca Pampa Cere de la hoya hidrográfica del río Loa. Las comunidades más cercanas son el campamento de operaciones de Chuquicamata (a 15 km al norte), la ciudad de Calama y el poblado de Conchi aproximadamente 40 km al noroeste [28].

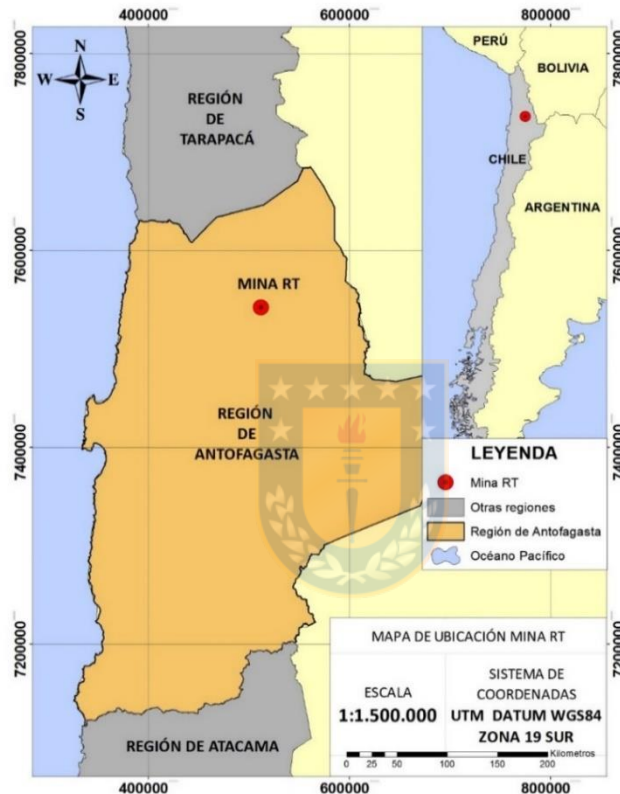


Figura 9: localización de mina

3.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE MINA

La mina RT es explotada por el método de rajo abierto, que comprende operaciones de perforación, tronadura, carguío y transporte de material en camiones hacia las instalaciones de procesamiento o botaderos de estéril [29]. La mina RT aplica un esquema de explotación con rampa continua, cuyos principales parámetros geométricos de diseño, se detallan a continuación.

- Altura de banco simple: 15 m.
- Altura de banco doble: 30 m.
- Ancho mínimo de fase: 120 m.
- Ancho de rampas: 35 m (30 m en sectores con acceso doble).
- Pendiente de rampas: 10%.
- Bermas de desacople: 25 m de ancho, cada 10 bancos como máximo.
- Ángulo de talud: entre 45° y 58°.

La explotación considera un diseño del rajo cuya geometría es de 2,5 km de largo por 1,5 km de ancho con una profundidad máxima de 300 m, ocupando una superficie aproximada de 670 ha [29].

En base a la información pública recopilada [9,30] se determina que el plan minero de RT en el año 2007 contempla la explotación del material sulfurado en el sector centro-sur del piso del rajo desde la cota 2690 m.s.n.m hasta llegar a 2630 m.s.n.m.

3.3 GEOLOGÍA

El mapa geológico se muestra en la Figura 10, los perfiles geológicos que intersectan la zona en la que se localiza el rajo (A-A'', B-B'''''' y E-E''''') se muestran en el ANEXO B. Las UG presentes en sector RT son las siguientes [29].

3.3.1 Unidades geológicas

Depósitos aluviales activos: gravas y ripios polimícticos, arenas y limos no consolidados, depósitos aluviales de arenas, limos y arcillas, no consolidados. Se le asigna a una edad Holoceno Superior.

Depósitos aluviales antiguos: gravas y ripios polimícticos, arenas y limos no consolidados, cortados por drenajes aluviales activos. Edad Pleistoceno Superior alto – Holoceno Medio.

Estratos de Cerros de Chuquicamata: secuencia volcánica y sedimentaria continental. Edad asignada entre Triásico Medio – Triásico Superior. Se compone de dos miembros:

- TRch(a): lavas andesíticas de piroxeno, porfídicas y afaníticas.
- TRch(c): conglomerados, brechas sedimentarias y areniscas gruesas a medias.

Granitoides del Eoceno: abarcan los siguientes cuerpos intrusivos;

- Complejo Intrusivo Chuquicamata: de composición granodiorita y granítica, incluye al Pórfido Este, Pórfido Oeste y Pórfido banco.
- Complejo Granodiorítico Fortuna: de composición principalmente granodiorítica.
- Granodiorita Fiesta: granodiorita leucocrática de biotita y hornblenda.
- Granodiorita Antena: granodiorita gris de hornblenda y biotita.
- Complejo diorítico Los Picos: intrusivo extenso, compuesto por numerosos plutones.

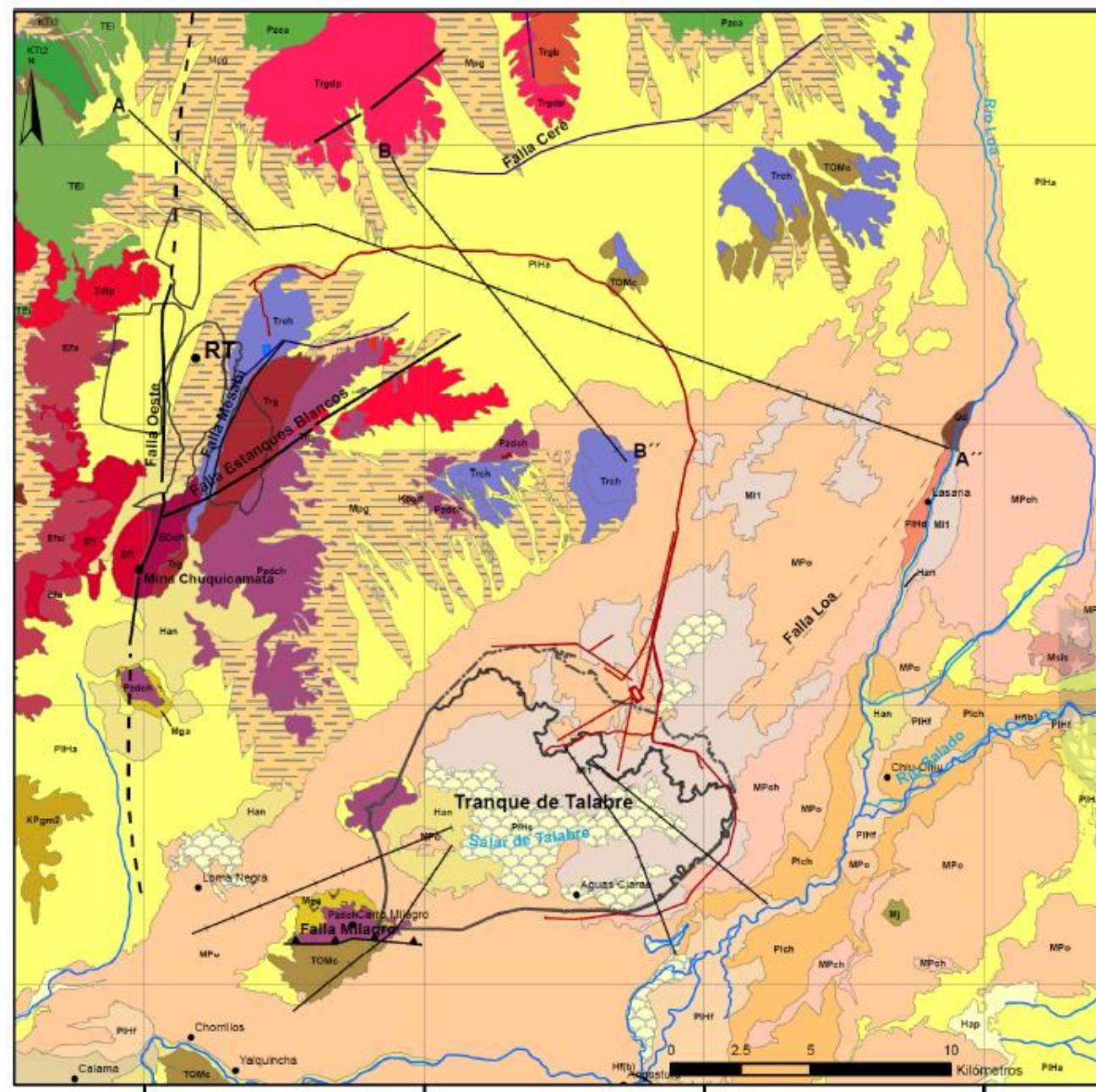
Granitoides del Triásico: compuesto por diques de pórfido micromonzodiorítico de hornblenda, cuerpos irregulares y diques de pórfido granodiorítico de hornblenda.

3.3.2 Geología estructural

La Falla Oeste corresponde al elemento estructural más relevante dentro del sector RT, está ubicada al oeste de la mina, en los cerros que componen la Sierra del Medio, y ha sido indicada como parte de un lineamiento mayor que se extiende entre Quebrada Blanca por el norte y el Salar de Punta Negra por el sur, y se considera a ésta falla como activa hasta el presente.

La Falla Estanques Blancos está ubicada en los cerros de Chuquicamata, y corresponde a una falla normal, casi vertical, de rumbo NE-SW y de unos 12 km de extensión.

Se tiene también al sistema Mesabi, este sistema se desarrolla al este y fuera del rajo. Es una falla de movimiento inverso con un trazado sinuoso de dirección general N 45°E.



Fuente: Cartografía Geológica Sernageomin

Diseño: MC / L.C.	Revisión: MFM	Proyecto RT Sulfuros			
Dibujo: MC / L.C.	Aprobó: MG				
SGA Soluciones en gestión ambiental		Sist. Referencia: Proyección UTM Huso 19 Sur	Fecha: Octubre 2012	Nº Proyecto: 12001	Rev.: 2
		Datum: WGS 84	Escala:	Plano/Figura:	Anexo:

Simbología

	Falla
	Falla Inferida
	Rio Loa
	Perfil Geológico
	Canaleta de relaves

Cartas Geológicas

"Corro de Paqui" Maksonev et al. 2001	"Conchif" Maksonev et al. 2001
"Calama" Tominson et al. 2010	"Chiu Chiu" N. Blanco et al. 2009

CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO HOLOCENO	
	TERCIARIO	PLIOCENO	
		MIOCENO	
		OLIGOCENO	
		PALEOCENO EOCENO	
	MESOZOICO	JURASICO	CRETACICO
		TRIASICO	
		PALEOZOICO	

- Han** Depósitos y cubiertas antrópicas: suelos de uso agrícolas, artificiales mineros, de relaves y vertedero sanitario
 - Hf** Depósitos Activos Fluviales y ciénagas: gravas, arenas, limos y arcillas, alfombras orgánicas, diatomitas y sinteres calcáreos. b) facies de llanuras y terrazas fluviales
 - PIHf** Depósitos antiguos fluviales y ciénagas: gravas, arenas, limos y arcillas, semiconsolidados y bien estratificados.
 - PIHa** Depósitos aluviales antiguos: gravas y ripios polimícticos, arenas y limos no consolidados y mal seleccionados. Facies de playa aluvial.
 - Pich** Formación Chiu Chiu: secuencia sedimentaria clástica y calcárea de origen lacustre, oleradamente consolidada.
 - MPg** Depósitos de piedemonte: gravas y ripios polimícticos, arenas y limos de mala selección y pobre consolidación.
 - MPO** Formación Opache: calizas palustres con moluscos de agua dulce, calizas arenosas, areniscas y conglomerados calcáreos, travertinos y diatomitas.
 - MI1** Formación Lasana: unidad clástica de origen fluvial y aluvio-palustre, compuesta por areniscas gruesas y conglomerados.
 - Msis** Ignimbrita Sifón: depósito de flujo piroclástico soldado. Se intercala en la Formación Chiquinaputo.
 - TOMc** Formación Calama: gravas de origen torrencial y gravitacional, mal estratificadas, mal clasificadas y de consolidación moderada.
 - TE1** Formación Icanche: coladas andesíticas, tobas liticas y de ceniza.
 - KPqm2** Formación Quebrada Mala: secuencia volcánica y sedimentaria continental. Miembro Superior: lavas y brechas de andesitas; Miembro Inferior: conglomerados medios a gruesos.
 - KTe** Formación Cerro Empexa: secuencia volcánica y sedimentaria continental. Miembro Superior: lavas de andesitas porfídicas; Miembro Inferior: brechas y conglomerados.
 - KT2** Formación Tolar: secuencia sedimentaria clástica rojiza de origen continental. Miembro 2: areniscas, areniscas gujarrosas y limolitas; Miembro 3: conglomerados gruesos y de bloques.
 - KT3** Formación Quehuita: secuencia sedimentaria de origen marino en los niveles inferiores y continental en los niveles superiores
 - Jqm** Estratos de Cerros de Chuquicamata: Secuencia volcánica y sedimentaria continental, conformada por lavas y brechas andesíticas.
 - Trch**
 - Pzca** Formación Collahuasi: Secuencia volcánica, de aspecto macizo y mal estratificado. a) lavas y brechas andesíticas; r) lavas riolíticas de biotita y s) rocas sedimentarias
 - Ha** Depósitos aluviales activos: gravas y ripios polimícticos, arenas y limos no consolidados.; p) facies de depósitos de playa aluvial.
 - PIHd** Depósitos de deslizamiento: megabloques con deslizamiento rotacional y depósitos caóticos de bloques, gravas y arenas.
 - Qd** Depósitos de derrumbe o colapso gravitacional: depósitos caóticos de bloques, gravas y arenas.
 - PIHs** Depósitos salinos: limos y arcillas pardas con intercalaciones de diatomitas, alto contenido de yeso y de cloruro de sodio
 - Mga** Gravas aluviales antiguas: gravas y ripios polimícticos, arenas y limos
 - MPch** Formación Chiquinaputo: unidad clástica de conglomerados, areniscas y limolitas.
 - Mj** Formación Jalquinche: areniscas finas y limolitas rosadas con intercalaciones subordinadas de evaporitas.
- Intrusivos**
- Granitoides del Eoceno**
- | | |
|--|---|
| Efs1 Pórfido San Lorenzo | Tdp Complejo diorítico Los Picos |
| ap Aplitas graníticas y Pórfidos Aplíticos Tetera | Tmda Monzodiorita cuarcifera Atahualpa |
| Efa Granodiorita Fiesta | Efa Granodiorita Antena |
| Tpd Pórfidos dioríticos | EOh Complejo Intrusivo Chuquicamata |
- Granitoides del Cretacico Superior**
- | |
|--|
| KTdb Diorita Quebrada Paqui |
| Kp(gd) Pórfidos Hipabisales y Diques del Cretácico Superior |
- Granitoides del Triasico**
- | |
|-------------------------------------|
| Trg Granitoides del Triásico |
|-------------------------------------|
- Granitoides del Paleozoico**
- | | |
|---|--------------------------|
| Trgdp Granodiorita Cerro Platero | Trgb Granito Bayo |
| Pzdch Complejo Metaplutónico de Cerros de Chuquicamata | |
| Pzgm Granito Mesa | |

Figura 10: mapa geológico sector RT y tranque Talabre [31]

3.4 HIDROGEOLOGÍA

La información referente al componente hidrogeológico, se obtuvo de estudios de carácter público [30]. La investigación se realiza en una zona donde se desarrolla la cuenca del río Loa, que recorre un total de 440 km comprendiendo una hoya hidrográfica de aproximadamente 33.081 km².

En el área de estudio se identifican la Unidad Acuífero Superior (UH-2) y Unidad Acuífero Inferior (UH-5). El basamento que subyace a estas UH es de carácter impermeable. La zona saturada (debajo del nivel freático hasta el basamento) muestra potencias que fluctúan entre 300 m y 500 m. Cabe mencionar que particularmente en el sector del rajo, no se observa desarrollo de la UH-2.

3.4.1 Acuíferos

Diversos estudios [32,33] clasifican a la cuenca Calama-El Loa como un medio acuífero (véase ANEXO D). Luego, se traza en el mapa a la cuenca de Calama y a los acuíferos circundantes al sector RT los que se aprecian en la Figura 11.

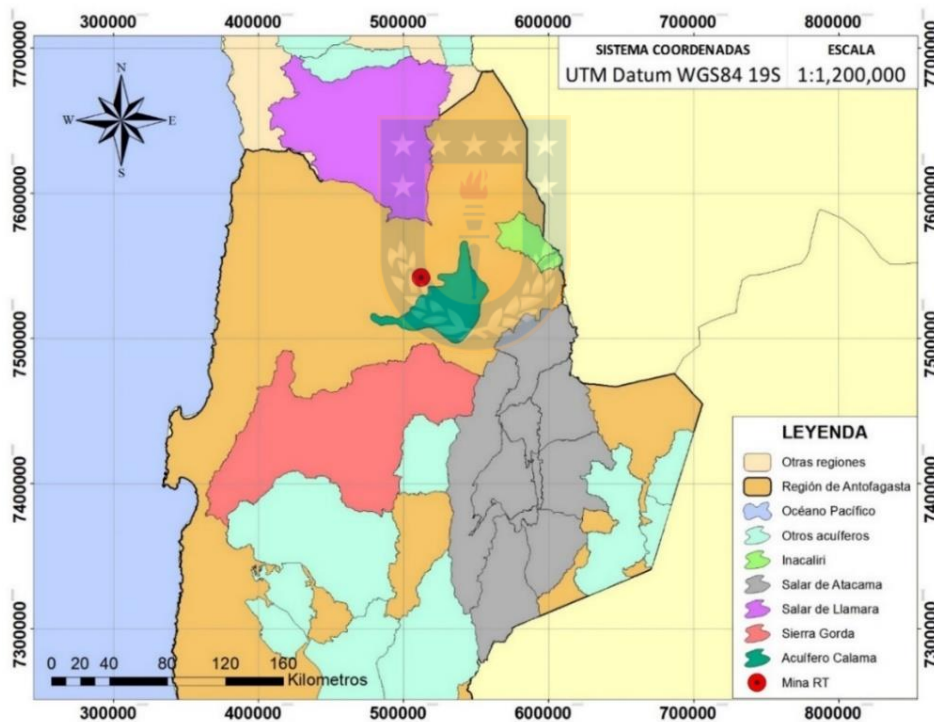


Figura 11: acuíferos en área de estudio (modificado de [33]).

3.4.2 Unidades hidrogeológicas del sector de estudio

UH-1: Depósitos aluvio-evaporíticos plio-pleistocenos.

Contiene las UG no consolidadas y la Formación Chiu Chiu. En el sector del rajo, el límite inferior se conecta directamente con UH-5 de similares características litológicas. Se presentan potencias de entre 10 m y 170 m y se encuentra parcialmente saturada conformando parcialmente un acuífero.

- **UH-1a Depósitos aluviales:** compuesta por gravas y arenas con matriz arenosa. El rango de conductividad hidráulica estimado se encuentra entre 10^{-1} y 10^2 m/d.
- **UH-1b Depósitos detrítico-evaporíticos:** albergada por Formación Chiu Chiu y rellenos clástico-salinos de salares. El rango de conductividad se encuentra entre 10^{-4} y 1 m/día.

UH-2: Acuífero cárstico-detrítico el Loa (“Acuífero Superior”).

Predomina el carácter freático y una permeabilidad variable. La porosidad de las rocas en este acuífero es baja. Existen zonas donde éste acuífero no está presente, siendo identificable solo el Acuífero Inferior en contacto directo con la unidad en superficie UH-1, como ha sido determinado para el sector del rajo RT. Los valores de conductividad se encuentran entre 10^{-2} m/d y 10^2 m/d.

UH-3: Acuitardo Ignimbrítico.

Unidad formada por tobas consolidadas, de permeabilidad baja, constituyendo un acuitardo. Las tobas poseen una potencia de 10 - 50 m. Conductividad de 10^{-6} m/día que genera confinamiento.

UH-4: Acuitardo el Loa.

En su composición predominan arcillas y limos que pertenecen a la parte inferior de la Formación Jalquinche. Alto grado de homogeneidad. Conductividades hidráulicas de 10^{-6} a 10^{-2} m/d.

UH-5: Acuífero gravas de Calama (“Acuífero Inferior”).

Constituida por gravas, arenas gravosas y conglomerados, con matriz arenosa y limo-arenosa, saturadas en su mayor parte. Se sitúa entre el Acuitardo y el Basamento Impermeable. En sectores del borde de la cuenca subyace al Acuífero Superior o a los Depósitos Aluvio-Evaporíticos, como ocurre en el rajo RT. Su potencia fluctúa entre 0-200 m, y se registran algunas de 300 m y 400 m.

- **UH-5a Depósitos de gravas:** Representa las condiciones típicas del Acuífero Inferior. La conductividad hidráulica fluctúa entre 5×10^{-2} a 10^1 m/d.
- **UH-5b Depósitos limo-arcillosos:** Compuesta por intercalaciones limo-arcillosas. La conductividad hidráulica fluctúa entre 10^{-5} m/d a 10^{-3} m/d.

UH-6: Acuífugo Rocas Pre-Terciarias (Basamento Impermeable).

Formado por la unidad Basamento Igneo-Metamórfico de litología diversa donde predominan las rocas ígneas y metamórficas, compuestas por rocas volcánicas y sedimentarias. Se considera que en esta no hay flujos subterráneos por su baja conductividad hidráulica. Se divide en dos unidades:

- **UH-6a:** Permeabilidad media a baja, contiene a los Estratos de Chuquicamata y Formación Icanche al occidente de la Falla Oeste, su parte superior está en mayor parte saturada. Su conductividad fluctúa entre 10^{-5} a 10^{-1} m/día.

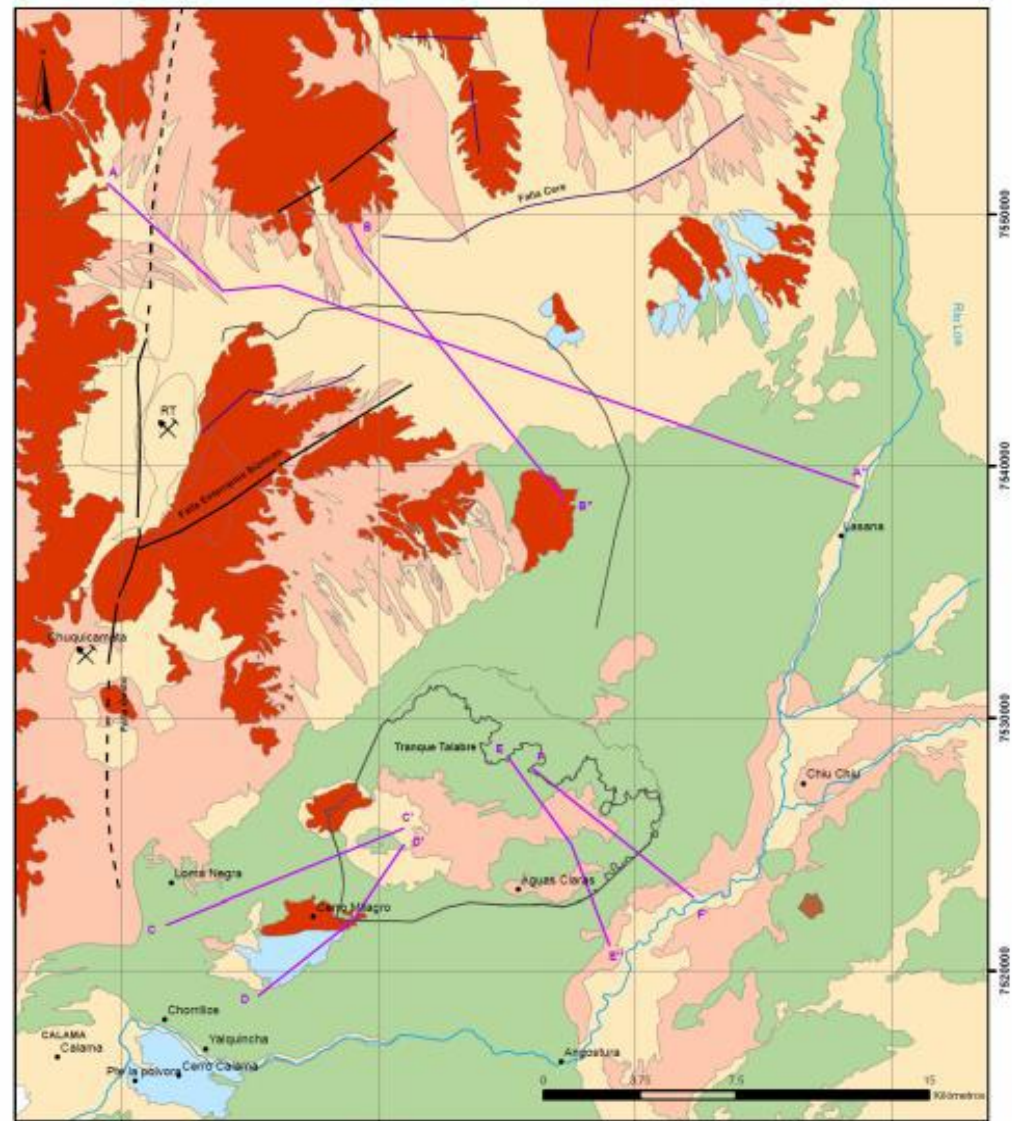
- **UH-6b:** Basamento rocoso de muy baja permeabilidad, que actúa como borde impermeable del sistema acuífero. Corresponde a unidades intrusivas con conductividades hidráulicas muy bajas (10^{-9} a 10^{-5} m/día), a excepción en sectores caracterizados por el desarrollo de roca muy fracturada, zonas de intenso fallamiento y por efecto local de procesos de alteración.

La Tabla 3 que se muestra a continuación indica cómo se correlacionan las unidades hidrogeológicas con las geológicas descritas respecto al área de estudio, y los valores de conductividad hidráulica correspondiente a cada unidad.

Tabla 3: correlación entre unidades hidrogeológicas y geológicas del área de estudio

Unidad hidrogeológica	Unidades Geológicas asociadas
UH-1: Depósitos aluvio-evaporíticos, no consolidados.	Han (dep. antrópicos, como suelos agrícolas), Ha (dep. aluviales activos), PIHa (dep. aluviales antiguos), MPg (dep. de piedemonte). K: 10^{-4} – 10^2 m/día
UH-2: Acuífero Superior	Formación Opache Parte Superior de Formación Jalquinche. K: 10^{-2}-10^2 m/día
UH-3: Acuitardo ignimbrítico	Tobas e ignimbritas. K: 10^{-6} m/día.
UH-4: Acuitardo El Loa	Parte Inferior de Formación Jalquinche Rocas volcánicas de Formación Calama. K: 10^{-6} – 10^2 m/día
UH-5: Acuífero Inferior	Gravas de la Formación Calama. Incluye limos y arcillas basales. K: 10^{-5} m/día – 10^1 m/día.
UH-6: Basamento Impermeable o acuífugo pre-Terciario	Rocas consolidadas anteriores a la Formación Calama. K: 10^{-9} – 10^{-5} m/día (hasta 10^{-1} en roca fracturada)

El mapa hidrogeológico se muestra en la Figura 12 y los perfiles hidrogeológicos en la Figura 13 y Figura 14. También se han analizado 24 sondajes [9] de los cuales 23 poseen información en el dominio, unos localizados alrededor del rajo y otros en su interior. La información data del año 2007. En la Tabla J- 1 y Tabla J- 2 del ANEXO J se muestra la información más relevante de cada sondaje.



Fuente: Cartografía Geológica Semageomin

Simbología

- UH1 Depósitos Aluvio-Evaporíticos Plio - Pleistoceno
a: Depósitos aluviales,
b: Formación Chiu-Chiu y dep. de piedemonte
- UH2 Acuífero Superior El Loa
- UH4 Acuífero El Loa
- UH5 Acuífero inferior gravas de Calama
- UH6 Basamento impermeable, Pre Terciario
- Perfil Hidrogeológico
- Río Loa
- Obras Proyecto

Cartas geológicas	
"Cerro de Paquí" Maksaev et al. 2001	"Conchi" Maksaev et al. 2001
"Calama" Tomlinson et al. 2010	"Chiu Chiu" N. Blanco et al. 2009

Figura 12: mapa hidrogeológico del sector RT [35]

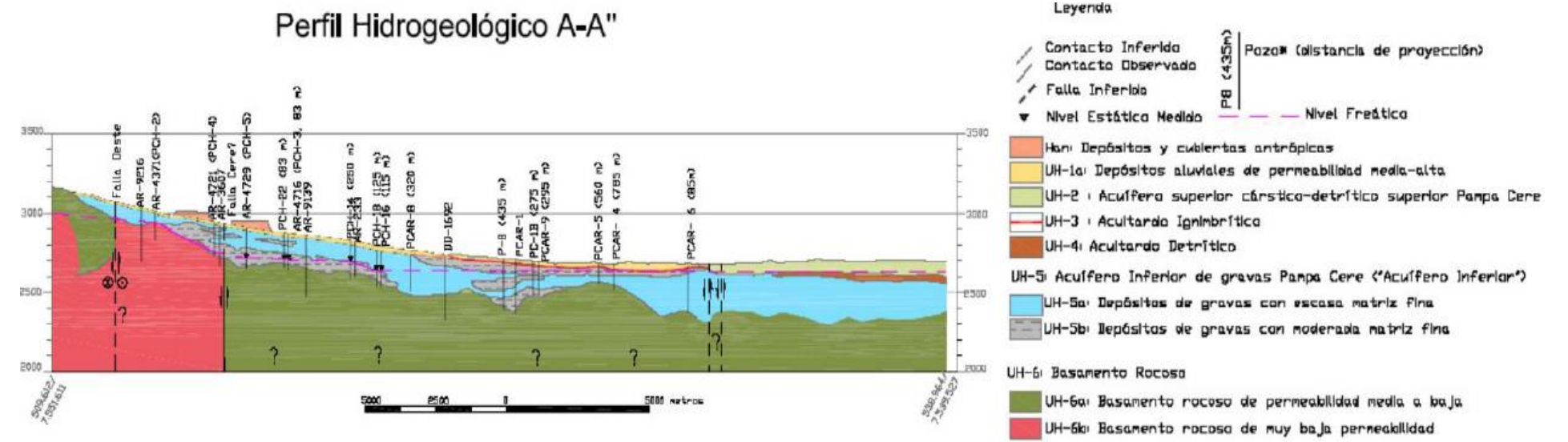
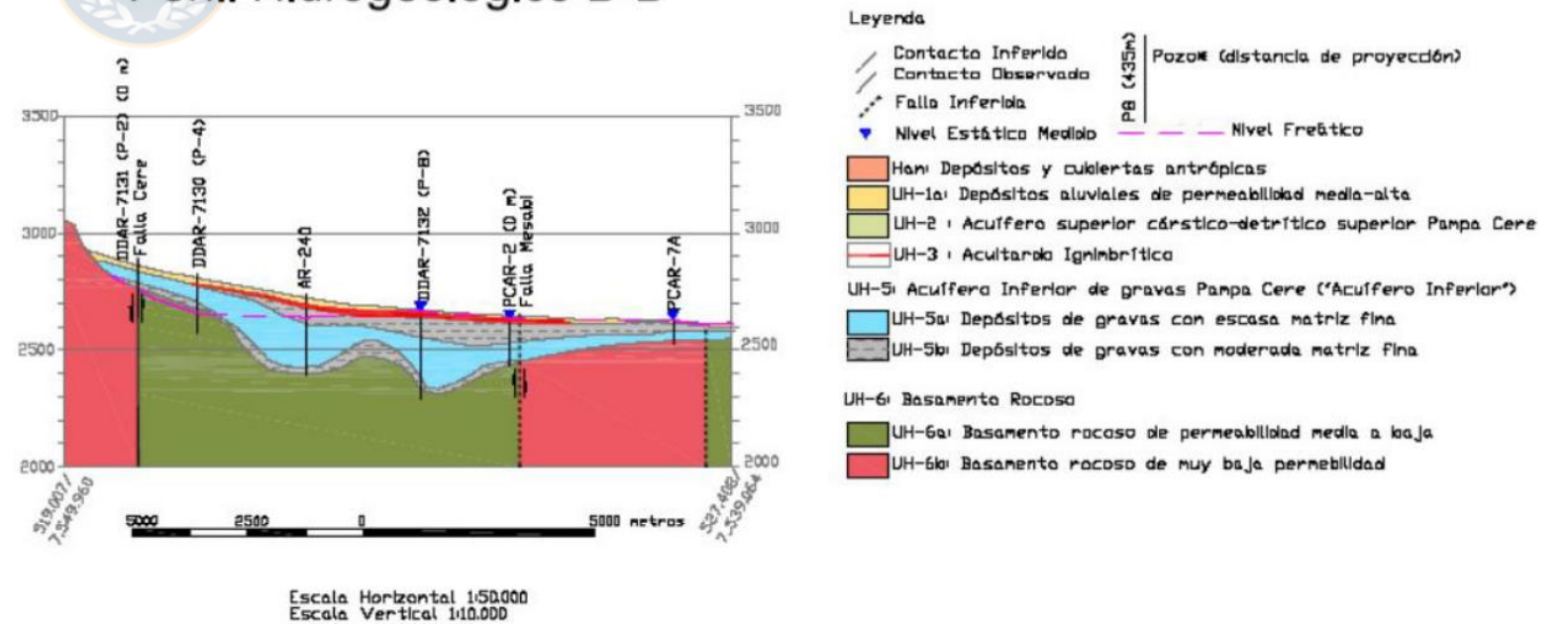


Figura 13: perfil hidrogeológico A-A" [35]



Perfil Hidrogeológico B-B'



Escala Horizontal 1:50.000
Escala Vertical 1:10.000

Figura 14: perfil hidrogeológico B-B' [35]

3.5 HIDROLOGÍA

La información hidrológica analizada [29] se resume en el siguiente apartado.

3.5.1 Hidrología Regional

La Región de Antofagasta constituye una de las áreas más áridas de Chile. La presencia de cursos de agua es escasa, siendo los únicos cauces con escurrimiento permanente el río Vilama, río San Pedro, y el río Loa, éste último se ubica aguas abajo a unos 23 km de la mina RT. El distrito Calama se enmarca en un clima desértico en el que la temperatura varía entre un máximo de enero de 20 °C y un mínimo de julio de -0,1 °C. La precipitación media anual en el distrito es de 38 mm y un período seco de 12 meses, con un déficit hídrico de 2.058 mm/año. No se registran períodos húmedos ni excedente hídrico [33]. En la Tabla 4 se muestran los valores medios mensuales y anuales de cada variable en el distrito Calama de la región de Antofagasta.

Tabla 4: valores meteorológicos medios mensuales y anuales en el distrito Calama

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.POT (mm)	194	191	184	175	165	158	156	158	165	175	184	191	2096

3.5.2 Cuencas hidrográficas

La zona de estudio se localiza en una subcuenca de la pampa Cere que pertenece a la cuenca hidrográfica del río Loa, cuenca exorreica de la región que logra llevar recursos hídricos desde la cordillera andina hasta el océano Pacífico en el acuífero de Calama (veáse ANEXO G). Esta cuenca puede dividirse en sub-cuencas, siendo en la sub-cuenca 7 en las que se emplaza el rajo RT, y en las sub-cuencas 3 y 7 lo que corresponde al sector Mina RT como se muestra en la Figura A- 1. La subcuenca donde se desarrollan las labores de la mina RT, considera un balance general aproximado de 30 l/s, de los cuales 2 l/s (como máximo) representan el drenaje producido a causa del rajo [32].

3.5.3 Hidrología del Sector RT

3.5.4.1 Estaciones meteorológicas

En la se recogen datos de las estaciones pluviométricas utilizadas, en la Figura E- 1 se muestra su ubicación geográfica, y los datos de precipitaciones y temperaturas.

3.5.4.2 Escorrentía superficial

Las áreas de escurrimiento hacia la mina RT generan escorrentías ocasionales y de baja magnitud, no generando cauces importantes en el área. Estas se muestran en la Figura A- 2.

3.5.4.3 Precipitaciones y Temperaturas

En el Sector RT la mayoría de los meses la precipitación es nula, con un valor medio histórico de 10 mm anuales y la máxima diaria (para un periodo de retorno de 10 años) es de entre 8 y 10 mm. [29,32]. En la Tabla E- 3 y Tabla E- 4 se detalla la información disponible de temperaturas de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

3.5.4.4 Evapo-transpiración

El distrito Calama en el que se localiza la zona de estudio se enmarca en un clima desértico cuyos valores medios mensuales y anuales de evapo-transpiración se muestran en la Tabla 4 (véase apartado 3.5.1). Luego la evapotranspiración mínima promedio es de 156 mm, la evapotranspiración máxima promedio es de 194 mm y la anual acumulada es de 2096 mm.

4. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

4.1 HIPÓTESIS CONCEPTUALES

El presente estudio se realiza a una escala de trabajo de nivel macroscópico, y se asume un flujo de agua darciano en medio poroso equivalente [4,20,22].

Se considera un modelo en régimen de flujo estacionario dado que no se dispone de datos piezométricos suficientes en la zona de modelación para realizar una modelación en régimen transitorio. Considerando los objetivos del presente estudio, un modelo en régimen estacionario permitirá obtener una primera aproximación válida del comportamiento hidrogeológico en el sector la mina [22]. El caudal de drenaje en el rajo y valores de potencial hidráulico designados corresponden a valores promedio en el tiempo [20].

EL rajo alcanza una profundidad significativa y su piso intercepta a la UH-6 presentándose una conductividad hidráulica variable en la vertical. Así también, el flujo horizontal no es uniforme puesto a que en el dominio de modelación se disponen distintas UH. Bajo estas condiciones se define un modelo tridimensional. El drenaje generado por el rajo será representado por un pozo de bombeo único que considera el caudal total drenado desde su piso, llevado a cabo por un sistema de pozos de bombeo interiores, método de drenaje utilizado en el rajo RT [34].

En el dominio de modelación no hay presencia de la UH-2, y en su mayor parte el acuífero UH-5 (principal) subyace a la UH-1 (unidad permeable más superficial) como ocurre en el sector del rajo. Por otra parte, las unidades acuitardo sobre la unidad UH-5 en el sector, presentan potencias muy bajas (véase Figura 13 y Figura 14), y su inclusión en el modelo se considera no relevante. Luego, se asume para el modelo una condición de medio acuífero no confinado que se justifica con la información de niveles piezométricos disponibles [15]. En vista de la información disponible, considerando las características propias de la zona en la que se define el dominio, y teniendo en cuenta los objetivos del estudio, se define el modelo considerando un medio en zona saturada.

El fluido considerado es el agua como fase fluida única, su densidad y viscosidad permanecen constantes en todo el medio poroso del dominio y se rige por la ley de Darcy.

4.2 DOMINIO DE MODELACIÓN Y CONDICIONES DE CONTORNO

El dominio del modelo se define en base al análisis de los antecedentes disponibles, para este caso se utilizó información referente a fallas, formaciones geológicas, contactos litológicos, curvas equipotenciales y acuíferos que circundan la zona de interés (véase Figura 10). La superficie topográfica conforma el límite superior del dominio y el límite inferior se designa en la cota 2400 m.s.n.m, desde donde predomina la UH-6b sub-unidad designada como basamento impermeable. Luego, se define el dominio de modelación el cual se muestra en la Figura 15.

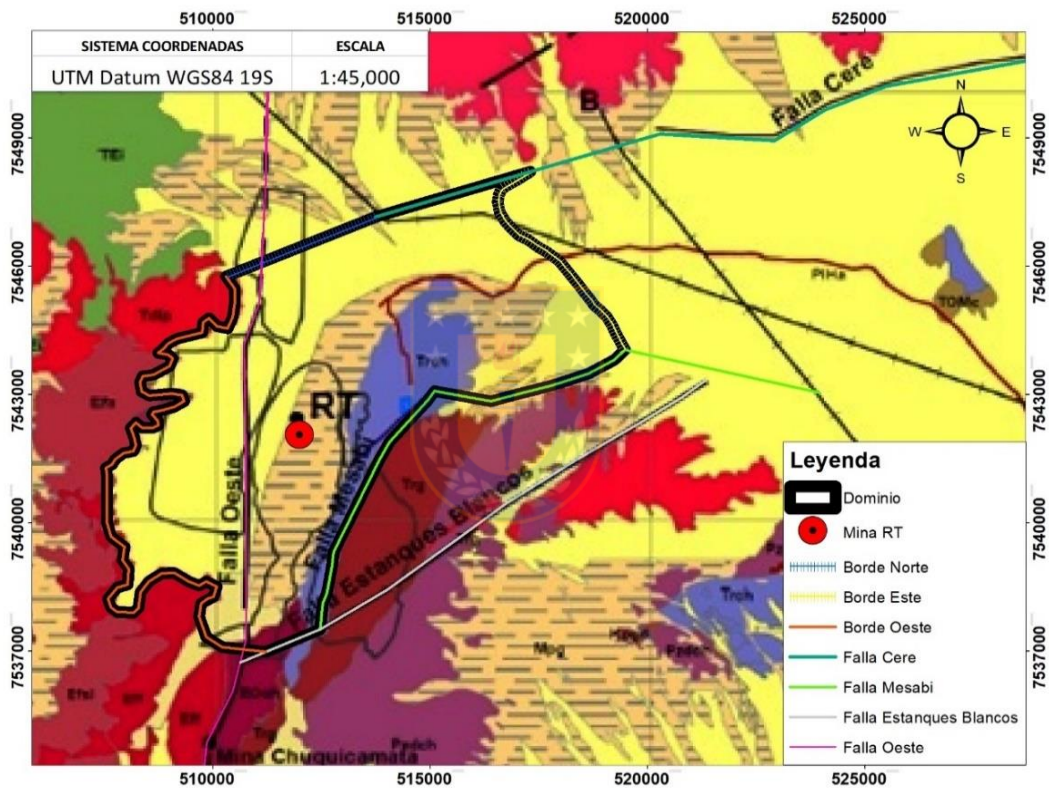


Figura 15: dominio de modelación (modificado de [31])

4.2.1 Borde Oeste

Se define en el límite de la UH-6 en el mapa hidrogeológico (Figura 12), que corresponde un borde de subcuenca (véase apartado 3.5.2 y ANEXO G). En el mapa geológico (Figura 10) se observan cambios litológicos entre los sectores este y oeste del. Se visualiza la Formación Granodiorita Antena (al norte) y Granodiorita Fiesta (al sur), granitoides del eoceno localizados al occidente del límite, mientras que al oriente se localiza la formación Depósitos Aluviales Antiguos de la época plioceno (véase apartado 3.3.1). Por otra parte, en el perfil hidrogeológico A-A'' (Figura 13) y perfiles geológicos A-A''', B-B''''', E-E'''' (véase ANEXO B) se observa la división entre las formaciones geológicas que componen a la UH-6 y la UH-5. Así, se define al límite como un borde impermeable

del dominio. Luego, para la modelación se define un borde con condición de contorno de tipo 2 (Neumann) con un flujo de agua de caudal nulo ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$).

4.2.2 Borde Cere

Definido a lo largo de un tramo observado de la falla Cere de orientación NE-SW dentro del sector de estudio (véase Figura 10 y Figura 12). En los perfiles geológicos e hidrogeológicos (ANEXO B, Figura 13 y Figura 14), se identifican cambios litológicos cuya divisoria es la Falla Cere. En los perfiles geológicos A-A'', A-A''', B-B'', B-B''''''', C-C'''''''' y E-E''', la Falla Cere separa a la formación Granitoides del Triásico de las formaciones pertenecientes a los Estratos de Cerros de Chuquicamata. Se observa también en el perfil geológico B-B'''''''' que la falla Cere genera una discontinuidad de la formación geológica Ignimbrita Sifón entre las cotas 2800 m.s.n.m y 2900 m.s.n.m. En los perfiles hidrogeológicos (Figura 13 y Figura 14) la falla Cere divide a la UH-6 en dos subunidades UH-6a y UH-6b, esta última presenta condiciones impermeables. Luego, se asume la hipótesis de que la falla cumple con las características de un borde impermeable del dominio, y para la modelación se define esta falla como un borde con condición de contorno de tipo 2 (Neumann) con un flujo de agua de caudal nulo ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$).

4.2.3 Borde Mesabi

Se define a lo largo de la falla Mesabi, que separa dos litologías en el sector oeste del rajo RT, al occidente de la falla se localiza la formación geológica Estratos de Cerros de Chuquicamata, y al oriente la formación Granitoides del Triásico. En los perfiles geológicos B-B'', C-C''''''''', D-D''', la falla divide litologías en profundidad, las formaciones Miembro Conglomerítico y Miembro Andesítico al occidente de la falla, y el Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata al oriente de la misma. Luego, Se asume la hipótesis de que la falla cumple con las características de un borde impermeable del dominio, y para la modelación se define esta falla como un borde con condición de contorno de tipo 2 (Neumann) con un flujo de agua de caudal nulo ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$).

4.2.4 Borde Este

Se define sobre una línea equipotencial (véase ANEXO F) cuyo potencial hidráulico es de 2665 m, perteneciente al componente acuífero inferior (UH-5) del acuífero de Calama, el cual subyace en el sector del rajo RT (véase Figura 12 y Figura 13). Luego, se define un borde con condición de contorno de Tipo 1 (Dirichlet) con un potencial hidráulico de 2665 m.

4.2.5 Borde Norte

Definido sobre un tramo al norte del rajo RT, conforma parte de la continuidad occidental del Borde Cere. Se define este borde en base a la información piezométrica de la UH-5 en la zona del acuífero Calama (véase ANEXO F) y los niveles piezométricos de pozos en el sector (véase ANEXO J), donde en dicho tramo se observan potenciales hidráulicos desde los 2700 m a los 2920 m desde el occidente al oriente. Luego, se define un borde con condición de contorno de Tipo 1 (Dirichlet) con un rango de valores entre 2700 m y 2920 m de potencial hidráulico.

4.3 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS

4.3.1 Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas designadas en el dominio de estudio se basan en UH previamente definidas (excepto la UH-C) y que han sido consideradas válidas por la mayoría de los estudios realizados en el sector [31]–[33], [37]–[39-41]. Así también, las UH implementadas han sido incluidas en función de su disposición espacial y posible importancia en el comportamiento de los flujos subterráneos de agua dentro de los límites del mismo. Tales se detallan a continuación.

UH-A: Depósitos Aluvio-Evaporíticos, Acuífero Gravas de Calama (Acuífero Inferior)

Desde la topografía esta unidad incluye parte de la UH-1, de potencias bajas en el dominio (véase Figura 13 y Figura 14) y localizada sobre la UH-5 de características litológicas similares (véase apartado 3.5.2). Integra también una fracción de la UH-5 presente en el dominio, dado a que su potencia varía, se define una cota de profundidad promedio representativa. Así, la disposición de la UH-A se designa desde la topografía hasta una cota de 2690 m.s.n.m (véase Figura 16). El rango de conductividad hidráulica fluctúa entre los valores 10^{-5} – 10^1 m/d.

UH-B: Rocas Pre-Terciarias y Basamento Impermeable.

Incluye parte de las sub-unidades UH-6a y UH-6b presentes en el dominio de modelación. Conforman una fracción superior desde la topografía en el sector Sur-Este del dominio (véase Figura 16) donde la UH-6 subyace a la superficie (véase Figura 12), y compone la fracción inferior del modelo desde la cota 2690 m.s.n.m hasta el límite inferior en la cota 2400 m.s.n.m. límite definido en función de las potencias con que se presentan las unidades superiores (véase apartado 3.5.2) y desde donde predomina la unidad UH-6b definida como basamento impermeable. El rango de conductividad hidráulica fluctúa entre los valores 10^{-9} – 10^{-1} m/d (véase apartado 3.5.2).

UH-C: Sector Rajo Radomiro Tomic.

Unidad que contiene las labores de mina a cielo abierto. Localizada en la UH-A y de características hidrogeológicas similares. Se considera que esta unidad puede llegar a conductividades del orden de 10 m/d por alteraciones producto de la actividad minera y la presencia de canales preferenciales de flujo mediante fracturas. Bajo ésta hipótesis se define un rango de conductividad hidráulica de 10^{-5} m/d a 10^1 m/d.

Los rangos de conductividad estimados a priori para las UH, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: distribución de conductividad hidráulica

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
UH-A	10^{-5} – 10^1 m/d
UH-B	10^{-9} – 10^{-1} m/d
UH-C	10^{-5} – 10^1 m/d

Considerando toda la información descrita, se obtiene el modelo conceptual del caso de estudio el cual se puede apreciar en la Figura 16.

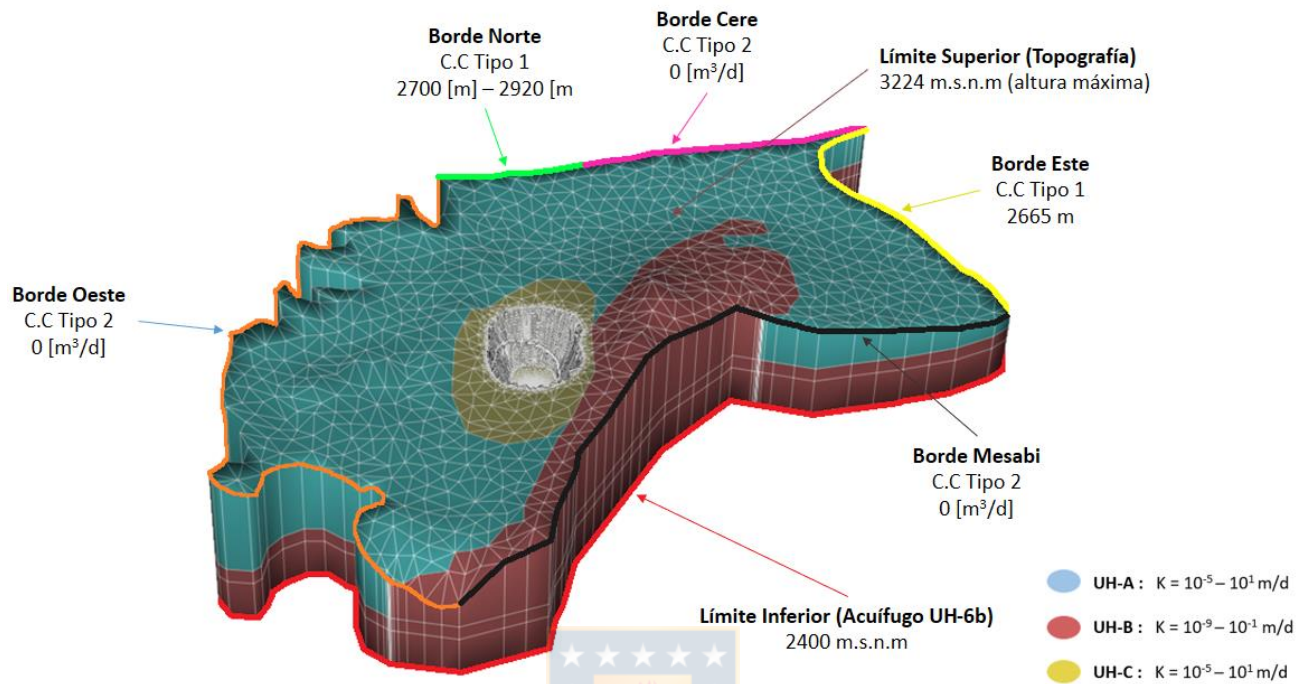


Figura 16: modelo conceptual

4.4 COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

En base a la información disponible en los antecedentes del presente estudio se definen los caudales de recarga y descarga para el modelo.

Precipitación: Se evidencia baja pluviosidad con un valor medio histórico de un orden de 10 mm anuales en el Sector RT disminuyendo hacia la costa. Se designa un valor estimado de 34 l/s [35].

Evapo-transpiración: La evapotranspiración potencial de tanque en el distrito Calama alcanza un valor de 2096 mm anuales, lo que implica que existe una capacidad de evaporación del 100% de los recursos precipitados [30].

Drenaje del rajo RT: Se considera en base a los antecedentes de caudales de agua drenada en el rajo un valor estimado de 2 l/s [39,40], que se estima como valor promedio representativo del caudal total extraído del rajo, desde el año 2007 en adelante [38] (véase ANEXO I). El pozo de bombeo se localiza en el centro de la UH-C (sector rajo) y se le asigna una condición de contorno tipo 2 con el valor de caudal correspondiente.

Flujo de agua subterráneo: el caudal de agua entrante al sector de estudio proviene de los aportes del acuífero de Calama (unidad superior e inferior). La recarga al sistema se da

principalmente por la unidad acuífero inferior (UH-5), desde el sector noroeste del dominio, en el sector norte del rajo se observan mayores potenciales hidráulicos los cuales van descendiendo hacia el oriente. Como objetivo de estudio se busca estimar los demás caudales aportantes, y los caudales de descarga subterránea del sistema.

Los elementos del balance hídrico del modelo conceptual se representan en la Figura 17.

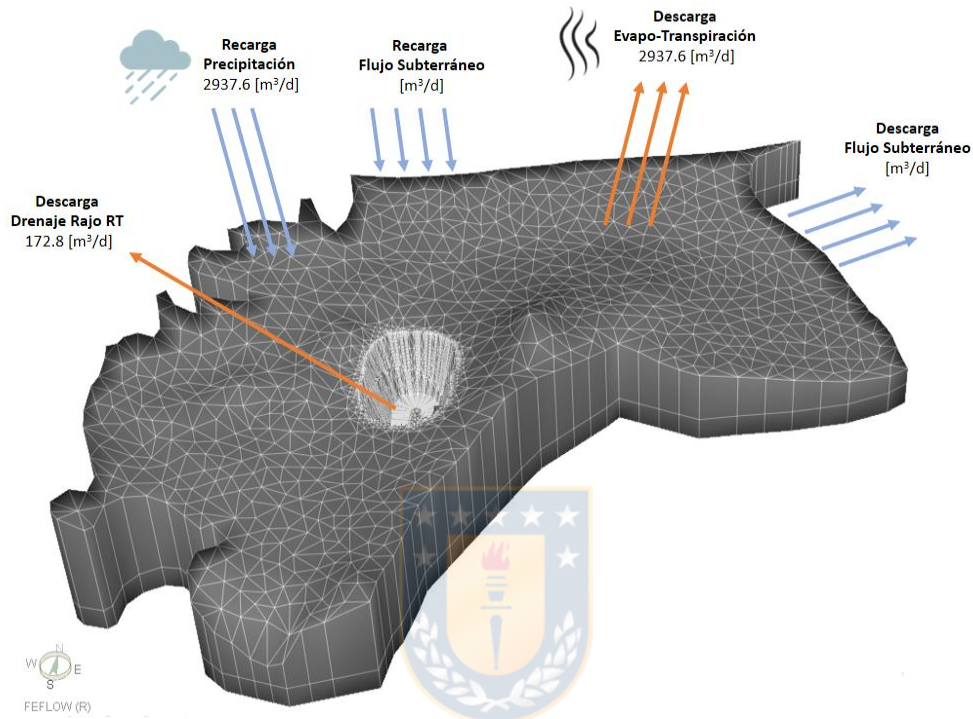


Figura 17: componentes del balance hídrico en el modelo

5. MODELOS NUMÉRICOS

5.1 DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE MODELOS

En la metodología de trabajo se utilizan tres herramientas informáticas las cuales son necesarias para la realización de los modelos numéricos.

ArcGIS el cual permite procesar y disponer en el espacio de forma georreferenciada la información pertinente definida en el modelo conceptual.

VULCAN mediante el cual se obtiene un diseño tridimensional del rajo RT y su intersección con la topografía del dominio definido en base a la información de parámetros geométricos disponibles y el DEM obtenido a partir de la interfaz de usuario *EarthExplorer* desarrollada por el USGS el cual permite descargar modelos digitales de elevaciones de la zona de estudio.

FEFLOW que es el código de simulación numérica seleccionado en función de los objetivos para la modelación de flujos de agua subterránea (véase apartado 2.4.3), con el que se define y discretiza el dominio considerando las UH, con condición de acuífero no confinado, flujo de agua (monofásico) en medio saturado y un régimen de flujo estacionario (Figura 18) . Después se designan

las condiciones de contorno y la distribución de parámetros hidrogeológicos dentro del dominio de modelación. Luego se definen las series de simulación, para evaluar los escenarios posibles.

Finalmente, se ejecutan las series de simulación para obtener resultados de piezometría, caudales y direcciones de flujo en el dominio de modelación, los que luego son analizados.

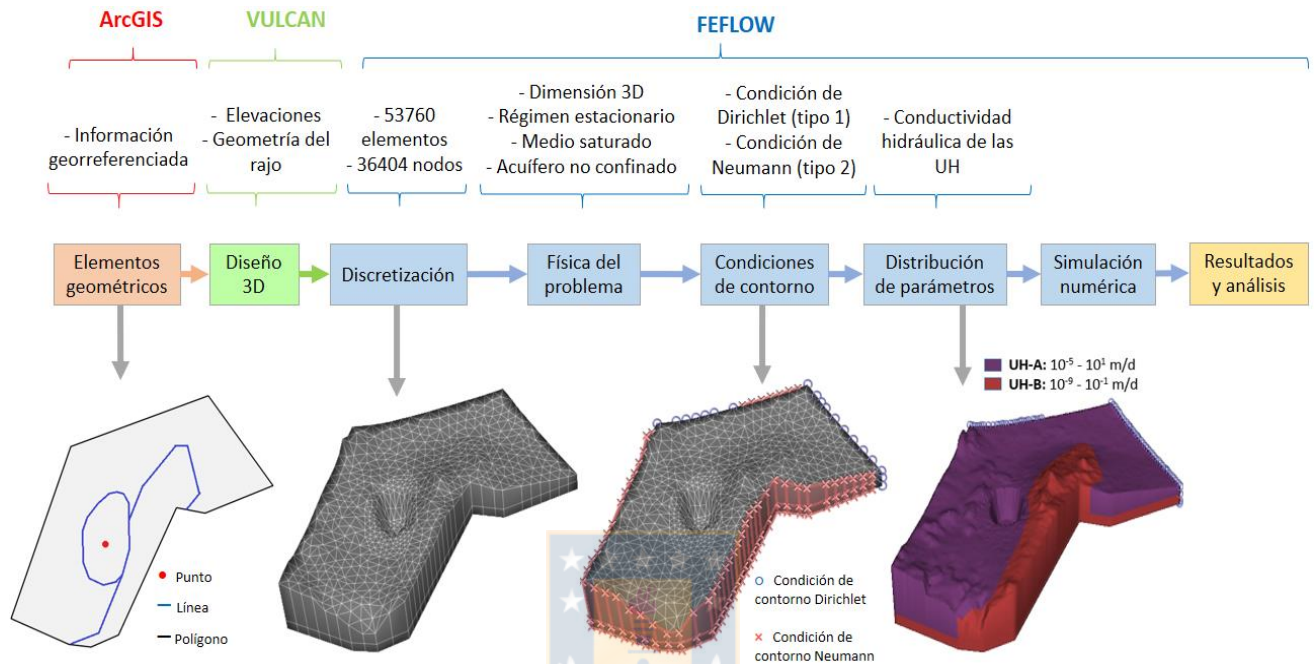


Figura 18: metodología de diseño de modelos numéricos

A continuación, se describe la metodología de la implementación de los modelos.

Se simplifican los elementos geométricos definidos, para reducir requerimientos computacionales del simulador (Figura 19). Luego, los elementos son exportados al código FEFLOW.

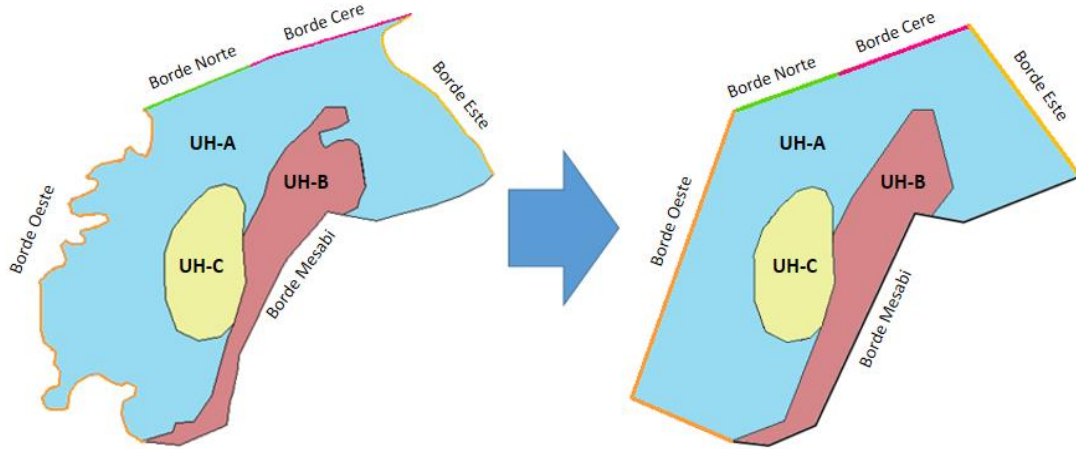


Figura 19: simplificación de elementos geométricos.

La información de los parámetros geométricos del rajo Radomiro Tomic se obtienen de los antecedentes disponibles (véase apartado 3.2 y ANEXO K). Se utiliza el *software* minero VULCAN para realizar el diseño tridimensional del rajo RT a partir del modelo digital de elevaciones con una resolución de 30x30 m obtenido con el EarthExplorer [39], y cuyos metadatos se muestran en el ANEXO L. Obtenidas las elevaciones y coordenadas correspondientes, se define la topografía del rajo minero (Figura 20b), para luego ser exportada al código de simulación FEFLOW (Figura 20c-d).

La Figura 20 muestra la topografía del rajo y la exportación de datos al código FEFLOW.

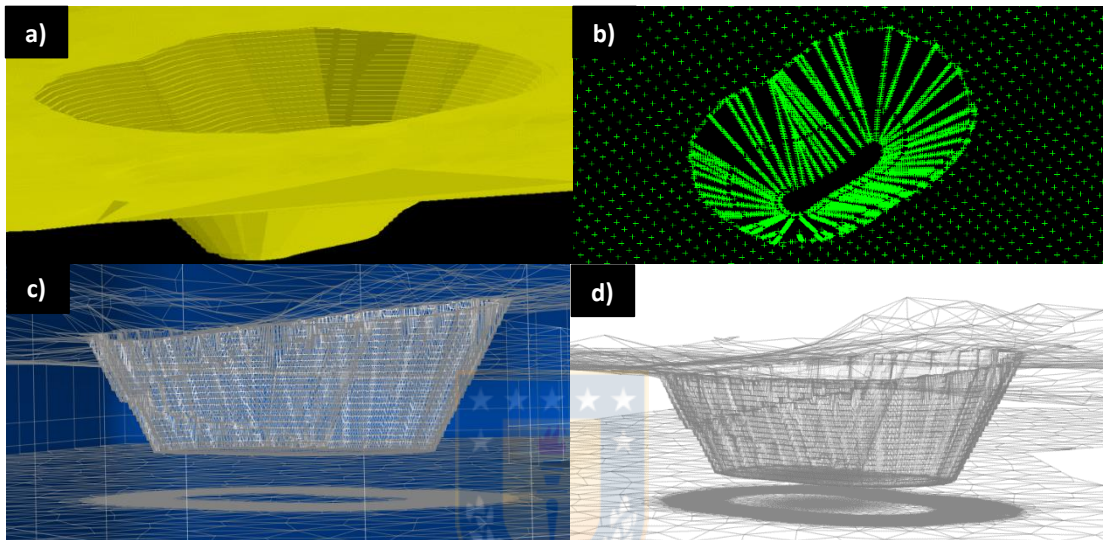


Figura 20: diseño del rajo minero en VULCAN y exportación a FEFLOW

Los modelos tridimensionales en FEFLOW se constituyen con 3 capas numéricas, la discretización espacial del dominio se lleva a cabo con el algoritmo *triangle*, obteniendo una malla de 194331 elementos triangulares de tipo Delaunay con 130016 nodos (Figura 20b). En la geometría definida, se implementan las condiciones de contorno de Dirichlet (tipo 1) y de Neumann (tipo 2) según el modelo conceptual. La condición de contorno de Dirichlet se utiliza para especificar los potenciales hidráulicos de los límites Borde Norte y Borde Este (límites hidráulicos). La condición de contorno de Neumann se utiliza para especificar un flujo nulo en los límites Borde Oeste, Borde Cere y Borde Mesabi (límites físicos), y para especificar el flujo del drenaje implementado en el rajo.

La conductividad hidráulica es el parámetro hidrogeológico que será evaluado en las series de simulación junto a los valores de las condiciones de contorno. Para ello se definen las series de simulación que se describen en el apartado siguiente.

Luego de implementado el procedimiento anterior y establecidas las condiciones definidas, se ejecuta la simulación numérica. Los resultados y soluciones obtenidos del estudio se exhiben mediante tablas de información, figuras y gráficos.

5.2 SERIES DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Las simulaciones realizadas se agrupan en 4 series. Cada serie con un objetivo específico, con un total de 267 simulaciones donde se ejecutan dos tipologías de modelos, 39 modelos homogéneos y 228 modelos heterogéneos. La metodología llevada a cabo en la realización de los modelos numéricos y las simulaciones, se sintetizan en la Figura 21 junto a su información base.

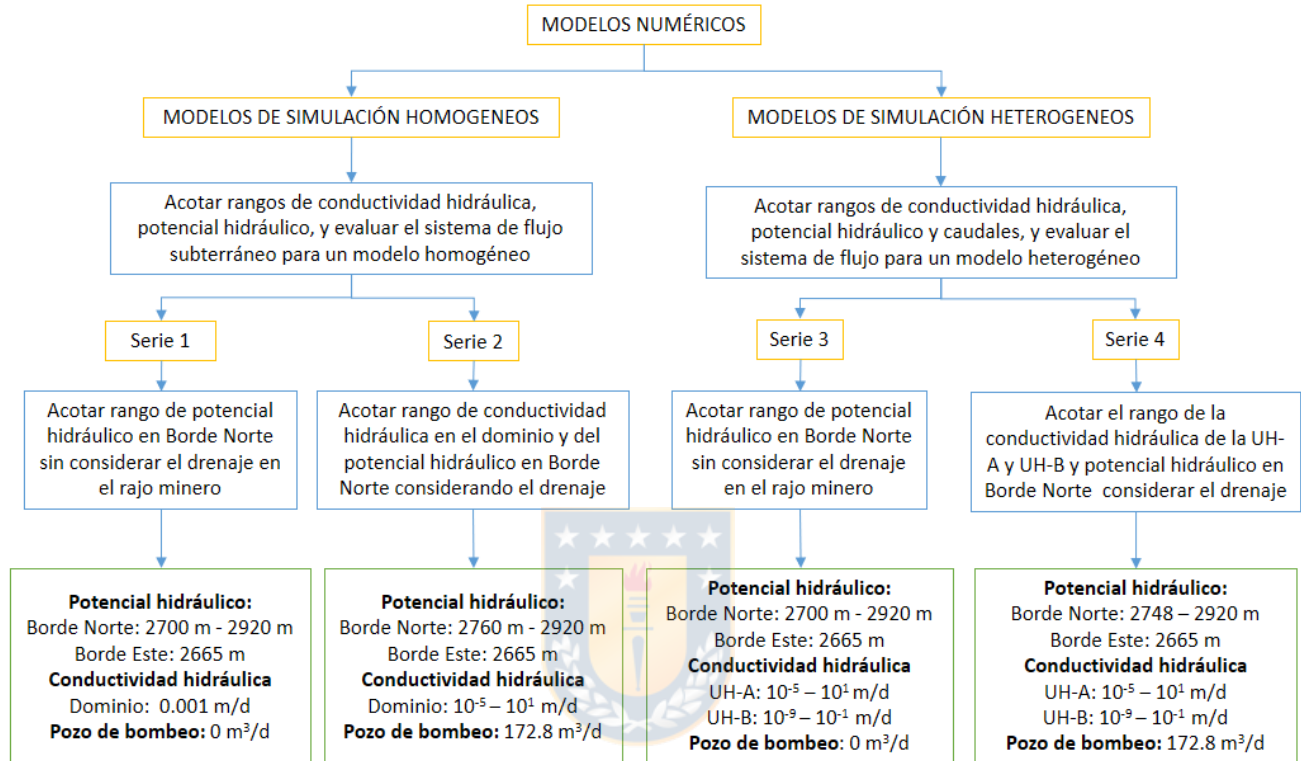


Figura 21: metodología de realización de series de simulación

Los modelos homogéneos tienen por objetivo establecer un modelo de base que permita comparar y evaluar los posibles cambios en el comportamiento del sistema asumiendo un menor grado de complejidad en cuanto a la distribución de parámetros. Los modelos heterogéneos tienen como objetivo implementar y evaluar el efecto de la heterogeneidad de la conductividad hidráulica.

5.3 MODELOS DE SIMULACIÓN HOMOGÉNEOS

En estudios con consideraciones hidrogeológicas de mayor escala [39,43] se considera que la conductividad hidráulica de la zona en la que se emplaza el dominio de modelación puede estar asociada a la roca fracturada de la UH-5. Las simulaciones en la presente sección consideran en el dominio una conductividad hidráulica constante y homogénea. Se evalúan los escenarios posibles en función del rango de conductividad de la UH-5 (véase apartado 3.5.2) y se varía el potencial hidráulico de las condiciones de contorno tipo Dirichlet y el caudal de bombeo en la mina.

La Figura 22 muestra la distribución espacial de la conductividad hidráulica y las condiciones de contorno a evaluar. Los valores de configuración de las series 1 y 2 se muestran en el ANEXO N.

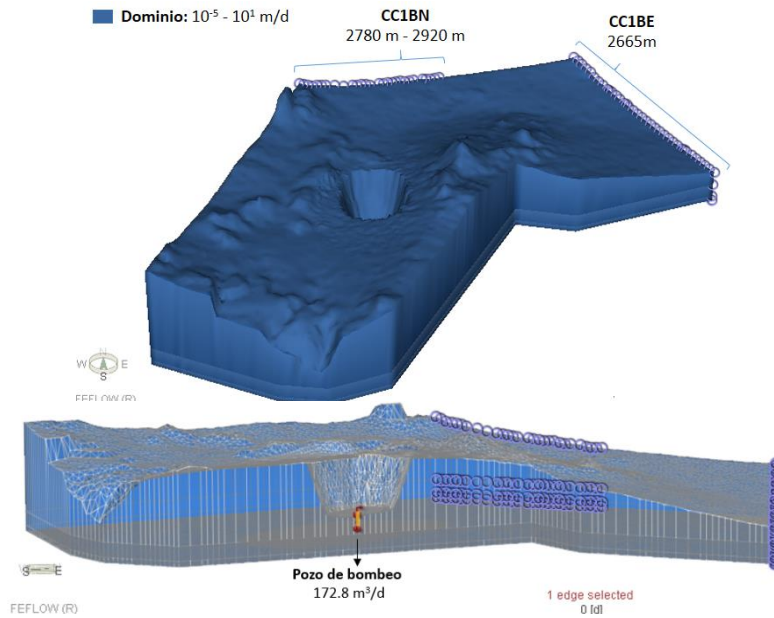


Figura 22: conductividad hidráulica y condiciones de contorno en modelo homogéneo

5.3.1 SERIE 1 – Sistema homogéneo sin pozo de bombeo

I. Procedimiento

Se realizan 12 simulaciones manteniendo constante la conductividad hidráulica del dominio y variando el potencial hidráulico del Borde Norte.

II. Descripción

Condiciones de contorno

- Potencial hidráulico de Borde Este constante = 2665 m.
- Rango de potencial hidráulico de Borde Norte = 2700 m a 2920 m.
- Caudal de bombeo en mina $Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$.

Distribución de parámetros

- Conductividad hidráulica del dominio = $0,001 \text{ m/d}$ (conductividad media de UH-A).

III. Análisis de resultados

Dado a una conductividad hidráulica homogénea en el dominio y a que en todos los casos se presenta un escenario en que el potencial hidráulico de CC1BN > CC1BE, Los resultados de simulación muestran que ante esta hipótesis las direcciones de flujo del sistema son similares (desde el Noroeste al Sureste-Este) y con una dirección preferentemente horizontal (ANEXO P). Los resultados de niveles piezométricos en el rajo en esta serie se muestran en la ANEXO O. El gráfico de la Figura 23 muestra la relación que presenta el nivel en el rajo frente a la variación del potencial hidráulico en el borde Norte, manteniendo el potencial del borde Este fijo en 2665 m. El gráfico muestra las simulaciones que permiten obtener como resultado un nivel en la mina de al menos 2740 m que corresponde al potencial hidráulico observado en el rajo RT. De esta forma se acota el rango de valores de potencial hidráulico del CC1BN a un rango entre 2760 y 2920 m.

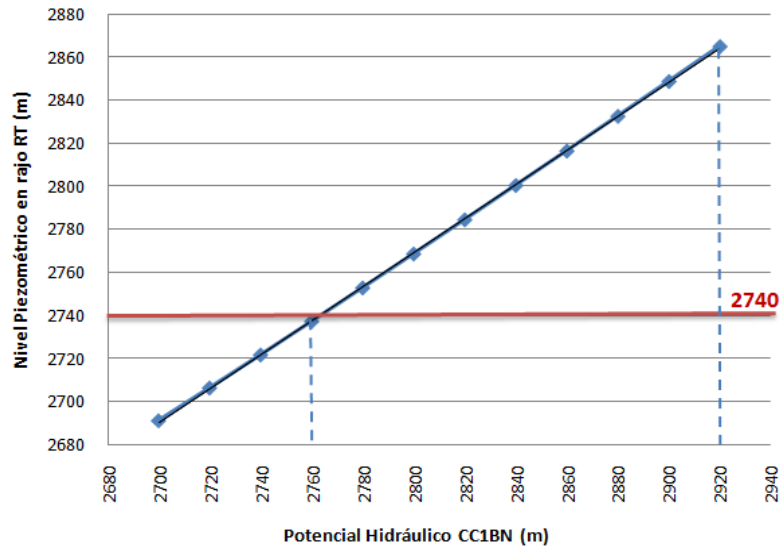


Figura 23: gráfico nivel piezométrico en rajo v/s potencial hidráulico en CC1BN

Luego, en un dominio homogéneo sin considerar el drenaje en el rajo minero, para cualquier valor de conductividad hidráulica, el rango de potencial hidráulico en el borde Norte varía entre 2760 m y 2920 m. Para estas condiciones se obtiene un nivel piezométrico en el rajo de al menos 2740 m.

5.3.2 SERIE 2 – Sistema homogéneo con pozo de bombeo

I. Procedimiento

Se realizan 28 simulaciones (convergen 22) manteniendo fijos los potenciales hidráulicos de los bordes Norte y Este y se hace variar la conductividad hidráulica del dominio. Obtenida una conductividad hidráulica estimada, se fija y se varía el potencial hidráulico del Borde Norte.

II. Descripción

Condiciones de contorno

- Rango de potencial hidráulico del Borde Este constante = 2665 m.
- Rango de potencial hidráulico del Borde Norte = 2760 m a 2920 m (resultados de la serie 1).
- Caudal de bombeo en mina $Q = 172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

Distribución de parámetros

- Rango de conductividad hidráulica en el dominio = 10^{-5} m/d a 10^1 m/d (asociado a UH-A).

III. Análisis de resultados

Se observa que las direcciones de flujo del sistema son similares en las simulaciones (desde el Noroeste al Sureste-Este) y con una dirección preferentemente horizontal (ANEXO P). Se simplifica el rango de valores de conductividad hidráulica para el dominio evaluando tres órdenes de magnitud (0.01 m/d, 0.1 m/d y 1 m/d), puesto a que

simular valores fuera de tal rango entrega resultados lejanos y poco coherentes con los antecedentes (nivel en el rajo menor a 2690 m.s.n.m y caudal de entrada al rajo de $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$).

El gráfico de la Figura 24 muestra la relación que presenta el caudal de entrada en el rajo RT frente a la variación del potencial hidráulico en CC1BN. Se observa que los valores de conductividad hidráulica bajo los que se obtienen caudales cercanos a 178.2 m³/d, son para una conductividad de 0.01 m/d. Esto se cumple para un rango de potencial hidráulico del CC1BN entre 2760 m y 2920 m.

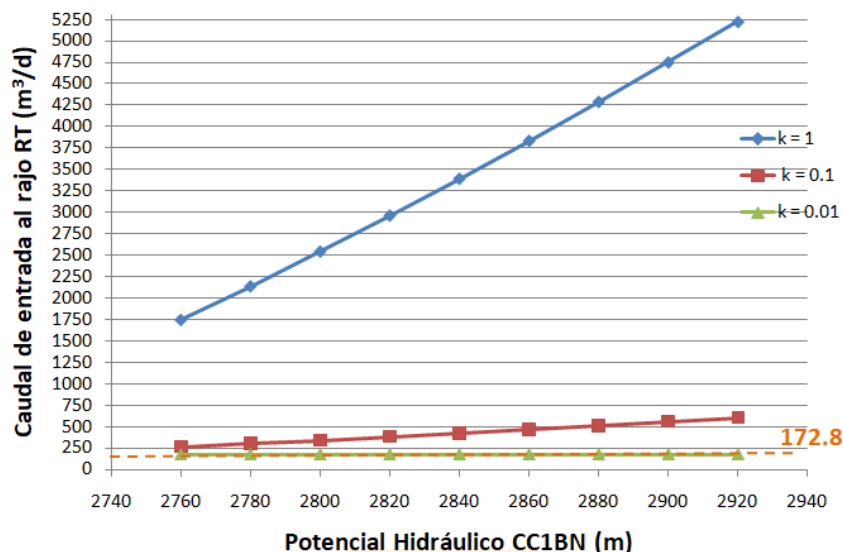


Figura 24: potencial hidráulico CC1BN v/s caudal de entrada en rajo RT

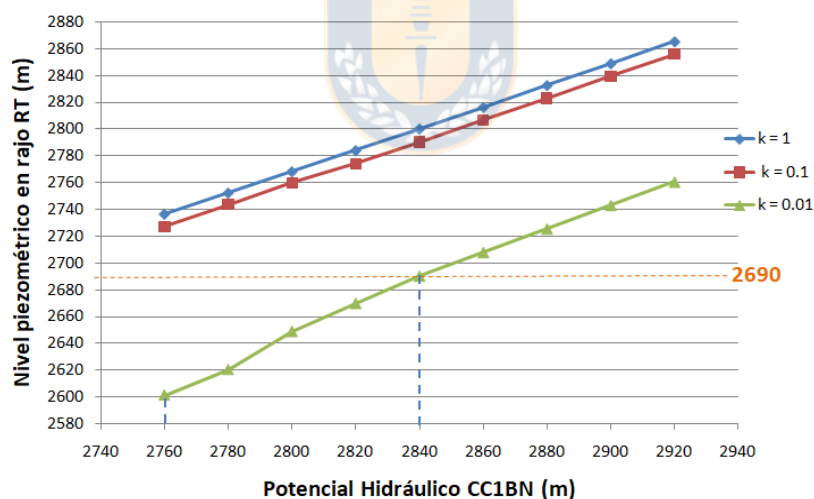


Figura 25: potencial hidráulico CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT

El gráfico de la Figura 25 muestra la relación que presenta el nivel en el rajo frente a la variación del potencial hidráulico en CC1BN. Se concluye que 0.01 m/d es el único valor de conductividad hidráulica bajo el que se puede lograr reducir el nivel piezométrico a una profundidad menor a 2690 m.s.n.m. Por otro lado, para un valor de 0.01 m/d de conductividad hidráulica un CC1BN con potencial hidráulico menor a 2760 m implica caudales entrantes al dominio con valores menores al caudal bombeado (178.2 m³/d). Considerando esto último y lo observado en el gráfico, se cumplen las condiciones indicadas anteriormente cuando el límite CC1BN posee un rango entre 2760 m y 2840 m de potencial hidráulico.

Luego, asumiendo un medio poroso de conductividad hidráulica homogénea y considerando la influencia del pozo de bombeo en la mina, la conductividad hidráulica del dominio homogéneo se estima en 0,01 m/d y el rango de un potencial hidráulico promedio representativo para el Borde Norte varía entre 2760 m.s.n.m y 2840 m.s.n.m.

Los resultados de niveles piezométricos en el rajo minero se muestran en el ANEXO O.

5.4 MODELOS DE SIMULACIÓN HETEROGENEOS

Las series de simulación realizadas en la presente sección consideran en el dominio una conductividad hidráulica heterogénea y constante en cada unidad hidrogeológica. Se evalúan los diferentes escenarios posibles en función del rango de conductividad hidráulica de la UH-A y UH-B (véase apartado 4.3.1) y se hacen variar los niveles piezométricos de las condiciones de contorno tipo Dirichlet y del caudal de bombeo en la mina (Neumann).

La Figura 26 muestra la distribución espacial de la conductividad hidráulica y las condiciones de contorno a evaluar. Los valores de configuración de las series 3 y 4 se muestran en el ANEXO N.

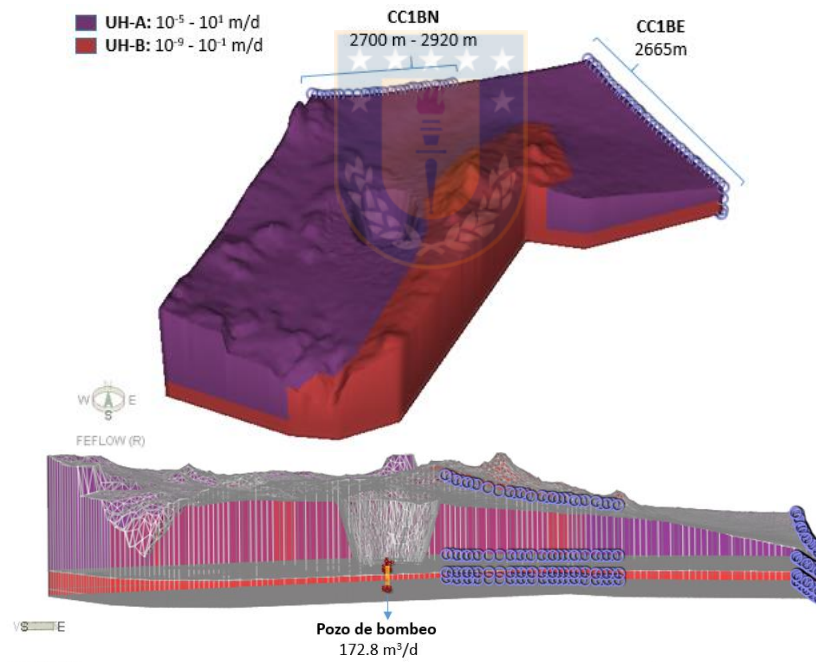


Figura 26: conductividad hidráulica y condiciones de contorno en modelo heterogéneo

5.4.1 SERIE 3 - Sistema heterogéneo sin pozo de bombeo

I. Procedimiento

Se realizan 444 simulaciones (de las que convergen 148) manteniendo un caudal de drenaje nulo, se evalúa el rango de valores de potencial hidráulico del Borde Norte, y se evalúan los casos posibles de conductividad hidráulica de las UH-A y UH-B bajo un sistema heterogéneo (con al menos un orden de magnitud de diferencia entre unidades).

II. Descripción

Condiciones de contorno

- Potencial hidráulico del borde Norte 2700 a 2920 m
- Potencial hidráulico del borde Este 2665 m.
- Caudal de bombeo en mina $Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$.

Distribución de parámetros

- Rango de conductividad hidráulica de la UH-A = 10^{-5} m/d a 10^1 m/d .
- Rango de conductividad hidráulica de la UH-B = 10^{-9} m/d a 10^{-1} m/d .

III. Análisis de resultados

Los gráficos de la Figura 27 y Figura 28 muestran la relación que presenta el nivel en el rajo frente a la variación del potencial hidráulico en CC1BN, los resultados se agrupan en series según los órdenes de magnitud de diferencia entre los valores de conductividad hidráulica de la UH-A y la UH-B, esto ya que los resultados coinciden en función de dicha diferencia (véase ANEXO O), por ejemplo, para un potencial hidráulico en CC1BN de 2800 m y una diferencia de conductividad de cuatro órdenes de magnitud (4 OM) entre la UH-A y UH-B el nivel piezométrico en el rajo es de 2761.26 m.

Se dan dos escenarios, cuando la conductividad de UH-A es menor a la de UH-B (Figura 27) y cuando la de UH-A es mayor a la de UH-B (Figura 28), se indica los valores de potencial hidráulico en CC1BN con los que resulta un nivel en la mina de al menos 2740 m en el rajo mostrando la relación que presenta el nivel en la mina frente a la variación del potencial hidráulico en CC1BN. Los resultados de simulación siguen direcciones de flujo relativamente similares (Noroeste a Sureste-Este) y con una dirección preferentemente horizontal (ANEXO P).

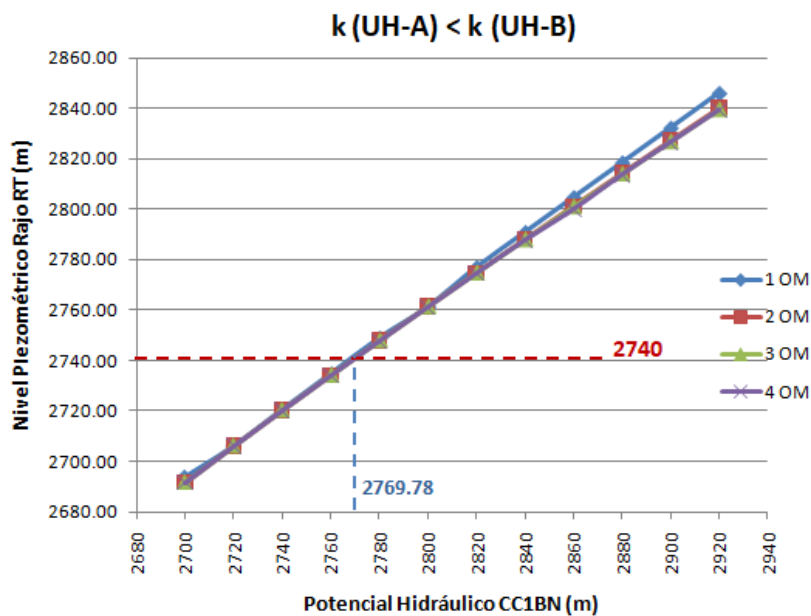


Figura 27: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(\text{UH-A}) < k(\text{UH-B})$

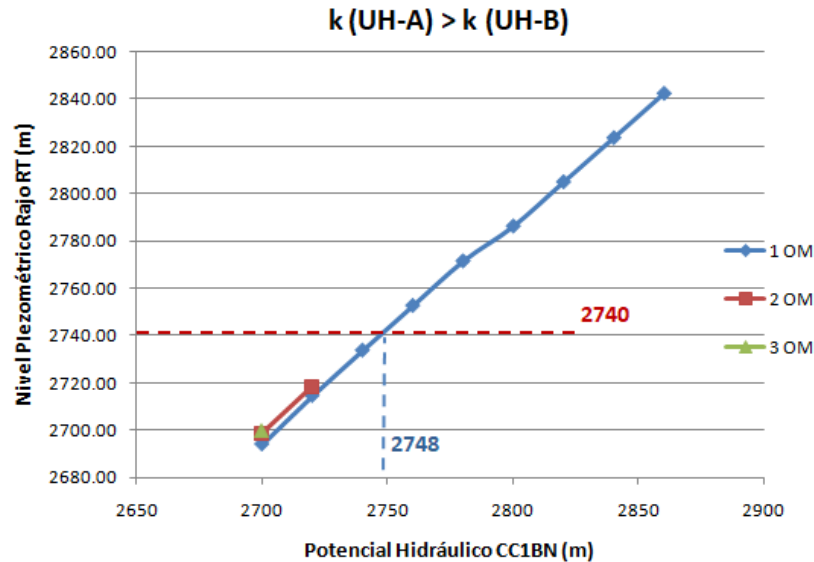


Figura 28: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(UH-A) > k(UH-B)$

Luego, para un sistema heterogéneo de la conductividad en el dominio, se acota el potencial hidráulico del Borde Norte para dos escenarios diferentes. Si la conductividad de la UH-A es mayor a la de UH-B, el rango de valores de potencial hidráulico en el Borde Norte varía entre **2748 m.s.n.m** y **2860 m.s.n.m**. Por otra parte, si la conductividad de la UH-A es menor a la de la UH-B, el rango de valores de potencial hidráulico en el Borde Norte varía entre **2769.78 m.s.n.m** y **2920 m.s.n.m**.

5.4.2 SERIE 4 - Sistema heterogéneo con pozo de bombeo

Esta serie busca conocer los efectos que produce el drenaje en un sistema en que la conductividad hidráulica tiene una distribución espacial heterogénea, esto en base a los resultados de niveles piezométricos y de caudales en el rajo minero, en el Borde Norte, Borde Este, rajo y piso del rajo. Al comparar los resultados de la Serie 3 y Serie 4 se podrá evaluar el efecto del drenaje en la mina (pozo de bombeo) en el entorno hidrogeológico.

I. Procedimiento

Se realizan 370 simulaciones (de las que convergen 80), manteniendo un caudal de drenaje constante, se evalúa el rango de valores de potencial hidráulico en CC1BN, y se evalúa la conductividad hidráulica de UH-A y UH-B.

II. Descripción

Condiciones de contorno

- Potencial hidráulico del borde Norte = 2748 a 2920 m
- Potencial hidráulico del borde Este = 2665 m.
- Caudal de bombeo en mina $Q = 172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

Distribución de parámetros

- Rango de conductividad hidráulica de la UH-A = 10^{-5} m/d a 10^1 m/d .
- Rango de conductividad hidráulica de la UH-B = 10^{-9} m/d a 10^{-1} m/d .

Los valores de distribución de parámetros y condiciones de contorno evaluadas en cada simulación realizada se detallan en el ANEXO N.

III. Análisis de resultados

Los resultados de la distribución de niveles piezométricos en el rajo, de caudales en Borde Norte, Borde Este, en el rajo minero y piso del rajo de cada simulación se muestra en el ANEXO O.

En la Figura 29 se muestran los resultados de nivel piezométrico para una conductividad de 0.1 en la UH-B, cada serie corresponde a resultados obtenidos para diferentes valores de conductividad posibles en la UH-A. Por ejemplo, para una conductividad hidráulica de 0.1 m/d en la UH-B, de 0.01 m/d en la UH-A (serie de color azul) y considerando un potencial hidráulico en el borde Norte de 2900, se obtiene como resultado un nivel piezométrico de 2812.26 m.

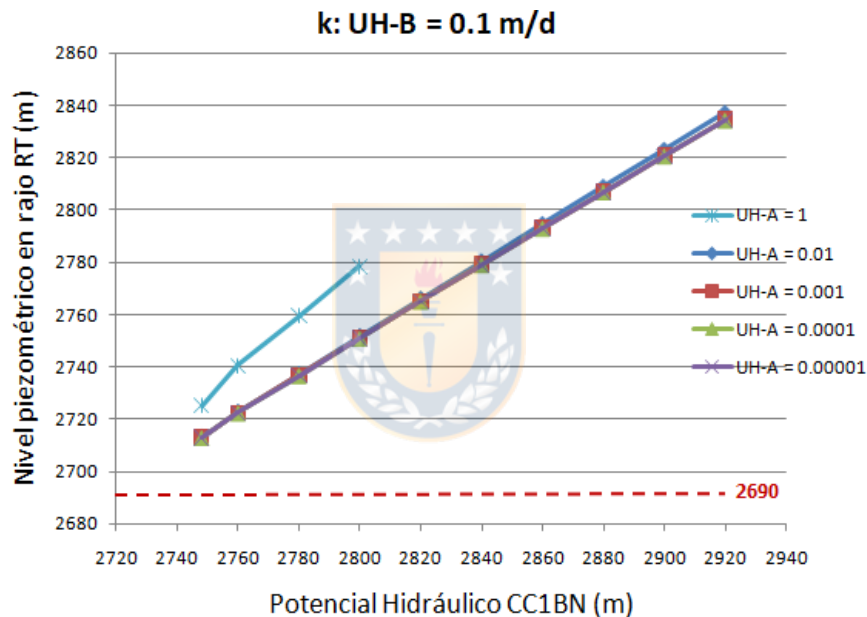


Figura 29: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(UH-B)=0.1$

Se observa que para una conductividad de 0.1 m/d en UH-B todos los resultados de nivel piezométrico en el rajo sobrepasan la cota de profundidad en la que se localiza el piso del rajo (2690 m.s.n.m), por ende, se descarta la posibilidad de que la UH-B sea representada con tal valor de conductividad hidráulica.

El gráfico de la Figura 31 muestra la relación que presenta el nivel piezométrico en el rajo para una conductividad de 0.01 en la UH-B frente a la variación del potencial hidráulico en la CC1BN, cada serie corresponde a los resultados obtenidos para los diferentes valores de conductividad posibles de la UH-A. Los resultados de simulación siguen direcciones de flujo relativamente similares (Noroeste a Sureste-Este) y con una dirección preferentemente horizontal (ANEXO P).

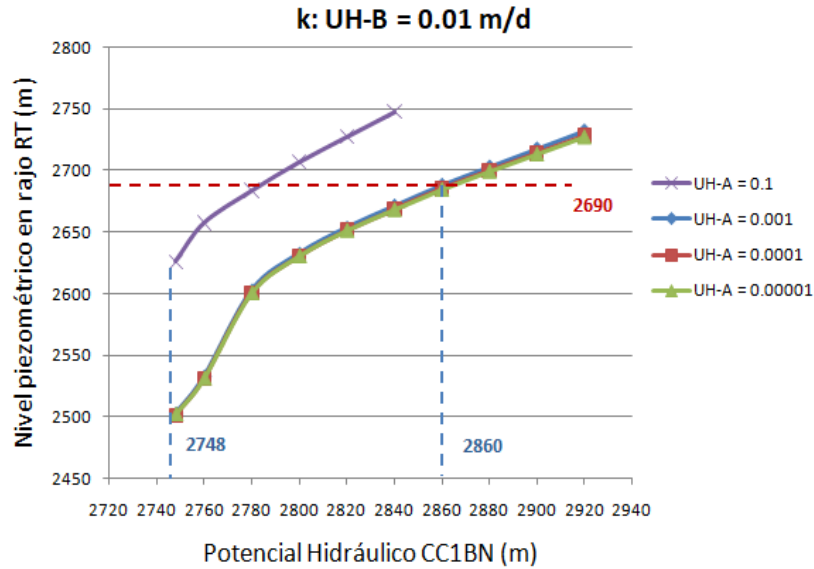


Figura 31: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT para $k(UH-B) = 0.01$

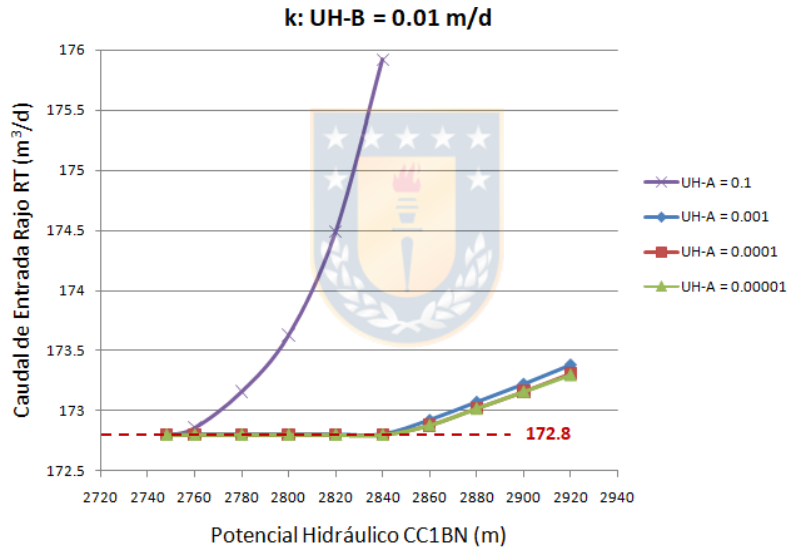


Figura 30: potencial hidráulico en CC1BN v/s caudal de entrada en rajo RT para $k(UH-B) = 0.01$

En los resultados obtenidos para un valor de conductividad de 0.01 m/d en UH-B predominan valores de nivel piezométrico en el piso del rajo menores a la cota 2690 m.s.n.m, condición bajo la cual se cumple un drenaje efectivo y se mantiene el nivel piezométrico bajo el piso del rajo minero. Así, se asigna un valor de 0.01 m/d como conductividad hidráulica representativa en la UH-B, para un sistema heterogéneo del dominio de estudio. En el gráfico de la Figura 30, se fija la conductividad de la UH-B en 0.01 m/d, y se evalúan los resultados del caudal entrante en el sector del rajo minero para los diferentes valores de conductividad posibles en la UH-A, procedimiento con el cual se consigue acotar dicho rango de valores.

Se observa que el caudal de entrada al rajo minero se mantiene en un valor aceptable (no superior al caudal de drenaje en el rajo de 172.8 m^3/d) para valores de conductividad hidráulica en

UH-A entre 10^{-5} y 10^{-3} m/d, al aumentar a un mayor orden de magnitud la conductividad de la UH-A (0.1 m/d) el caudal entrante al rajo sobrepasa al caudal bombeado, con lo que no se logra un balance adecuado en las simulaciones y/o se obtienen resultados incoherentes con la información respaldada en los antecedentes. En base a lo anterior, y considerando los resultados de las simulaciones de la Serie 3, se descarta la posibilidad de que la conductividad de la UH-A sea mayor a la de la UH-B, por ende, el rango de conductividad hidráulica se define con un potencial mínimo de 2769.78 m en el Borde Norte.

Por otra parte en el gráfico de la Figura 30 se evidencia que el caudal de entrada al rajo minero es mayor al caudal bombeado para un valor mayor a 2840 m de potencial hidráulico en el Bore Norte, por lo que dicho valor corresponde al mayor potencial posible para la CC1BN.

Luego, para un sistema heterogéneo de la conductividad en el dominio de estudio, en el que se implementa un drenaje mediante pozo bombeo con un caudal de $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$, se define una conductividad de 0.01 m/d para la UH-B, el rango de valores de UH-A fluctúa entre 10^{-5} m/d y 10^{-3} m/d, y el potencial hidráulico promedio en CC1BN fluctúa entre 2769,78 m.s.n.m y 2840 m.s.n.m.

6. CALIBRACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

Las simulaciones realizadas permitieron obtener resultados a partir de los cuales se define información base para la caracterización hidrogeológica del dominio de modelación. La distribución de parámetros definida mediante los resultados corresponde a una primera aproximación que conforma valores promedio representativos de conductividad hidráulica en cada unidad hidrogeológica, distribución que se empleará como condición inicial y valores preferenciales para realizar una estimación de la conductividad hidráulica en el dominio mediante un proceso de calibración. Esta se lleva a cabo mediante el uso de la herramienta FEPEST. PEST es un software ampliamente utilizado en modelado ambiental para calibrar modelos, para determinar la incertidumbre asociada con parámetros y predicciones, y tareas relacionadas. En la actualidad, PEST es probablemente el software más utilizado para la calibración de modelos de aguas subterráneas [41]. FEPEST vincula PEST con un modelo FEFLOW a través de una conveniente interfaz gráfica de usuario, con el que es posible utilizar una gama de funciones de PEST [41,44].

Como la calibración corresponde a la etapa final del presente trabajo, la información inicial corresponde a la información resultante de las simulaciones realizadas anteriormente, y las simplificaciones geométricas realizadas retornan a su forma original para la obtención de resultados proyectados en el dominio real, de ésta forma se construye el modelo nuevamente siguiendo la metodología explicada en la Figura 32.

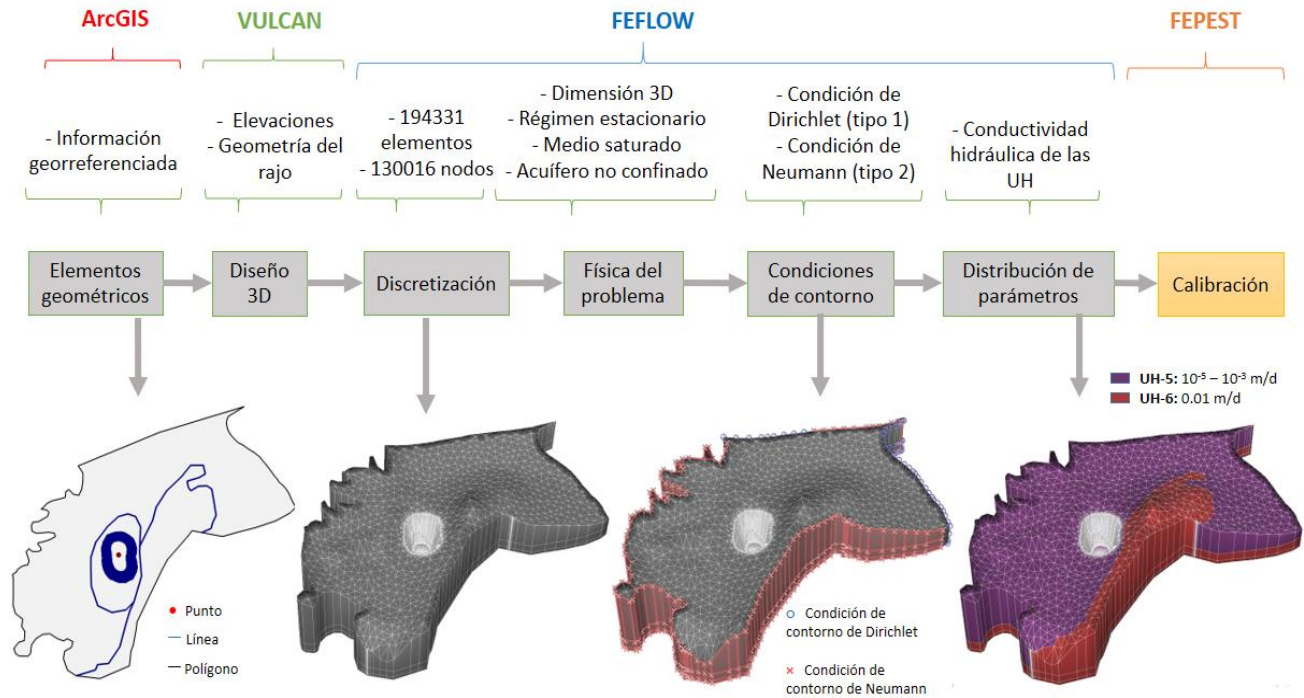


Figura 32: metodología de construcción de modelos numéricos previo a calibración

6.1 CONFIGURACIÓN PREVIA A CALIBRACIÓN EN FEPEST

Control de Optimización: se selecciona el modo de operación *Estimation* en el panel de configuración (*Problem Settings*) para estimar la conductividad hidráulica en el dominio de estudio. En los criterios de terminación (*Termination Criteria*) se asigna 10 iteraciones como número máximo de iteraciones de optimización (*NOPTMAX*), esto en consideración de las capacidades computacionales y el tiempo de cálculo empleado. Luego, en las estadísticas de operación se activan la matriz de covarianza (*ICOV*), la matriz de correlación (*ICOR*) y valores propios (*IEIG*).

Parámetros: El parámetro a estimar es la conductividad hidráulica, se comienza con la distribución espacial en el eje X (*xco*) para la que se designa un método de asignación de puntos piloto en 2D (con vista en planta) ajustable a la primera capa (*Layer 1*) de la zona del modelo en la que se realiza la estimación (*Layer 1 y 2*), zona designada en función de las capas del modelo con las que interactúa el rajo espacialmente. Luego se generan 70 puntos pilotos con una distribución manual y conveniente en el dominio (Figura 33). Generados los puntos se define el método de interpolación, se utiliza kriging ordinario y se configura definiendo el tipo de variograma, este se ajusta asignando valores de meseta (*sill*), rango (*range*) y efecto pepita (*nugget*) (véase ANEXO M). Luego se configuran los valores predeterminados en la definición de parámetros, donde se utiliza como valores iniciales y preferenciales de conductividad a las resultantes de la simulación de modelos homogéneos y heterogéneos. Se definen también los valores límite de conductividad hidráulica donde el valor mínimo en el dominio es de 10^{-9} m/d (menor valor en UH-B), y un valor

máximo de 10 m/d (mayor valor en UH-A), con esto se busca contemplar en la estimación posibles fenómenos geológicos y afecciones de zonas de alto fracturamiento en el dominio. Por último, el método de asignación para el eje Y y el eje Z (y_{co} y z_{co}) se vincula al configurado para el eje X.

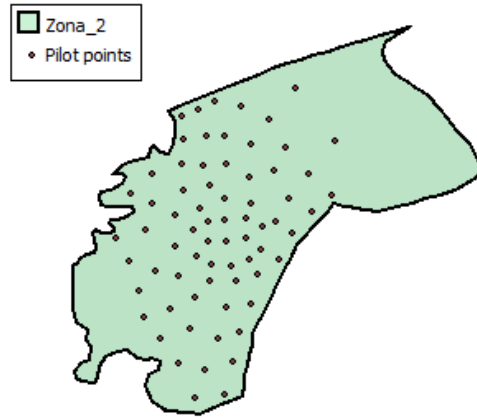


Figura 33: puntos piloto generados con distribución uniforme en el dominio de modelación

Observaciones: Los pozos de observación (véase ANEXO J) asignados al modelo poseen mediciones de potencial hidráulico, estos son cargados en FEPEST (Figura 34) en sus coordenadas geográficas correspondientes y sus respectivos valores de referencia con un peso igual a 1 (*weight*).

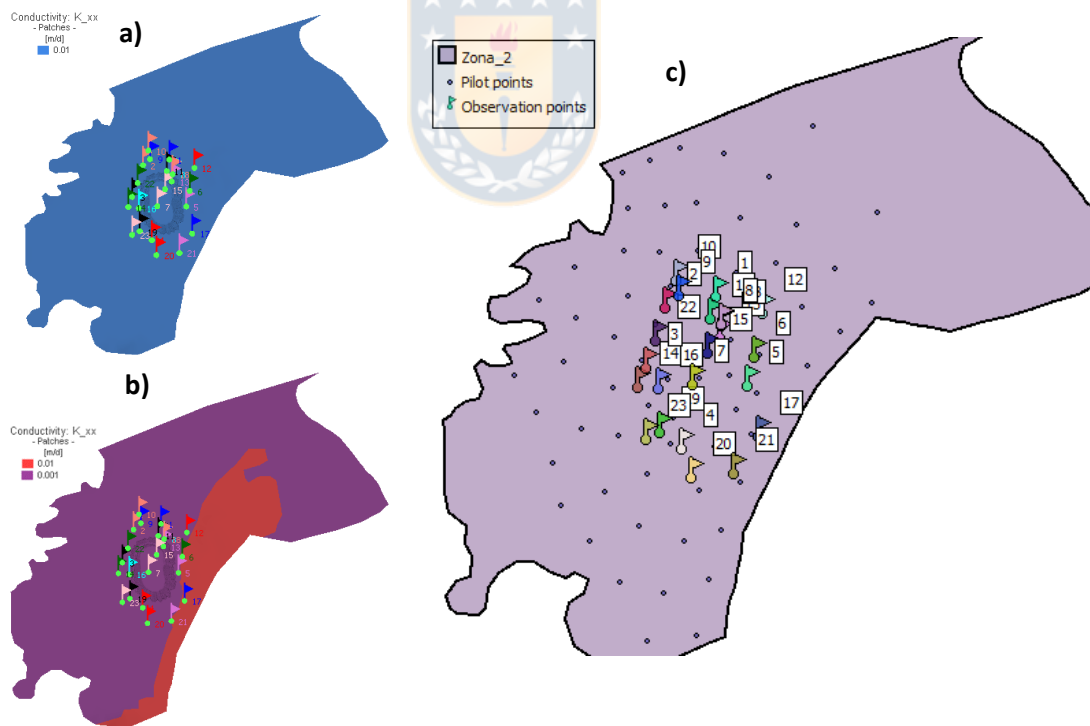


Figura 34: pozos de observación exportados a FEPEST

Regularización: FEPEST usa por defecto el método *Singular Value Decomposition* (óptimo para modelos de FEFLOW), para este ejercicio se implementa también la regularización de Thikonov (permite que estimaciones poco realistas sean rechazadas mediante una ponderación relativa

adecuada entre las mediciones, respetando la información previa). Además, se utiliza *SVD-Assist* para acortar el número de dimensiones del problema y lograr una calibración más rápida.

Paralelización: para optimizar el tiempo en el proceso de calibración, pueden generarse una determinada cantidad de “*workers*”, con el que el número de modelos invocados para el proceso puede distribuirse en diferentes computadores, arrancando en forma paralela en un mismo instante con el objetivo de minimizar el tiempo requerido (si se tiene un solo ordenador, los modelos pueden distribuirse funcionando en diferentes núcleos del mismo).

Ejecución: configurado el problema en función de los objetivos del trabajo y la información disponible se procede a crear los archivos de configuración (*Control file*, *Template file* e *Instruction file*) y los archivos por lotes (*batch files*) para FEFLOW Y PEST. Al mismo tiempo se ejecutan las herramientas de verificación de PEST (*PESTCHEK*, *TEMPCHEK* e *INSCHEK*) las cuales indicarán advertencias y/o errores encontrados, en tal caso pueden realizarse las modificaciones necesarias volviendo a la configuración del problema. Si las herramientas de verificación no indican errores, se procede a ejecutar FEPEST.

6.2 CALIBRACIÓN SISTEMA HOMOGÉNEO

La información base utilizada para la calibración del presente modelo son los niveles piezométricos medidos en terreno dentro del dominio de estudio de los que se tiene información (véase ANEXO J), y se considera como condición inicial una distribución homogénea de la conductividad hidráulica en el dominio con un valor de 0.01 m/d, valor obtenido de la aproximación manual realizada en la Serie 1 y Serie 2 de simulaciones numéricas del presente trabajo. Dado que no se obtuvo en la aproximación manual un valor específico de potencial hidráulico como representativo en el Borde Norte, para efectos de análisis se interpolan los valores del rango inicial de la forma en que se muestra en el ANEXO R, buscando que los valores se distribuyan de una forma similar a la disposición real de los potenciales hidráulicos en tal límite (véase ANEXO F).

I. Procedimiento

Se carga en FEPEST el modelo numérico con inicial homogénea de la conductividad hidráulica, junto a los niveles piezométricos medidos en terreno como puntos de observación (Figura 34a). Para la estimación se asignan 10 iteraciones y se computa utilizando 1 *worker*. Luego de estimada la distribución de la conductividad hidráulica en el dominio se ejecuta la simulación del modelo con su respectiva asignación de condiciones de contorno (Borde Norte, Borde Este, bordes de flujo nulo y caudal de drenaje en el rajo minero).

II. Datos de calibración

- Máximo de iteraciones: 10
- *Workers*: 1

- Método de interpolación: Kriging ordinario
- Conductividad hidráulica inicial: Dominio = 0.01 m/d
- Límite de parámetro mínimo: 10^{-9} m/d
- Límite de parámetro máximo: 10 m/d

III. Datos de simulación

Condiciones de contorno:

- Potencial hidráulico del borde Norte = 2700 - 2900 m (valores interpolados)
- Potencial hidráulico del borde Este = 2665 m.
- Caudal de bombeo en mina $Q = 172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

IV. Análisis de resultados

Los resultados de niveles piezométricos en el rajo, de caudales en Borde Norte, Borde Este, en el rajo y piso del rajo de la simulación se muestran en el apartado 7. Se muestra en la Figura 34a la distribución de conductividad hidráulica inicial junto a los puntos de observación. El resultado de la distribución espacial de la conductividad hidráulica y el gráfico de niveles piezométricos “simulados v/s observados” de la calibración se muestra en la Figura 35.

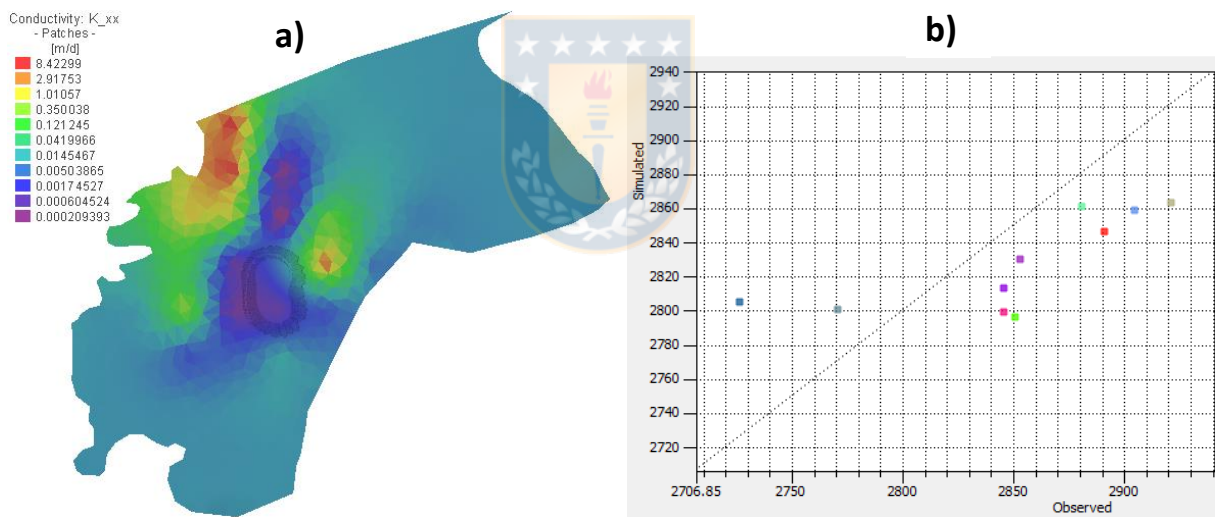


Figura 35: resultados de calibración en partir de conductividad inicial homogénea a) distribución espacial de conductividad hidráulica; b) gráfico de niveles piezométricos simulados v/s observados

En la Figura 35a se observa que las conductividades hidráulicas más altas tienden a situarse en el sector Noroeste del dominio, disminuyendo de forma paulatina en dirección Sur y Este, en las cercanías del rajo minero comienza a descender la conductividad desde el exterior al interior alcanzando conductividades bastante bajas en el sector sur del piso del rajo y en la pared oeste del mismo, las conductividades más bajas se localizan en una franja con tendencia en dirección Norte-Sur localizada al Oeste del rajo minero, esto último es un fenómeno geológico que puede vincularse a la presencia de la Falla Oeste, la cual se muestra con características similares en el mapa geológico del sector (véase Figura 10). En el sector Noreste aledaño al rajo la conductividad asciende

demarcando una zona de conductividad alta, y luego vuelve a disminuir una manteniendo homogeneidad (valores cercanos a 0.01 m/d) hasta el sector del Borde Este.

En el gráfico de la Figura 35b, se observa que los valores simulados difieren de los observados entre 15 m a 60 m, la mayoría de los niveles observados se mantiene a una diferencia menor, a excepción del pozo PZMRT-7 que es el que difiere en mayor magnitud.

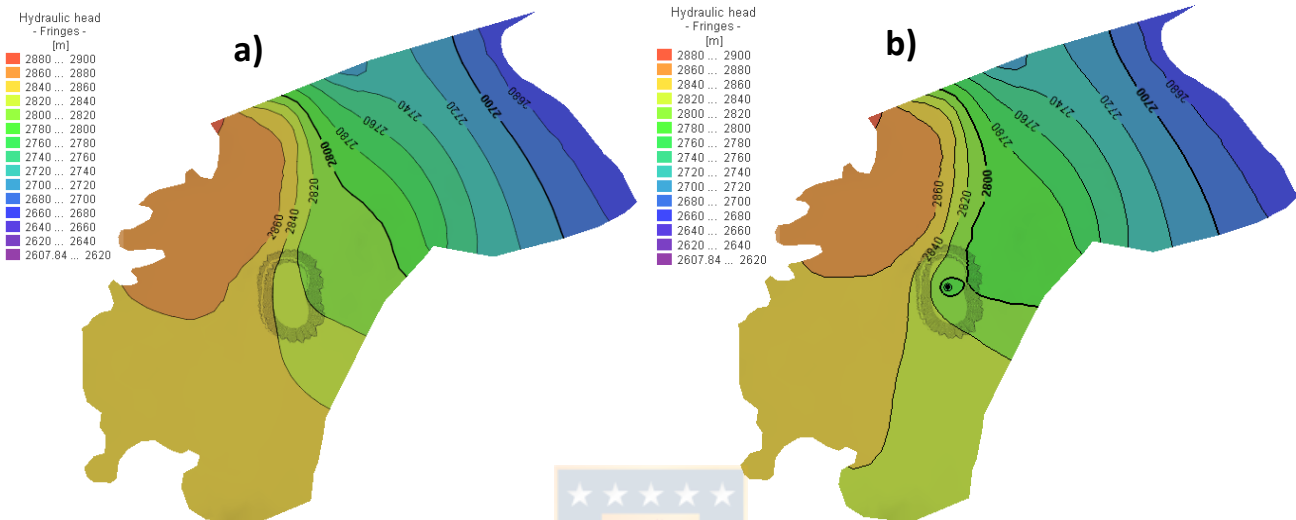


Figura 36: Niveles piezométricos de modelo calibrado a partir de conductividad inicial homogénea: a) sin drenaje ; b) con drenaje

En la Figura 36 se muestra la distribución de niveles piezométricos del modelo sin drenaje (Figura 36a) y con drenaje de agua subterránea (Figura 36b). Desde el sector del rajo hacia el Sur se observa una disminución en un rango de 10 m a 20 m en el nivel piezométrico. En general se observa que el pozo de bombeo si bien genera una reducción importante del nivel piezométrico, lo hace con un efecto bastante localizado en el piso del rajo, no generando un cambio significativo en el comportamiento hidrogeológico de la superficie piezométrica en el dominio de modelación.

6.3 CALIBRACIÓN SISTEMA HETEROGÉNEO

La información base utilizada para la calibración del presente modelo son los niveles piezométricos medidos en terreno dentro del dominio de estudio de los que se tiene información (véase ANEXO J), y considera como condición inicial una distribución heterogénea de la conductividad hidráulica con un valor de 0.001 m/d en la UH-A y un valor de 0.01 m/d en la UH-B, valores obtenidos de la aproximación manual realizada en las Series 3 y Serie 4 del presente trabajo. Como no se obtuvo en la aproximación manual un valor específico de potencial hidráulico como representativo en el Borde Norte, se procede a interpolar los valores del rango inicial de la forma en que se muestra en el ANEXO R, buscando que los valores se distribuyan de una forma similar a la disposición real de los potenciales hidráulicos en tal límite (véase ANEXO F).

I. Procedimiento

Se carga en FEPEST el modelo numérico con distribución inicial heterogénea de la conductividad hidráulica, junto a los niveles piezométricos disponibles como puntos de observación. Para la estimación se asignan 10 iteraciones y se computa utilizando 1 *worker*. Luego de estimada la conductividad se ejecuta la simulación del modelo con su respectiva asignación de condiciones de contorno (Borde Norte, Borde Este, bordes de flujo nulo y caudal de drenaje en el rajo minero).

II. Datos calibración

- Máximo de iteraciones: 10
- *Workers*: 1
- Método de interpolación: Kriging ordinario
- Conductividad hidráulica inicial UH-A = 0.001 m/d
- Conductividad hidráulica inicial UH-B = 0.01 m/d
- Límite de parámetro mínimo: 10^{-9} m/d
- Límite de parámetro máximo: 10 m/d

III. Datos simulación

Condiciones de contorno

- Potencial hidráulico del borde Norte = 2700 - 2900 m (valores interpolados).
- Potencial hidráulico del borde Este = 2665 m.
- Caudal de bombeo en mina $Q = 172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

IV. Análisis de Resultados

Los resultados de niveles piezométricos en el rajo, de caudales en Borde Norte, Borde Este, en el rajo y piso del rajo de la simulación se muestran apartado 7. Se muestra en la Figura 34b la distribución de conductividad hidráulica inicial junto a los puntos de observación. El resultado de la distribución espacial de la conductividad hidráulica y el gráfico de niveles piezométricos “simulados v/s observados” de la calibración se muestra en la Figura 37.

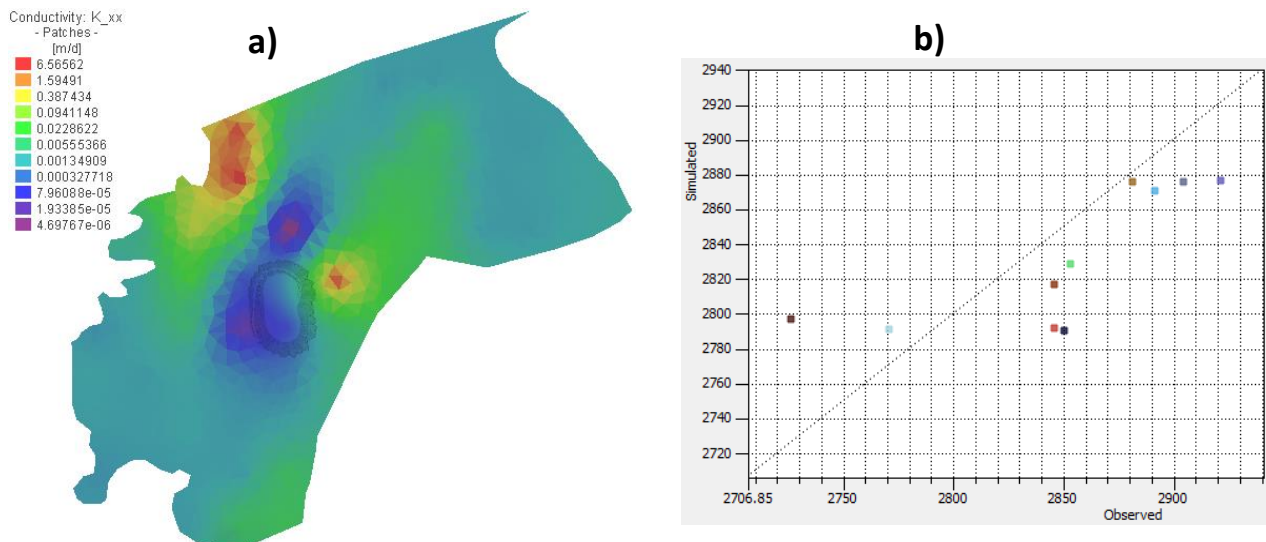


Figura 37: resultados de calibración en partir de conductividad inicial heterogénea: a) distribución espacial de conductividad hidráulica; b) gráfico de niveles piezométricos simulados v/s observados

Se observa que las conductividades hidráulicas más altas tienden a situarse en el extremo Noroeste del dominio en las cercanías del Borde Oeste y provenientes del sector donde se localiza la UH-6, disminuyendo gradualmente en dirección Sur y Este, en las cercanías del rajo minero comienza a descender la conductividad alcanzando magnitudes más bajas en el sector sur del piso del rajo y en la pared oeste del mismo. Se observa un cambio abrupto de la conductividad en una franja con tendencia en dirección Norte-Sur al Oeste del rajo minero, esto último es un fenómeno geológico que puede vincularse a la presencia de la Falla Oeste, la cual se muestra con características similares en el mapa geológico del sector (véase Figura 10). En un sector aledaño al Noreste del rajo (sector donde subyace la UH-B a la topografía) la conductividad asciende demarcando una zona acotada de conductividad alta, y luego vuelve a disminuir, en el sector de la UH-B predominan valores cercanos a 0.01 m/d, y en los sectores Sur, Noreste y Este del dominio predominan conductividades del orden de 0.001 m/d.

En el gráfico de la Figura 37b, se observa que los valores simulados difieren de los observados entre 3 m a 60 m, la mayoría de los niveles observados se mantiene a una diferencia menor, a excepción del pozo PZMRT-7 que es el que difiere en mayor magnitud.

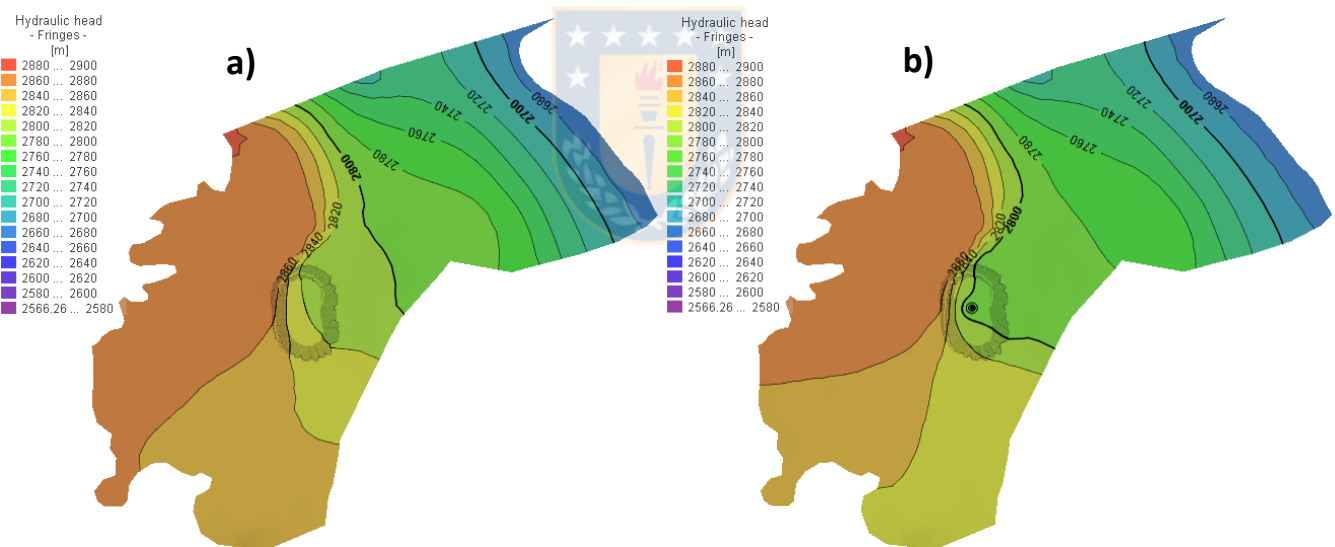


Figura 38: Niveles piezométricos de modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea: a) sin drenaje ; b) con drenaje

En la Figura 38 se muestra la distribución de niveles piezométricos del modelo sin drenaje (Figura 38a) y con drenaje de agua subterránea (Figura 38b). Desde el sector del rajo hacia el Sur se observa una disminución en un rango de 10 m a 20 m en el nivel piezométrico. En general se observa que el pozo de bombeo si bien genera una reducción importante del nivel piezométrico, lo hace con un efecto bastante localizado en el piso del rajo, no generando un cambio significativo en el comportamiento hidrogeológico de la superficie piezométrica en el dominio de modelación.

7. RESULTADOS

De las 4 series de simulación numérica realizadas y la calibración de 2 modelos se obtienen los siguientes resultados.

7.1 Conductividad hidráulica en el dominio

Modelos homogéneos: La conductividad hidráulica promedio del dominio considerando en este un sistema homogéneo es de 0.01 m/d (véase apartado 5.3).

Modelos heterogéneos: Se obtiene como resultado una conductividad hidráulica promedio de 0.01 m/d en la UH-B. La conductividad hidráulica para la UH-A se acota a un rango de valores entre 10^{-5} m/d y 10^{-3} m/d, respecto al rango inicial designado en el modelo conceptual (10^{-5} - 10^1 m/d).

Modelo calibrado de condición inicial homogénea: La distribución espacial de la conductividad hidráulica con vista en planta se muestra en la Figura 35a y se describe en el apartado 6.2.

Modelo calibrado de condición inicial heterogénea: La distribución espacial de la conductividad hidráulica con vista en planta se muestra en la Figura 37a y se describe en el apartado 6.3.

7.2 Potencial hidráulico en Borde Norte

Modelos homogéneos: Los valores de potencial hidráulico que pueden ser un promedio representativo en el Borde Norte bajo una distribución homogénea de la conductividad son calculados en las series 1 y 2 condicionando dos escenarios, sin bombeo en la mina y con bombeo respectivamente. De lo anterior se obtiene que el drenaje empleado en el rajo minero es aplicable para un valor de potencial hidráulico entre 2760 m.s.n.m y 2840 m.s.n.m. La Tabla 6 muestra los posibles valores de potencial hidráulico junto al caudal y el nivel piezométrico en el rajo minero.

Tabla 6: potencial hidráulico de CC1BN, nivel en mina, y caudal en rajo en modelo homogéneo.

Simulación	Potencial Hidráulico CC1BN (m)	Dominio (m/d)	Nivel Piezométrico Rajo (m)	Caudal Entrada Rajo (m ³ /d)	Caudal Salida Rajo (m ³ /d)
S1HOB_P2760_001DOM	2760	0.01	2601.27	172.86	0.00
S4HOB_P2780_001DOM	2780	0.01	2620.4	172.85	0.00
S7HOB_P2800_001DOM	2800	0.01	2648.93	172.85	-0.0055
S10HOB_P2820_001DOM	2820	0.01	2669.97	172.84	-0.0383
S13HOB_P2840_001DOM	2840	0.01	2690.31	173.02	-0.2232

Modelos heterogéneos: Los valores de potencial hidráulico que pueden ser un promedio representativo para el Borde Norte bajo una distribución heterogénea de la conductividad son calculados en las series 3 y 4, esto condicionando dos escenarios, el primero sin bombeo en la mina (serie 3) y el segundo con bombeo (serie 4). De lo anterior se obtiene que el drenaje en la mina es aplicable para un valor de potencial hidráulico entre 2769.78 m.s.n.m y 2840 m.s.n.m. La Tabla 7 muestra los posibles valores de potencial hidráulico junto al caudal y el nivel piezométrico en la mina.

Tabla 7: potencial hidráulico en CC1BN, caudal y nivel piezométrico en rajo para modelo heterogéneo

Simulación	Potencial Hidráulico CC1BN (m)	UH-A	UH-B	Nivel Piezométrico Rajo (m)	Caudal Entrada Rajo (m ³ /d)	Caudal Salida Rajo (m ³ /d)
S30HEB_P2840_0001UHA_001UHB	2840	0.001	0.01	2671.08	172.8	-0.0027247
S32HEB_P2840_00001UHA_001UHB	2840	0.0001	0.01	2668.58	172.8	-0.00025542
S35HEB_P2840_000001UHA_001UHB	2840	0.00001	0.01	2668.3	172.8	-0.00002537
S30HEB_P2820_0001UHA_001UHB	2820	0.001	0.01	2653.86	172.8	-0.0010199
S32HEB_P2820_00001UHA_001UHB	2820	0.0001	0.01	2651.64	172.8	0.000092531
S35HEB_P2820_000001UHA_001UHB	2820	0.00001	0.01	2651.41	172.8	9.1625E-06
S30HEB_P2800_0001UHA_001UHB	2800	0.001	0.01	2632.8	172.8	0
S32HEB_P2800_00001UHA_001UHB	2800	0.0001	0.01	2630.68	172.8	0
S35HEB_P2800_000001UHA_001UHB	2800	0.00001	0.01	2630.59	172.8	0
S30HEB_P2780_0001UHA_001UHB	2780	0.001	0.01	2602.89	172.8	0
S32HEB_P2780_00001UHA_001UHB	2780	0.0001	0.01	2600.69	172.8	0
S35HEB_P2780_000001UHA_001UHB	2780	0.00001	0.01	2600.46	172.8	0
S30HEB_P2769.78_0001UHA_001UHB	2769.78	0.001	0.01	2532.76	172.8	-0.00009936
S32HEB_P2769.78_00001UHA_001UHB	2769.78	0.0001	0.01	2530.8	172.8	-0.00001888
S35HEB_P2769.78_000001UHA_001UHB	2769.78	0.00001	0.01	2531.05	172.8	-1.3786E-06

7.3 Efecto de labor a cielo abierto y drenaje en distribución de niveles piezométricos

Modelos homogéneos: El gráfico de la Figura 39 muestra el efecto que tiene la excavación del rajo y el pozo de bombeo en la distribución de niveles piezométricos del dominio y en el rajo. Compara los resultados de la serie 1 y de la serie 2. Se compara el nivel piezométrico en el rajo con el potencial hidráulico del Borde Norte. Cada serie del gráfico representa una serie de simulación en la que el potencial hidráulico del Borde Este es fijo y se hace variar el potencial del Borde Norte.

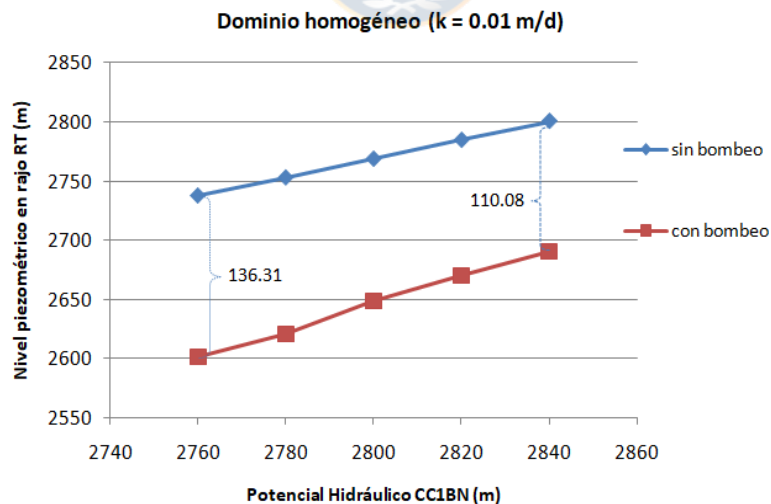


Figura 39: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT, serie 1 y serie 2 (sistema homogéneo)

Del gráfico se concluye que la excavación del rajo minero y su respectivo drenaje, para una conductividad hidráulica en un dominio homogéneo de 0,01 m/d, llega a generar en el punto de mayor influencia un descenso en el nivel piezométrico en la mina que puede variar entre 110.08 m y 136.31 m. El efecto del drenaje por si solo genera un descenso en el nivel piezométrico (desde el piso del rajo) que varía entre 0.31 m y 88.73 m.

Modelos heterogéneos : El gráfico en la Figura 40 muestra el efecto que tiene la excavación del rajo y el pozo de bombeo en la distribución de niveles piezométricos en el rajo minero. Se muestra la relación del nivel piezométrico en el rajo con el potencial hidráulico del Borde Norte comparando los resultados de la serie 3 y serie 4. Cada serie del gráfico representa una serie de simulación donde el potencial hidráulico del Borde Este es fijo y se varía el potencial del Borde Norte, para los 3 casos de diferencia de orden de magnitud (OM) que puede darse entre la UH-A y la UH-B.

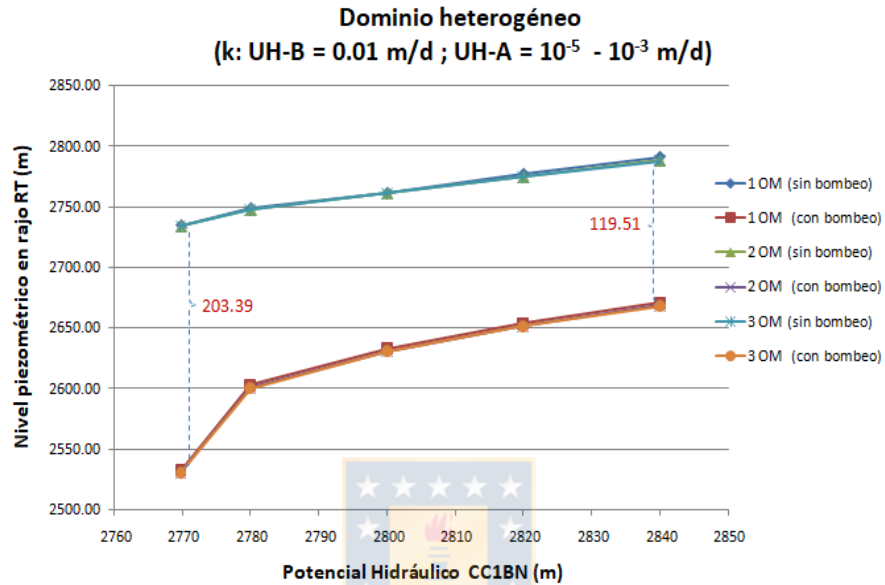


Figura 40: potencial hidráulico en CC1BN v/s nivel piezométrico en rajo RT, serie 3 y serie 4 (sistema heterogéneo)

Del gráfico se concluye que la excavación del rajo minero y su drenaje, para un sistema heterogéneo con conductividad hidráulica de 0.01 m/d en la UH-B y un rango entre 10^{-5} y 10^{-3} en la UH-A, genera un efecto casi similar para el caso de uno, dos o tres orden de magnitud en que puede diferir la conductividad hidráulica de las UH cuando la conductividad de UH-A es menor a la de UH-B, tal efecto genera en el punto de mayor influencia un descenso del nivel piezométrico en el piso del rajo entre 119.51 m y 203.39 m. El efecto del drenaje por si solo genera un descenso en el nivel piezométrico (desde el piso del rajo en cota 2690 m.s.n.m) que varía entre 18.92 m y 159.2 m.

Modelo calibrado de condición inicial homogénea: Se expone en la Figura 36 los resultados de distribución espacial de niveles piezométricos con vista en planta y en la Figura Q- 3 con vista en sección en la zona del rajo (véase ANEXO Q) posterior a la calibración de la conductividad hidráulica a partir de un modelo homogéneo, se visualizan los resultados sin considerar el drenaje, y considerando el efecto del drenaje. Los resultados del efecto del drenaje en los niveles piezométricos obtenidos en el punto de mayor influencia (piso del rajo) se indican en la Tabla 8:

Tabla 8: efecto del drenaje en nivel piezométrico del rajo RT para modelo calibrado en base a sistema homogéneo

Simulación	Caudal Drenaje (m ³ /d)	Nivel sin drenaje (m)	Nivel con drenaje (m)
CA_HOM_INT_CC1BN_CB	172.8	2830.1	2607.84

Modelo calibrado de condición inicial heterogénea: Se visualiza en la Figura 38 los resultados de distribución espacial de niveles piezométricos con vista en planta y en la Figura Q- 4 con vista en sección en la zona del rajo (véase ANEXO Q) posterior a la calibración de la conductividad hidráulica a partir del modelo heterogéneo, estos se exponen considerando y no considerando el efecto del drenaje. Los resultados en el punto de mayor influencia (piso del rajo) se indican la Tabla 9:

Tabla 9: efecto del drenaje en nivel piezométrico del rajo RT para modelo calibrado en base a sistema heterogéneo

Simulación	Caudal Drenaje (m ³ /d)	Nivel sin drenaje (m)	Nivel con drenaje (m)
CA_HET_INT_CC1BN	172.8	2822.01	2566.44

7.4 Caudal en Borde Norte y Borde Este

En cualquier escenario de simulación de los modelos se cumple que el potencial hidráulico de CC1BN>CC1BE, por ende, el rango de valores de caudales en el Borde Norte representa una recarga al sistema y el rango de caudales en el Borde Este representa una descarga del sistema.

Modelos homogéneos: Los resultados de caudales en el Borde Norte y Borde Este obtenidos para los diferentes valores de potencial hidráulico evaluados en el Borde Norte para un sistema homogéneo de la conductividad, se muestran en el ANEXO O. Los resultados de caudales obtenidos son calculados en las simulaciones numéricas bajo las siguientes condiciones.

- Caudal bombeado en la mina de 172.8 m³/d.
- Potencial hidráulico en el Borde Norte entre 2760 m y 2840 m.
- Potencial hidráulico en el Borde Este de 2665 m.
- Conductividad hidráulica del dominio de 0.01 m/d.

Se muestra en la Figura 41 el gráfico que resume los resultados de caudales obtenidos en el límite CC1BN (Borde Norte) y CC1BE (Borde Este).

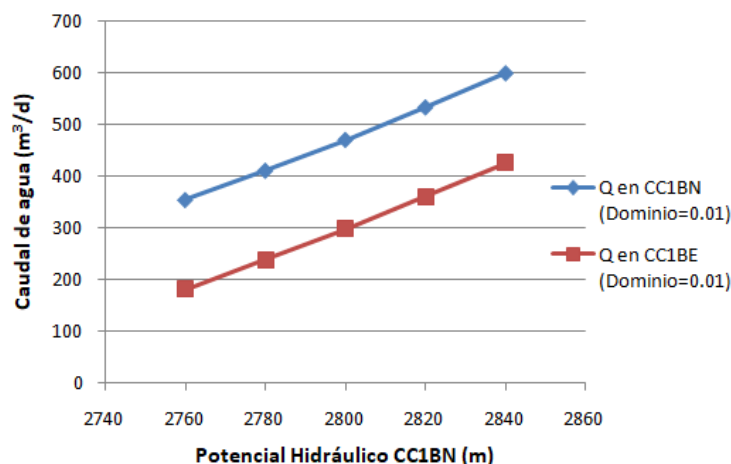


Figura 41: potencial hidráulico CC1BN v/s caudal de agua en CC1BN (azul) y CC1BE (rojo) (sistema

Modelos heterogéneos; los resultados de caudales en el Borde Norte y Borde Este obtenidos para los diferentes valores de potencial hidráulico evaluados en el Borde Norte para un sistema heterogéneo de la conductividad, se muestran en el ANEXO O. Los resultados de caudales obtenidos son calculados en las simulaciones numéricas bajo las siguientes condiciones.

- Caudal bombeado en la mina de $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.
- Potencial hidráulico en el Borde Norte entre 2769.78 m y 2840 m
- Potencial hidráulico en el Borde Este de 2665 m.
- Conductividad hidráulica de la UH-6 de 0.01 m/d
- Conductividad hidráulica de la UH-5 entre 10^{-5} m/d y 10^{-3} m/d .

Se muestra en la Figura 42 el gráfico que resume los resultados de caudales obtenidos en el límite CC1BN (Borde Norte) y CC1BE (Borde Este)

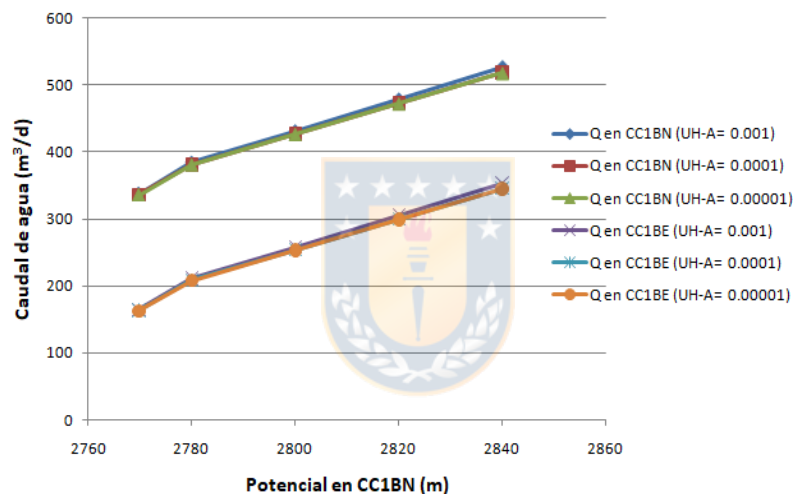


Figura 42: potencial hidráulico CC1BN v/s caudal de agua en CC1BN y CC1BE (sistema

Modelo calibrado a partir de conductividad inicial homogénea, el resultado de caudales obtenido es calculado en la simulación numérica bajo las siguientes condiciones.

- Caudal bombeado en la mina de $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.
- Potencial hidráulico en el Borde Norte con interpolación de valores entre 2700 m y 2900 m.

Se muestra en la Tabla 10 los resultados de caudales en Borde Norte y Borde Este.

Tabla 10: caudales en Borde Norte y Borde Este en modelo calibrado respecto a sistema homogéneo

Simulación	Caudal CC1BN (m^3/d)	Caudal CC1BE (m^3/d)
CA_HOM_INT_CC1BN	14975	-14802

Modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea, el resultado de caudales obtenido es calculado en la simulación numérica bajo las siguientes condiciones.

- Caudal bombeado en la mina de 172.8 m³/d.
- Potencial hidráulico en el Borde Norte con interpolación de valores entre 2700 m y 2900 m.

Se muestra en la Tabla 11 los resultados de caudales en Borde Norte y Borde Este.

Tabla 11: caudales Borde Norte y Borde Este en modelo calibrado respecto a sistema heterogéneo

Simulación	Caudal CC1BN (m ³ /d)	Caudal CC1BE (m ³ /d)
CA_HET_INT_CC1BN	6561.8	-6389

7.5 Caudal de entrada y salida en el rajo minero

Para los modelos homogéneos y heterogéneos, el caudal de entrada en el rajo está determinado por el drenaje implementado en el mismo, del cual se tiene por antecedentes (véase ANEXO I) que corresponde a un caudal de 172.8 m³/d extraído por pozos de bombeo, como lo anterior es una condición en el modelo, tanto el caudal de entrada en el rajo como el caudal de salida desde el rajo en las simulaciones tiende a ser igual 172.8 m³/d y 0 m³/d respectivamente (véase ANEXO O), valores que se cumplen en los resultados de simulación en los modelos mencionados.

Modelo calibrado respecto a modelo homogéneo, se muestra en la Tabla 12 los resultados de caudales de entrada y salida en el rajo minero y en el piso del rajo obtenidos de la simulación del modelo calibrado con una distribución de conductividad hidráulica estimada en el dominio por FePEST a partir de una conductividad inicial homogénea.

Tabla 12: caudal de entrada y salida en rajo y piso del rajo, en modelo calibrado respecto a modelo homogéneo

Simulación	Caudal Entrada Rajo (m ³ /d)	Caudal Salida Rajo (m ³ /d)	Caudal Entrada Piso (m ³ /d)	Caudal Salida Piso (m ³ /d)
CA_HOM_INT_CC1BN	246.13	-73.328	184.1	-11.305

Modelo calibrado respecto a modelo heterogéneo, se muestra en la Tabla 13 los resultados de caudales de entrada y salida en el rajo minero y en el piso del rajo obtenidos de la simulación del modelo calibrado con una distribución de conductividad hidráulica estimada en el dominio por FePEST a partir de una conductividad inicial heterogénea.

Tabla 13: caudal de entrada y salida en rajo y piso del rajo, en modelo calibrado respecto a modelo heterogéneo

Simulación	Caudal Entrada Rajo (m ³ /d)	Caudal Salida Rajo (m ³ /d)	Caudal Entrada Piso (m ³ /d)	Caudal Salida Piso (m ³ /d)
CA_HET_INT_CC1BN	201.54	-28.739	174.31	-1.5065

8. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

El respaldo teórico, el análisis de los antecedentes y la información recopilada del caso de estudio, permitió formular un modelo conceptual hidrogeológico en base al cual se efectúan diversos modelos numéricos los que son calibrados mediante estimación de parámetros y luego utilizados para la obtención de resultados con los que es posible describir el comportamiento hidrogeológico del entorno de la mina RT, evaluar el impacto de la mina en las aguas subterráneas, y analizar las posibles causas del afloramiento de agua al interior del rajo minero.

Comportamiento hidrogeológico en el dominio de estudio

El dominio de estudio conforme a la caracterización hidrogeológica, se divide en dos sectores tridimensionales (UH-A y UH-B). El valor promedio de conductividad hidráulica en la UH-B es de 0.01 m/d y en la UH-5 puede variar en un rango entre 10^{-5} m/d y 10^{-3} m/d, conductividades bastante bajas, acorde a las características hidrogeológicas (prácticamente impermeables) de las formaciones geológicas que constituyen las UH, aunque, el valor obtenido para la UH-B (localizada bajo el piso del rajo) resulta mayor, lo anterior puede deberse a la presencia de un macizo rocoso fracturado. Para un sistema homogéneo la conductividad hidráulica promedio es de 0.01 m/d, si se compara los resultados (en términos de piezometría, caudales y direcciones de flujo) del modelo homogéneo y heterogéneo se observa que son poco sensibles a la conductividad de la UH-A y más sensibles a la conductividad de la UH-B (véase ANEXO O).

En ambos modelos calibrados a partir de una condición inicial de conductividad homogénea y heterogénea, se obtiene una distribución espacial de la conductividad hidráulica en el dominio que puede vincularse a los antecedentes geológicos del sector, se presenta en ambos una franja pronunciada en dirección Norte-Sur al Oeste del rajo minero, la que puede asociarse a la presencia de la Falla Oeste la cual en el mapa geológico del sector se presenta con características similares (véase Figura 10). Por otra parte, los modelos tienden a zonificar un área de bajas conductividades que abarca la zona suroeste del piso del rajo y la pared oeste del rajo, tal resultado puede asociarse a que el rajo en profundidad comienza a excavar lo que corresponde a la sub-unidad UH-6b, sub-unidad que se caracteriza por poseer las conductividades hidráulicas más bajas del sector de estudio y es designada como basamento impermeable (véase apartado 3.5.2). Se observa también que las conductividades hidráulicas más altas tienden a situarse en el extremo Noroeste del dominio en las cercanías del Borde Oeste y en la zona sur de la UH-B, lo que puede deberse a que en dicho sector es donde la sub-unidad UH-6a subyace a la superficie (véase Figura 10, Figura 12 y Figura 13), sub-unidad hidrogeológica que alcanza conductividades mayores debido a sus características geológicas y zonas de alto fracturamiento (véase apartado 3.5.2). Se muestra también en los resultados de calibración un área de conductividad alta más acotada al Noreste del rajo, lo que puede deberse a una zona con alta presencia de fracturas (valores asociados a la roca fracturada de la UH-6a) o a la

sub-unidad UH-5a la cual constituye gravas y conglomerados (con conductividades más altas) que según antecedentes (véase apartado 3.5.2) subyacen en el sector del rajo minero.

La dirección del flujo de las aguas subterráneas se orienta desde el Noroeste al Sureste con una tendencia principal hacia al Este, que se origina por la recarga que aporta el acuífero UH-5 (componente inferior del acuífero Calama) desde el Norte del dominio (véase ANEXO P). Dado que el potencial hidráulico en el Borde Norte es en cualquier caso mayor al potencial del Borde Este, las direcciones generales de flujo no se ven significativamente afectada por los valores de potencial hidráulico evaluados en el límite CC1BN para los modelos simulados en el presente estudio, por ende, el límite CC1BN representa en todos los modelos una recarga al sistema y el CC1BE una descarga del sistema.

Se observa también que las direcciones de flujo en los modelos homogéneo y heterogéneo tienden el drenaje por pozos de bombeo genera una mayor influencia que en los modelos calibrados, teniendo los primeros una influencia de mayor área alterando los flujos en las afueras del rajo, mientras que en los modelos calibrados el drenaje genera un impacto bastante localizado en el piso del rajo no generando cambios significativos en las direcciones de flujo del dominio de estudio (véase ANEXO P).

La cantidad de agua que entra al dominio desde el acuífero Calama, para un sistema en que la conductividad hidráulica se distribuye de forma homogénea, se estima en un caudal mínimo de 354.20 m³/d y un caudal máximo de 598.67 m³/d. Mientras que para un sistema heterogéneo de la conductividad se estima un caudal mínimo de 335.82 m³/d y un caudal máximo de 526.33 m³/d. La diferencia en los resultados de caudales entre los modelos homogéneo y heterogéneo es baja, por lo que se concluye que el rango de valores estimado para la conductividad hidráulica en la UH-5 es poco sensible con los resultados de caudales. De lo anterior se deduce que el flujo de agua subterránea en el dominio de estudio se da principalmente a través de estructuras geológicas asociadas a la roca fracturada de la UH-6a. En el modelo calibrado a partir de una conductividad inicial homogénea, la cantidad de agua que entra al dominio desde el acuífero Calama se estima en un caudal de 14975 m³/d. Mientras que, en el modelo calibrado a partir de una distribución heterogénea de la conductividad, el caudal de entrada estimado es de 6561.8 m³/d.

La cantidad de agua que sale del dominio por el límite Borde Este en modelos homogéneos, se estima en un caudal mínimo de 181.4 m³/d y un caudal máximo de 425.87 m³/d. Mientras que para un sistema heterogéneo se estima un caudal de salida mínimo de 163.02 m³/d y un caudal máximo de 353.53 m³/d. En el modelo calibrado a partir de una distribución homogénea de la conductividad el caudal de descarga de agua desde el dominio por el límite del Borde Este se estima en un caudal de 14802 m³/d para el escenario. Mientras que, en el modelo calibrado con conductividad inicial heterogénea, el caudal de entrada estimado es de 6389 m³/d para el escenario.

Se observa que en los modelos homogéneo y heterogéneo definidos con conductividades promedio representativas, los caudales de entrada y salida en el dominio son bastante bajos respecto de los caudales obtenidos en los modelos calibrados. Por ende, se puede decir que un valor promedio de la conductividad en el sector de estudio no es lo suficientemente representativo para un análisis adecuado de los caudales que efectúa el flujo de agua subterránea en el sector debido a lo variable que es la distribución espacial de la conductividad hidráulica en el dominio de estudio.

También es evidente que los caudales de flujo de agua subterránea de entrada y salida en el dominio del modelo calibrado a partir de una conductividad inicial homogénea son mayores al los del calibrado a partir de una conductividad heterogénea. Lo anterior puede dar cuenta de que al determinar una distribución espacial de la conductividad hidráulica (mediante la calibración) de forma coherente a las condiciones impuestas en función de los antecedentes y la información observada en el dominio de estudio, los resultados de caudales si son sensibles al valor de conductividad inicial y preferencial designados en los modelos previos a la calibración tanto en la UH-A como en la UH-B.

En cuanto a la distribución espacial de niveles piezométricos en el dominio, los resultados obtenidos de ambos modelos calibrados son cercanos a lo que se evidencia en el mapa de piezometría disponible en los antecedentes del sector de estudio, siendo el modelo calibrado a partir de una conductividad inicial heterogénea el que presenta mayor similitud (véase Figura 36, Figura 38 y ANEXO F). Por otra parte, en ambos modelos calibrados, el caudal de agua entrante al piso del rajo excede levemente al caudal de agua bombeado (véase apartado 7.5), siendo el modelo calibrado a partir de una conductividad inicial heterogénea el que difiere en menor magnitud (caudal entrante desde el piso del rajo de 0.017 l/s).

Luego, teniendo en cuenta que no se dispone de antecedentes relacionados a información de caudales en el dominio de estudio (a excepción del caudal de agua bombeado en el rajo) y en función de los resultados obtenidos, se considera que el modelo calibrado a partir de una conductividad inicial heterogénea es el que representa de mejor manera el comportamiento hidrogeológico, mostrando una mayor coherencia con la información disponible de pozos de observación, antecedentes geológicos, piezometría en el dominio y condiciones impuestas en el modelo (condiciones de contorno de tipo Dirichlet, condiciones de Neumann, caudal bombeado de 172.8 m³/d y nivel piezométrico en el piso del rajo bajo la cota 2690 m.s.n.m). Lo anterior también se respalda comparando los gráficos de niveles piezométricos “simulados versus observados” donde el modelo calibrado a partir de una conductividad inicial heterogénea es el que se ajusta de mejor manera a la información de pozos observados en el dominio.

Respecto a las posibles causas del afloramiento de agua, si bien en el piso del rajo son estimadas conductividades bajas, es válido considerar que en la UH-B bajo el piso del rajo se estimó una conductividad promedio representativa de 0.01 m/d asociada a la UH-6a, pudiendo dicho afloramiento estar asociado a un flujo de agua preferencial a través de fracturas.

Los bajos caudales de agua en el sector del rajo se dan por las bajas conductividades asociadas a las características geológicas del macizo rocoso, y por la presencia de la Falla Oeste que considerando las direcciones de flujo en el dominio (de Noroeste a Sureste-Este), actúa como una barrera natural impermeable.

Impacto de la mina en las aguas subterráneas

La superficie piezométrica en el dominio de estudio en su curso normal se ve afectada tanto por el sistema de drenaje implementado en el rajo minero, como por la excavación llevada a cabo para su realización. La forma en que influye la excavación del rajo minero en términos de niveles piezométricos está dada netamente por la morfología de la excavación misma en su intercepción con la superficie piezométrica del sector, esto dadas las bajas conductividades hidráulicas de condición prácticamente impermeable en la localización del rajo. Por otra parte, el sistema de drenaje implementado que en el presente caso de estudio corresponde a pozos de bombeo, si bien tienden a reducir una altura significativa de nivel piezométrico (véase apartado 7.3), lo hacen con un efecto bastante localizado en el sector del piso del rajo (véase ANEXO P y ANEXO Q), sin generar un impacto mayor en el comportamiento hidrogeológico general del dominio de estudio, esto dado al bajo caudal de agua drenado y a las bajas conductividades hidráulicas en el sector donde es implementado el drenaje.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jhariya, D., Khan, R., & Thakur, G. S. (2016). Impact of mining activity on water resource: an overview study. *Proceedings of the Recent Practices and Innovations in Mining Industry, Raipur, India*, 19-20.
- [2] Instituto tecnológico GeoMinero de España (2003). *Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo Abierto*. Ministerio de Industria Comercio y Turismo, Secretaria General de la Energía y Recursos Minerales.
- [3] Fernandez-Rubio, R., & Lorca, D. F. (1993). Mine water drainage. *Mine water and the environment*, 12(1), 107-130.
- [4] Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- [5] Rapantova, N., Zeman, J., Vojtek, D., Grmela, A., & Michálek, B. (2009, October). Mathematical Modelling Application for Optimisation of Utilisation of Mine Waters with High Uranium Concentrations from Flooded Mines. In *Water Institute of Southern Africa, International Mine Water Association. Proceedings, International Mine Water Conference. Document Transformation Technologies, Pretoria* (pp. 89-94).
- [6] Sena, C., & Molinero, J. (2009). Water resources assessment and hydrogeological modelling as a tool for the feasibility study of a closure plan for an open pit mine (La Respina Mine, Spain). *Mine Water and the Environment*, 28(2), 94-101.
- [7] Garzonio, C. A., Piccinini, L., & Gargini, A. (2014). Groundwater modeling of fractured aquifers in mines: the case study of Gavorrano (Tuscany, Italy). *Rock mechanics and rock engineering*, 47(3), 905-921.
- [8] Monninkhoff, B., Altenkirch, N., Luo, J., & Clausnitzer, V. (2014). Analyzing the Effects of Groundwater Influenced Flooding of a Large Abandoned Mining Area in Eastern Germany.
- [9] Water Management Consultants. (2007). Resultados del programa de terreno mina Radomiro Tomic División CODELCO norte, Santiago.
- [10] Herrera Herbert, J., & Pla Ortiz de Urbina, F. (2006). Métodos de minería a cielo abierto. pp. 119.
- [11] Jimeno, C. L, Llera J. M. P., & De Urbina, F. P. O. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- [12] Herrera Herbert, J. *Introducción al Drenaje de Explotaciones Mineras*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid, 2009.
- [13] Sánchez, L. E. (1995). Drenaje de minas a cielo abierto. *Aspectos Geológicos de Protección Ambiental*, 1, 145-154.

- [14] Custodio E. & Llamas M. R. (1976). *Hidrología Subterránea*, Segunda ed., vol. 1, no. 2. Barcelona: Omega.
- [15] González de Vallejo, L.I., Ferrer M., Ortuño, L & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- [16] Sánchez-San Román, F. J. (2017), Conceptos Fundamentales de Hidrogeología, vol. 1, pp. 1–11.
- [17] Sánchez-San Román, F. J. (2017), Ley de Darcy. Conductividad hidráulica, pp. 1–12,.
- [18] Martínez Alfaro, P.E, Martínez Santos, P. & S. Castaño Castaño. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*, vol. 1, no. 1. Madrid, Barcelona, 2006.
- [19] Sánchez-San Román, F. J. (2017), Hidráulica Subterránea : Principios Básicos Régimen Permanente y Régimen Variable, pp. 1–14.
- [20] Bear, J., & Cheng, A. H. D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport* (Vol. 23). Springer Science & Business Media.
- [21] Wels, C., Mackie, D., & Scibek, J. (2012). *Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities*. Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.
- [22] Barnett, B. & Townley, L. (2012). *Australian groundwater modelling guidelines; Sinclair Knight Merz and National Centre for Groundwater Research and Training*, no. June. Canberra: National Water Commission.
- [23] Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science*. Elsevier.
- [24] Mercer, J. W., & Faust, C. R. (1980). Ground-Water Modeling: Mathematical Models a. *Groundwater*, 18(3), 212-222.
- [25] Franke, O. L., Reilly, T. E., & Bennett, G. D. (1987). Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems: an introduction.
- [26] DHI, M. P. B. (2018) Introductory Tutorial: Feflow 7.2[®] (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System), Horsholm. MIKE powered by DHI. Retrieved from MIKE Powered by DHI: <https://www.mikepoweredbydhi.com>.
- [27] Diersch, H. J. G. (2013). *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.
- [28] Geotecnia Consultores. (1997). Declaración Impacto Ambiental, Proyecto Expansión Radomiro Tomic.
- [29] CODELCO, SGA[®] Soluciones en gestión ambiental. (2018). Capítulo 2.3 Línea de Base - Medio Físico., Santiago.
- [30] CODELCO, GS3 Consultores. (2018). Anexo 2-1 Caracterización ambiental medio físico.,

Santiago.

- [31] DGA, Matraz Consultores Asociados S.A. (2012) “Estudio acuífero de Calama sector medio del río Loa, región de Antofagasta, Informe Final.” Dirección General de Aguas, Santiago.
- [32] CODELCO, GS3 Consultores. (2018) Anexo 2-3 Análisis drenaje rajo Radomiro Tomic quinquenio 2018-2022., Santiago.
- [33] Santibáñez Quezada, F. (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo I: Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas: FIA.
- [34] Water Management Consultants, “Anexo 3: Plan de drenaje mina Radomiro Tomic.” CODELCO, Santiago, 2007.
- [35] Hídrica Consultores SPA, “Asesoría técnica para la sectorización de acuíferos en Calama, Informe final.” Dirección General de Aguas, Santiago, 2017.
- [36] CODELCO, “Capítulo 1: Descripción de proyecto, DIA de proyecto ‘Modificaciones al proyecto extracción y movimiento de minerales mina Radomiro Tomic’.” GS3 Consultores, Santiago, 2018.
- [37] CODELCO (2012). Anexo 4-5 Análisis drenaje rajo Radomiro Tomic. Santiago.
- [38] CODELCO (2013). Respuesta a ordinario N°388/2013 DGA. Dirección de exploración e hidrogeología, Santiago.
- [39] USGS, *Earth Explorer.*, 2000, [Online]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/scene/metadata/full/5e83a3ee1af480c5/SRTM1S23W069V3/>.
- [40] WSP Chile (2017). SERVICIO HIDROGEOLÓGICO Y CONTROL TÉCNICO PARA LA PERFORACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS RT-CERE-LOA.
- [41] DHI-Wasy (2016). FePEST in FEFLOW 7.0 - User Guide, p. 124. MIKE powered by DHI. Retrieved from MIKE Powered by DHI: <https://www.mikepoweredbydhi.com>.
- [42] CEITSAZA (2016). Acuíferos Región de Antofagasta, Antofagasta.
- [43] Golder Associates (2014). Plan de cierre faenas mineras (Ley N° 20.551), [Online]. Available: <https://www.codelco.com/radomiroTomic>.
- [44] Doherty, J. (2018). PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimizers. 7th Edition. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.

10. ANEXOS

ANEXO A: Hidrología del sector RT

Tabla A- 1: estaciones pluviométricas en zona de estudio [36].

Estación	Código BNA	Coordenadas UTM Datum PSAD 56- Huso 19		Altitud (m.s.n.m.)
		Norte (m)	Este (m)	
Conchi Viejo	02104007-K	7.572.650	528.511	3.491
Conchi Muro Embalse	02104009-6	7.561.561	537.836	3.010
Chiu Chiu	02104010-K	7.529.707	537.415	2.524
Ayquina	02105018-0	7.536.512	570.229	3.031
Calama	02110013-7	7.517.389	509.832	2.300

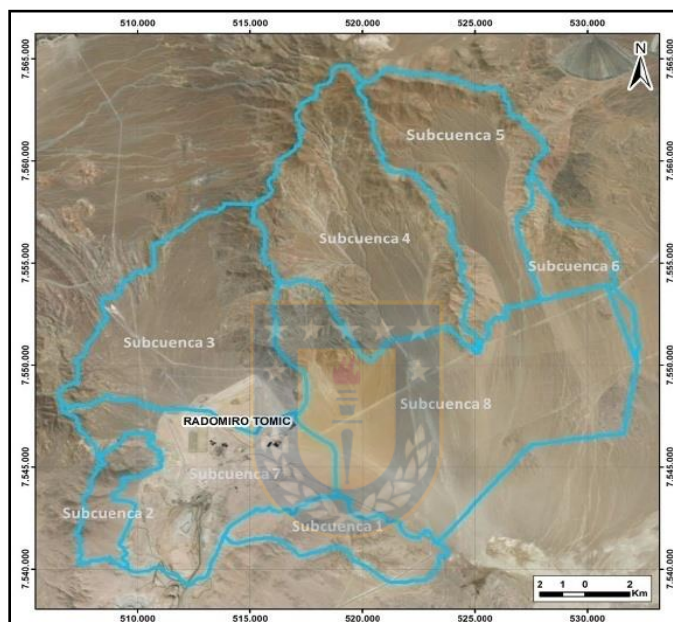


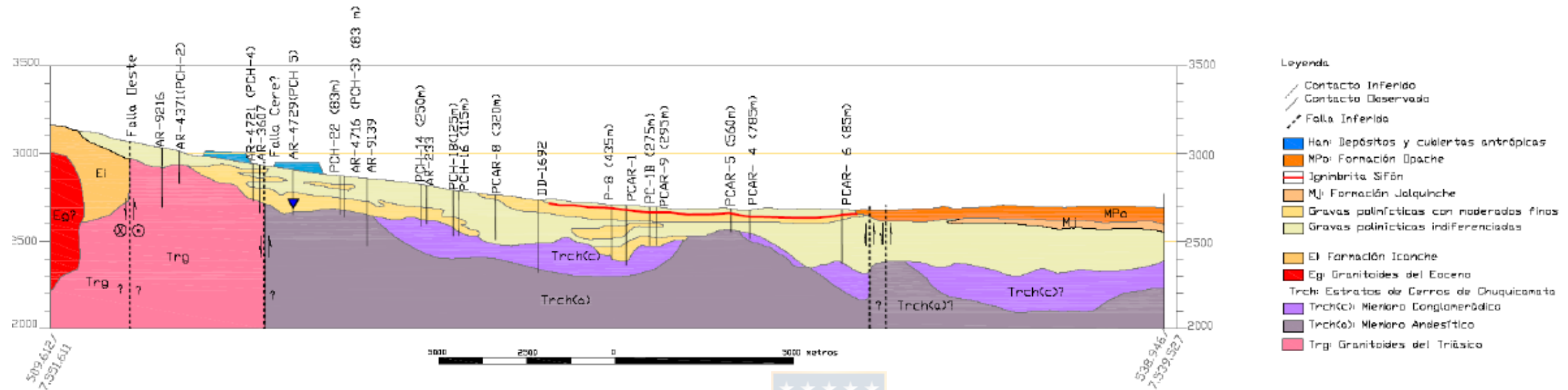
Figura A- 1: sub-cuencas hidrográficas de la zona de estudio [26]



Figura A- 2: áreas de escurrimiento a mina Radomiro Tomic [25]

ANEXO B: perfiles geológicos en sector RT.

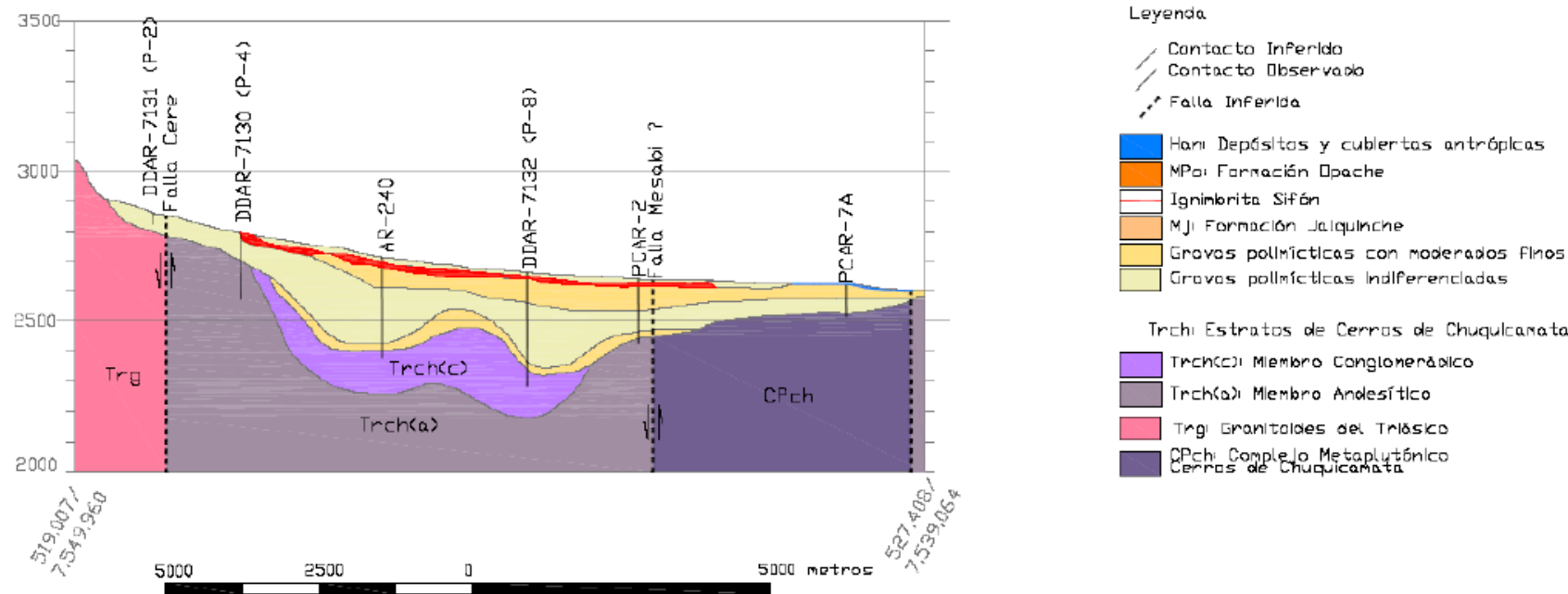
Perfil Geológico A-A''



- Leyenda**
- Contacto Inferido
 - - - Contacto Observado
 - - - - - Falta Inferida
 - Hani Depósitos y cubiertas antrópicas
 - MPa: Formación Opache
 - Ignimbrita Sifón
 - Mj: Formación Jalquinche
 - Gravas polimícticas con moderados finos
 - Gravas polimícticas indiferenciadas
 - EI: Formación Iconche
 - Egi: Granitoides del Eoceno
 - Trch: Estratos de Cerros de Chuquicanata
 - Trch(c): Miembro Conglomerádico
 - Trch(a): Miembro Andesítico
 - Trg: Granitoides del Triásico

Figura B- 1: perfil geológico A-A'' [35]

Perfil Geológico B-B''

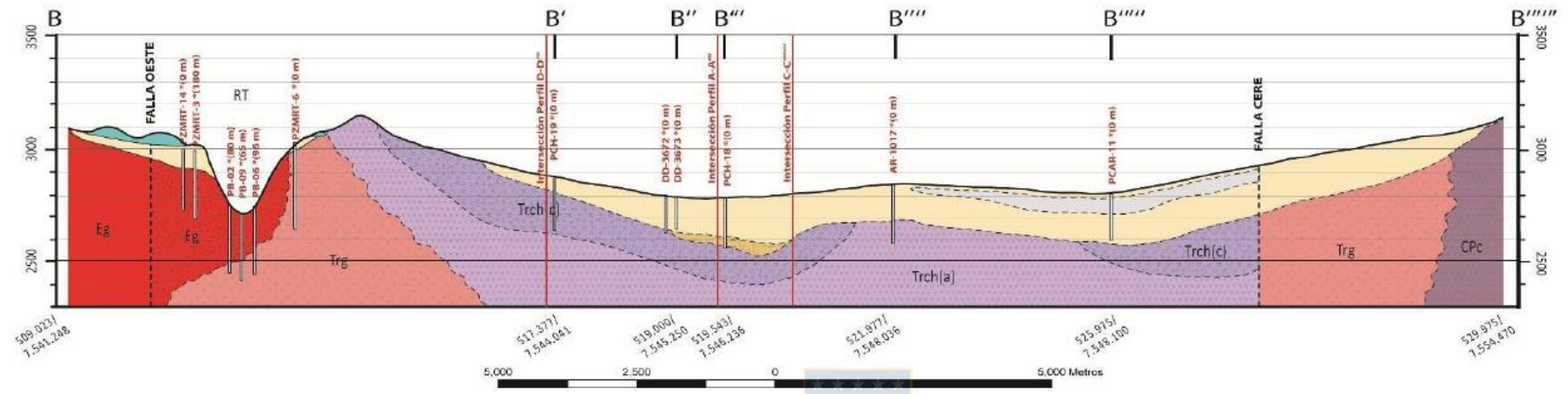


- Leyenda**
- Contacto Inferido
 - - - Contacto Observado
 - - - - - Falta Inferida
 - Hani Depósitos y cubiertas antrópicas
 - MPa: Formación Opache
 - Ignimbrita Sifón
 - Mj: Formación Jalquinche
 - Gravas polimícticas con moderados finos
 - Gravas polimícticas indiferenciadas
 - Trch: Estratos de Cerros de Chuquicanata
 - Trch(c): Miembro Conglomerádico
 - Trch(a): Miembro Andesítico
 - Trg: Granitoides del Triásico
 - CPch: Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicanata

Diseño:	Revisión:	Proyecto RT Sulfuros		
	MR			
Dibujo:	Aprobó:			
LC	MG			
	Sistema Referencia:	Fecha:	Nº Proyecto:	Rev.:
		Octubre 2012	12001	1
	Datum:	Escala:	Plano/Figura:	Anexo:
	Pсад 56			

Figura B- 2: perfil geológico B-B'' [35]

PERFIL GEOLÓGICO B - B''''''



LEYENDA

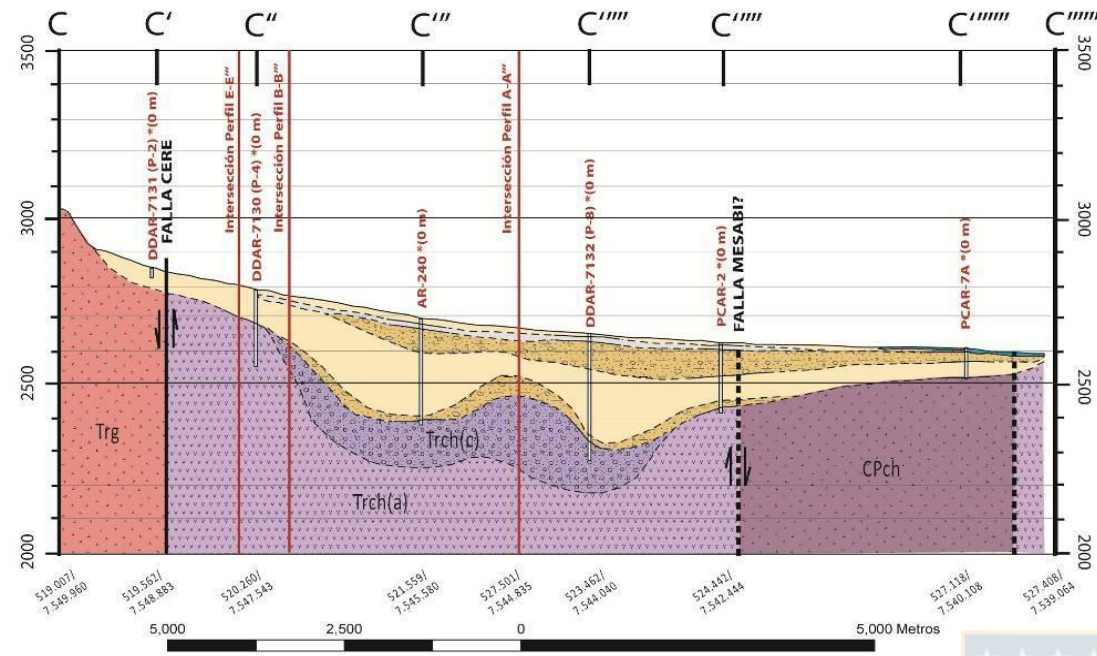
- Contacto Inferido
- Contacto Observado
- /// Falla Inferida
- ▼ Nivel Estático medido
- POZO *(435 m) (distancia de proyección)
- Han: Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno Superior)
- MPo: Formación Opache (Mioceno Superior - Plioceno Superior Baja)
- Ignimbrita Sifón
- Mj: Formación Jalquinche (Mioceno Inferior - Mioceno Superior Baja)
- Gravas Polimícticas con moderados finos
- Gravas Polimícticas indiferenciadas
- Trch: Estratos de Cerros de Chuquicamata (Triásico Medio Superior)
 - Trch (c) : Miembro Conglomerádico
 - Trch (a) : Miembro Andesítico
- CPc: Formación Collahuasi (Carbonífero superior - Pérmico)
- Eg : Granitoides del Eoceno
- Trg : Granitoides del Tríasico



Modelo de Simulación Hidrogeológica Mina Radomiro Tomic Contrato N°45010631	
Perfil Geológica B-B''''''	
Escala Horizontal: Gráfica	
Escala Vertical: Gráfica	
Fecha: Diciembre 2010	
Datos: PSAD 36	

Figura B- 3: perfil geológico B-B'''''' [35]

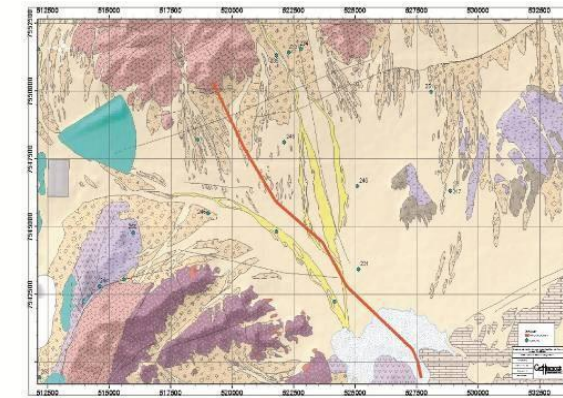
PERFIL GEOLÓGICO C-C''''''



LEYENDA

- Contacto Inferido
- Contacto Observado
- Falla Inferida
- Nivel Estático medido
- Pozo *(distancia de proyección)
- Han: Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno Superior)
- MPO: Formación Opache (Mioceno Superior - Plioceno Superior bajo)
- Ignimbrita Sifón
- Mj: Formación Jalquinche (Mioceno Inferior - Mioceno Superior bajo)
- Gravas Polimícticas con moderados finos
- Gravas Polimícticas indiferenciadas
- Ei: Formación Icanche (Eoceno Inferior a Medio bajo, 53 - 43 Ma)
- Trch: Estratos de Cerros de Chuquicamata (Triásico Medio Superior)
- Trch (c): Miembro Conglomerádico
- Trch (a): Miembro Andesítico
- CPc: Formación Collahuasi (Carbonífero Superior - Pérmico)
- CPch: Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (Carbonífero - Pérmico Superior)
- Eg: Granitoides del Eoceno
- Trg: Granitoides del Triásico

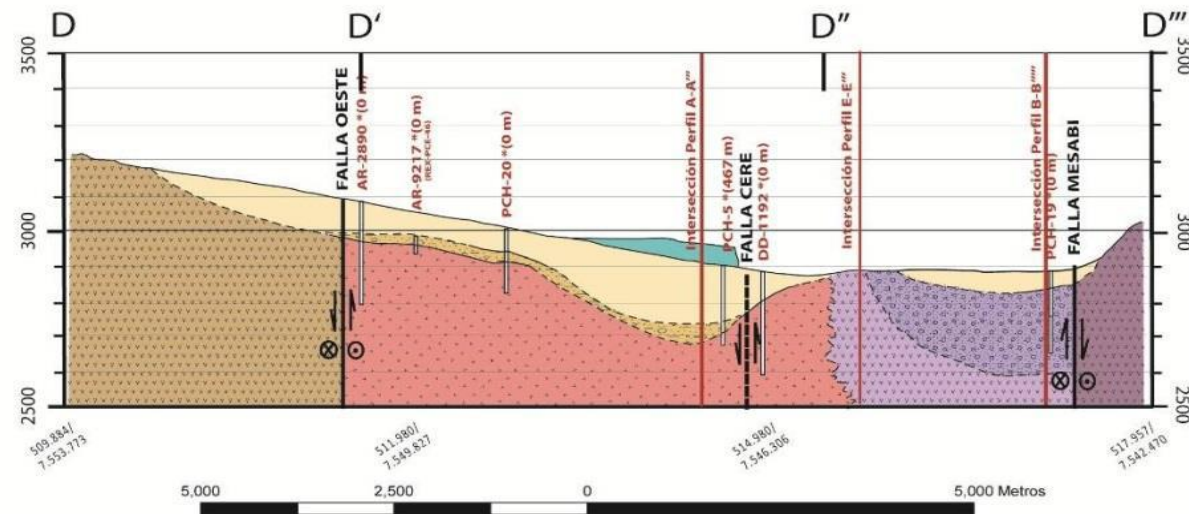
UBICACIÓN



Modelo de Simulación Hidrogeológica Mina Radomiro Tomic Contrato N°45010631	
Perfil Geológico A-A''	
Escala Horizontal: Gráfica	
Escala Vertical: Gráfica	
Fecha: Diciembre 2010	
Datos: PSAD 56	

Figura B- 4: perfil geológico C-C'''''' [35]

PERFIL GEOLÓGICO D-D''''



LEYENDA

- Contacto Inferido
- Contacto Observado
- Falla Inferida
- Nivel Estático medido
- Pozo *(distancia de proyección)
- Han: Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno Superior)
- MPO: Formación Opache (Mioceno Superior - Plioceno Superior bajo)
- Ignimbrita Sifón
- Mj: Formación Jalquinche (Mioceno Inferior - Mioceno Superior bajo)
- Gravas Polimícticas con moderados finos
- Gravas Polimícticas indiferenciadas
- Ei: Formación Icanche (Eoceno Inferior a Medio bajo, 53 - 43 Ma)
- Trch: Estratos de Cerros de Chuquicamata (Triásico Medio Superior)
- Trch (c): Miembro Conglomerádico
- Trch (a): Miembro Andesítico
- CPc: Formación Collahuasi (Carbonífero Superior - Pérmico)
- CPch: Complejo Metaplutónico Cerros de Chuquicamata (Carbonífero - Pérmico Superior)
- Eg: Granitoides del Eoceno
- Trg: Granitoides del Triásico

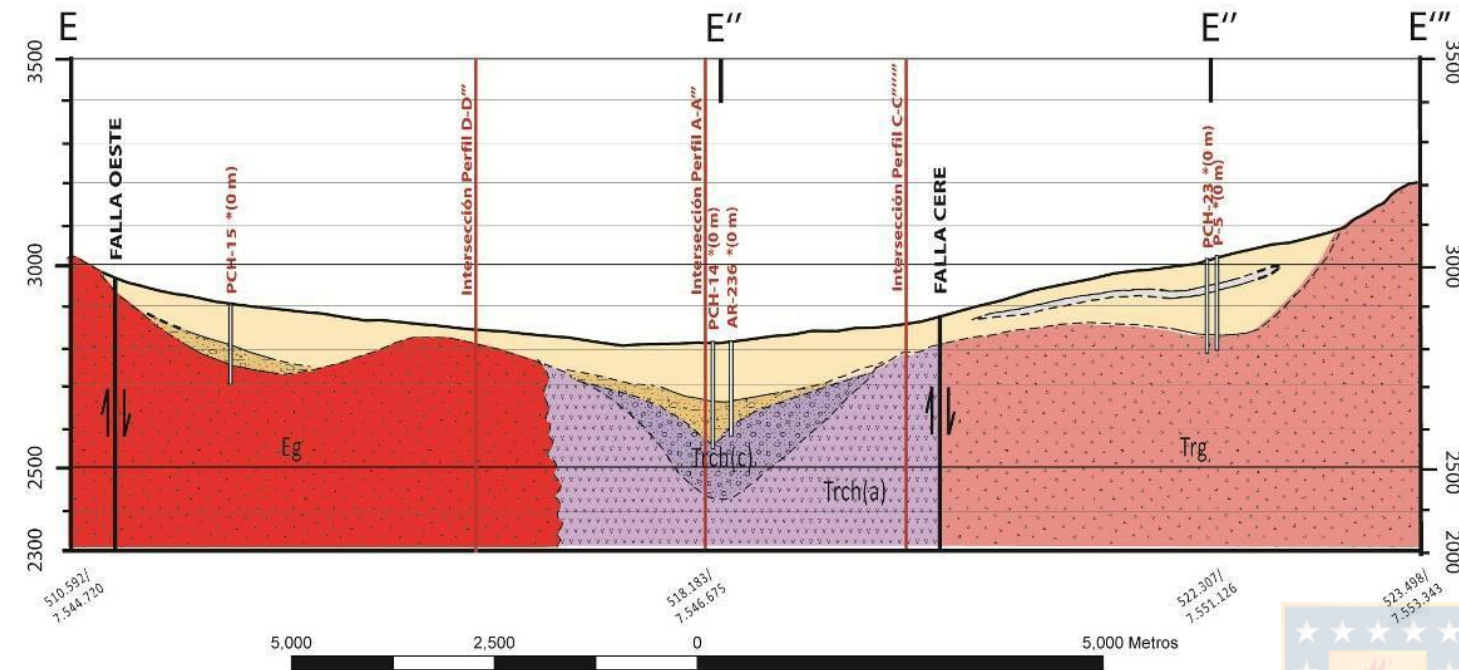
UBICACIÓN



Modelo de Simulación Hidrogeológica Mina Radomiro Tomic Contrato N°45010631	
Perfil Geológico D-D''	
Escala Horizontal: Gráfica	
Escala Vertical: Gráfica	
Fecha: Enero 2011	
Datos: PSAD 56	

Figura B- 5: perfil geológico D-D'''' [35]

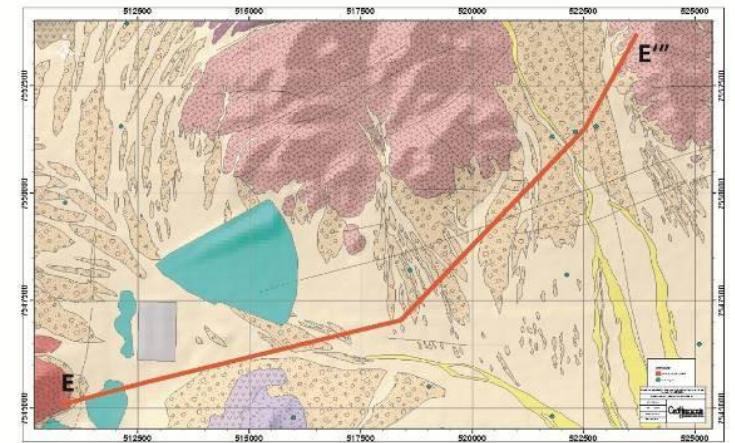
PERFIL GEOLÓGICO E - E'''



LEYENDA

- Contacto Inferido
- Contacto Observado
- /// Falla Inferida
- ▼ Nivel Estático medido
- ▭ Pozo *(distancia de proyección)
- Han: Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno Superior)
- MPO: Formación Opache (Mioceno Superior - Plioceno Superior baja)
- Ignimbrita Sifón
- Mj: Formación Jalquinche (Mioceno Inferior - Mioceno Superior baja)
- Gravas Polimícticas con moderados finos
- Gravas Polimícticas indiferenciadas
- Ei: Formación Icanche (Eoceno Inferior a Medio bajo, 33 - 43 Ma)
- Eg: Granitoides del Eoceno
- Trg: Granitoides del Triásico
- Trch: Estratos de Cerros de Chuquicamata (Triásico Medio Superior)
- Trch (c): Miembro Conglomerádico
- Trch (a): Miembro Andesítico

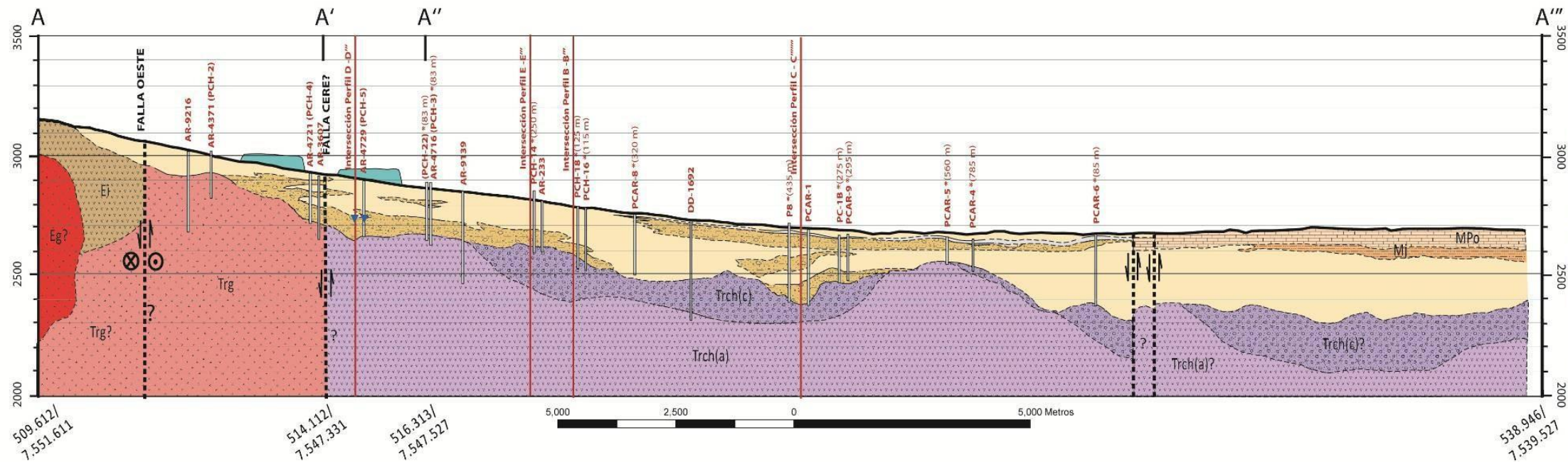
UBICACIÓN



Modelo de Simulación Hidrogeológica Mina Radomiro Tomic Contrato N°45010631	
Perfil Geológico E-E'''	
Escala Horizontal 1:50.000	
Escala Vertical 1:10.000	
Fecha: Enero 2011	
Datam: PSAD 56	

Figura B- 7: perfil geológico E-E''' [35]

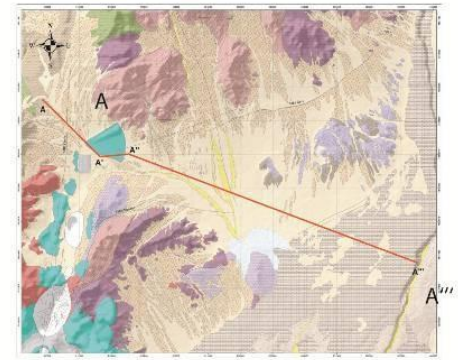
PERFIL GEOLÓGICO A - A'''



LEYENDA

- Contacto Inferido
- Contacto Observado
- /// Falla Inferida
- ▼ Nivel Estático medido
- ▭ Pozo *(distancia de proyección)
- Han: Depósitos y cubiertas antrópicas (Holoceno Superior)
- MPO: Formación Opache (Mioceno Superior - Plioceno Superior baja)
- Ignimbrita Sifón
- Mj: Formación Jalquinche (Mioceno Inferior - Mioceno Superior baja)
- Gravas Polimícticas con moderados finos
- Gravas Polimícticas indiferenciadas
- Ei: Formación Icanche (Eoceno Inferior a Medio bajo, 33 - 43 Ma)
- Eg: Granitoides del Eoceno
- Trg: Granitoides del Triásico
- Trch: Estratos de Cerros de Chuquicamata (Triásico Medio Superior)
- Trch (c): Miembro Conglomerádico
- Trch (a): Miembro Andesítico

UBICACIÓN



Modelo de Simulación Hidrogeológica Mina Radomiro Tomic Contrato N°45010631	
Perfil Geológico A-A'''	
Escala Horizontal: Gráfica	
Escala Vertical: Gráfica	
Fecha: Diciembre 2010	
Datam: PSAD 56	

Figura B- 6: perfil geológico A-A''' [35]

ANEXO C: perfiles geotécnicos del rajo mina RT

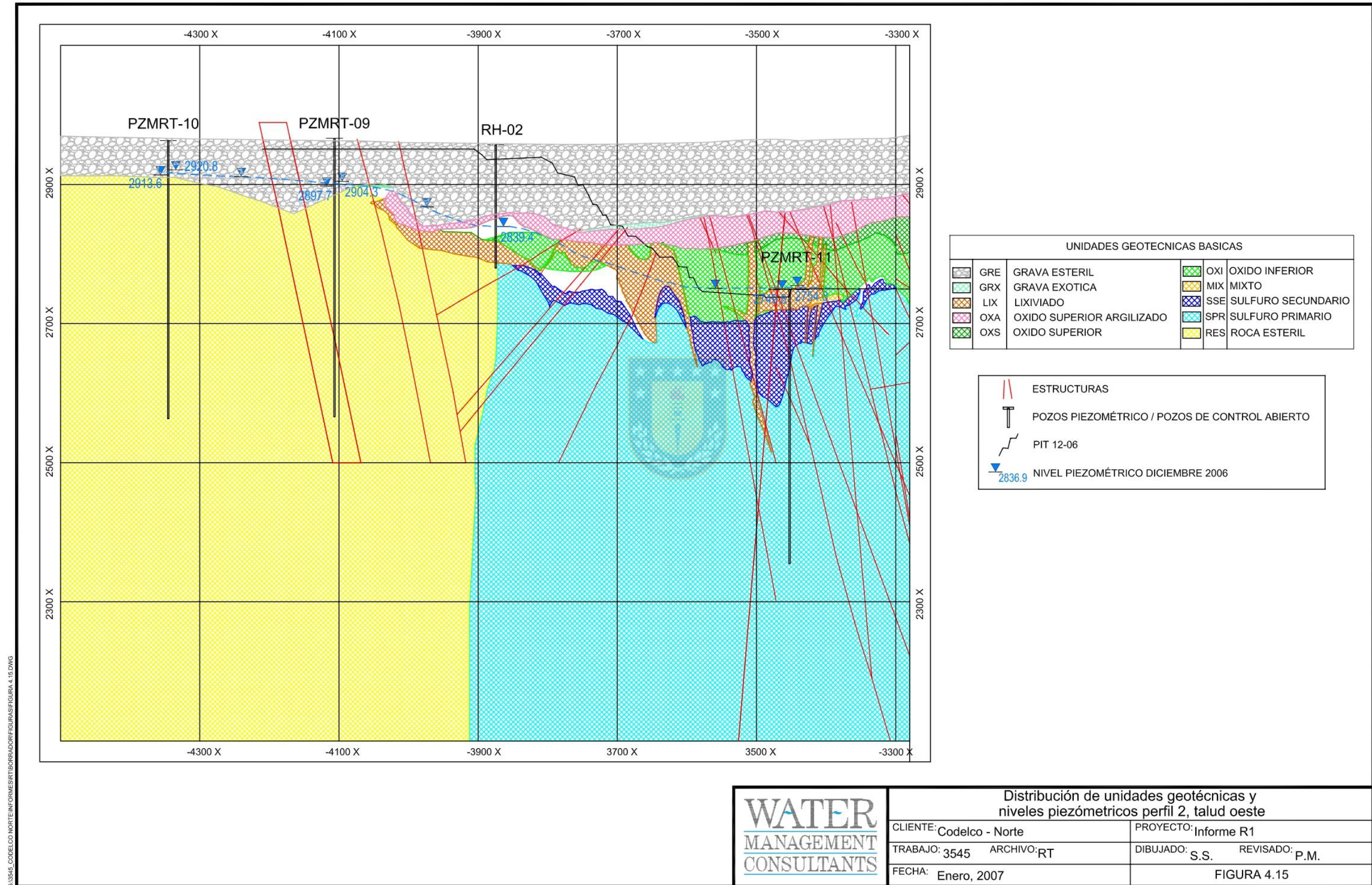


Figura C- 1: perfil 2; talud oeste, distribución de unidades geotécnicas y niveles piezométricos [34]

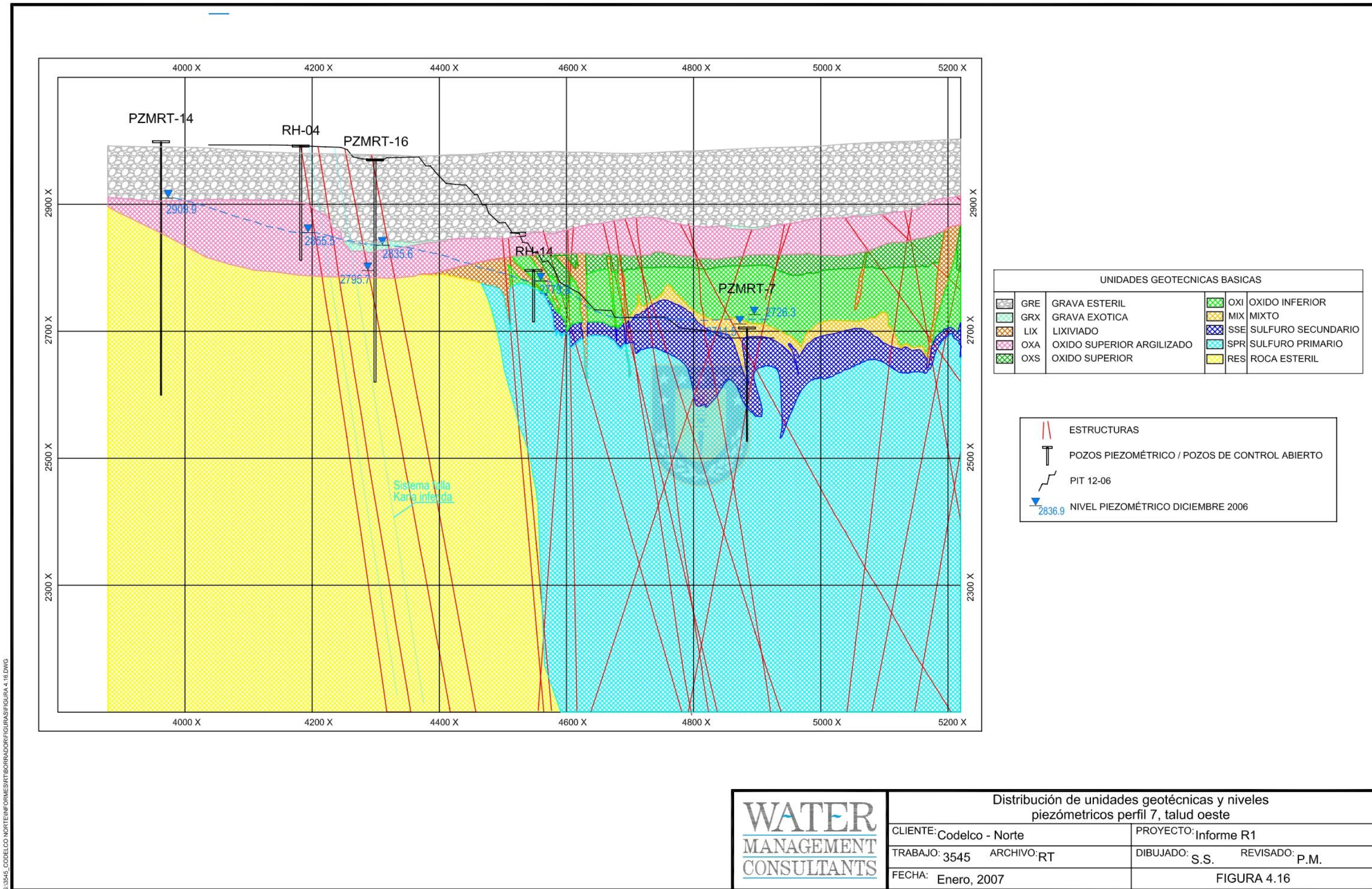


Figura C- 2: perfil 7; talud oeste, distribución de unidades geotécnicas y niveles piezométricos [34]

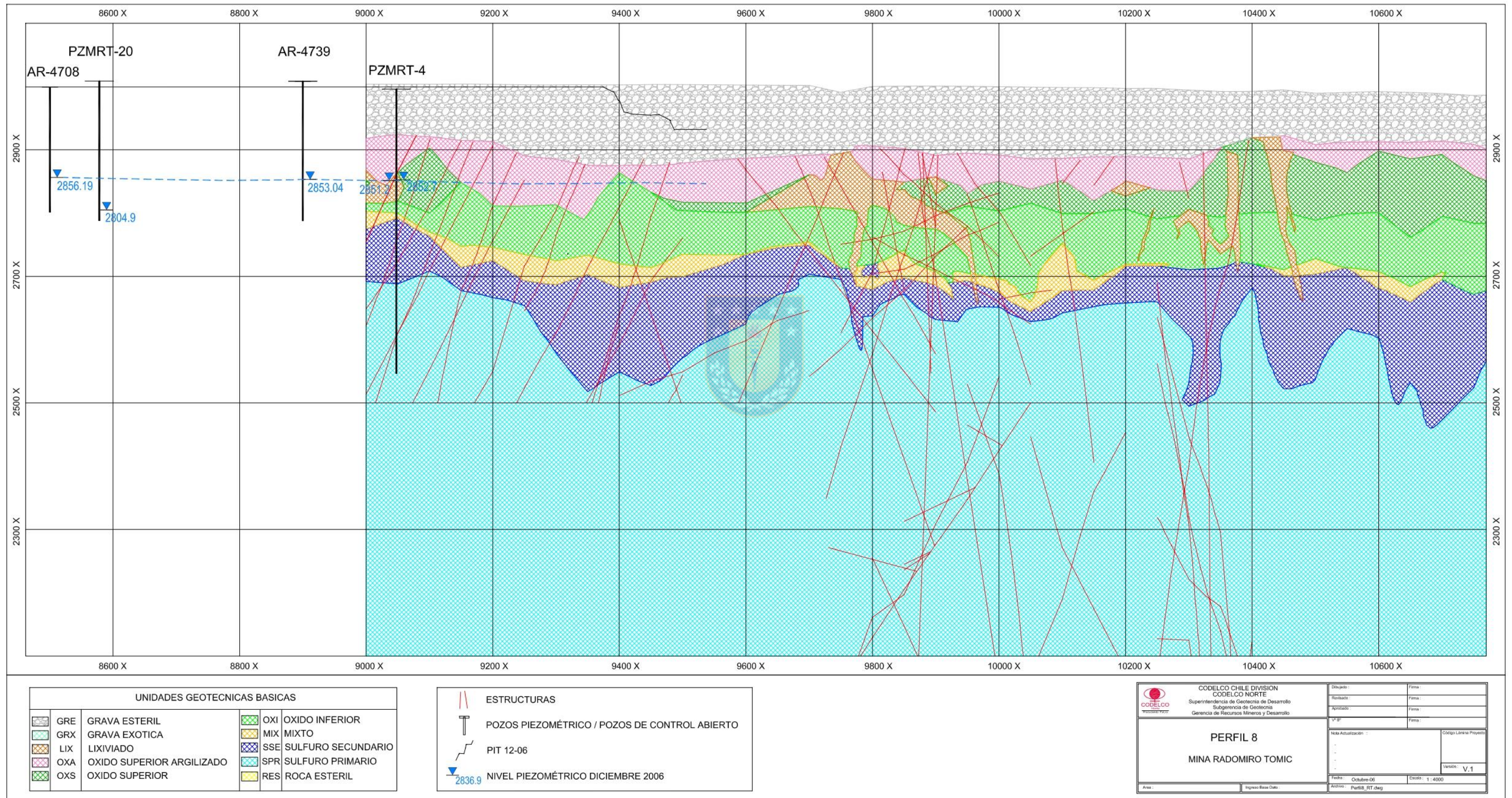


Figura C- 3: perfil 8; talud oeste, distribución de unidades geotécnicas y niveles piezométricos [34]

ANEXO D: acuíferos región de Antofagasta

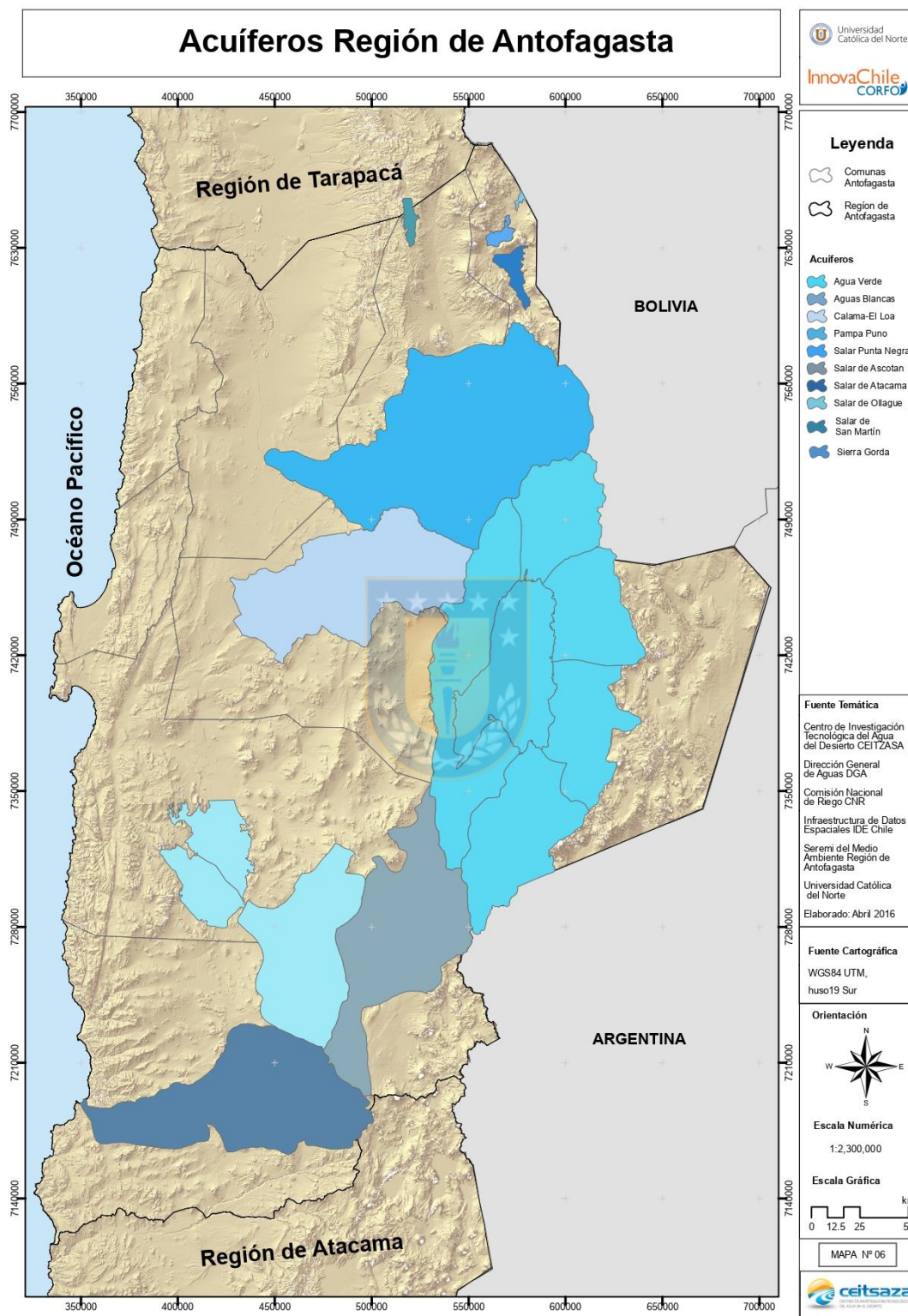


Figura D- 1: mapa de acuíferos en región de Antofagasta [42]

ANEXO E: estaciones meteorológicas y años con estadística de precipitaciones y temperatura

Tabla E- 1: años con estadística de precipitaciones y temperatura [31]

ESTACIÓN	AÑOS CON ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIONES (■) Y TEMPERATURA (■)																				
	1965 a	1969	1970 a	1972	1973	1974	1975 a	1977	1978	1979 a	1988	1989	1990 a	1991	1992 a	1993	1994	1995 a	2001	2002 a	2011
CONCHI VIEJO					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CONCHI MURO EMBALSE									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CHIU CHIU					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AYQUINA		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CALAMA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■



Figura E- 1: estaciones meteorológicas en región de Antofagasta [29]

Tabla E- 2: precipitaciones medias mensuales y anuales (mm) [33]

ESTACIÓN	ALTURA (M)	LONGITUD (°)	LATITUD (°)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	FUENTE	PERIODO
CONCHI VIEJO	3473	-68,73	-21,95	12	16	6	1	0	1	2	1	1	0	0	1	41	DGA	1973-2015
CONCHI MURO EMBALSE	3010	-68,62	-22,03	5	6	4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	19	DGA	1967-2015
CHIUCHIU	2521	-68,64	-22,34	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	DGA	1975-2015
AYQUINA	3006	-68,32	-22,28	11	12	10	0	0	1	0	1	0	0	0	1	37	DGA	1967-2015
CALAMA	2297	-68,91	-22,45	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4	DGA	1965-2015

Fuente: Atlas Agroclimático de Chile, 2017, Tomo I: De Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta.

Tabla E- 3: temperaturas mínimas medias (°C) [33]

ESTACIÓN	ALTURA (M)	LONGITUD	LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	FUENTE	PERIODO
CHIU CHIU	2521	-68,64	22,34	3,9	4,3	3,6	1,9	0,3	-	-	-	0,1	1,1	1,8	2,7	DGA	1979-2015
AYQUINA	3006	-68,32	22,28	6,0	6,3	5,9	5,4	4,9	4,4	3,8	4,4	4,4	4,7	4,6	5,1	DGA	1993-2014
CALAMA	2297	-68,91	22,45	7,3	7,2	6,5	4,9	3,1	1,9	1,1	1,5	2,9	4,1	5,0	6,3	DGA	1964-1994

Tabla E- 4: temperaturas máximas medias (°C) [33]

ESTACIÓN	ALTURA (M)	LONGITUD	LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	FUENTE	PERIODO
CHIU CHIU	2521	-68,64	22,34	23,1	23,2	23,1	22,8	21,8	20,9	20,6	22,1	22,9	23,6	23,6	23,6	DGA	1979-2015
AYQUINA	3006	-68,32	22,28	21,2	20,8	20,4	20,0	17,9	16,8	16,6	18,1	18,8	19,9	20,8	21,4	DGA	1993-2014
CALAMA	2297	-68,91	22,45	23,8	23,9	23,1	22,7	21,8	20,6	20,7	21,3	22,4	23,5	24,0	24,0	DGA	1964-1994

Fuente: atlas agroclimático de Chile, 2017, tomo I: de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta.

ANEXO F: curvas equipotenciales del acuífero inferior (acuífero de Calama)

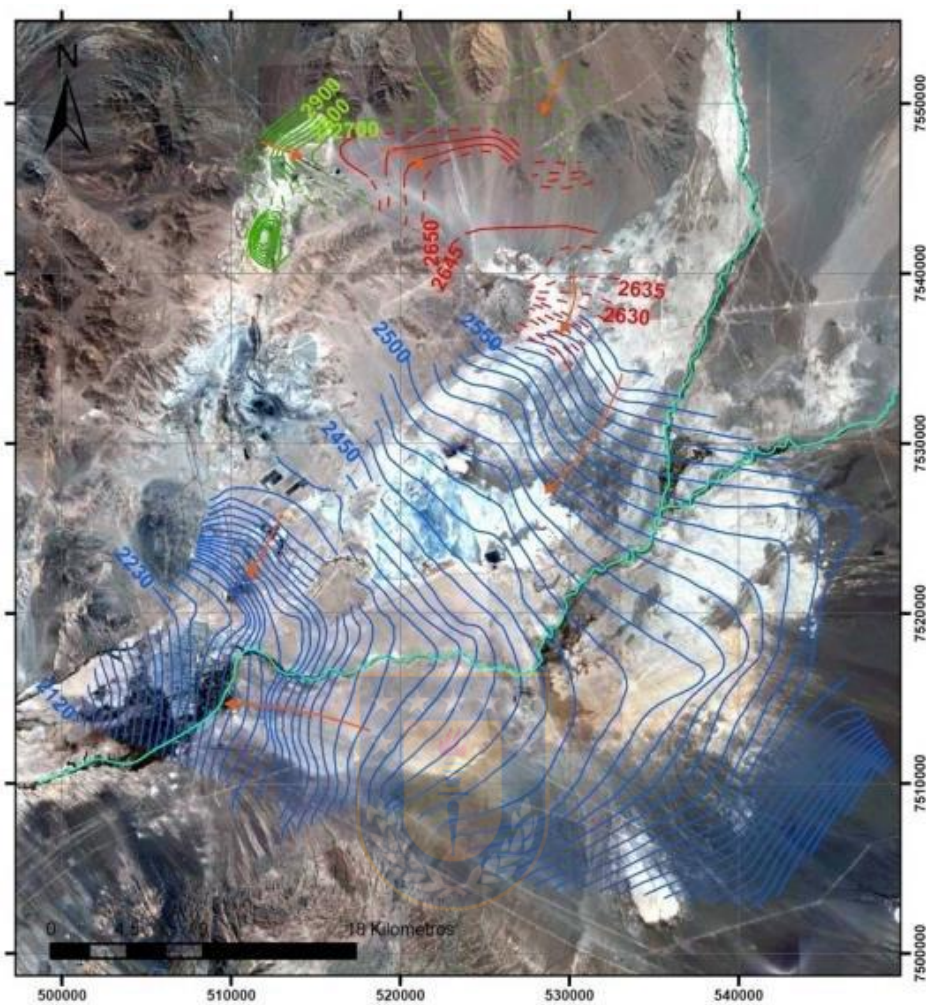


Figura F- 1: curvas equipotenciales del acuífero inferior en sector RT [30]

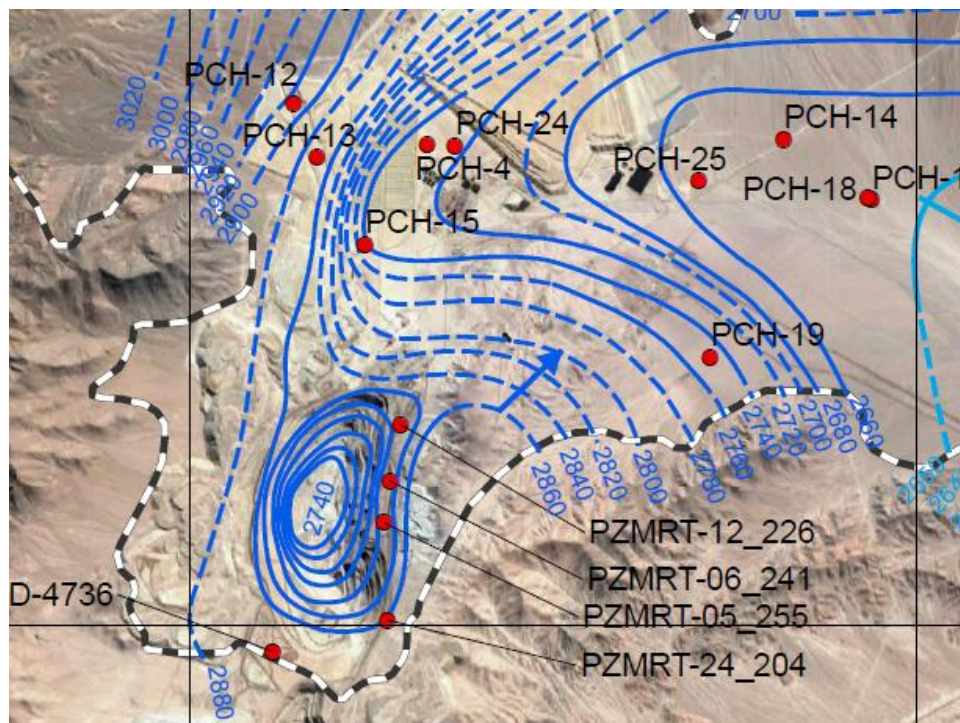


Figura F- 2: curvas equipotenciales sector rajo minero RT [40]

ANEXO G: mapa de micro-cuencas de pampa Cere- RT

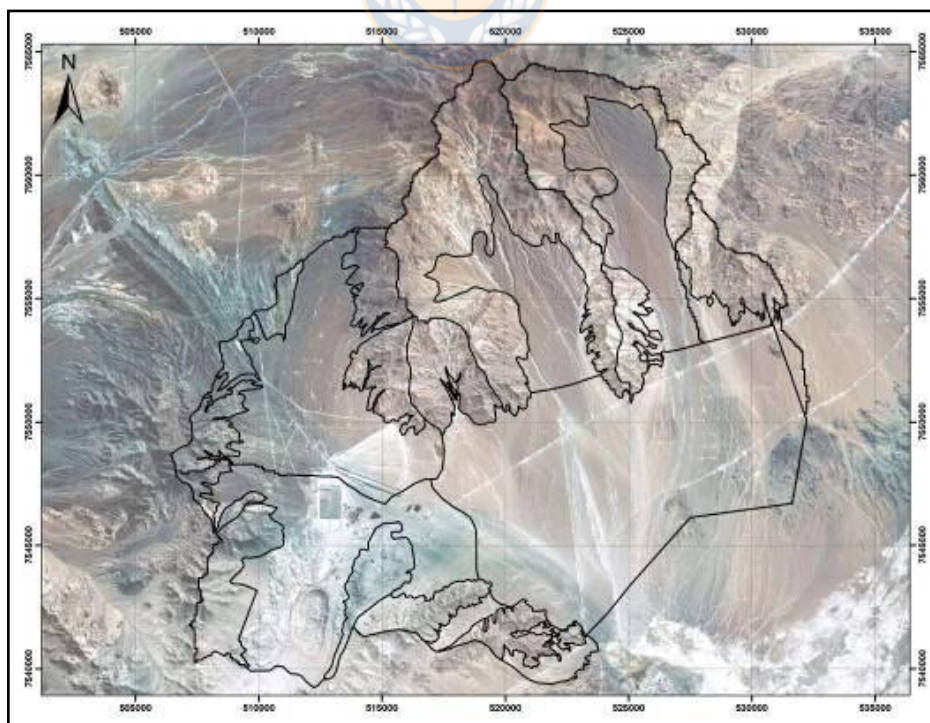


Figura G- 1: mapa de microcuencas de pampa Cere- sector RT [30]

ANEXO H: geomorfología región de Antofagasta y sector Radomiro Tomic

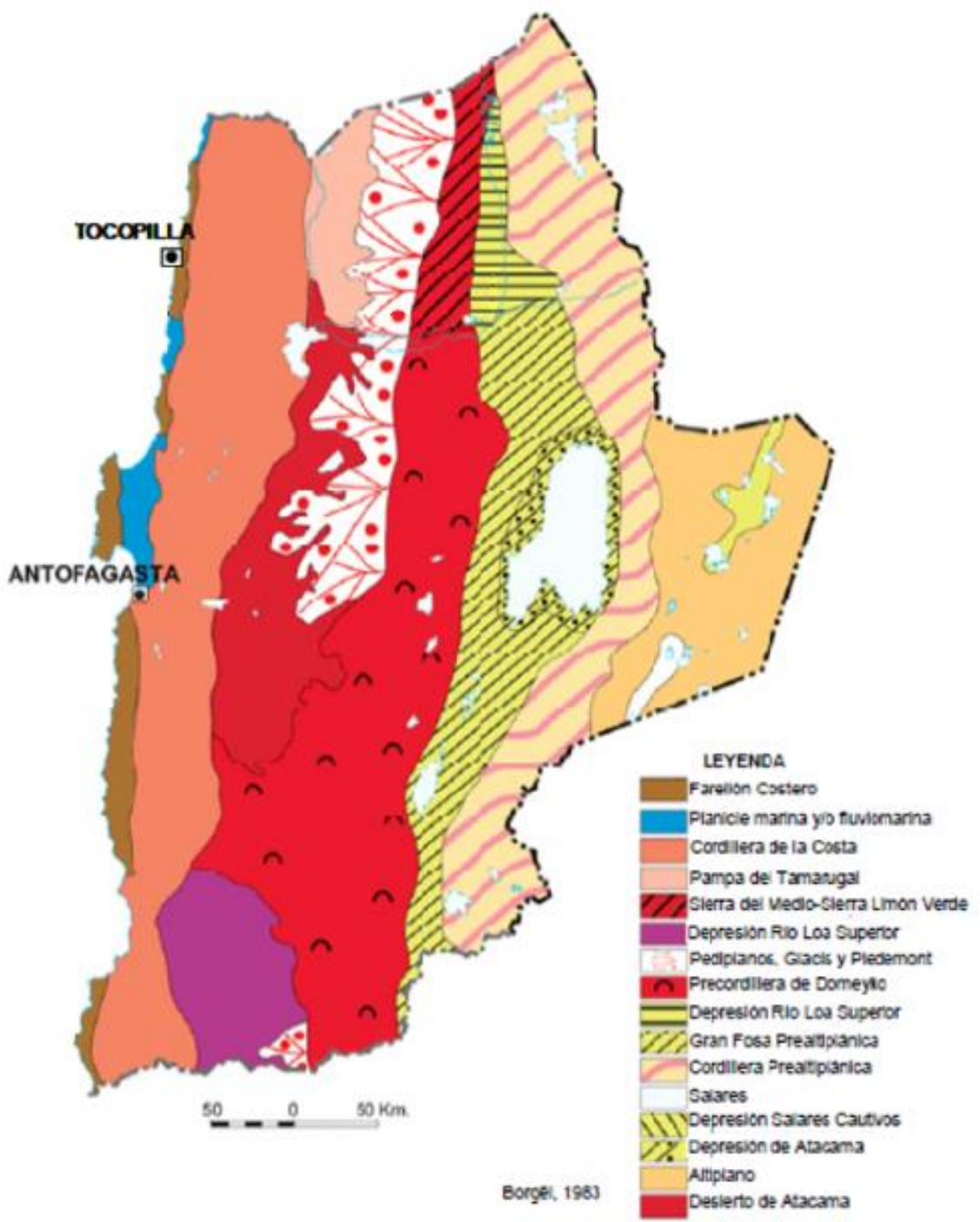


Figura H- 2: geomorfología región de Antofagasta [31]

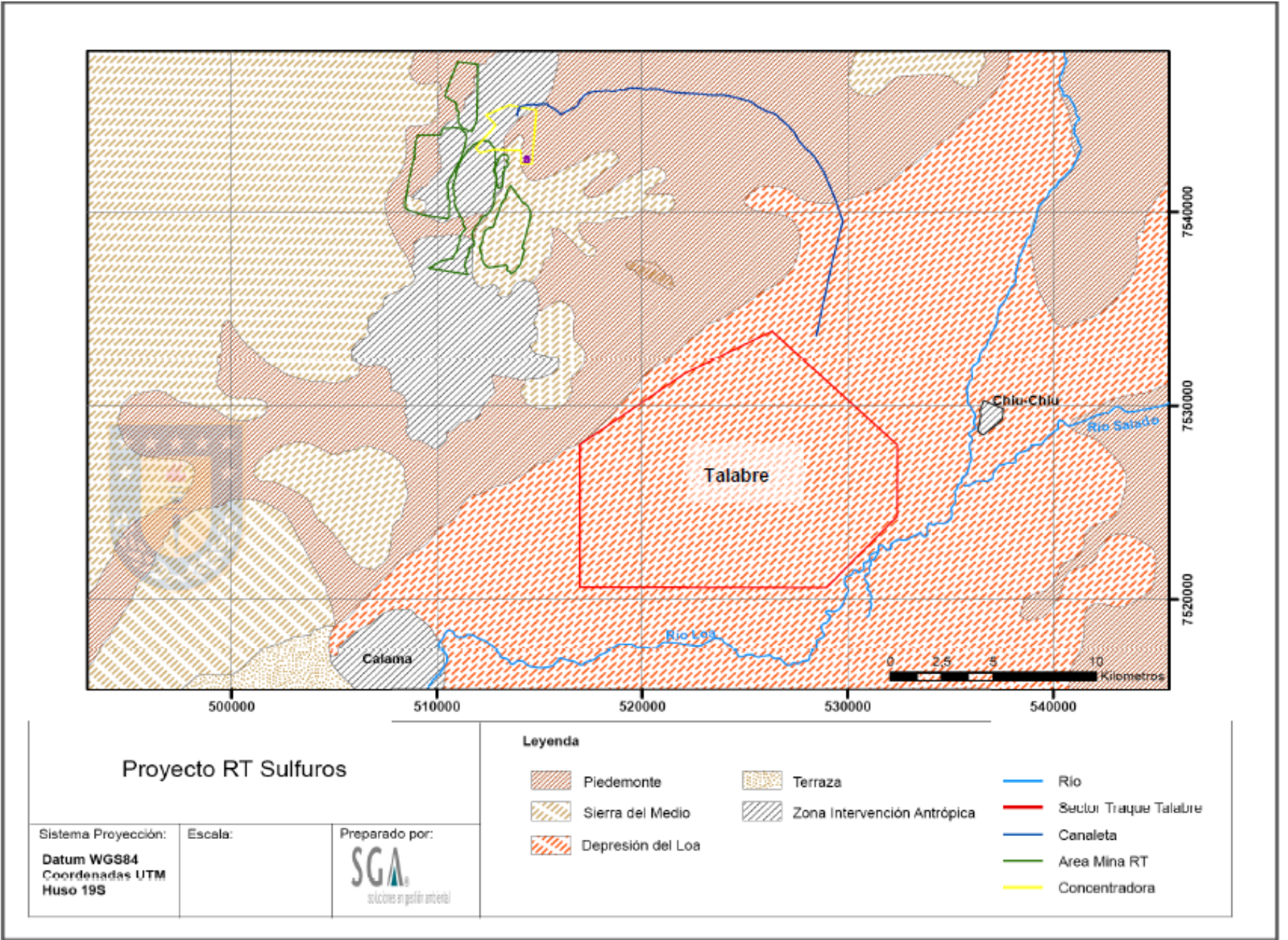


Figura H- 1: Geomorfología sector Mina RT - tranque Talabre [31]

ANEXO I: caudales de drenaje mina Radomiro Tomic

Fecha	RECHARGE IN (l/s)	WELLS IN (l/s)	WELLS OUT (l/s)	STORAGE IN (l/s)	STORAGE OUT (l/s)	CONSTANT HEAD IN (l/s)	CONSTANT HEAD OUT (l/s)	TOTAL IN (l/s)	TOTAL OUT (l/s)	IN - OUT (l/s)	PERCENT DISCREPANCY
01-01-04	0.04	11.55	0.00	49.70	33.16	18.03	46.20	79.32	79.36	-0.04	-0.05
01-02-04	0.03	11.47	0.00	49.38	32.85	18.07	46.13	78.95	78.99	-0.04	-0.05
01-03-04	0.03	11.41	0.00	49.19	32.56	18.10	46.07	78.72	78.64	0.09	0.11
01-04-04	0.03	11.36	0.00	48.81	32.36	18.13	46.01	78.32	78.37	-0.05	-0.06
01-05-04	0.02	11.28	0.00	48.63	32.10	18.16	45.95	78.09	78.05	0.04	0.05
01-06-04	0.02	11.19	0.00	48.32	31.89	18.20	45.89	77.73	77.78	-0.05	-0.07
01-07-04	0.02	11.09	0.00	48.16	31.59	18.23	45.83	77.50	77.42	0.08	0.11
01-08-04	0.02	10.99	0.00	47.88	31.43	18.26	45.77	77.15	77.20	-0.05	-0.06
01-09-04	0.02	10.88	0.00	47.65	31.19	18.29	45.71	76.84	76.90	-0.06	-0.08
01-10-04	0.02	10.78	0.00	47.54	30.92	18.33	45.65	76.66	76.57	0.09	0.12
01-11-04	0.02	10.68	0.00	47.27	30.76	18.36	45.59	76.32	76.35	-0.03	-0.04
01-12-04	0.01	10.58	0.00	47.11	30.50	18.39	45.53	76.09	76.03	0.06	0.08
01-01-05	0.01	10.48	0.00	46.85	30.34	18.43	45.47	75.77	75.81	-0.04	-0.06
01-02-05	0.48	10.91	0.00	45.95	30.36	18.46	45.41	75.80	75.77	0.03	0.04
01-03-05	2.09	12.81	0.00	44.25	32.30	18.48	45.36	77.63	77.67	-0.04	-0.05
01-04-05	3.22	14.22	0.00	43.09	33.70	18.50	45.32	79.03	79.02	0.00	0.00
01-05-05	3.93	15.16	0.00	42.28	34.52	18.52	45.28	79.89	79.80	0.09	0.12
01-06-05	4.30	15.72	0.00	41.60	34.95	18.55	45.24	80.17	80.19	-0.02	-0.03
01-07-05	4.44	16.00	0.00	41.09	35.05	18.57	45.20	80.10	80.25	-0.15	-0.19
01-08-05	4.42	16.08	0.00	40.72	34.78	18.60	45.15	79.82	79.93	-0.11	-0.14
01-09-05	4.29	16.03	0.00	40.57	34.29	18.63	45.10	79.52	79.39	0.14	0.17
01-10-05	4.10	15.89	0.00	40.32	33.89	18.66	45.05	78.97	78.93	0.04	0.05
01-11-05	3.87	15.68	0.00	40.00	33.34	18.70	45.00	78.24	78.33	-0.09	-0.12
01-12-05	3.62	15.43	0.00	39.84	32.68	18.73	44.95	77.62	77.63	-0.01	-0.01
01-01-06	3.36	15.15	0.00	39.67	32.12	18.77	44.89	76.95	77.02	-0.07	-0.09
01-02-06	3.09	14.94	0.00	39.65	31.37	18.81	44.84	76.50	76.21	0.29	0.38
01-03-06	6.67	17.21	0.00	37.29	35.31	18.82	44.82	80.00	80.13	-0.13	-0.16
01-04-06	13.31	21.70	0.00	33.98	43.22	18.80	44.86	87.78	88.08	-0.29	-0.33
01-05-06	17.60	24.77	0.00	32.16	48.17	18.77	44.90	93.30	93.07	0.23	0.25
01-06-06	19.99	26.65	0.00	30.93	51.58	18.75	44.94	96.31	96.52	-0.21	-0.21
01-07-06	21.07	27.68	0.00	30.19	52.68	18.73	44.96	97.67	97.64	0.03	0.03
01-08-06	21.24	28.11	0.00	29.86	53.02	18.73	44.97	97.94	97.99	-0.05	-0.05
01-09-06	20.79	28.12	0.00	29.71	52.48	18.74	44.97	97.35	97.44	-0.10	-0.10
01-10-06	19.95	27.82	0.00	29.89	51.35	18.75	44.95	96.42	96.30	0.12	0.13
01-11-06	18.88	27.33	0.00	29.93	50.26	18.78	44.92	94.92	95.17	-0.25	-0.26
01-12-06	17.68	26.71	0.00	30.34	48.42	18.81	44.88	93.54	93.30	0.25	0.26
01-01-07	16.43	26.01	0.00	30.62	46.97	18.85	44.82	91.90	91.79	0.11	0.12
01-02-07	15.15	25.45	2.00	32.40	45.28	18.89	44.77	91.89	92.05	-0.16	-0.18
01-03-07	13.96	24.71	2.00	32.77	43.60	18.93	44.72	90.37	90.32	0.05	0.06
01-04-07	12.83	23.96	2.00	33.01	42.14	18.98	44.66	88.78	88.80	-0.02	-0.02
01-05-07	11.71	23.21	2.00	33.45	40.64	19.03	44.60	87.41	87.24	0.17	0.19
01-06-07	10.67	22.47	2.00	33.65	39.41	19.08	44.53	85.88	85.94	-0.06	-0.07
01-07-07	9.71	21.76	2.00	34.17	38.12	19.14	44.47	84.78	84.58	0.19	0.23
01-08-07	8.82	21.08	2.00	34.36	37.10	19.19	44.40	83.45	83.50	-0.05	-0.05
01-09-07	7.99	20.42	2.00	34.70	36.07	19.24	44.33	82.35	82.41	-0.05	-0.07
01-10-07	7.24	19.80	2.00	35.10	35.05	19.29	44.27	81.43	81.32	0.11	0.13
01-11-07	6.56	19.21	2.00	35.45	34.20	19.34	44.21	80.56	80.41	0.15	0.19
01-12-07	5.94	18.65	2.00	35.77	33.41	19.39	44.15	79.75	79.55	0.20	0.25
01-01-08	5.38	18.12	2.00	35.84	32.71	19.44	44.08	78.79	78.79	0.00	0.00
01-02-08	4.86	17.61	2.00	36.03	32.00	19.49	44.02	77.99	78.02	-0.03	-0.04
01-03-08	4.41	17.14	2.00	36.27	31.34	19.54	43.96	77.36	77.30	0.05	0.07
01-04-08	4.00	16.70	2.00	36.37	30.77	19.59	43.91	76.65	76.67	-0.02	-0.02
01-05-08	3.62	16.28	2.00	36.68	30.07	19.63	43.85	76.21	75.92	0.29	0.39
01-06-08	3.27	15.88	2.00	36.55	29.73	19.68	43.80	75.39	75.52	-0.13	-0.18
01-07-08	2.96	15.50	2.00	36.74	29.12	19.72	43.75	74.93	74.87	0.07	0.09
01-08-08	2.68	15.15	2.00	36.88	28.66	19.78	43.69	74.49	74.35	0.13	0.18
01-09-08	2.43	14.80	2.00	36.90	28.25	19.82	43.64	73.96	73.89	0.06	0.09
01-10-08	2.20	14.49	2.00	37.01	27.83	19.87	43.60	73.56	73.43	0.14	0.19
01-11-08	1.99	14.19	2.00	36.96	27.40	19.92	43.55	73.06	72.95	0.11	0.15
01-12-08	1.80	13.90	2.00	37.03	27.04	19.96	43.50	72.70	72.55	0.15	0.20
01-01-09	1.63	13.64	2.00	36.99	26.69	20.01	43.46	72.27	72.15	0.12	0.16
01-02-09	1.48	13.78	2.00	36.85	26.78	20.06	43.41	72.16	72.19	-0.03	-0.04
01-03-09	1.35	13.55	2.00	36.96	26.47	20.10	43.37	71.96	71.84	0.12	0.16
01-04-09	1.22	13.33	2.00	36.73	26.18	20.14	43.33	71.43	71.51	-0.08	-0.11
01-05-09	1.11	13.12	2.00	36.78	25.87	20.18	43.29	71.19	71.16	0.03	0.04
01-06-09	1.01	12.91	2.00	36.59	25.70	20.23	43.25	70.74	70.95	-0.21	-0.30
01-07-09	0.91	12.72	2.00	36.66	25.33	20.27	43.21	70.56	70.54	0.03	0.04
01-08-09	0.83	12.54	2.00	36.59	25.07	20.31	43.17	70.28	70.24	0.03	0.05
01-09-09	0.75	12.37	2.00	36.45	24.83	20.35	43.13	69.92	69.96	-0.04	-0.05
01-10-09	0.68	12.21	2.00	36.43	24.57	20.39	43.09	69.70	69.67	0.04	0.05
01-11-09	0.62	12.05	2.00	36.44	24.30	20.43	43.05	69.55	69.35	0.19	0.28
01-12-09	0.56	11.91	2.00	36.42	24.07	20.47	43.01	69.37	69.09	0.28	0.40
01-01-10	0.51	11.77	2.00	36.32	23.86	20.51	42.98	69.11	68.83	0.28	0.40
01-01-11	3.88	15.58	2.00	28.74	24.36	20.85	42.68	69.05	69.04	0.01	0.01
01-01-12	3.88	15.58	2.00	26.82	23.17	21.24	42.33	67.51	67.50	0.01	0.01
01-10-12	3.88	15.58	2.00	25.59	22.48	21.51	42.09	66.56	66.57	-0.02	-0.03
01-01-13	3.88	12.08	2.00	28.23	21.92	21.60	42.01	65.78	65.93	-0.15	-0.22
01-09-13	3.88	12.08	2.00	27.11	21.02	21.83	41.82	64.88	64.83	0.05	0.07



Figura I- 1: caudales de drenaje en mina Radomiro Tomic [42]

Tabla 2.1 Coordenadas de los sondajes de investigación hidrogeológica

Nombre del pozo	Norte*	Este*	Elevación (msnm)	Profundidad perforado (m)	Tipo de habilitación
PB-1	10139,48	3614,32	2690	131	Pozo de monitoreo, habilitado con PVC de 2,5"
PB-2	10387,72	3575,84	2690	220	Pozo de monitoreo, habilitado con PVC de 2,5"
PB-3	10619,65	3601,98	2690	200	Pozo de bombeo, habilitado con PVC de 6"
PB-4	10810,10	3672,46	2704	159	Pozo de monitoreo, habilitado con PVC de 2,5"
PB-5	10645,81	3606,97	2692	170	Pozo de bombeo, habilitado con PVC de 6"

Nota: *coordenadas mina.

Figura I- 2: coordenadas de sondajes de investigación hidrogeológica en piso del rajo RT [34]

Tabla 3.2 Resultados del desarrollo

Pozo de bombeo	Duración del desarrollo (minutos)	Caudal estimado (l/s)	Comentarios
PB-03	2670	1,0	Caudal estable.
PB-05	30	0,06	

Figura I- 3: resultados de desarrollo y caudal estimado de pozos de bombeo en rajo RT [34]

ANEXO J: pozos de observación de nivel piezométrico en sector mina Radomiro Tomic

Tabla J- 1: sondajes alrededor del rajo [9]

Nombre	Coord. Este	Coord. Norte	Cota superficie	Sector	Profundidad al agua	Nivel Piezométrico
PZMRT-09	3282,0	11727,0	2.966,1	Oeste	61,79	2904,3
PZMRT-10	3181,0	11997,6	2.963,2	Oeste	42,36	2920,8
PZMRT-12	4710,9	11689,3	3.007,8	Este	170,92	2836,9
PZMRT-14	2861,5	10006,7	2.998,6	Oeste	88,72	2909,9
PZMRT-17	4999,3	9500,5	3.064,1	Este	213,39	2850,7
PZMRT-19	3344,1	9270,5	2.987,3	Sur	147,29	2840,0
PZMRT-20	3997,8	8578,4	3.008,6	Sur	203,74	2804,9
PZMRT-21	4701,9	8783,4	3.045,9	Sur	184,54	2861,4
PZMRT-22	3021,1	10858,7	2.983,3	Oeste	124,01	2859,3
PZMRT-23	3134,5	9109,2	2.992,8	Sur	127,09	2865,8
PZMRT-24	4980,0	9000,0	3.065,0	Este	-	-
PZMRT1	3889,6	11821,3	2.962,6	Norte	117,08	2845,5
PZMRT2A	3094,3	11480,9	2.972,1	Oeste	91,26	2880,9
PZMRT3	2930,7	10365,6	2.991,7	Oeste	100,60	2891,1
PZMRT4A	3770,8	9047,0	2.995,9	Sur	143,17	2852,7
PZMRT5	4701,6	10357,6	3.034,7	Este	189,39	2845,3
PZMRT6	4695,7	10895,3	3.025,8	Este	175,57	2850,3

Tabla J- 2: sondajes dentro del rajo [9]

Nombre	Coord. Este	Coord. Norte	Cota del anillo	Sector	Profundidad al agua	Nivel Piezométrico
PZMRT7A	3767,3	10217,9	2.705,1	Piso rajo	-21,14	2726,3
PZMRT8	4067,5	11355,6	2.735,1	Piso rajo	-35,36	2770,5
PZMRT-11	3871,2	11427,0	2.749,4	Piso rajo	-5,41	2754,8
PZMRT-13	4078,3	11114,5	2.734,8	Piso rajo	-19,89	2754,7
PZMRT-15	3919,0	10813,0	2.696,9	Piso rajo	-22,12	2719,1
PZMRT-16	3197,5	10031,7	2.970,1	Oeste	134,35	2835,6
PZMRT-18	4065,4	11350,3	2.735,2	Piso rajo	-34,74	2769,9

ANEXO K: parámetros geométricos de rajo minero Radomiro Tomic

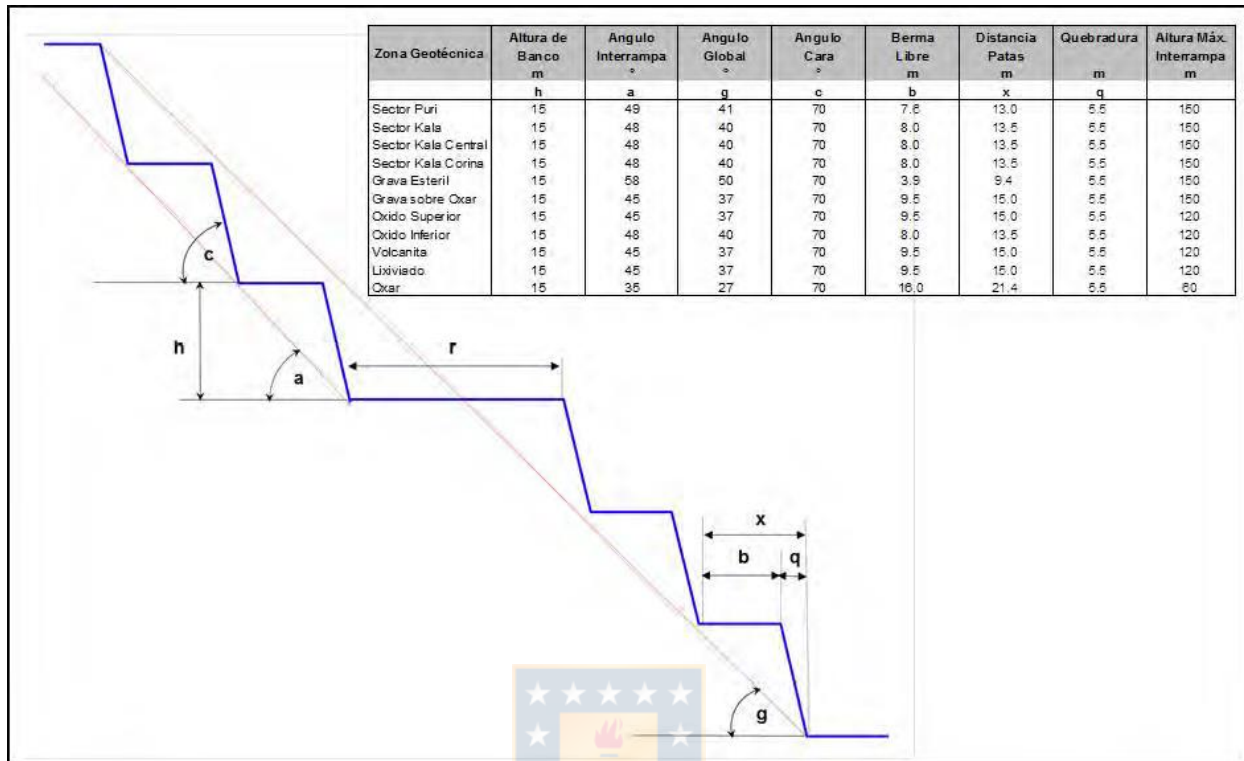


Figura K- 1: parámetros geotécnicos y de diseño minero de rajo abierto Radomiro Tomic [43]

Los principales parámetros utilizados en el diseño de fases son los siguientes:

- Bancos de 15 m de altura.
- En los inicios y términos de las rampas, los bancos serán cerrados.
- Radio de giro mínimo 17m.
- El largo de rampa es medido en el borde de menor longitud.
- Todos los bancos tienen acceso por la rampa principal (no se consideran rampas auxiliares).
- Bermas de seguridad abiertas. Ancho mínimo de conexión a rampa de 15m.
- Se consideran vías de escape interior mina (coincidentes con las bermas de seguridad).
- El cierre de fases se diseña en escalera, evitando con esto los cierres angostos.

ANEXO L: metadatos de modelo digital de elevaciones

Tabla L- 1: metadatos del modelo digital de elevaciones [39]

Data Set Attribute	Attribute Value
<u>Entity ID</u>	SRTM1S23W069V3
<u>Acquisition Date</u>	2000-02-11 00:00:00-06
<u>Publication Date</u>	2014-09-23 00:00:00-05
<u>Resolution</u>	1-ARC
<u>Date Updated</u>	
<u>NW Corner Lat</u>	22°00'00"S
<u>NW Corner Long</u>	69°00'00"W
<u>NE Corner Lat</u>	22°00'00"S
<u>NE Corner Long</u>	68°00'00"W
<u>SE Corner Lat</u>	23°00'00"S
<u>SE Corner Long</u>	68°00'00"W
<u>SW Corner Lat</u>	23°00'00"S
<u>SW Corner Long</u>	69°00'00"W
<u>NW Corner Lat dec</u>	-22
<u>NW Corner Long dec</u>	-69
<u>NE Corner Lat dec</u>	-22
<u>NE Corner Long dec</u>	-68
<u>SE Corner Lat dec</u>	-23
<u>SE Corner Long dec</u>	-68
<u>SW Corner Lat dec</u>	-23
<u>SW Corner Long dec</u>	-69

ANEXO M: configuración de interpolación por kriging en FEPEST

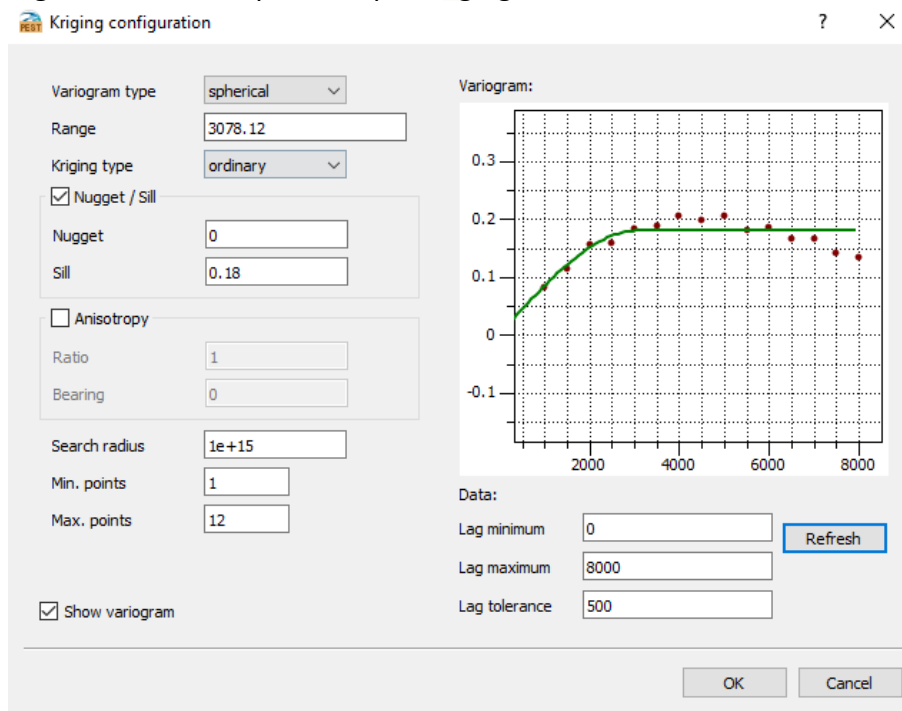


Figura M- 1: configuración de interpolación por kriging en FEPEST

ANEXO N: información de entrada en series de simulación

Tabla N- 1: datos de entrada para simulaciones en serie 1

Variable	Caudal Drenaje (m ³ /d)	Dominio (m/d)	CC2BO (m ³ /d)	CC1BN (m)	CC2BC (m ³ /d)	CC1BE (m)	CC2BM (m ³ /d)
Rango				2700 - 2920			
SERIE 1							
Simulación							
S1HO_P2700_0001DOM	0	0.001	0	2700	0	2665	0
S2HO_P2720_0001DOM	0	0.001	0	2720	0	2665	0
S3HO_P2740_0001DOM	0	0.001	0	2740	0	2665	0
S4HO_P2760_0001DOM	0	0.001	0	2760	0	2665	0
S5HO_P2780_0001DOM	0	0.001	0	2780	0	2665	0
S6HO_P2800_0001DOM	0	0.001	0	2800	0	2665	0
S7HO_P2820_0001DOM	0	0.001	0	2820	0	2665	0
S8HO_P2840_0001DOM	0	0.001	0	2840	0	2665	0
S9HO_P2860_0001DOM	0	0.001	0	2860	0	2665	0
S10HO_P2880_0001DOM	0	0.001	0	2880	0	2665	0
S11HO_P2900_0001DOM	0	0.001	0	2900	0	2665	0
S12HO_P2920_0001DOM	0	0.001	0	2920	0	2665	0

Tabla N- 2: datos de entrada para simulaciones en serie 2

Variable	Caudal Drenaje (m ³ /d)	Dominio (m/d)	CC2BO (m ³ /d)	CC1BN (m)	CC2BC (m ³ /d)	CC1BE (m)	CC2BM (m ³ /d)
Rango		10 ⁻⁵ - 25		2760-2920			
SERIE 2							
Simulación							
S1HOB_P2760_001DOM	172.8	0.01	0	2760	0	2665	0
S2HOB_P2760_01DOM	172.8	0.1	0	2760	0	2665	0
S3HOB_P2760_1DOM	172.8	1	0	2760	0	2665	0
S4HOB_P2780_001DOM	172.8	0.01	0	2780	0	2665	0
S5HOB_P2780_01DOM	172.8	0.1	0	2780	0	2665	0
S6HOB_P2780_1DOM	172.8	1	0	2780	0	2665	0
S7HOB_P2800_001DOM	172.8	0.01	0	2800	0	2665	0
S8HOB_P2800_01DOM	172.8	0.1	0	2800	0	2665	0
S9HOB_P2800_1DOM	172.8	1	0	2800	0	2665	0
S10HOB_P2820_001DOM	172.8	0.01	0	2820	0	2665	0
S11HOB_P2820_01DOM	172.8	0.1	0	2820	0	2665	0
S12HOB_P2820_1DOM	172.8	1	0	2820	0	2665	0
S13HOB_P2840_001DOM	172.8	0.01	0	2840	0	2665	0
S14HOB_P2840_01DOM	172.8	0.1	0	2840	0	2665	0
S15HOB_P2840_1DOM	172.8	1	0	2840	0	2665	0
S16HOB_P2860_001DOM	172.8	0.01	0	2860	0	2665	0
S17HOB_P2860_01DOM	172.8	0.1	0	2860	0	2665	0
S18HOB_P2860_1DOM	172.8	1	0	2860	0	2665	0
S19HOB_P2880_001DOM	172.8	0.01	0	2880	0	2665	0
S20HOB_P2880_01DOM	172.8	0.1	0	2880	0	2665	0
S21HOB_P2880_1DOM	172.8	1	0	2880	0	2665	0
S22HOB_P2900_001DOM	172.8	0.01	0	2900	0	2665	0
S23HOB_P2900_01DOM	172.8	0.1	0	2900	0	2665	0
S24HOB_P2900_1DOM	172.8	1	0	2900	0	2665	0
S25HOB_P2920_001DOM	172.8	0.01	0	2920	0	2665	0

S26HOB_P2920_01DOM	172.8	0.1	0	2920	0	2665	0
S27HOB_P2920_1DOM	172.8	1	0	2920	0	2665	0

Tabla N- 3: datos de entrada para simulaciones en serie 3

Variable	Caudal Drenaje (m ³ /d)	UH-5 (m/d)	UH-6 (m/d)	CC2BO (m ³ /d)	CC1BN (m)	CC2BC (m ³ /d)	CC1BE (m)	CC2BM (m ³ /d)
Rango								
SERIE 3								
Simulación								
S24HE_P2920_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2920	0	2665	0
S29HE_P2920_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2920	0	2665	0
S30HE_P2920_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2920	0	2665	0
S31HE_P2920_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2920	0	2665	0
S32HE_P2920_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2920	0	2665	0
S33HE_P2920_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2920	0	2665	0
S34HE_P2920_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2920	0	2665	0
S35HE_P2920_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2920	0	2665	0
S36HE_P2920_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2920	0	2665	0
S37HE_P2920_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2920	0	2665	0
S24HE_P2900_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2900	0	2665	0
S29HE_P2900_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2900	0	2665	0
S30HE_P2900_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2900	0	2665	0
S31HE_P2900_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2900	0	2665	0
S32HE_P2900_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2900	0	2665	0
S33HE_P2900_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2900	0	2665	0
S34HE_P2900_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2900	0	2665	0
S35HE_P2900_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2900	0	2665	0
S36HE_P2900_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2900	0	2665	0
S37HE_P2900_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2900	0	2665	0
S24HE_P2880_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2880	0	2665	0
S29HE_P2880_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2880	0	2665	0
S30HE_P2880_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2880	0	2665	0
S31HE_P2880_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2880	0	2665	0
S32HE_P2880_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2880	0	2665	0
S33HE_P2880_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2880	0	2665	0
S34HE_P2880_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2880	0	2665	0
S35HE_P2880_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2880	0	2665	0
S36HE_P2880_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2880	0	2665	0
S37HE_P2880_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2880	0	2665	0
S19HE_P2860_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2860	0	2665	0
S24HE_P2860_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2860	0	2665	0
S29HE_P2860_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2860	0	2665	0
S30HE_P2860_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2860	0	2665	0
S31HE_P2860_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2860	0	2665	0
S32HE_P2860_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2860	0	2665	0
S33HE_P2860_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2860	0	2665	0
S34HE_P2860_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2860	0	2665	0
S35HE_P2860_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2860	0	2665	0
S36HE_P2860_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2860	0	2665	0
S37HE_P2860_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2860	0	2665	0
S19HE_P2840_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2840	0	2665	0
S24HE_P2840_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2840	0	2665	0
S29HE_P2840_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2840	0	2665	0
S30HE_P2840_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2840	0	2665	0

S31HE_P2840_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2840	0	2665	0
S32HE_P2840_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2840	0	2665	0
S33HE_P2840_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2840	0	2665	0
S34HE_P2840_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2840	0	2665	0
S35HE_P2840_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2840	0	2665	0
S36HE_P2840_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2840	0	2665	0
S37HE_P2840_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2840	0	2665	0
S19HE_P2820_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2820	0	2665	0
S24HE_P2820_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2820	0	2665	0
S29HE_P2820_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2820	0	2665	0
S30HE_P2820_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2820	0	2665	0
S31HE_P2820_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2820	0	2665	0
S32HE_P2820_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2820	0	2665	0
S33HE_P2820_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2820	0	2665	0
S34HE_P2820_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2820	0	2665	0
S35HE_P2820_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2820	0	2665	0
S36HE_P2820_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2820	0	2665	0
S37HE_P2820_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2820	0	2665	0
S19HE_P2800_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2800	0	2665	0
S24HE_P2800_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2800	0	2665	0
S29HE_P2800_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2800	0	2665	0
S30HE_P2800_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2800	0	2665	0
S31HE_P2800_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2800	0	2665	0
S32HE_P2800_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2800	0	2665	0
S33HE_P2800_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2800	0	2665	0
S34HE_P2800_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2800	0	2665	0
S35HE_P2800_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2800	0	2665	0
S36HE_P2800_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2800	0	2665	0
S37HE_P2800_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2800	0	2665	0
S13HE_P2780_1UHA_01UHB	0	1	0.1	0	2780	0	2665	0
S19HE_P2780_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2780	0	2665	0
S24HE_P2780_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2780	0	2665	0
S25HE_P2780_001UHA_0001UHB	0	0.01	0.001	0	2780	0	2665	0
S29HE_P2780_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2780	0	2665	0
S30HE_P2780_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2780	0	2665	0
S31HE_P2780_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2780	0	2665	0
S32HE_P2780_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2780	0	2665	0
S33HE_P2780_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2780	0	2665	0
S34HE_P2780_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2780	0	2665	0
S35HE_P2780_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2780	0	2665	0
S36HE_P2780_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2780	0	2665	0
S37HE_P2780_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2780	0	2665	0
S13HE_P2760_1UHA_01UHB	0	1	0.1	0	2760	0	2665	0
S19HE_P2760_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2760	0	2665	0
S24HE_P2760_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2760	0	2665	0
S25HE_P2760_001UHA_0001UHB	0	0.01	0.001	0	2760	0	2665	0
S29HE_P2760_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2760	0	2665	0
S30HE_P2760_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2760	0	2665	0
S31HE_P2760_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2760	0	2665	0
S32HE_P2760_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2760	0	2665	0
S33HE_P2760_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2760	0	2665	0
S34HE_P2760_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2760	0	2665	0
S35HE_P2760_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2760	0	2665	0
S36HE_P2760_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2760	0	2665	0
S37HE_P2760_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2760	0	2665	0
S13HE_P2740_1UHA_01UHB	0	1	0.1	0	2740	0	2665	0
S19HE_P2740_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2740	0	2665	0
S24HE_P2740_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2740	0	2665	0

S25HE_P2740_001UHA_0001UHB	0	0.01	0.001	0	2740	0	2665	0
S29HE_P2740_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2740	0	2665	0
S30HE_P2740_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2740	0	2665	0
S31HE_P2740_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2740	0	2665	0
S32HE_P2740_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2740	0	2665	0
S33HE_P2740_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2740	0	2665	0
S34HE_P2740_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2740	0	2665	0
S35HE_P2740_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2740	0	2665	0
S36HE_P2740_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2740	0	2665	0
S37HE_P2740_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2740	0	2665	0
S7HE_P2720_5UHA_01UHB	0	5	0.1	0	2720	0	2665	0
S13HE_P2720_1UHA_01UHB	0	1	0.1	0	2720	0	2665	0
S14HE_P2720_1UHA_001UHB	0	1	0.01	0	2720	0	2665	0
S19HE_P2720_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2720	0	2665	0
S20HE_P2720_01UHA_0001UHB	0	0.1	0.001	0	2720	0	2665	0
S24HE_P2720_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2720	0	2665	0
S25HE_P2720_001UHA_0001UHB	0	0.01	0.001	0	2720	0	2665	0
S29HE_P2720_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2720	0	2665	0
S30HE_P2720_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2720	0	2665	0
S31HE_P2720_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2720	0	2665	0
S32HE_P2720_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2720	0	2665	0
S33HE_P2720_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2720	0	2665	0
S34HE_P2720_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2720	0	2665	0
S35HE_P2720_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2720	0	2665	0
S36HE_P2720_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2720	0	2665	0
S37HE_P2720_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2720	0	2665	0
S1HE_P2700_10UHA_01UHB	0	10	0.1	0	2700	0	2665	0
S7HE_P2700_5UHA_01UHB	0	5	0.1	0	2700	0	2665	0
S8HE_P2700_5UHA_001UHB	0	5	0.01	0	2700	0	2665	0
S13HE_P2700_1UHA_01UHB	0	1	0.1	0	2700	0	2665	0
S14HE_P2700_1UHA_001UHB	0	1	0.01	0	2700	0	2665	0
S15HE_P2700_1UHA_0001UHB	0	1	0.001	0	2700	0	2665	0
S19HE_P2700_01UHA_001UHB	0	0.1	0.01	0	2700	0	2665	0
S20HE_P2700_01UHA_0001UHB	0	0.1	0.001	0	2700	0	2665	0
S24HE_P2700_001UHA_01UHB	0	0.01	0.1	0	2700	0	2665	0
S25HE_P2700_001UHA_0001UHB	0	0.01	0.001	0	2700	0	2665	0
S29HE_P2700_0001UHA_01UHB	0	0.001	0.1	0	2700	0	2665	0
S30HE_P2700_0001UHA_001UHB	0	0.001	0.01	0	2700	0	2665	0
S31HE_P2700_00001UHA_01UHB	0	0.0001	0.1	0	2700	0	2665	0
S32HE_P2700_00001UHA_001UHB	0	0.0001	0.01	0	2700	0	2665	0
S33HE_P2700_00001UHA_0001UHB	0	0.0001	0.001	0	2700	0	2665	0
S34HE_P2700_000001UHA_01UHB	0	0.00001	0.1	0	2700	0	2665	0
S35HE_P2700_000001UHA_001UHB	0	0.00001	0.01	0	2700	0	2665	0
S36HE_P2700_000001UHA_0001UHB	0	0.00001	0.001	0	2700	0	2665	0
S37HE_P2700_000001UHA_00001UHB	0	0.00001	0.0001	0	2700	0	2665	0

Tabla N- 4: datos de entrada para simulaciones en serie 4

Variable	Bombeo (m3/d)	UH-5	UH-6	CC2BO (m3/d)	CC1BN (m)	CC2BC (m3/d)	CC1BE (m)	CC2BM (m3/d)
Rango								
SERIE 4								
Simulación								
S24HEB_P2920_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2920	0	2665	0
S29HEB_P2920_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2920	0	2665	0

S30HEB_P2920_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2920	0	2665	0
S31HEB_P2920_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2920	0	2665	0
S32HEB_P2920_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2920	0	2665	0
S34HEB_P2920_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2920	0	2665	0
S35HEB_P2920_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2920	0	2665	0
S24HEB_P2900_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2900	0	2665	0
S29HEB_P2900_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2900	0	2665	0
S30HEB_P2900_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2900	0	2665	0
S31HEB_P2900_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2900	0	2665	0
S32HEB_P2900_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2900	0	2665	0
S34HEB_P2900_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2900	0	2665	0
S35HEB_P2900_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2900	0	2665	0
S24HEB_P2880_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2880	0	2665	0
S29HEB_P2880_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2880	0	2665	0
S30HEB_P2880_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2880	0	2665	0
S31HEB_P2880_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2880	0	2665	0
S32HEB_P2880_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2880	0	2665	0
S34HEB_P2880_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2880	0	2665	0
S35HEB_P2880_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2880	0	2665	0
S24HEB_P2860_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2860	0	2665	0
S29HEB_P2860_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2860	0	2665	0
S30HEB_P2860_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2860	0	2665	0
S31HEB_P2860_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2860	0	2665	0
S32HEB_P2860_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2860	0	2665	0
S34HEB_P2860_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2860	0	2665	0
S35HEB_P2860_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2860	0	2665	0
S19HEB_P2840_01UHA_001UHB	172.8	0.1	0.01	0	2840	0	2665	0
S24HEB_P2840_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2840	0	2665	0
S29HEB_P2840_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2840	0	2665	0
S30HEB_P2840_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2840	0	2665	0
S31HEB_P2840_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2840	0	2665	0
S32HEB_P2840_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2840	0	2665	0
S34HEB_P2840_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2840	0	2665	0
S35HEB_P2840_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2840	0	2665	0
S19HEB_P2820_01UHA_001UHB	172.8	0.1	0.01	0	2820	0	2665	0
S24HEB_P2820_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2820	0	2665	0
S29HEB_P2820_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2820	0	2665	0
S30HEB_P2820_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2820	0	2665	0
S31HEB_P2820_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2820	0	2665	0
S32HEB_P2820_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2820	0	2665	0
S34HEB_P2820_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2820	0	2665	0
S35HEB_P2820_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2820	0	2665	0
S13HEB_P2800_1UHA_01UHB	172.8	1	0.1	0	2800	0	2665	0
S19HEB_P2800_01UHA_001UHB	172.8	0.1	0.01	0	2800	0	2665	0
S24HEB_P2800_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2800	0	2665	0
S29HEB_P2800_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2800	0	2665	0
S30HEB_P2800_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2800	0	2665	0
S31HEB_P2800_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2800	0	2665	0

S32HEB_P2800_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2800	0	2665	0
S34HEB_P2800_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2800	0	2665	0
S35HEB_P2800_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2800	0	2665	0
S13HEB_P2800_1UHA_01UHB	172.8	1	0.1	0	2800	0	2665	0
S19HEB_P2800_01UHA_001UHB	172.8	0.1	0.01	0	2800	0	2665	0
S24HEB_P2780_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2780	0	2665	0
S29HEB_P2780_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2780	0	2665	0
S30HEB_P2780_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2780	0	2665	0
S31HEB_P2780_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2780	0	2665	0
S32HEB_P2780_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2780	0	2665	0
S34HEB_P2780_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2780	0	2665	0
S35HEB_P2780_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2780	0	2665	0
S13HEB_P2760_1UHA_01UHB	172.8	1	0.1	0	2760	0	2665	0
S19HEB_P2760_01UHA_001UHB	172.8	0.1	0.01	0	2760	0	2665	0
S24HE_P2760_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2760	0	2665	0
S29HE_P2760_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2760	0	2665	0
S30HEB_P2760_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2760	0	2665	0
S31HE_P2760_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2760	0	2665	0
S32HEB_P2760_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2760	0	2665	0
S34HE_P2760_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2760	0	2665	0
S35HEB_P2760_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2760	0	2665	0
S13HEB_P2748_1UHA_01UHB	172.8	1	0.1	0	2748	0	2665	0
S19HEB_P2748_01UHA_001UHB	172.8	0.1	0.01	0	2748	0	2665	0
S24HEB_P2748_001UHA_01UHB	172.8	0.01	0.1	0	2748	0	2665	0
S29HEB_P2748_0001UHA_01UHB	172.8	0.001	0.1	0	2748	0	2665	0
S30HEB_P2748_0001UHA_001UHB	172.8	0.001	0.01	0	2748	0	2665	0
S31HEB_P2748_00001UHA_01UHB	172.8	0.0001	0.1	0	2748	0	2665	0
S32HEB_P2748_00001UHA_001UHB	172.8	0.0001	0.01	0	2748	0	2665	0
S34HEB_P2748_000001UHA_01UHB	172.8	0.00001	0.1	0	2748	0	2665	0
S35HEB_P2748_000001UHA_001UHB	172.8	0.00001	0.01	0	2748	0	2665	0

ANEXO O: resultados de series de simulación

Tabla O- 1: datos de salida en simulaciones de serie 1

Variable	Nivel Piezométrico Rajo (m)
SERIE 1	
Simulación	
S1HO_P2700_0001DOM	2691.2
S2HO_P2720_0001DOM	2706.48
S3HO_P2740_0001DOM	2721.67
S4HO_P2760_0001DOM	2737.58
S5HO_P2780_0001DOM	2752.82
S6HO_P2800_0001DOM	2768.58
S7HO_P2820_0001DOM	2784.44
S8HO_P2840_0001DOM	2800.39
S9HO_P2860_0001DOM	2816.43
S10HO_P2880_0001DOM	2832.54
S11HO_P2900_0001DOM	2848.72
S12HO_P2920_0001DOM	2866.49

Tabla O- 2: datos de salida en simulaciones de serie 2

Variable	Nivel Piezométrico Rajo (m)	Caudal CC1BN (m ³ /d)	Caudal CC1BE (m ³ /d)	Caudal Entrada Rajo (m ³ /d)	Caudal Salida Rajo (m ³ /d)	Caudal Entrada Piso (m ³ /d)	Caudal Salida Piso (m ³ /d)
SERIE 2							
Simulación							
S1HOB_P2760_001DOM	2601.27	354.20	-181.40	172.86	0.00	172.75	0.00
S2HOB_P2760_01DOM	2727.14	2396.1	-2223	263.31	-90.51	201.25	-28.454
S3HOB_P2760_1DOM	2736.61	22813	-22640	1741.4	-1568.6	1113.9	-941.14
S4HOB_P2780_001DOM	2620.4	410.74	-237.94	172.85	0	172.82	0
S5HOB_P2780_01DOM	2743.79	2961.5	-2788.7	300.75	-127.96	221.05	-48.253
S6HOB_P2780_1DOM	2752.41	28467	-28294	2134.5	-1961.8	1342	-1169.2
S7HOB_P2800_001DOM	2648.93	470.31	-297.52	172.85	-0.0054466	172.86	-0.060476
S8HOB_P2800_01DOM	2759.85	3557.3	-3384.5	339.55	-166.76	242.78	-69.985
S9HOB_P2800_1DOM	2768.32	34424	-34252	2541.2	-2368.4	1573.8	-1401
S10HOB_P2820_001DOM	2669.97	532.96	-360.17	172.84	-0.03826	172.94	-0.14087
S11HOB_P2820_01DOM	2774.15	4183.5	-4010.7	380.15	-207.35	265.37	-92.571
S12HOB_P2820_1DOM	2784.15	40689	-40516	2961	-2788.2	1809	-1636.2
S13HOB_P2840_001DOM	2690.31	598.67	-425.87	173.02	-0.22322	173.03	-0.23107
S14HOB_P2840_01DOM	2790.39	4840.7	-4667.9	422.55	-249.76	288.52	-115.72
S15HOB_P2840_1DOM	2800.26	47257	-47085	3392.5	-3219.7	2047.3	-1874.5
S16HOB_P2860_001DOM	2707.98	667.39	-494.59	173.25	-0.43751	173.13	-0.32575
S17HOB_P2860_01DOM	2806.71	5527.8	-5355	466.19	-293.39	312.26	-139.46
S18HOB_P2860_1DOM	2816.45	54132	-53960	3835.7	-3662.9	2289	-2116.2
S19HOB_P2880_001DOM	2725.61	739.17	-566.37	173.49	-0.68607	173.22	-0.42486
S20HOB_P2880_01DOM	2823.08	6245.7	-6072.9	511.29	-338.49	336.4	-163.6
S21HOB_P2880_1DOM	2832.72	61312	-61137	4289.6	-4116.8	2533.4	-2360.6
S22HOB_P2900_001DOM	2743.18	813.99	-641.22	173.89	-1.073	173.34	-0.5392
S23HOB_P2900_01DOM	2839.56	6991.3	-6819.7	557.15	-384.39	360.67	-187.87
S24HOB_P2900_1DOM	2849.06	68793	-68621	4751.2	-4578.4	2780.14	-2607.6
S25HOB_P2920_001DOM	2760.71	891.91	-719.11	174.41	-1.6092	173.52	-0.71886
S26HOB_P2920_01DOM	2856.05	7769.8	-7598.4	604.23	-431.46	385.35	-212.55
S27HOB_P2920_1DOM	2865.44	76583	-76410	5223	-5050.2	3030.3	-2857.5

Tabla O- 3: datos de salida en simulaciones de Serie 3

Variable	Nivel Piezométrico Rajo (m)
SERIE 3	
Simulación	
S24HE_P2920_001UHA_01UHB	2846.02
S29HE_P2920_0001UHA_01UHB	2840.04
S30HE_P2920_0001UHA_001UHB	2846.02
S31HE_P2920_00001UHA_01UHB	2839.38
S32HE_P2920_00001UHA_001UHB	2840.04
S33HE_P2920_00001UHA_0001UHB	2846.02
S34HE_P2920_000001UHA_01UHB	2839.32
S35HE_P2920_000001UHA_001UHB	2839.38
S36HE_P2920_000001UHA_0001UHB	2840.04
S37HE_P2920_000001UHA_00001UHB	2846.02
S24HE_P2900_001UHA_01UHB	2832.28
S29HE_P2900_0001UHA_01UHB	2827.20
S30HE_P2900_0001UHA_001UHB	2832.28
S31HE_P2900_00001UHA_01UHB	2826.65
S32HE_P2900_00001UHA_001UHB	2827.20
S33HE_P2900_00001UHA_0001UHB	2832.28
S34HE_P2900_000001UHA_01UHB	2826.59
S35HE_P2900_000001UHA_001UHB	2826.65
S36HE_P2900_000001UHA_0001UHB	2827.20
S37HE_P2900_000001UHA_00001UHB	2832.28
S24HE_P2880_001UHA_01UHB	2818.52
S29HE_P2880_0001UHA_01UHB	2814.27
S30HE_P2880_0001UHA_001UHB	2818.52
S31HE_P2880_00001UHA_01UHB	2813.81
S32HE_P2880_00001UHA_001UHB	2814.27
S33HE_P2880_00001UHA_0001UHB	2818.52
S34HE_P2880_000001UHA_01UHB	2813.76
S35HE_P2880_000001UHA_001UHB	2813.81
S36HE_P2880_000001UHA_0001UHB	2814.27
S37HE_P2880_000001UHA_00001UHB	2818.52
S19HE_P2860_01UHA_001UHB	2842.46
S24HE_P2860_001UHA_01UHB	2804.73
S29HE_P2860_0001UHA_01UHB	2801.24
S30HE_P2860_0001UHA_001UHB	2804.73
S31HE_P2860_00001UHA_01UHB	2800.87
S32HE_P2860_00001UHA_001UHB	2801.24
S33HE_P2860_00001UHA_0001UHB	2804.73
S34HE_P2860_000001UHA_01UHB	2800.02
S35HE_P2860_000001UHA_001UHB	2800.87
S36HE_P2860_000001UHA_0001UHB	2801.24
S37HE_P2860_000001UHA_00001UHB	2804.73
S19HE_P2840_01UHA_001UHB	2823.7
S24HE_P2840_001UHA_01UHB	2790.90
S29HE_P2840_0001UHA_01UHB	2788.10
S30HE_P2840_0001UHA_001UHB	2790.90
S31HE_P2840_00001UHA_01UHB	2787.81
S32HE_P2840_00001UHA_001UHB	2788.10
S33HE_P2840_00001UHA_0001UHB	2790.90
S34HE_P2840_000001UHA_01UHB	2787.78
S35HE_P2840_000001UHA_001UHB	2787.81

S36HE_P2840_000001UHA_0001UHB	2788.10
S37HE_P2840_000001UHA_0001UHB	2790.90
S19HE_P2820_01UHA_001UHB	2805.01
S24HE_P2820_001UHA_01UHB	2777.01
S29HE_P2820_0001UHA_01UHB	2774.84
S30HE_P2820_0001UHA_001UHB	2777.01
S31HE_P2820_00001UHA_01UHB	2774.62
S32HE_P2820_00001UHA_001UHB	2774.84
S33HE_P2820_00001UHA_0001UHB	2777.01
S34HE_P2820_000001UHA_01UHB	2774.59
S35HE_P2820_000001UHA_001UHB	2774.62
S36HE_P2820_000001UHA_0001UHB	2774.84
S37HE_P2820_000001UHA_0001UHB	2777.01
S19HE_P2800_01UHA_001UHB	2786.28
S24HE_P2800_001UHA_01UHB	2761.45
S29HE_P2800_0001UHA_01UHB	2761.45
S30HE_P2800_0001UHA_001UHB	2763.06
S31HE_P2800_00001UHA_01UHB	2761.28
S32HE_P2800_00001UHA_001UHB	2761.45
S33HE_P2800_00001UHA_0001UHB	2763.06
S34HE_P2800_000001UHA_01UHB	2761.26
S35HE_P2800_000001UHA_001UHB	2761.28
S36HE_P2800_000001UHA_0001UHB	2761.45
S37HE_P2800_000001UHA_0001UHB	2763.06
S13HE_P2780_1UHA_01UHB	2771.48
S19HE_P2780_01UHA_001UHB	2771.48
S24HE_P2780_001UHA_01UHB	2749.04
S25HE_P2780_001UHA_0001UHB	2771.50
S29HE_P2780_0001UHA_01UHB	2747.90
S30HE_P2780_0001UHA_001UHB	2749.03
S31HE_P2780_00001UHA_01UHB	2747.79
S32HE_P2780_00001UHA_001UHB	2747.90
S33HE_P2780_00001UHA_0001UHB	2749.03
S34HE_P2780_000001UHA_01UHB	2747.77
S35HE_P2780_000001UHA_001UHB	2747.79
S36HE_P2780_000001UHA_0001UHB	2747.90
S37HE_P2780_000001UHA_0001UHB	2749.03
S13HE_P2760_1UHA_01UHB	2752.63
S19HE_P2760_01UHA_001UHB	2752.63
S24HE_P2760_001UHA_01UHB	2734.91
S25HE_P2760_001UHA_0001UHB	2752.63
S29HE_P2760_0001UHA_01UHB	2734.19
S30HE_P2760_0001UHA_001UHB	2734.91
S31HE_P2760_00001UHA_01UHB	2734.11
S32HE_P2760_00001UHA_001UHB	2734.19
S33HE_P2760_00001UHA_0001UHB	2734.91
S34HE_P2760_000001UHA_01UHB	2734.10
S35HE_P2760_000001UHA_001UHB	2734.11
S36HE_P2760_000001UHA_0001UHB	2734.19
S37HE_P2760_000001UHA_0001UHB	2734.91
S13HE_P2740_1UHA_01UHB	2733.71
S19HE_P2740_01UHA_001UHB	2733.70
S24HE_P2740_001UHA_01UHB	2720.67
S25HE_P2740_001UHA_0001UHB	2733.70
S29HE_P2740_0001UHA_01UHB	2720.30
S30HE_P2740_0001UHA_001UHB	2720.67
S31HE_P2740_00001UHA_01UHB	2720.22
S32HE_P2740_00001UHA_001UHB	2720.30

S33HE_P2740_00001UHA_0001UHB	2720.67
S34HE_P2740_000001UHA_01UHB	2720.22
S35HE_P2740_000001UHA_001UHB	2720.22
S36HE_P2740_000001UHA_0001UHB	2720.30
S37HE_P2740_000001UHA_00001UHB	2720.67
S7HE_P2720_5UHA_01UHB	2717.80
S13HE_P2720_1UHA_01UHB	2714.50
S14HE_P2720_1UHA_001UHB	2718.23
S19HE_P2720_01UHA_001UHB	2714.50
S20HE_P2720_01UHA_0001UHB	2718.43
S24HE_P2720_001UHA_01UHB	2706.28
S25HE_P2720_001UHA_0001UHB	2714.50
S29HE_P2720_0001UHA_01UHB	2706.11
S30HE_P2720_0001UHA_001UHB	2706.28
S31HE_P2720_00001UHA_01UHB	2706.09
S32HE_P2720_00001UHA_001UHB	2706.11
S33HE_P2720_00001UHA_0001UHB	2706.28
S34HE_P2720_000001UHA_01UHB	2706.09
S35HE_P2720_000001UHA_001UHB	2706.09
S36HE_P2720_000001UHA_0001UHB	2706.11
S37HE_P2720_000001UHA_00001UHB	2706.28
S1HE_P2700_10UHA_01UHB	2698.62
S7HE_P2700_5UHA_01UHB	2697.60
S8HE_P2700_5UHA_001UHB	2699.48
S13HE_P2700_1UHA_01UHB	2693.95
S14HE_P2700_1UHA_001UHB	2698.62
S15HE_P2700_1UHA_0001UHB	2699.70
S19HE_P2700_01UHA_001UHB	2693.95
S20HE_P2700_01UHA_0001UHB	2698.62
S24HE_P2700_001UHA_01UHB	2691.62
S25HE_P2700_001UHA_0001UHB	2693.95
S29HE_P2700_0001UHA_01UHB	2691.59
S30HE_P2700_0001UHA_001UHB	2691.62
S31HE_P2700_00001UHA_01UHB	2691.59
S32HE_P2700_00001UHA_001UHB	2691.59
S33HE_P2700_00001UHA_0001UHB	2691.62
S34HE_P2700_000001UHA_01UHB	2691.59
S35HE_P2700_000001UHA_001UHB	2691.59
S36HE_P2700_000001UHA_0001UHB	2691.59
S37HE_P2700_000001UHA_00001UHB	2691.62

Tabla O- 4: datos de salida en simulaciones de serie 4

Variable	Nivel Piezométrico Rajo (m)	Caudal CC1BN (m ³ /d)	Caudal CC1BE (m ³ /d)	Caudal Entrada Rajo (m ³ /d)	Caudal Salida Rajo (m ³ /d)	Caudal Entrada Piso (m ³ /d)	Caudal Salida Piso (m ³ /d)
SERIE 4							
Simulación							
S24HEB_P2920_001UHA_01UHB	2837.33	6154.4	-5981.6	563.22	-390.42	420.39	-247.59
S29HEB_P2920_0001UHA_01UHB	2834.67	5980.5	-5807.7	557.16	-384.36	419.46	-246.66
S30HEB_P2920_0001UHA_001UHB	2731.95	724.52	-551.72	173.38	-0.57721	172.8	0
S31HEB_P2920_00001UHA_01UHB	2834.39	5962.9	-5790.1	556.52	-383.72	419.33	-246.53
S32HEB_P2920_00001UHA_001UHB	2727.9	706.6	-533.8	173.31	-0.50823	172.8	0
S34HEB_P2920_000001UHA_01UHB	2834.36	5961.2	-5788.4	556.45	-383.65	419.32	-246.52
S35HEB_P2920_000001UHA_001UHB	2727.49	704.79	-531.99	173.3	-0.50154	172.8	0
S24HEB_P2900_001UHA_01UHB	2823.18	5646.1	-5473.3	522.21	-349.41	392.07	-219.27
S29HEB_P2900_0001UHA_01UHB	2820.92	5501.7	-5329	517.06	-344.26	391.3	-218.5
S30HEB_P2900_0001UHA_001UHB	2717.36	674.12	-501.32	173.22	-0.41866	172.8	0

S31HEB_P2900_00001UHA_01UHB	2820.68	5487.2	-5314.4	516.54	-343.74	391.21	-218.41
S32HEB_P2900_00001UHA_001UHB	2713.83	659.2	-486.4	173.16	-0.36498	172.8	0
S34HEB_P2900_000001UHA_01UHB	2820.66	5485.7	-5312.9	516.49	-343.69	391.2	-218.4
S35HEB_P2900_000001UHA_001UHB	2713.47	657.69	-484.89	173.16	-0.35958	172.8	0
S24HEB_P2880_001UHA_01UHB	2809	5143.3	-4970.5	481.88	-309.08	364.16	-191.36
S29HEB_P2880_0001UHA_01UHB	2807.1	5025.5	-4852.7	477.79	304.99	363.53	-190.73
S30HEB_P2880_0001UHA_001UHB	2702.71	624.31	-451.48	173.07	-0.26631	172.8	0
S31HEB_P2880_00001UHA_01UHB	2806.9	5013.6	-4840.8	477.36	-304.56	363.46	-190.66
S32HEB_P2880_00001UHA_001UHB	2699.68	612.08	-439.28	173.02	-0.22374	172.8	0
S34HEB_P2880_000001UHA_01UHB	2806.88	5012.4	-4839.6	477.32	-304.52	363.45	-190.65
S35HEB_P2880_000001UHA_001UHB	2699.36	610.85	-438.05	173.02	-0.21948	172.8	0
S24HEB_P2860_001UHA_01UHB	2794.77	4645.8	-4473	442.43	-269.63	337	-164.2
S29HEB_P2860_0001UHA_01UHB	2793.2	439.17	-266.37	439.17	-266.37	336.62	-163.82
S30HEB_P2860_0001UHA_001UHB	2687.91	575.01	-402.22	172.92	-0.11817	172.8	0
S31HEB_P2860_00001UHA_01UHB	2793.04	4542.4	-4369.6	438.83	-266.03	336.57	-163.77
S32HEB_P2860_00001UHA_001UHB	2684.99	565.24	-392.44	172.88	-0.084602	172.8	0
S34HEB_P2860_000001UHA_01UHB	2793.03	4541.5	-4368.7	438.8	-266	336.56	-163.76
S35HEB_P2860_000001UHA_001UHB	2684.69	564.26	-391.46	172.88	-0.081221	172.8	0
S19HEB_P2840_01UHA_001UHB	2747.79	1182.5	-998.37	175.92	-3.1126	172.81	-0.013932
S24HEB_P2840_001UHA_01UHB	2780.49	4153.9	-3981.1	403.7	-230.9	310.5	-137.7
S29HEB_P2840_0001UHA_01UHB	2779.23	4081.1	-3908.3	401.2	-228.4	310.19	-137.39
S30HEB_P2840_0001UHA_001UHB	2671.08	526.33	-353.53	172.8	-0.0027247	172.8	0
S31HEB_P2840_00001UHA_01UHB	2779.1	4073.7	-3900.9	400.94	-228.14	310.16	-137.36
S32HEB_P2840_00001UHA_001UHB	2668.58	518.71	-345.91	172.8	-0.00025542	172.8	0
S34HEB_P2840_000001UHA_01UHB	2766.37	1657.30	-1484.5	222.62	-49.82	188.56	-15.76
S35HEB_P2840_000001UHA_001UHB	2668.3	517.95	-345.15	172.8	-0.00002537	172.8	0
S19HEB_P2820_01UHA_001UHB	2727.63	976.44	-803.64	174.49	-1.687	172.81	-0.0050279
S24HEB_P2820_001UHA_01UHB	2766.17	3667.7	-3494.9	366.02	-193.22	284.76	-111.96
S29HEB_P2820_0001UHA_01UHB	2765.18	3613.2	-3440.4	364.19	-191.39	284.49	-111.69
S30HEB_P2820_0001UHA_001UHB	2653.86	478.23	-305.43	172.8	-0.0010199	172.8	0
S31HEB_P2820_00001UHA_01UHB	2765.08	3607.7	-3434.9	364	-191.2	284.46	-111.66
S32HEB_P2820_00001UHA_001UHB	2651.64	472.51	-299.71	172.8	0.00009253	172.8	0
S34HEB_P2820_000001UHA_01UHB	2765.07	3607.2	-3434.4	363.98	-191.18	284.45	-111.65
S35HEB_P2820_000001UHA_001UHB	2651.41	471.93	-299.13	172.8	9.1625E-06	172.8	0
S13HEB_P2800_1UHA_01UHB	2778.41	6641.6	-6468.9	393.29	-220.48	226.8	-53.995
S19HEB_P2800_01UHA_001UHB	2707	793.56	-620.76	173.63	-0.81815	172.8	0
S24HEB_P2800_001UHA_01UHB	2751.79	3187.3	-3014.5	329.2	-156.4	259.48	-86.684
S29HEB_P2800_0001UHA_01UHB	2751.04	3148.4	-2975.6	327.85	-155.05	259.28	-86.477
S30HEB_P2800_0001UHA_001UHB	2632.8	430.75	-257.95	172.8	0	172.8	0
S31HEB_P2800_00001UHA_01UHB	2750.96	3144.5	-2971.7	327.71	-154.91	259.25	-86.453
S32HEB_P2800_00001UHA_001UHB	2630.68	426.64	-253.84	172.8	0	172.8	0
S34HEB_P2800_000001UHA_01UHB	2750.95	3144.1	-2971.3	327.7	-154.9	259.25	-86.451
S35HEB_P2800_000001UHA_001UHB	2630.59	426.23	-253.43	172.8	0	172.8	0
S13HEB_P2800_1UHA_01UHB	2759.47	5046.3	-4873.4	336.77	-163.96	212.27	-39.472
S19HEB_P2800_01UHA_001UHB	2683.59	633.16	-460.36	173.16	-0.34054	172.8	0
S24HEB_P2780_001UHA_01UHB	2737.34	2712.8	-2540	293.31	-120.51	234.7	-61.9
S29HEB_P2780_0001UHA_01UHB	2736.81	2686.8	-2514	292.37	-119.57	234.54	-61.741
S30HEB_P2780_0001UHA_001UHB	2602.89	383.9	-211.1	172.8	0	172.8	0
S31HEB_P2780_00001UHA_01UHB	2736.75	2684.2	-2511.4	282.28	-119.48	234.52	-61.723
S32HEB_P2780_00001UHA_001UHB	2600.69	381.13	-208.33	172.8	0	172.8	0
S34HEB_P2780_000001UHA_01UHB	2736.75	2684	-2511.2	292.27	-119.47	234.52	-61.721
S35HEB_P2780_000001UHA_001UHB	2600.46	380.85	-208.05	172.8	0	172.8	0
S13HEB_P2760_1UHA_01UHB	2740.42	3677.2	-3504.4	285.46	-112.65	199.42	-26.617
S19HEB_P2760_01UHA_001UHB	2657.37	494.83	-322.03	172.86	-0.060377	172.8	-0.0032276
S24HE_P2760_001UHA_01UHB	2722.84	2244.5	-2071.6	258.37	-85.574	210.86	-38.064
S29HE_P2760_0001UHA_01UHB	2722.48	2228.7	-2055.9	257.79	-84.995	210.73	-37.932
S30HEB_P2760_0001UHA_001UHB	2532.76	337.68	-164.88	172.8	-0.00009936	172.8	0

S31HE_P2760_00001UHA_01UHB	2722.44	2227.1	-2054.3	257.74	-84.937	210.72	-37.919
S32HEB_P2760_00001UHA_001UHB	2530.8	335.99	-163.19	172.8	-0.00001888	172.8	0
S34HE_P2760_000001UHA_01UHB	2722.44	2227	-2054.2	257.73	-84.931	210.72	-37.917
S35HEB_P2760_000001UHA_001UHB	2531.05	335.82	-163.02	172.8	-1.3786E-06	172.8	0
S13HEB_P2748_1UHA_01UHB	2725.21	3152.2	-2979.4	291.41	-118.61	207.81	-35.012
S19HEB_P2748_01UHA_001UHB	2625.81	415.6	-242.81	172.8	0	172.8	0
S24HEB_P2748_001UHA_01UHB	2713.25	1939.6	-1766.8	236.29	-63.495	196.44	-23.642
S29HEB_P2748_0001UHA_01UHB	2712.99	1929.2	-1756.4	235.89	-63.092	196.33	-23.533
S30HEB_P2748_0001UHA_001UHB	2502.53	307.62	-134.82	172.8	0	172.8	0
S31HEB_P2748_00001UHA_01UHB	2712.97	1928.1	-1755.3	235.85	-63.052	196.32	-23.522
S32HEB_P2748_00001UHA_001UHB	2501.23	306.5	-133.7	172.8	0	172.8	0
S34HEB_P2748_000001UHA_01UHB	2712.97	1928	-1755.2	235.85	-63.047	196.32	-23.52
S35HEB_P2748_000001UHA_001UHB	2501.84	306.39	-133.59	172.8	0	172.8	0



ANEXO P: direcciones de flujo en modelos de simulación

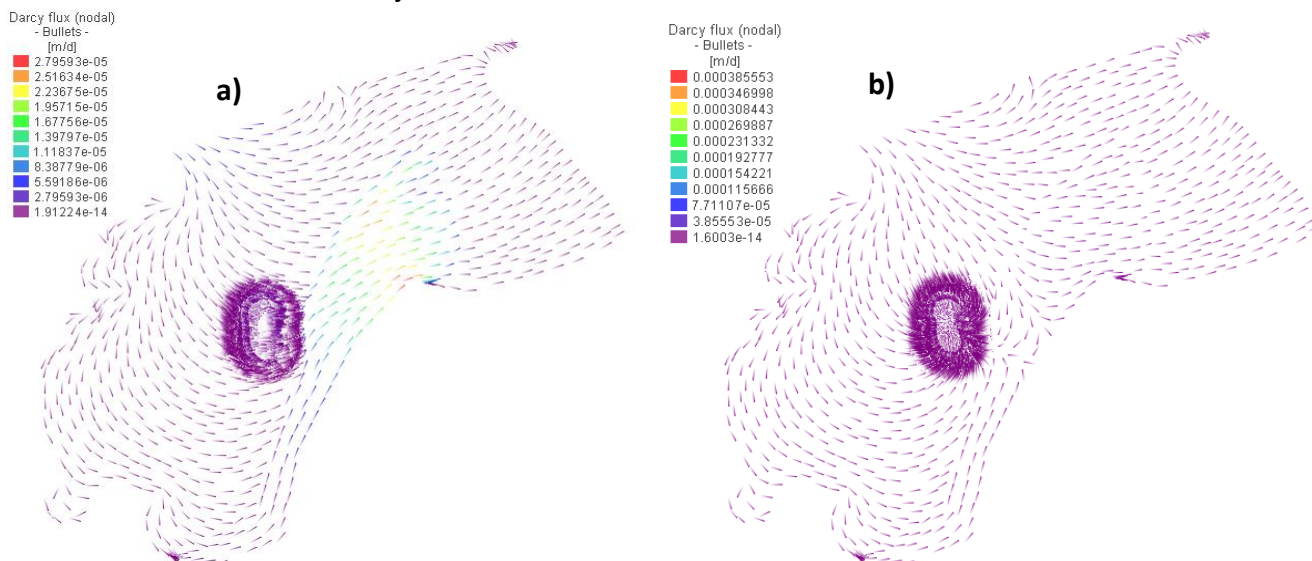


Figura P- 1: direcciones de flujo en modelo heterogéneo: a) sin bombeo; b) con bombeo

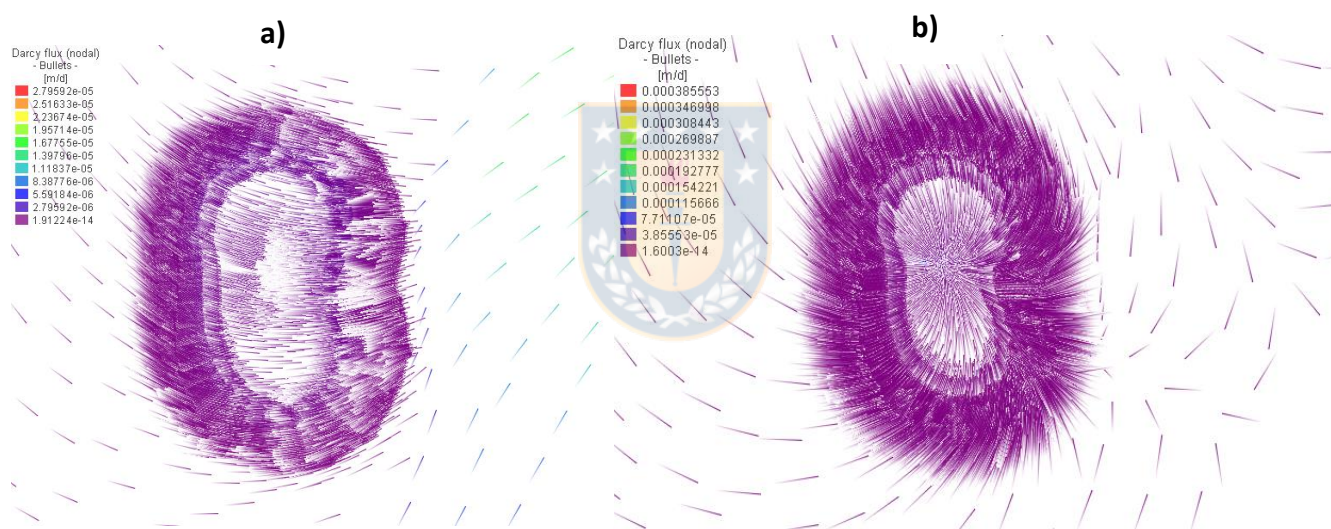


Figura P- 2: direcciones de flujo en modelo heterogéneo (vista rajo RT): a) sin bombeo; b) con bombeo

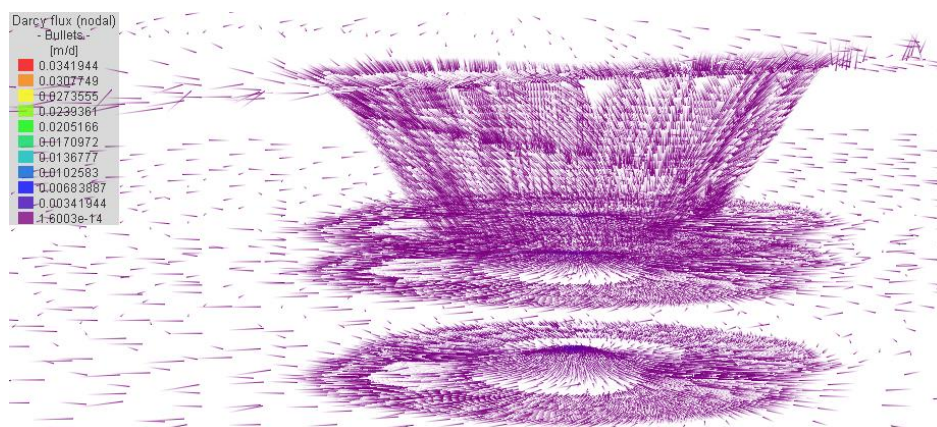


Figura P- 3: direcciones de flujo en modelo heterogéneo con bombeo (vista 3D en dirección Norte-Sur)

Modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea

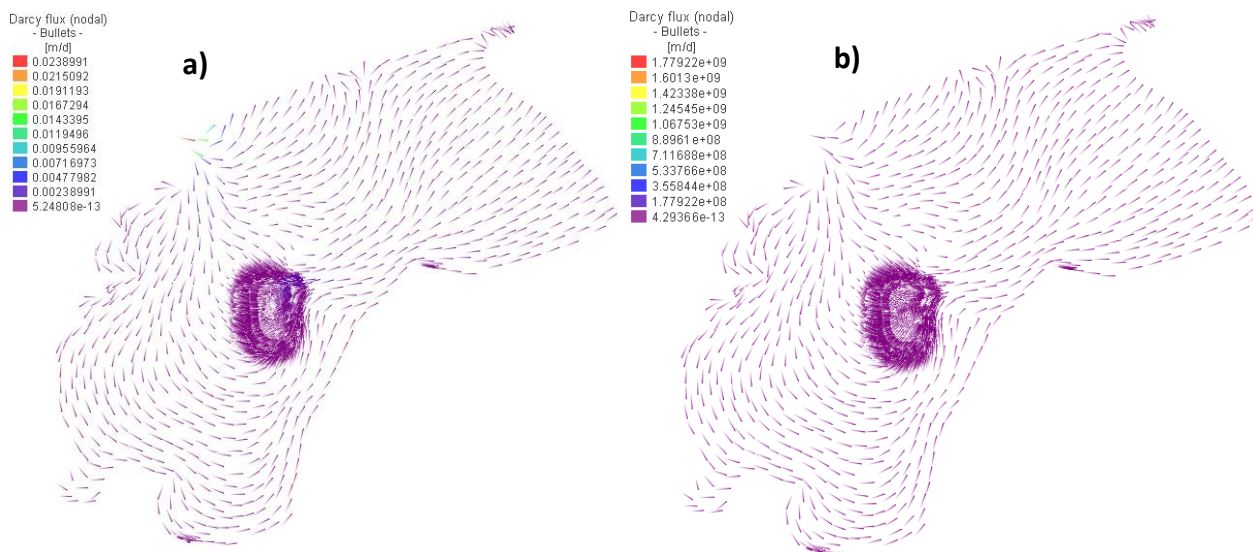


Figura P- 6: direcciones de flujo en modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea: a) sin bombeo; b) con bombeo

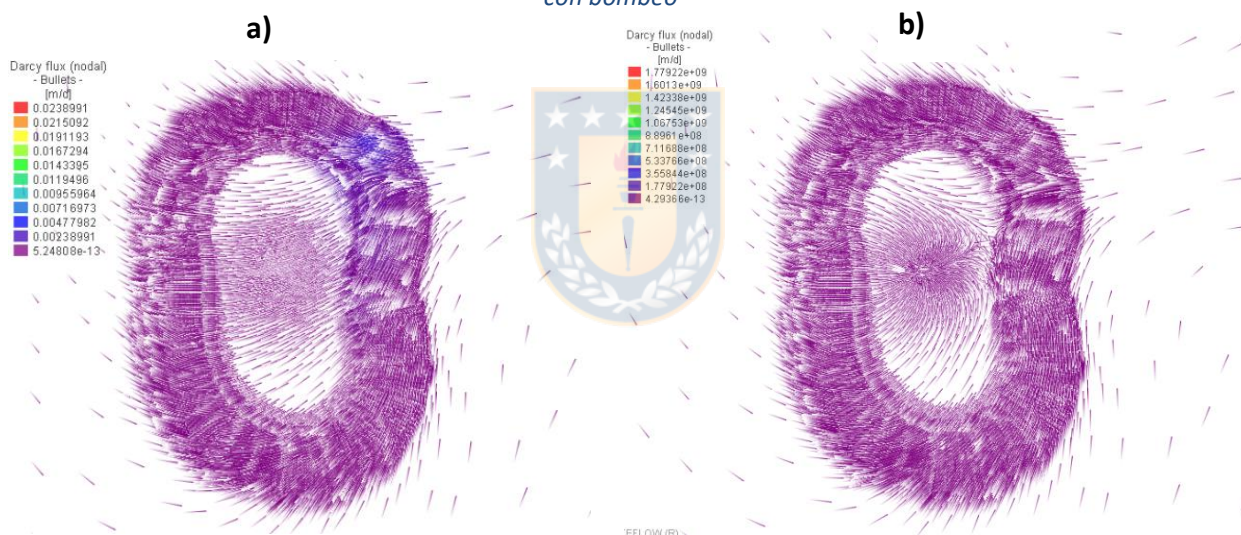


Figura P- 5: direcciones de flujo en modelo heterogéneo (vista rajo RT): a) sin bombeo; b) con bombeo

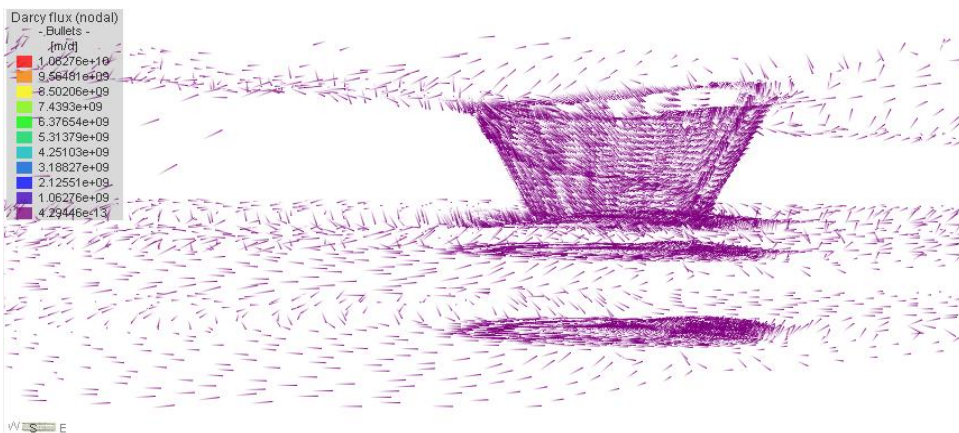


Figura P- 4: direcciones de flujo en modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea con bombeo (vista 3D en dirección Norte-Sur)

ANEXO Q: resultados distribución espacial de niveles piezométricos (vista en sección)

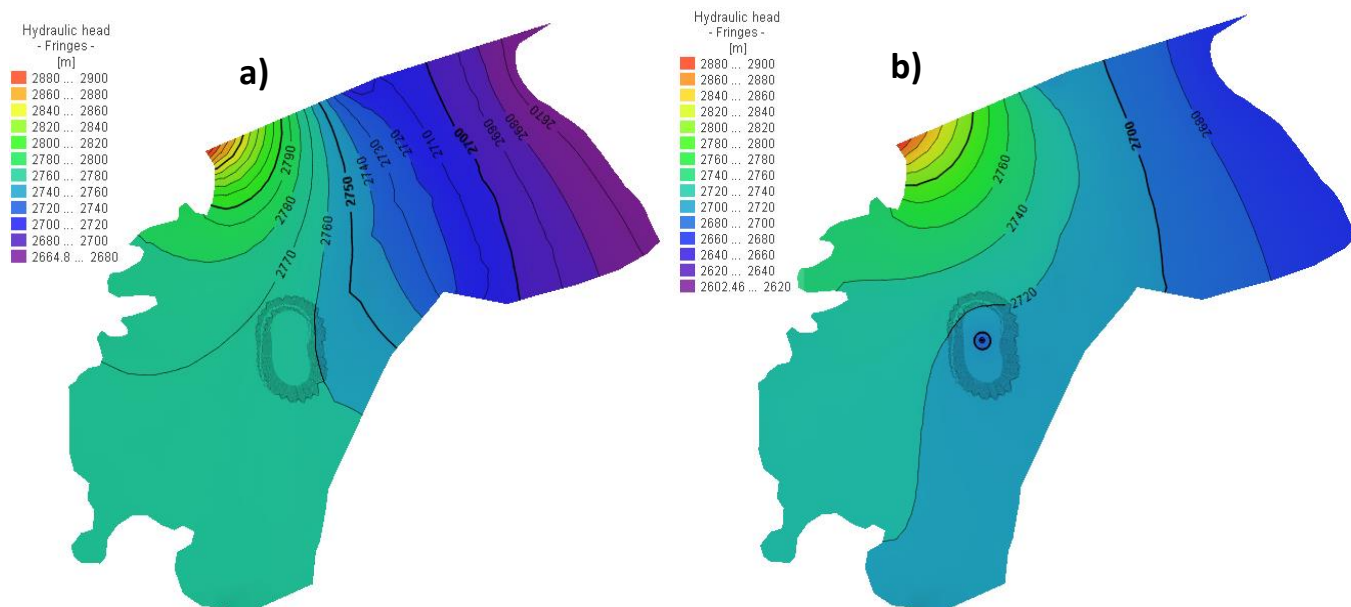


Figura Q- 1: distribución de niveles piezométricos en modelo heterogéneo: a) sin bombeo; b) con bombeo

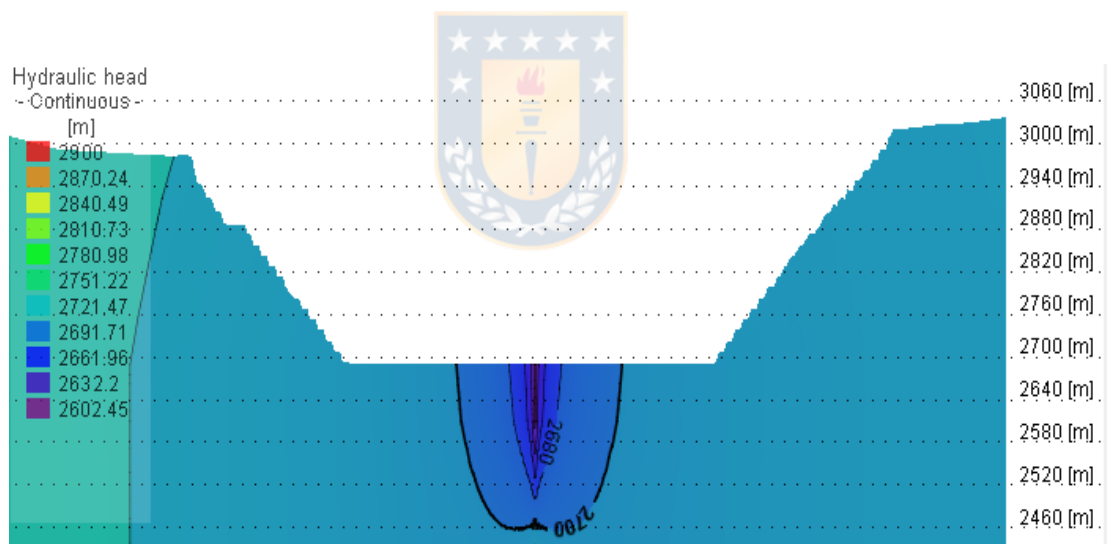


Figura Q- 2: distribución de niveles piezométricos en modelo heterogéneo con bombeo (vista en sección rajo RT)

Modelo calibrado a partir de conductividad inicial homogénea

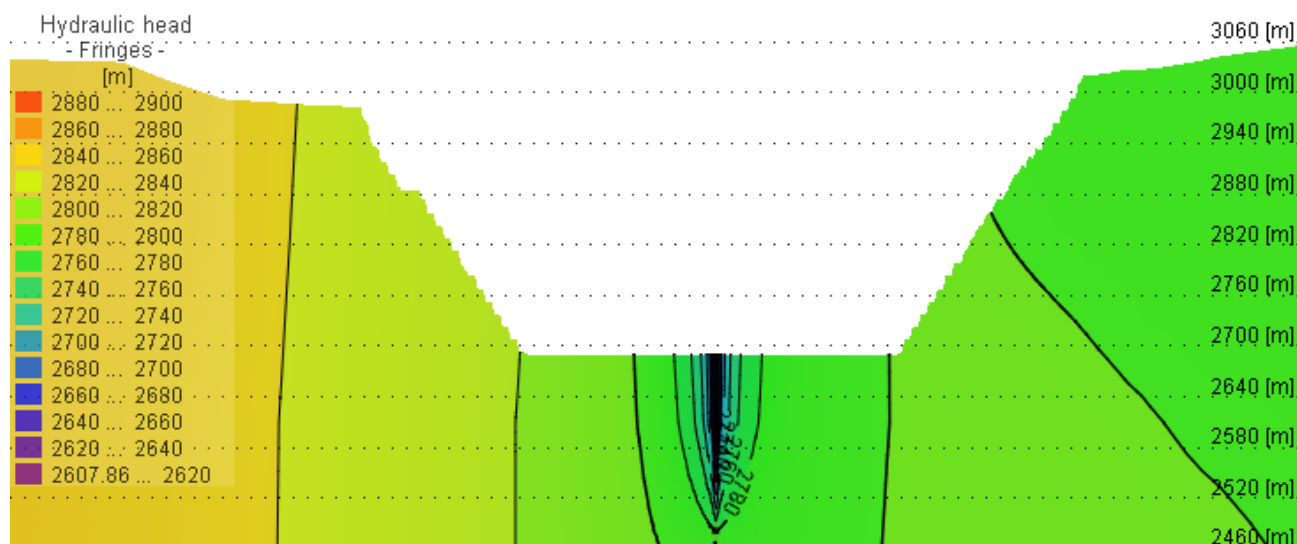


Figura Q- 3: niveles piezométricos en modelo calibrado a partir de sistema homogéneo en escenario 2 con drenaje (vista en sección del rajo abierto)

Modelo calibrado a partir de conductividad inicial heterogénea

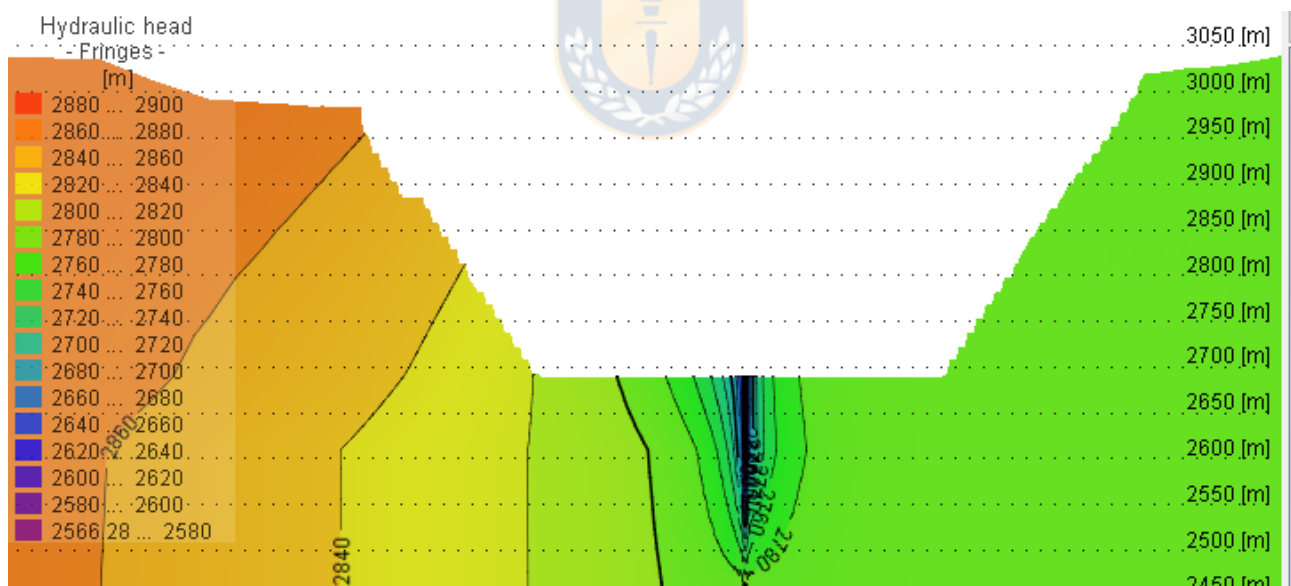


Figura Q- 4: niveles piezométricos en modelo calibrado a partir de sistema heterogéneo en escenario 2 con drenaje (vista en sección del rajo abierto)

ANEXO R: interpolación de potencial hidráulico en el límite Borde Norte

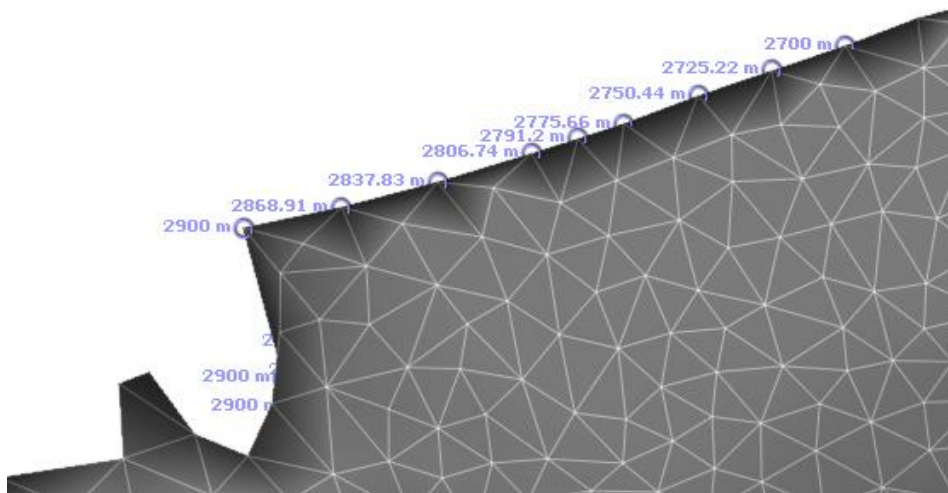


Figura R- 1: interpolación de potencial hidráulico en el límite Borde Norte (1D Linear interpolation)

ANEXO S: condiciones de contorno en rajo minero posterior a calibración

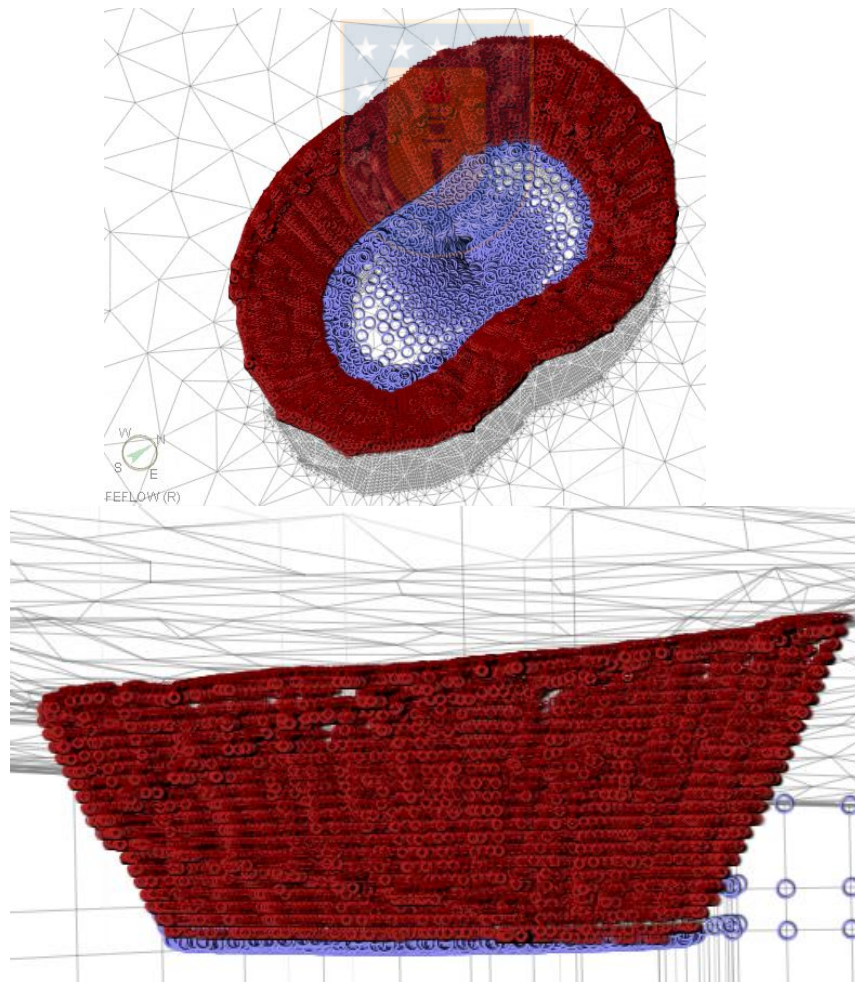


Figura S- 1: condiciones de contorno en rajo minero posterior a calibración

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

Título: Análisis mediante simulación numérica del impacto en el sistema de flujo de agua subterránea de un acuífero por el drenaje de una mina a cielo abierto.		
Nombre Memorista: JASON GIOVANNI MARTÍNEZ ORELLANA		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Sobresaliente	 Prof. Ramón Díaz Noriega
Calificación	6.8	
Fecha	27/05/2021	
 Prof. FERNANDO PARADA		
Ingeniero Supervisor:		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Andrés González Quirós		 Prof. Cristian Vera Soriano
Resumen		
<p>En el presente trabajo se plantea una modelación hidrogeológica aplicada al sector minero haciendo uso de herramientas de simulación numérica de flujo de agua subterránea, que permita obtener conocimiento de características y comportamiento hidrogeológico del sector de estudio, del impacto físico que tiene el desarrollo de una mina a cielo abierto en el entorno hidrogeológico, optimizando la información disponible para evaluar diferentes posibles escenarios. El estudio se realiza con información pública de la faena minera Radomiro Tomic, ubicada en la región de Antofagasta en la comuna de Calama, yacimiento explotado a rajo abierto para la obtención de minerales oxidados, y cuyas operaciones presentan problemas por el afloramiento de agua subterránea en el piso del rajo.</p> <p>La investigación se lleva a cabo en seis etapas, comenzando con la búsqueda de información y análisis de los antecedentes del caso de estudio, para luego realizar la modelización del problema formulando el modelo conceptual, matemático y numérico, luego el modelo pasa por un proceso de calibración para finalmente ejecutar las simulaciones y obtener los resultados. En el modelo conceptual se define un dominio ubicado dentro de la formación Acuífero Calama. Dentro del dominio se definen las unidades hidrogeológicas A y C de conductividad hidráulica media (10^{-5}-10^1 m/d), y la unidad hidrogeológica B de conductividad hidráulica baja (10^{-9}-10^{-1} m/d). El balance hídrico del sistema se caracteriza en función de las estimaciones de la recarga y descarga de agua</p>		

subterránea, donde la estación de bombeo en la mina actúa como principal elemento de descarga del sistema extrayendo un caudal de $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$.

La implementación del modelo numérico considera un modelo tridimensional donde se asume que el flujo de agua subterránea es a través de un medio poroso saturado, no confinado y en régimen estacionario gobernado por la ley de Darcy, representada en la ecuación general de flujo de agua subterránea en medios porosos saturados. Para las simulaciones se utiliza el código de simulación FEFLOW con el que se realizan 234 simulaciones agrupadas en 4 series de simulación clasificadas en modelos homogéneos y heterogéneos. Para la calibración de modelos se utiliza la herramienta FEPEST estimando la conductividad hidráulica en el dominio definido de acuerdo a los datos disponibles de piezometrías en el entorno de la mina.

Los resultados obtenidos de las simulaciones permiten determinar el comportamiento general del flujo de agua subterránea en la zona y el papel que juega la mina en el comportamiento del sistema. Los modelos indican que el agua que ingresa a la mina proviene principalmente de la unidad hidrogeológica denominada acuífero inferior (UH-5) del Acuífero Calama y que la causa de afloramientos de agua en la mina está relacionada con zonas de alta conductividad hidráulica asociadas a las familias de fracturas que afectan a la unidad UH-6a en la zona del rajo.

