



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

## **MODELACIÓN NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA DEL RAJO LOS BRONCES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

**KIMBERLYN STEFANN DEMIERRES CONTRERAS**

**PROFESOR GUÍA:**

PAU BARCELÓ MENDOZA

**PROFESORA CO-GUÍA:**

LINDA DANIELE

**COMISIÓN:**

MARTIN BROWN SEPÚLVEDA

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Kimberlyn Demierres Contreras  
**FECHA:** 15/10/2021  
**PROFESOR GUÍA:** Pau Barceló

## **MODELACIÓN NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA DEL RAJO LOS BRONCES**

Actualmente, la modelación numérica de aguas subterráneas se ha posicionado como una herramienta imprescindible en la toma de decisiones respecto del manejo y control de los recursos hídricos en distintos ámbitos. La minería metálica no es la excepción, y sumado a que, la mayor parte de esta se desarrolla a cielo abierto, resulta interesante tener una mirada acabada de las herramientas disponibles para realizar la modelación del desaguado de un rajo.

En el mercado existen distintos softwares que se utilizan para este fin, cada uno con distintos códigos, atributos y limitaciones. La selección de uno u otro depende de sus características intrínsecas además de los objetivos, necesidades propias del estudio mismo y de quien lo requiere. Dada la importancia de los resultados de estos modelos, es preponderante trabajar con un software adecuado, que represente de forma ajustada el sistema hidrogeológico que se precisa.

Este trabajo tiene como objetivo realizar una comparación de tres softwares disponibles en el mercado (Groundwater Vistas, FEFLOW, MINEDW) para la modelación numérica del desaguado de rajes, mediante su aplicación a un caso real de la minería chilena, en el rajo Los Bronces. Para lograrlo, se construye el mismo modelo en cada software y se calibra en régimen estacionario. Se realiza la comparación de acuerdo con 7 criterios: Características técnicas inherentes a los códigos, complejidad del uso de la interfaz, preproceso, capacidad de simulación, calibración del modelo estacionario, postproceso y otras características, en la calibración del modelo estacionario, implementación de condiciones de borde en el modelo transiente y algunos escenarios postminería.

Los resultados muestran que todos los softwares permiten modelar el rajo y sus características. Sin embargo, los programas poseen diferencias principalmente en la implementación de variables y disponibilidad de menús específicos que se traducen en amplias diferencias en el tiempo de construcción del modelo.

De forma general, para las etapas alcanzadas del modelo se concluye que, para modelar un rajo MINEDW resulta ser el software más adecuado en términos de facilidad de construcción y optimización del tiempo invertido. Sin embargo, se debe tener precaución en la condición de admisibilidad de recarga no afecte el resultado del modelo. Por otra parte, si lo que interesa es disponer de un postproceso que genere cálculos estadísticos, o entender de forma profunda el funcionamiento del acuífero, Groundwater Vistas o FEFLOW serán mejor opción. En estos últimos casos, se debe considerar que el tiempo de construcción del modelo, puede ser varias veces el tiempo invertido en MINEDW. No es posible obtener una conclusión sobre el manejo y gestión de recursos hídricos para Los Bronces, dado que solo se calibraron los modelos estacionarios realizados, sin posibilidad de alcanzar la etapa predictiva del modelo.

La selección de un código para modelar un rajo debe hacerse de acuerdo al objetivo del modelo, las características a representar, las limitantes propias del estudio y en consideración a los modelos previamente realizados.

## **Dedicatoria**

Dedico la memoria de mi título,

A mi madre y mi padre, por inspirarme.

A mis hermanos y hermana, por acompañarme.

A mi sobrina y sobrino, para inspirarles.

Y por llenarme de amor en este largo camino.

## Agradecimientos

Tras el largo camino recorrido en la aventura de convertirme en geóloga, que se corona con esta memoria de título, solo puedo agradecer. A mi mamá y mi papá, porque me enseñaron a donde podía llegar, me dieron la oportunidad de lograrlo y me apoyaron siempre con todo el amor del mundo, durante toda mi formación, incluso en mis momentos de duda, creyendo en mí más que yo misma, sin dudar de que lo lograría. Agradezco también a mis hermanos y a mi hermana, por su amor y apoyo incondicional, incluso en los momentos de mayor estrés. No puedo dejar de darle las gracias también a mi cuñada Kata y a mis sobrinitos. Colombita y Franco, que me llenaron de amor y consuelo en los momentos más relajados y en los más críticos. Los amo muchísimo.

Agradezco a mi comisión. A Pau, por dirigir este trabajo e invertir tiempo que muchas veces no tenía, por apoyarme cada vez que lo necesité y por confiar en que podía hacerlo. A Martín, por apoyar este trabajo desde que solo era una idea y contribuir activamente a desarrollarlo y mejorarlo. A Linda, por todo el apoyo para el desarrollo de la memoria.

Naturalmente, le doy las gracias a mis compañeros y esta altura amigos de la U, de plan común y geología, quienes hicieron de mi paso por la universidad una etapa inolvidable, llena de recuerdos de la U, terrenos y del patio de los naranjos que están dentro de mi corazón. Y que han ido más allá, a vacaciones, paseos y juntas que me llenan el alma y la existencia. Hubiese sido un placer compartir una sala de memoristas discutiendo de geología y celebrando cada avance, pero nadie pensó que vendría una pandemia. Estoy agradecida de la vida de haber conocido personas tan bacanas, que espero conservar en mi día a día.

No puedo dejar de nombrar especialmente a mi amiga Lore, a quien tuve el placer de conocer gracias a la U, de quien soy tan distinta y comparto tantas cosas a la vez, muchas de ellas sin saberlo. Te quiero mucho, amiga para toda la vida.

Gracias también a mis amigas AAHH y amigos CC, que siempre tuvieron una palabra de aliento y un panorama para distraerme, y entendieron cuando desaparecí por terminar este trabajo. Fueron un gran apoyo durante toda esta etapa, los quiero mucho.

Quiero agradecer especialmente al Ale, mi amigo y compañero, de cálculo, de mecánica, de métodos, de campo, de carrera, de memoria y ahora, de la vida. Gracias por hacer el proceso de la memoria infinitamente más grato con tu apañe en los momentos más duros y en las abundantes vacaciones en tiempos no recomendados, por todo el entusiasmo con que soñábamos en lo que haríamos cuando fuésemos geólogos, por las partidas de tetris, por las lecturas de cartas astrales, por la excelente compañía de un mes que posibilitó que termináramos de escribir, y, en fin, por todo el amor que me entregas.

Agradezco también a quienes hicieron posible este trabajo, enseñándome y guiándome cuando no veía como seguir. A Manuel Gutiérrez, por su excelente disposición a responder mis innumerables dudas, y enseñarme todo lo que necesité, e incluso más. A María Pool, porque su ayuda me dio luz para sacar adelante este trabajo. Y a todas las personas que contribuyeron desinteresadamente a este trabajo, cuya ayuda sin duda me permitió progresar.

Agradezco también a todos quienes proporcionaron licencias de estudiante para el uso de los softwares para realizar este trabajo: Environmental Simulations Inc por la licencia de Groundwater Vistas, DHI Group por la licencia de FEFLOW, Itasca Chile por la licencia de MINEDW, Seequent por la licencia de Leapfrog, y Aquaveo por la licencia de GMS.

## Tabla de contenido

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introducción</b> .....                                    | 1  |
| <b>1.1 Formulación del problema</b> .....                       | 1  |
| <b>1.2 Objetivos</b> .....                                      | 2  |
| <b>1.2.1 Objetivo general</b> .....                             | 2  |
| <b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....                        | 2  |
| <b>1.3 Hipótesis</b> .....                                      | 2  |
| <b>1.4 Metodología</b> .....                                    | 2  |
| <b>1.5 Ubicación y accesos</b> .....                            | 4  |
| <b>1.6 Estudios previos</b> .....                               | 5  |
| <b>2. Caracterización de la zona de estudio</b> .....           | 6  |
| <b>2.1 Caracterización geológica</b> .....                      | 6  |
| <b>2.1.1 Introducción</b> .....                                 | 6  |
| <b>2.1.2 Estratigrafía</b> .....                                | 6  |
| <b>2.1.3 Geología estructural</b> .....                         | 11 |
| <b>2.1.4 Geomorfología</b> .....                                | 13 |
| <b>2.1.5 Contacto primario – secundario</b> .....               | 18 |
| <b>2.2 Caracterización hidrológica</b> .....                    | 19 |
| <b>2.2.1 Precipitación</b> .....                                | 19 |
| <b>2.2.2 Fluviometría</b> .....                                 | 23 |
| <b>2.2.3 Escorrentía Quebrada La Disputada</b> .....            | 27 |
| <b>2.2.4 Evolución temporal del embalse Los Bronces</b> .....   | 27 |
| <b>2.3 Caracterización hidrogeológica</b> .....                 | 28 |
| <b>2.3.1 Catastro de pozos</b> .....                            | 28 |
| <b>2.3.2 Parámetros hidráulicos</b> .....                       | 31 |
| <b>2.3.3 Piezometría</b> .....                                  | 34 |
| <b>3. Modelo hidrogeológico conceptual</b> .....                | 45 |
| <b>3.1 Unidades hidrogeológicas</b> .....                       | 45 |
| <b>3.1.1 Criterio definición unidades hidrogeológicas</b> ..... | 45 |
| <b>3.1.2 Descripción UH</b> .....                               | 45 |
| <b>3.2 Propiedades hidráulicas de UH</b> .....                  | 46 |
| <b>3.3 Geometría del sistema hidrogeológico</b> .....           | 47 |
| <b>3.4 Balance hídrico</b> .....                                | 49 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.4.1 | Componentes balance hídrico.....                               | 49  |
| 3.4.2 | Balance preoperacional .....                                   | 51  |
| 3.4.3 | Balance operacional.....                                       | 54  |
| 4.    | Modelos numéricos.....   | 57  |
| 4.1   | Criterios de comparación .....                                 | 57  |
| 4.2.1 | Características técnicas inherentes a los códigos.....         | 57  |
| 4.2.2 | Complejidad del uso de interfaz.....                           | 57  |
| 4.2.3 | Preproceso .....   | 57  |
| 4.2.4 | Capacidad de simulación .....                                  | 57  |
| 4.2.5 | Calibración del modelo estacionario.....                       | 58  |
| 4.2.6 | Postproceso.....   | 58  |
| 4.2.7 | Otras características.....                                     | 58  |
| 4.2   | Reseña de softwares .....                                      | 58  |
| 4.3   | Interfaces de usuario.....                                     | 61  |
| 4.4   | Construcción modelo numérico .....                             | 64  |
| 4.4.1 | Geometría y límites del modelo .....                           | 64  |
| 4.4.2 | Tamaño de la grilla, discretización horizontal y vertical..... | 65  |
| 4.4.3 | Parámetros hidráulicos .....                                   | 69  |
| 4.4.4 | Condiciones de borde .....                                     | 71  |
| 4.4.5 | Recargas .....   | 75  |
| 4.4.6 | Pozos de observación .....                                     | 76  |
| 4.4.7 | Régimen temporal.....  | 78  |
| 4.4.8 | Escenarios post-minería .....                                  | 79  |
| 4.5   | Calibración modelo estacionario .....                          | 79  |
| 4.6   | Postproceso .....  | 98  |
| 4.7   | Otras características .....                                    | 101 |
| 5.    | Discusiones .....  | 103 |
| 5.1   | Criterios comparativos .....                                   | 103 |
| 5.2   | Aporte del trabajo.....  | 111 |
| 6.    | Conclusiones y recomendaciones .....                           | 113 |
| 7.    | Bibliografía .....   | 115 |
| 8.    | Anexos .....   | 121 |
| 8.1   | Anexo 1.....   | 121 |
| 8.2   | Anexo 2.....   | 130 |

## Índice de tablas

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 2.1: Características geomorfológicas de Subsubcuenca San Francisco y Quebrada La Disputada.....  | 13  |
| Tabla 2.2: Proporción de orientación de laderas en los distintos sectores .....  | 14  |
| Tabla 2.3: Estadística de promedios de precipitación mensual [mm] período 2009 – 2020.....   | 19  |
| Tabla 2.4: Estadística de promedios de precipitación mensual [mm] período 1980 – 2015.....   | 21  |
| Tabla 2.5: Estadística de promedios de precipitación mensual período 2009 – 2020.....  | 22  |
| Tabla 2.6: Estadística de promedios de caudal mensual [m <sup>3</sup> /s] período 2009/10 – 2019/20. ....  | 23  |
| Tabla 2.7: Estadística de promedios de caudal mensual [m <sup>3</sup> /s] período 2007/08 – 20 17/18. ....   | 24  |
| Tabla 2.8: Estadística de promedios de caudal mensual [m <sup>3</sup> /s] período 1986/87 – 2019/20. ....  | 25  |
| Tabla 2.9: Resumen de cantidad y tipos de pozos en Los Bronces. ....   | 28  |
| Tabla 2.10: Pozos de bombeo con coordenada, rango de registro de datos y estado. *Pozos con información de caudales de bombeo disponible más completa..... | 29  |
| Tabla 2.11: Estadística de parámetros hidráulicos por unidad litológica. ....  | 32  |
| Tabla 2.12: Coeficientes de almacenamiento obtenidos para distintos sondajes. ....   | 32  |
| Tabla 2.13: Valores de porosidad y rendimiento específico representativos de la literatura. ....   | 33  |
| Tabla 2.14: Valores de almacenamiento específico según Domenico y Mifflin (1965). ....   | 33  |
| Tabla 2.15: Disponibilidad de datos de cotas de niveles piezométricos por año. ....  | 34  |
| Tabla 3.1: Valores de conductividad hidráulica para las UH. ....   | 47  |
| Tabla 3.2: Balance hídrico preoperacional para el sistema período 1996 – 2005.....   | 52  |
| Tabla 3.3: Balance hídrico operacional para el sistema período 2015 - 2019.....  | 54  |
| Tabla 4.1: Recargas y áreas asociadas a cada zona. ....  | 75  |
| Tabla 4.2: Niveles medidos en pozos de observación .....   | 77  |
| Tabla 4.3: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en calibración GV .....   | 84  |
| Tabla 4.4: Balance hidrogeológico calibrado en régimen estacionario GV .....   | 84  |
| Tabla 4.5: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en calibración FEFLOW .....   | 87  |
| Tabla 4.6: Balance hidrogeológico calibrado en régimen estacionario FEFLOW .....   | 88  |
| Tabla 4.7: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en calibración MINEDW .....   | 91  |
| Tabla 4.8: Balances hidrogeológicos calibrados en régimen estacionario MINEDW. A la izquierda con escorrentía, a la derecha sin escorrentía.....           | 92  |
| Tabla 4.9: Parámetros hidráulicos modelo estacionario MINEDW comparativo .....   | 94  |
| Tabla 4.10: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en modelo comparativo MINEDW .....   | 95  |
| Tabla 4.11: Balances hidrogeológicos en régimen estacionario MINEDW. A la izquierda con escorrentía, a la derecha sin escorrentía .....                    | 96  |
| Tabla 5.1: Comparación de softwares según distintas características enmarcadas en criterios comparativos.....  | 109 |
| Tabla 8.1: Registro pluviométrico Estación Estero Yerba Loca antes Río San Francisco - DGA .....   | 121 |
| Tabla 8.2: Registro pluviométrico Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA.....  | 121 |
| Tabla 8.3: Registro pluviométrico Estación Los Bronces – AAS .....   | 122 |
| Tabla 8.4: Registro pluviométrico Estación Estero Yerba Loca antes junta Río San Francisco – DGA.....  | 123 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 8.5: Registro fluviométrico Estación Rio San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA..... | 124 |
| Tabla 8.6: Registro fluviométrico Estación Rio San Francisco en paso Marchant – AAS .....             | 124 |
| Tabla 8.7: Datos de ensayos hidráulicos .....   | 125 |
| Tabla 8.8: Niveles utilizados para piezometría junio 2006 - junio 2007.....                           | 127 |
| Tabla 8.9: Cota de niveles utilizados para piezometría abril 2014 - abril 2015 .....                  | 128 |
| Tabla 8.10: Cotas de niveles utilizados para piezometría marzo 2016 - marzo 2017 .....                | 129 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Mapa de ubicación y acceso a la zona de estudio. ....  | 5  |
| Figura 2.1: Mapa geológico del área de estudio. ....   | 12 |
| Figura 2.2: Mapa de glaciares presentes en el área de estudio. A) Subsubcuenca San Francisco.<br>B) Quebrada La Disputada y Quebrada Yerba Loca. ....  | 15 |
| Figura 2.3: Mapa de pendientes del área de estudio. A) Subsubcuenca San Francisco. B)<br>Quebrada La Disputada y Quebrada Yerba Loca. ....             | 16 |
| Figura 2.4: Mapa de orientación de laderas del área de estudio. A) Subsubcuenca San Francisco.<br>B) Quebrada La Disputada y Quebrada Yerba Loca. .... | 17 |
| Figura 2.5: Contacto primario – secundario. ....   | 19 |
| Figura 2.6: Ubicación de estaciones meteorológicas y fluviométricas en el área de estudio. ....  | 20 |
| Figura 2.7: Comportamiento pluviométrico promedio mensual 2009 – 2020. ....  | 21 |
| Figura 2.8: : Comportamiento pluviométrico promedio mensual 1980 – 2015. ....  | 22 |
| Figura 2.9:Comportamiento pluviométrico promedio mensual 2009 – 2020. ....   | 23 |
| Figura 2.10: Comportamiento caudal promedio mensual 2009/10 – 2019/20. ....  | 24 |
| Figura 2.11: Comportamiento caudal promedio mensual 2007/08 – 2017/18. ....  | 25 |
| Figura 2.12: Comportamiento caudal promedio mensual 1986/87 – 2019/20. ....  | 26 |
| Figura 2.13: Gráfico conjunto de caudales promedio por estación fluviométrica. ....  | 26 |
| Figura 2.14: Distribución de pozos de bombeo en el rajo y sus cercanías. ....  | 30 |
| Figura 2.15: Datos disponibles de conductividad hidráulica en la zona de estudio. ....   | 31 |
| Figura 2.16: Red de monitoreo de niveles piezométricos en Los Bronces. ....  | 35 |
| Figura 2.17: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Rajo en el período 2005 –<br>2008. ....  | 36 |
| Figura 2.18: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Rajo en el período 2011 –<br>2017. ....  | 37 |
| Figura 2.19: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Periférico Norte en el<br>período 2012 – 2017. ....                              | 38 |
| Figura 2.20: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Periférico Sur en el<br>período 2012 – 2017. ....                                | 38 |
| Figura 2.21: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Botadero San Francisco en<br>el período 2006 – 2007. ....                        | 39 |
| Figura 2.22: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Botadero San Francisco en<br>el período 2012 – 2016. ....                        | 40 |
| Figura 2.23: Piezometría estimada para la zona de estudio con datos de cotas piezométricas entre<br>junio 2006- junio 2007. ....                       | 41 |
| Figura 2.24: Piezometría estimada para la zona de estudio con datos de cotas piezométricas entre<br>abril 2014- abril 2015. ....                       | 41 |
| Figura 2.25:Piezometría estimada para la zona de estudio con datos de cotas piezométricas entre<br>marzo 2016- marzo 2017. ....                        | 42 |
| Figura 2.26: Mapa de descensos de niveles piezométricos entre 2007 y 2015. ....  | 43 |
| Figura 2.27: Mapa de descensos de niveles piezométricos entre 2007 y 2017. ....  | 44 |
| Figura 3.1: Mapa hidrogeológico de la zona de estudio (2020). ....   | 48 |
| Figura 3.2: Perfil AA' unidades hidrogeológicas en profundidad. ....   | 49 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.3: Perfil BB' unidades hidrogeológicas en profundidad.....  | 49  |
| Figura 3.4: Perfil esquemático de trayectoria de recargas profundas y escorrentía subsuperficial en el rajo. ....  | 51  |
| Figura 3.5: Esquema en planta de funcionamiento y componentes del sistema hidrogeológico en la zona del rajo en etapa pre – operacional.....                           | 53  |
| Figura 3.6: Esquema en planta de funcionamiento y componentes del sistema hidrogeológico en la zona del rajo en etapa operacional.....                                 | 55  |
| Figura 3.7: Esquema en perfil de funcionamiento y componentes del sistema hidrogeológico en la zona del rajo etapa operacional. ....                                   | 56  |
| Figura 4.1: Interfaz GV .....  | 62  |
| Figura 4.2:Interfaz FEFLOW .....   | 63  |
| Figura 4.3: Interfaz MINEDW .....  | 64  |
| Figura 4.4: Dominio del modelo numérico y sus límites (divisoria con otras cuencas y divisoria interna).....   | 65  |
| Figura 4.5: Grilla refinada diseñada en GV vista en planta y vista de sección transversal a lo largo de fila 16. Zonas negras corresponden a celdas de “no flujo”..... | 66  |
| Figura 4.6: Grilla refinada diseñada en GMS e importada a FEFLOW. Vista en planta y vista transversal sentido SN .....   | 68  |
| Figura 4.7: Grilla diseñada en GMS importada a MINEDW. Vista en planta y vista transversal dirección SN. ....  | 69  |
| Figura 4.8: Distribución de UH en los modelos. De izquierda a derecha: GV, FEFLOW y MINEDW .....   | 71  |
| Figura 4.9: Zonas de recarga en los distintos softwares. De izquierda a derecha: GV, FEFLOW y MINEDW .....   | 76  |
| Figura 4.10: Ubicación pozos de observación en zona de estudio .....   | 77  |
| Figura 4.11: Gráfico de dispersión de calibración de niveles en régimen estacionario calibrado en GV .....   | 83  |
| Figura 4.12:Conductividades hidráulicas conceptuales y calibradas GV.....  | 83  |
| Figura 4.13: Resultado modelo estacionario calibrado GV .....  | 85  |
| Figura 4.14: Gráfico de dispersión de calibración de niveles en régimen estacionario calibrado en FEFLOW .....   | 86  |
| Figura 4.15: Conductividades hidráulicas conceptuales y calibradas FEFLOW .....  | 87  |
| Figura 4.16: Resultado modelo estacionario calibrado FEFLOW .....  | 89  |
| Figura 4.17: Gráfico de dispersión de calibración de niveles en régimen estacionario calibrado en MINEDW .....   | 90  |
| Figura 4.18: Conductividades hidráulicas conceptuales y calibradas MINEDW .....  | 91  |
| Figura 4.19: Resultado de niveles modelo estacionario calibrado MINEDW (izquierda) y zonas de escorrentía (derecha).....   | 93  |
| Figura 4.20: Gráfico de dispersión de niveles medidos vs simulados en régimen estacionario en MINEDW .....   | 94  |
| Figura 4.21: Resultado niveles modelo estacionario MINEDW (izquierda) y zonas de escorrentía (derecha).....  | 97  |
| Figura 4.22: Velocidad de flujo y círculos de residuales en modelo estacionario calibrado .....  | 99  |
| Figura 4.23: Velocidad de flujo en modelo estacionario calibrado .....   | 100 |
| Figura 5.1: Metodología utilizada por MINEDW para simular recarga.....   | 106 |
| Figura 8.1: Traza sección transversal en modelo Leapfrog .....   | 131 |
| Figura 8.2: En blanco sección transversal considerada para cálculo de salida natural de quebrada .....   | 131 |

# 1. Introducción

## 1.1 Formulación del problema

El desaguado de minas a cielo abierto típicamente tiene como propósito generar un descenso del nivel de agua subterránea bajo el nivel del fondo del rajo, con el fin de eliminar infiltraciones de agua subterránea residual o de escorrentía subsuperficial que posibiliten el ingreso de agua dentro del rajo, excavaciones o túneles (Beale y Read, 2014). Por otra parte, la despresurización de un rajo busca disipar la presión de poros inducida por el agua subterránea en sectores localizados de la mina, con el fin de aumentar la estabilidad de los taludes y disminuir la cantidad de material que se precisa remover (Beale y Read, 2014). Ambos procesos están interrelacionados y son necesarios para el desarrollo minero. En algunos casos, el sistema de desaguado bastará para lograr el nivel de despresurización requerido. Sin embargo, cuando esto no ocurre es necesario implementar un sistema complementario de despresurización en las áreas de interés.

En este escenario, un diseño efectivo y preciso del sistema de drenaje y despresurización del rajo es fundamental para un desarrollo exitoso de las operaciones mineras en un escenario seco, estable y de bajo riesgo. Para esto, primeramente, se debe construir un modelo hidrogeológico que represente simplificadaamente el funcionamiento del sistema hidrogeológico real (SEA, 2012). En este sentido, un modelo hidrogeológico conceptual que grafique la exploración hidrogeológica por medio de la integración de características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de la zona, es necesario para realizar un efectivo análisis del sistema completo. Un modelo conceptual es validado a través de la construcción de un modelo hidrogeológico numérico que posibilite la comparación de los resultados de la simulación con las observaciones de terreno (Betancur y Palacio, 2009).

Los modelos numéricos representan la hidrodinámica de un sistema acuífero mediante la superposición de un sistema de nodos al dominio hidrogeológico, en los cuales se buscan soluciones numéricas a los sistemas de ecuaciones parciales que rigen el flujo de agua subterránea, resultantes de la combinación matemática de ecuaciones de balance de masa y ley de Darcy. De esta manera, resultan ser una herramienta imprescindible, por ejemplo, para diseños de mina o evaluaciones ambientales y, particularmente, para el diseño de los sistemas de drenaje y despresurización de minas a cielo abierto. Lo anterior, debido a que permiten simular e incorporar a ellos distintas variables propias de los rajos. Así, permiten evaluar potenciales efectos de operaciones sobre un acuífero, además de predecir condiciones hidrogeológicas en diferentes escenarios como construcción, operación (actual o futura) y cierre de la mina, apoyando decisiones en relación al manejo, control y aprovechamiento de los recursos hídricos.

La selección de un código/software de modelación debe realizarse en conocimiento de los atributos y limitaciones que cada uno posee (método de resolución de ecuaciones, dimensionalidad, tipo de flujo que modela, entre otros), además de la consideración de los objetivos y necesidades o requerimientos propios del estudio, de forma tal de escoger el código que logre representar de la manera más adecuada todas las variables involucradas en el modelo hidrogeológico y sea de un uso sencillo (Kumar, 2012).

En consideración a que la modelación numérica constituye una importante metodología en tomas de decisiones sobre el manejo de aguas subterráneas en minería y que alrededor del 85% de la producción mundial de cobre proviene de minas a rajo abierto (Corporación Alta Ley, 2019), resulta particularmente interesante realizar una comparación de los softwares de modelación

numérica de flujo disponibles en el mercado. El fin es analizar cuál de ellos se adapta y puede representar de mejor forma la dinámica hidrogeológica en los procesos de desaguado de rajos. Este trabajo busca entonces, aportar a la discusión de selección de un código de modelación para desaguado de rajos, realizando una comparación de distintos softwares de modelación numérica de flujo de aguas subterráneas (Groundwater Vistas, MINEDW y FEFLOW) mediante su aplicación a un caso real de la minería chilena en el Rajo Los Bronces, al destacar sus similitudes y diferencias al momento de modelar, con el fin de establecer ventajas y desventajas de cada uno para modelar numéricamente la hidrodinámica de un rajo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Comparar herramientas de modelación numérica de aguas subterráneas mediante su aplicación a un caso real de desaguado de rajo de la minería chilena en el Rajo Los Bronces.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar un modelo conceptual de un sistema hidrogeológico complejo.
- Construir tres modelos numéricos que se sustenten en el modelo conceptual y que cuantifique variables de estudio (niveles, recarga y flujos).
- Definir criterios comparativos para las distintas características (numéricas y de aplicación) de los softwares en la modelación de un rajo.

## **1.3 Hipótesis**

- Todos los códigos son adecuados para la modelización de flujos subterráneos, sin embargo, poseen distintas características (tales como el tipo de grilla y cuan ajustable sea, método de resolución de ecuación de flujo, facilidad de uso de las interfaces, entre otras) que los hacen más o menos apropiados para modelar el desaguado de un rajo.
- Las representaciones de ciertas variables propias de los rajos serán incluidas de maneras distintas en cada software y esto puede influir en los resultados (balance y movimiento del flujo). Estas diferencias pueden afectar las decisiones de manejo y gestión de recursos hídricos.

## **1.4 Metodología**

En principio, la metodología consistió en recopilación y revisión de antecedentes disponibles referente a la geología, hidrogeología, geomorfología e hidrología del área de estudio.

Para la caracterización de la geología de la zona se confeccionó un mapa geológico con base en la información bibliográfica recopilada (mapas SERNAGEOMIN, EIA, artículos académicos, memorias de título, etc.). En él también se incluyó información estructural de la zona y fue generado en ArcGis v10.3 ESRI. Para estudiar la geomorfología, se utilizaron modelos de elevación digital (DEMs) para generar mapas de pendiente y de orientación de laderas para lo cual se utilizó ArcGis v10.3 ESRI. Se recopiló también información sobre la caracterización geotécnica de las rocas presentes en el rajo.

Para caracterizar la hidrogeología, se realizó un catastro de los pozos de observación y de bombeo ubicados en la zona, junto a su registro histórico de niveles piezométricos y caudales de bombeo

correspondiente. Además, se consideró la información referente a parámetros hidráulicos disponibles en la zona, analizando los rangos de valores de conductividad hidráulica y de almacenamiento de las unidades geológicas del área. Se realizó un análisis de la evolución de niveles piezométricos de cada pozo en el intervalo de tiempo registrado, a partir de lo que se generaron 3 mapas piezométricos en distintas fechas: junio 2006 – junio 2007; abril 2014 – abril 2015; marzo 2016 – marzo 2017. Lo anterior, para analizar la evolución de niveles piezométricos en conjunto en la zona del rajo.

En el caso de la hidrología, se revisó el registro de precipitaciones y caudales disponible en la Dirección General de Aguas (DGA) y en bibliografía complementaria. A partir de esto se generaron gráficos de la evolución en el tiempo tanto de las precipitaciones como de la fluvimetría, para estudiar sus comportamientos anuales/mensuales, con el fin de caracterizar la cuenca en que se sitúa la zona de estudio. Se delimitó también la cuenca de estudio por medio de herramientas disponibles en ArcGis v10.3 ESRI para trabajar sobre el DEM, complementadas con información de la DGA. Mediante la observación de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 se analizó la evolución en el tiempo del embalse Los Bronces ubicado en las cercanías del rajo. Se caracterizó la situación de escorrentía dentro de la Quebrada La Disputada.

Mediante la integración de la información previamente estudiada y caracterizada, se definieron las unidades hidrogeológicas (UH). Estas se presentaron en mapas/perfiles hidrogeológicos generados en ArcGis v10.3 ESRI e Illustrator, de acuerdo con la metodología de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (Struckmeier y Margat, 1995).

Sobre la base de lo anterior, se generó un modelo hidrogeológico conceptual que incluye un balance hídrico apoyado en la caracterización hidrológica, bibliografía complementaria y en la delimitación geométrica del sistema hidrogeológico de acuerdo a la definición de UH realizada.

Posteriormente, se construyeron en régimen estacionario y transiente tres modelos hidrogeológicos numéricos apoyados en el modelo conceptual desarrollado, siguiendo la metodología expuesta en la Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (SEA, 2012). Para esto, se utilizaron los softwares Groundwater Vistas, MINEDW y FEFLOW. La calibración de los modelos se realizó solo para los modelos estacionarios, siguiendo la línea de disminución del error residual entre niveles simulados y medidos. Se utilizaron como estadígrafos la raíz del error cuadrático medio normalizado (SRMS) y la suma promedio de residuales (SMSR).

El proceso de construcción de los modelos, los resultados de calibración y características de cada software fueron contrastados de acuerdo a criterios de comparación previamente definidos. Los aspectos generales de los criterios consideran características técnicas inherentes a los códigos, complejidad en el uso de la interfaz, preproceso, capacidad de simulación, calibración del modelo estacionario y postproceso.

A continuación, se presenta una breve reseña técnica de los softwares a utilizar:

Groundwater Vistas (GV) es una interfaz gráfica para la modelación de flujo de agua subterránea y de transporte de contaminantes en 3D, de pre y post proceso. Su código de simulación es MODFLOW que nace en 1984 (McDonald y Harbaugh, 2003) bajo el auspicio del United States Geological Survey (USGS). GV resuelve la ecuación general de flujo subterráneo utilizando el método de Diferencias Finitas y es actualmente comercializado por Environmental Simulations, Inc (ESI).

Finite Element Subsurface Flow system (FEFLOW) fue creado en 1979 por Hans-Jörg G. Diersch en el Research Centre for Soil Fertility of Müncheberg (Alemania) y posteriormente desarrollado

en Institute for Water Resources Planning and Systems Research Inc. (WASY Gmgh) (Diersch, 2009). Es una herramienta de modelación numérica de 2D y 3D, aplicable en proyectos de transporte de calor y contaminantes o flujos de agua subterránea, en un medio saturado o de condiciones variables. Trabaja con el método de Elementos Finitos y actualmente es comercializado por Grupo DHI.

MINEDW es un programa de modelación de flujo de agua subterránea, de elementos finitos y en 3D desarrollado específicamente para aplicaciones mineras, que contempla funciones de pre y post proceso. Es un código basado en algoritmos del código de elementos finitos FEMFLOW3D, desarrollado por USGS. Fue desarrollado originalmente en 1992 por Tim J. Durbin y fue modificado entre 1993 y 2005 de acuerdo con en el modelamiento de proyectos de desaguado de minería de “clase mundial”. En el 2012 Itasca Denver desarrolló la versión 2.0 de MINEDW (Ugorets, 2015). Actualmente es comercializado por Itasca Denver.

## **1.5 Ubicación y accesos**

La zona de estudio corresponde a la mina Los Bronces, explotada actualmente por Anglo American Sur (en adelante, AAS). Esta mina se ubica en el distrito geológico Los Bronces – Rio Blanco – Los Sulfatos, el cual constituye depósitos de clase mundial de pórfidos de Cu – Mo de Chile Central. Este se sitúa en la Cordillera de Los Andes Central a una altura aproximada de 3.500 m.s.n.m, en Lo Barnechea, región Metropolitana, cerca del límite con la región de Valparaíso, aproximadamente a 65 km al noreste de Santiago (Figura 1.1). Las operaciones mineras realizadas consisten la extracción de mineral a rajo abierto y su posterior flotación para obtener concentrado de cobre. El mineral extraído es sometido a un proceso de chancado y molienda en las dependencias de la mina para luego ser enviado como pulpa a través de un mineroducto hacia la planta concentradora ubicada en el sector las Tórtolas, ubicada 45 km al norte de Santiago (Figura 1.1) (AAS, 1996).

Santiago es la ciudad más cercana a la mina, y para acceder hasta ella, se debe tomar la Costanera Norte hacia el oriente hasta la salida 1c hacia Av. La Dehesa, girar a la izquierda hacia Av. Las Condes, siguiendo hasta tomar la ruta G-21 Camino a Farellones, donde se permanecerá hasta el Corral Quemado, lugar donde se toma el desvío hacia el norte (camino La Disputada, ruta G-245) por el valle del río San Francisco recorriendo aprox. 30 km hasta la mina.

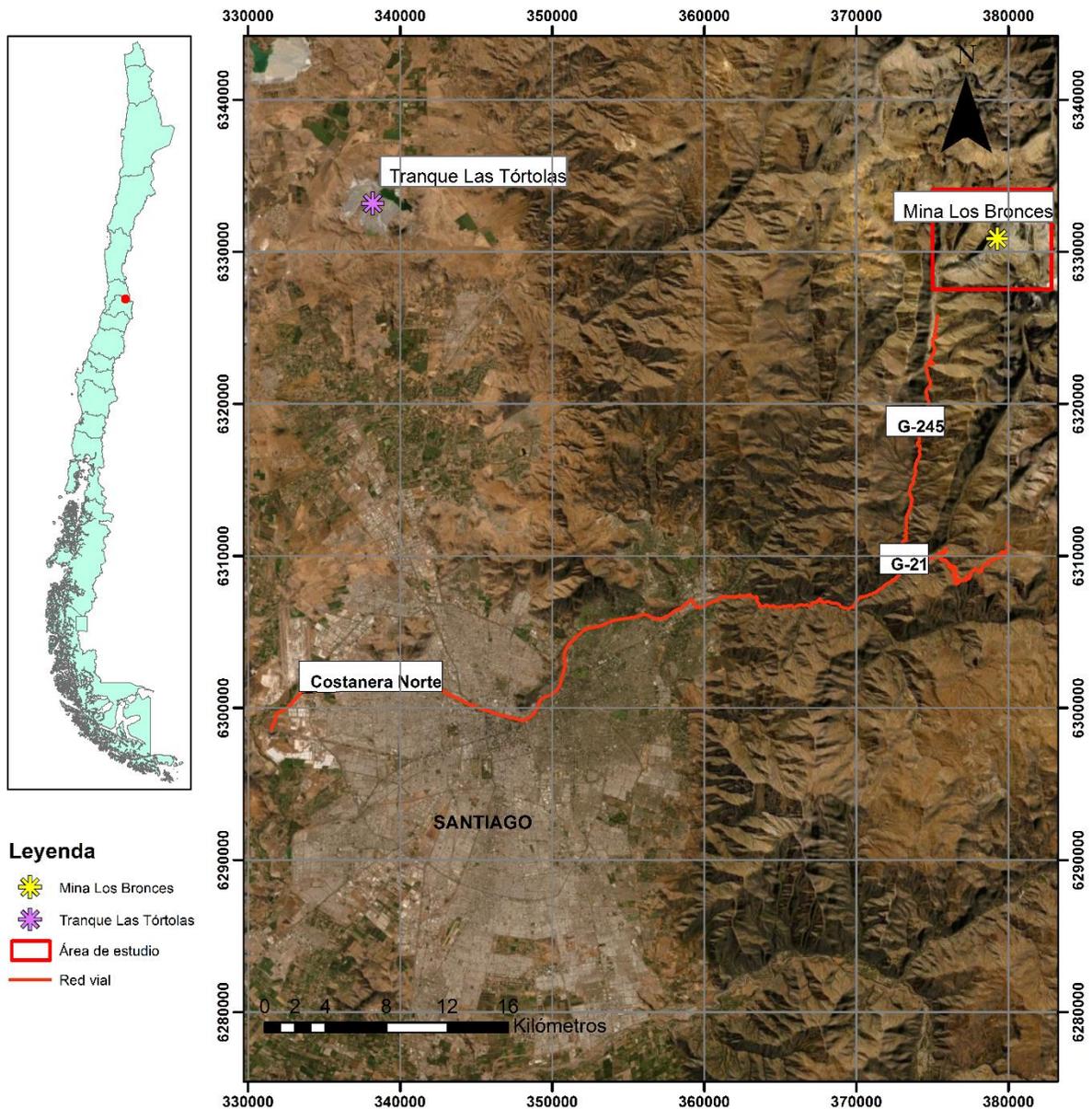


Figura 1.1: Mapa de ubicación y acceso a la zona de estudio. Elaboración propia.

## 1.6 Estudios previos

En la zona se han realizado distintos estudios de caracterización de la geología regional, geología económica, investigación de origen y factores de control del emplazamiento yacimiento entre otros por parte de AAS, otras y otros investigadores, como, por ejemplo: Warnaars y otros (1985), AAS (1996), Frikken y otros (2005), AAS (2006), Carrizo y otros (2015), Piquer y Skarmeta (2012), Piquer y otros (2015), Hémera (2019), AAS (2019). El estudio más reciente de ellos corresponde al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado por AAS al Servicio de Evaluación e impacto ambiental (SEA) en el 2019, con motivo de la presentación del proyecto “Los Bronces Integrado” (LBI), el cual consiste en la expansión del rajo actual en dos fases, y el desarrollo de minería subterránea en una tercera fase. Este trabajo se basará en gran parte en dicho estudio.

## **2. Caracterización de la zona de estudio**

Este capítulo reúne información bibliográfica relacionada a la caracterización de la zona de estudio, que incluye la geología, hidrología y la hidrogeología. Primero se presenta la geología del sector donde se encuentra Los Bronces, incluyendo estructuras, geomorfología de la subsubcuenca San Francisco y calidad geotécnica de las rocas del rajo. En segundo lugar, se presenta la hidrología de la zona, que se compone de la caracterización pluvial y fluviométrica de la subsubcuenca San Francisco, la situación de la escorrentía en la quebrada La Disputada y la evolución del Embalse Los Bronces. Se finaliza el capítulo con información hidrogeológica del rajo como registro de pozos, parámetros hidráulicos, y piezometrías en distintos períodos para estudiar la evolución de niveles.

### **2.1 Caracterización geológica**

En esta sección se detalla la geología, las estructuras y la geomorfología presentes en la zona de estudio. En primer lugar, se contextualiza morfoestructuralmente el área, para seguir con la descripción de la estratigrafía, intrusivos y alteraciones presentes. Luego, se habla de las estructuras presentes en la zona a distintas escalas. Se continúa con la descripción de la geomorfología en términos de pendientes, ocupación glaciaria y orientación de laderas. Para terminar, se presenta el contacto primario – secundario definido en la zona de estudio debido a características geotécnicas y mineralógicas, principalmente.

#### **2.1.1 Introducción**

En Chile central se distinguen 3 morfoestructuras, de oeste a este: La Cordillera la Costa, Depresión Central y la Cordillera Principal. La zona de estudio se ubica en la Cordillera Principal entre 381.000 – 384.000 E y 6.330.000 – 6.340.000 N, coordenadas UTM.

La mina Los Bronces se ubica dentro del Distrito geológico Río Blanco – Los Bronces – Los Sulfatos y explota un yacimiento de Cu – Mo de tipo pórfido cuprífero, ubicado en la franja metalogénica del Mioceno tardío – Plioceno temprano (Cochilco, 2016).

El yacimiento se ubica principalmente en la Formación Farellones (Mioceno) y en los intrusivos (Mioceno – Plioceno) que se emplazan en ella, los cuales fueron afectados por distintos episodios de alteración hidrotermal y mineralización de Cu – Mo entre 7,4 y 4,9 Ma. (Warnaars y otros, 1985).

#### **2.1.2 Estratigrafía**

En esta sección se presenta una breve reseña de las formaciones en que se identifican las rocas estratificadas en la zona de estudio. Se presenta también información sobre la geología de los intrusivos y las alteraciones presentes.

## **a) Rocas estratificadas**

### *Formación Abanico (Eoceno - Mioceno) - EoMa*

Esta formación, definida por Aguirre (1960), corresponde a una secuencia que rodea los 3000 m de espesor y está formada por tobas y brechas volcánicas de colores principalmente violáceos, púrpura y gris. Posee intercalaciones de lavas andesíticas y riolíticas, además de sedimentitas volcanoclásticas consistentes en areniscas de grano fino a medio, lutitas y limos finamente estratificados, con flora fósil, escasas con relación al resto de la secuencia (Thiele, 1980). Está expuesta entre 32.5° y más al sur de 36°S. Entre 33 y 35°S se dispone en dos franjas NS paralelas en la Cordillera Principal, separadas por la Formación Farellones.

La Formación Abanico es concordante en su base con la Formación Colimapu y su techo está marcado por una discordancia angular con la Formación Farellones (Thiele, 1980). Diversas dataciones radiométricas efectuadas en distintos niveles de la columna, acotan su edad entre 36 Ma. en los depósitos cenozoicos de Las Termas del Flaco en el valle del Río Tinguiririca (Charrier y otros, 1996) y 16,1 Ma en las lavas altamente deformadas en el valle del Río Las Leñas (Kay y Kurtz, 1995). Considerando las mínimas edades obtenidas, la Formación Abanico se interpreta como producto de varios eventos volcánicos, o uno continuo de largo lapso, entre el Eoceno medio a tardío al Mioceno Temprano tardío.

Las rocas que componen esta formación se encuentran medianamente alteradas. Levi (1970) sostiene que la alteración regional es relativamente contemporánea con el volcanismo.

### *Formación Farellones (Mioceno inferior – medio) - Mf*

La formación fue definida por Klohn (1960), y su espesor se estima en 2500 m, aumentado por diversos mantos intrusivos y lacolitos que se intercalan en la secuencia. Se compone de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas, siendo las lavas predominantes en la secuencia. Posee además alternancia de rocas volcanoclásticas más finas, lo que produce una marcada estratificación que la diferencia de la Formación Abanico. Las tobas son de color gris claro y presentan clastos de riolitas y andesitas. Las ignimbritas también son de color gris claro y poseen clastos de andesitas y obsidiana. Localmente, estas rocas se presentan muy alteradas a arcilla, limolita, hematita y sílice. Sedimentitas lacustres consistentes en conglomerados, areniscas y lutitas aparecen finamente estratificadas (Thiele, 1980). Dentro de la zona de estudio se distinguen dos litofacies (Hémera, 2019): Rocas volcánicas efusivas y piroclásticas con intercalaciones de rocas epiclásticas (Mf(a)) y rocas piroclásticas (Mf(b)).

Se distribuye como una franja NS en la Cordillera Principal entre aproximadamente 32 y 35°S (Vergara y otros, 1988), manteniendo una inclinación máxima de 25°.

Su límite inferior corresponde la Formación Abanico, cuyo contacto ha sido descrito típicamente como discordante (Aguirre, 1960; Klohn, 1960; Jaros and Zelman, 1967; Charrier, 1973b, 1981b; Thiele, 1980; Moscoso y otros, 1982), mientras que otros autores lo han descrito como concordante o pseudoconcordante, o correspondiente a un cabalgamiento regional de bajo ángulo que conecta con la falla El Fierro en Las Termas del Flaco (Godoy, 1988, 1991; Godoy y Lara, 1994; Godoy y otros, 1999). Es intruída por distintos cuerpos ígneos, y gran parte de su techo corresponde a la actual superficie de erosión.

No posee fósiles para acotar una edad. Sin embargo, edades radiométricas K/Ar en plagioclasa y en roca total entre  $17,3 \pm 0,2$  y  $24,1 \pm 1$  Ma (Drake, 1976; Vergara y Drake, 1978) y edades U-Pb

en circones de valores entre  $18 \pm 0,3$  Ma y  $13,5 \pm 0,4$  Ma (Hémera, 2019) permiten asignarle una edad miocena inferior a media. En la zona de estudio se distribuyen hacia el este y noreste (Figura 2.1).

## **b) Rocas intrusivas**

### *Intrusivos Plutónicos (Mioceno) - Mg*

Conjunto de intrusivos cuya petrografía corresponde a granitos y granodioritas afectadas localmente por alteración hidrotermal (Mg(b)); monzonitas y monzonitas cuarcíferas (Mg(c)); monzodioritas y monzodioritas cuarcíferas (Mg(d)); y dioritas y dioritas cuarcíferas (Mg(e)) (Hémera, 2019). Estas rocas intruyen a la Formación Farellones y subordinadamente a la Formación Abanico. Se distribuyen extensamente en el área Los Bronces y se dispone como una franja NS limitada por fallas de desplazamiento dextral (Carrizo y otros, 2012; Piquer, 2015). Dicha franja es denominada por Piquer (2015) como batolito Río Blanco – San Francisco. López y Vergara (1982), asocian el Plutón granodiorítico Río Blanco – San Francisco a la mineralización, donde reconocieron al menos 3 eventos magmáticos (de edad 12-13 Ma., 8,3-8,5 Ma. y 5,2 Ma., respectivamente).

Su edad se atribuye al Mioceno con base en edades que varían entre 20,1 y 8,16 Ma (Warnaars, 1985 en Piquer, 2015; Deckart y otros, 2006) para rocas pertenecientes a la unidad.

Estas rocas pueden presentar distintos tipos de alteración hidrotermal según su profundidad y distancia a centros mineralizadores. Sin embargo, en profundidad se distinguen distintos eventos concéntricos asociados a sistemas mineralizados de tipo pórfido cuprífero, manifestados como zonaciones de alteración hidrotermal.

### *Intrusivos hipabisales a subvolcánicos (Mioceno Superior – Plioceno Inferior) - MPh*

Complejo subvolcánico de composición principalmente dacítica (Serrano y otros, 1996), compuesto de pórfidos dacíticos y cuerpos subvolcánicos dacíticos (MPh(a)), pórfidos andesíticos (MPh(b)), domos riolíticos y diatremas (MPh(c)) y domos dacíticos (MPh(d)) (Hémera, 2019). Estas rocas se encuentran en contacto con plutones más antiguos y brechas mineralizadas (Serrano y otros, 1996).

A estas rocas se les asocia una edad comprendida entre el Mioceno Superior y Plioceno Inferior de acuerdo con diversas dataciones U-Pb en circones que indican edades entre  $7,12 \pm 0,19$  y  $4,31 \pm 0,05$  Ma (Deckart y otros, 2013; Bertens y otros, 2010 en Toro y otros, 2012)

### *Brechas hidrotermales (Mioceno Superior – Plioceno Inferior) - MPbh*

Se han reconocido una serie de brechas hidrotermales en el distrito Río Blanco – Los Bronces, que han sido caracterizadas según sus minerales, tipo, textura y mineralización presente (Serrano y otros, 1996). Se distinguen brechas de turmalina, brechas con matriz de polvo de roca y brechas ígneas.

Las brechas de turmalina (MPbh (b)) presentan un color gris medio dado por la presencia de polvo de roca y turmalina fina. Los clastos son subredondeados y corresponden a fragmentos de andesitas y pórfidos granodioríticos-dacíticos, alterados a sericita, con tamaños de mm a m. La matriz está constituida de polvo de roca y minerales hidrotermales que constituyen la secuencia paragenética: turmalina, specularita, menor cuarzo, calcopirita y pirita, carbonatos (dolomita-ankerita) y

anhidrita. El cuerpo brechoso es cortado por vetas tipo “D” y vetillas rellenas de pirita, calcopirita y molibdenita (Hémera, 2019).

Su origen se atribuye a múltiples eventos de brechización y alteración, presentando una mineralización post brechización. Estas brechas se distribuyen en el yacimiento Los Bronces, yacimiento Río Blanco, proyecto los Sulfatos y San Manuel (Hémera, 2019).

Brechas de polvo de roca (Mpbh (a)) presentan fragmentos de monzonita cuarcífera de grano fino y con mineralización de tipo pórfido cuprífero diseminada, en una matriz de polvo de roca. Comúnmente los fragmentos como la matriz se presentan alterados homogéneamente a cuarzo sericita (Warnaars, 1985). Estas brechas afloran en el sector de Los Bronces.

Discretos cuerpos de brechas ígneas se han desarrollado por la intrusión del complejo de pórfidos Paloma y Sulfatos. Presenta clastos de cm de pórfidos granodioríticos y dacíticos, y en menor medida clastos de cm a m de andesitas muy alteradas, sub angulosos en una matriz aplítica. Estas brechas presentan zonas profundas de intensa alteración biotítica, con presencia de biotita, cuarzo, feldespato potásico y albita, con intensa diseminación de bornita. En algunas porciones altas la alteración sericítica es dominante, y está acompañada de clorita, cuarzo, turmalina, anhidrita y especularita.

Se han obtenido edades entre 7,4 y 4,2 Ma, lo que permite asignarles una edad Mioceno Superior a Plioceno Inferior a estas brechas (Serrano y otros, 1996).

### **c) Depósitos no consolidados**

#### *Depósitos glaciares (Pleistoceno – Holoceno) - PIHg*

Depósitos morrénicos polimícticos, macizos, mal seleccionados y con porcentajes entre 20 – 50% de matriz. Se componen de fragmentos mayores (0,8 – 2,5 m) redondeados a subredondeados con estrías glaciares y fragmentos medios (0,01 a 0,8 m) angulosos a sub angulosos, inmersos en una matriz tamaño arena a limo.

Estos depósitos se disponen al este del área de estudio y presentan morfologías varias que se asocian a morrenas laterales, frontales o de fondo. Poseen espesores que superan los 20 m y cubren áreas desde 5.500 a 820.000 m<sup>2</sup> (Hémera, 2019).

#### *Depósitos aluviales y aluvio-coluviales (Holoceno) - Ha*

Depósitos mal seleccionados, macizos a incipientemente estratificados, constituidos por fragmentos tamaño bloque a limo. Estos depósitos recientes se disponen como relleno de quebradas en el Sector de Los Bronces, cubriendo áreas de hasta 210.000 m<sup>2</sup>, presentándose en superficies suavizadas con pendientes menores a 15° en facies proximales y entre 5° y 8° en facies distales. Los depósitos de relleno de fondo de valle alcanzan extensiones de hasta 200m de largo, mientras que los de morfología de abanico alcanzan 300 m desde el pie al ápice (Hémera, 2019).

#### *Depósitos coluviales (Pleistoceno – Holoceno) - Hc*

Depósitos esencialmente monomícticos y presentar estratificación gruesa con inclinaciones fuertes a moderadas con pendientes de hasta 35°, clastosoportados y formados por fragmentos angulosos a subangulosos, con tamaño variable de bloque en la parte baja a arena gruesa en las partes altas. Se consideran de origen gravitacional, tanto antiguos como recientes que se acumulan en las laderas

presentando morfologías de conos de deyección, pudiendo alcanzar hasta 700 m de extensión del pie al ápice. Cubren áreas de hasta 740.000 m<sup>2</sup> (Hémera, 2019).

#### *Depósitos de flujo de detritos (Holoceno) - Hfd*

Corresponden a depósitos macizos, de muy mala selección, localmente clastosoportados y polimícticos, con fragmentos mayores angulosos a subangulosos, inmersos en una matriz fina de tamaño arena y limo, con menor arcilla. Estos depósitos recientes se presentan con morfologías de superficies lobuladas, levées laterales y frentes abruptos, eventualmente suavizados por erosión, parcialmente retrabajados y/o disectados por cursos actuales de ríos. Se ubican como relleno de valles en el sector de Los Bronces, donde suelen encontrarse interdigitados con depósitos del mismo origen y/o con depósitos aluviales y coluviales. Cubren áreas de hasta 280.000 m<sup>2</sup>, presentando extensiones que superan los 1,5 km de largo.

#### *Depósitos antrópicos (Holoceno – actual) - Han*

Constituyen a esta unidad todo tipo de modificaciones a la superficie natural del terreno como consecuencia de la actividad antrópica actual o reciente. En el sector Los Bronces están ampliamente distribuidos, cubriendo un área total de aprox. 660 km<sup>2</sup>. Los depósitos se asocian a las faenas de explotación de los yacimientos de cobre Río Blanco y Los Bronces.

#### **d) Alteración hidrotermal**

En el Distrito Río Blanco – Los Bronces se reconoce una relación entre el tipo de alteración hidrotermal que afecta las rocas, el volumen de mineralización y el desarrollo de distintos tipos de brechas hidrotermales (Hémera, 2019). Superficialmente, la alteración dominante corresponde a la alteración cuarzo-sericita que afecta a rocas pertenecientes a la Formación Farellones y rocas intrusivas miocenas (Irrázaval y otros, 2010). No obstante, estudios en profundidad en el sector Los Bronces sugieren la presencia de otras alteraciones (AAS, 2019) como alteración potásica, alteración biotítica, alteración sericítica y cuarzo-sericítica, alteración clorita-cuarzo-sericita, alteración propilítica, alteración actinolita-magnetita y alteración argílica intermedia. Entre ellas, Serrano y otros (1996) destaca:

- Zona de alteración potásica rica en biotita, que estaría asociada a mineralización de alta ley, se encuentra diseminada y en *stockwork*.
- Zona de alteración hidrotermal rica en actinolita y magnetita, dispuesta alrededor de la alteración potásica, y que hospeda brechas de actinolita y magnetita como minerales principales.
- Zona de alteración sericítica (fílica), que presenta grandes cuerpos de brechas de turmalina mineralizadas, que también ocurren en la periferia de la zona de alteración potásica y de mineralización de alta ley.

### 2.1.3 Geología estructural

En Los Andes de Chile Central y Argentina (32-35°S) se pueden distinguir dos dominios estructurales. Un dominio oriental y otro occidental, cuya separación está dada por las Fallas Río Olivares, El Fierro y Altos de Juncal, de rumbo NS a NO, que pliegan rocas cretácicas y las disponen sobre la Fm. Abanico por contacto de falla (Piquer, 2015).

El dominio oriental, está referido a rocas sedimentarias marinas y continentales altamente deformadas, de edad Jurásico a Cretácico temprano, que constituyen la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua (Ramos, 1996). Por su parte, el dominio occidental, donde se ubica la zona de estudio, está compuesto por la Formación Abanico y Formación Farellones, rocas de edad eocena a pliocena, asociadas al desarrollo e inversión de una cuenca intra-arco (Charrier, 2002a). Este dominio se encuentra acotado por el este por fallas inversas de vergencia este, cuya falla principal corresponde a la falla El Diablo (Fock y otros, 2006), mientras que al oeste es limitado por la falla inversa San Ramón, de vergencia oeste y sus equivalentes hacia el norte, Falla Alto del Juncal-El Fierro y Falla Pocuro, respectivamente (Piquer y Skarmeta, 2012). Todas de rumbo aproximado NS. En este sector, las estructuras que deforman la Fm. Abanico corresponden principalmente a pliegues asimétricos de variable amplitud y longitud de onda, con ejes de rumbo NS a NE (Charrier, 2002; Fock, 2005). Mientras que la Fm. Farellones en general presenta una estratificación subhorizontal, con un leve basculamiento al oeste y desarrollo de pliegues menos intensos. (Quiroga, 2013). En la zona, de manera general los pliegues muestran vergencia al O y están asociados a la propagación de fallas inversas de vergencia O, asociadas a un acortamiento en dirección EO (Carrizo y otros, 2014).

En este dominio se reconocen además estructuras de orientaciones NS, NE-SO, NO-SE (Carrizo y otros, 2012; Piquer, 2015). Dentro de las que poseen orientación NS se encuentran la Falla Río Olivares, Falla El Quempo, Falla El Fierro-Altos de Juncal, además de las del distrito minero Río Blanco – Los Bronces. Las fallas regionales de orientación NS no afloran en el Distrito, son ciegas (aprox. 4-5 km de profundidad) y actúan deformando a las rocas de las formaciones Abanico y Farellones (Carrizo y otros, 2014). Entre las fallas de orientación NE destacan las presentes del Distrito Río Blanco – Los Bronces (Fallas Saladillo, El Salto y Flores) de movimiento dextral con componente inversa menor (Carrizo y otros, 2012; Piquer, 2015). Las estructuras NO presentes en el distrito minero Río Blanco – Los Bronces son Ortiga, Barriga y Río Blanco – Los Bronces, asociadas por pliegues de arrastre en rocas de las formaciones Abanico y Farellones (Piquer, 2015).

La deformación superficial en el área está dada por estructuras discretas con trazas estimadas no mayores a 10 km y corresponden a vetas, vetas-falla y fallas menores, estratificación y fallas intracutáneas. No superan los 6 m de espesor de relleno hidrotermal y los 4 km de persistencia (Carrizo y otros, 2014). La apertura de las estructuras dispuestas en la Fm. Farellones es variada, no superando 5 cm y cerrándose en profundidad. La cinemática de estas estructuras indica tensión y movimientos de rumbo, dominando estructuras de orientación NE-SO de tipo dextral. La deformación intracutánea aparece en acortamiento subordinado asociado al cizalle de estratificación de lavas. Esta deformación secundaria es independiente de las estructuras orogénicas responsables del relieve (Carrizo y otros, 2014).

La orientación preferencial de las estructuras frágiles superficiales responde a una deformación difusa, donde domina la tensión y el cizalle lateral.

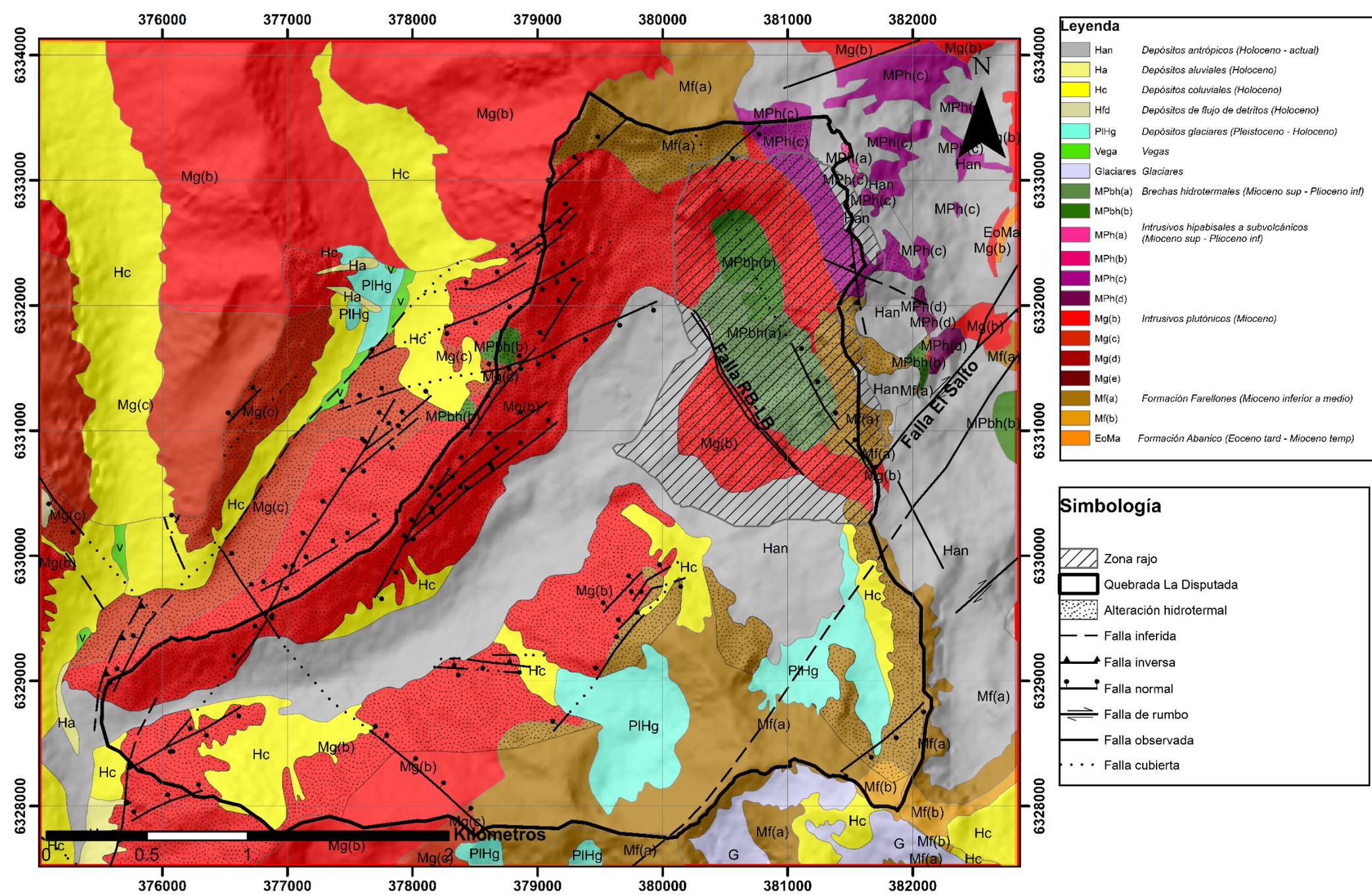


Figura 2.1: Mapa geológico del área de estudio. Elaboración propia basado en Hémera (2019) y Piquer y otros (2015).

## 2.1.4 Geomorfología

La zona de estudio se encuentra en la Cordillera Principal Occidental de Chile central. Dado este ambiente montañoso, constituye una zona de alta pendiente y presencia de glaciares tipo rocoso mayoritariamente. La zona de estudio se ubica dentro de Quebrada La Disputada, que es parte de la subsubcuenca del Río San Francisco, que pertenece a la subcuenca Mapocho Alto, que a su vez está dentro cuenca del Río Maipo.

La delimitación de la subsubcuenca del Río San Francisco se realizó con base en un modelo de elevación digital (DEM) Alospasar de resolución 12 m y la información de la DGA. La delimitación de Quebrada La Disputada se hizo en base a la información disponible en AAS (2019).

La Tabla 2.1 resume las características de la Subsubcuenca San Francisco y Quebrada La Disputada, en términos de pendientes, área, alturas y porcentaje de ocupación glaciar.

Tabla 2.1: Características geomorfológicas de Subsubcuenca San Francisco y Quebrada La Disputada

| Característica<br>Sector             | Área<br>[km <sup>2</sup> ] | Cota<br>mínima<br>[m.s.n.m] | Cota<br>máxima<br>[m.s.n.m] | Cota media<br>[m.s.n.m] | Pendiente<br>máxima | Pendiente<br>media | % de<br>ocupación<br>glaciar |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|
| Subsubcuenca<br>Río San<br>Francisco | 294                        | 1.168                       | 5.402                       | 3.094                   | 79°                 | 27,6°              | 5,2                          |
| Quebrada La<br>Disputada             | 22                         | 2.805                       | 4.896                       | 3.707                   | 76°                 | 28,2°              | 7,65                         |

La Figura 2.2 presenta la delimitación de la subsubcuenca y la quebrada, además de la distribución de glaciares en la zona según el inventario público de glaciares DGA. Se han distinguido distintos tipos de ellos de acuerdo con el Atlas del Agua (DGA, 2015), entre los que se encuentran:

- **Glaciar de montaña:** Glaciares de distintas formas que se encuentran confinados por un terreno montañoso.
- **Glaciar rocoso:** Glaciares compuestos predominantemente por fragmentos de roca, sedimentos o materiales finos e intersticialmente por hielo, mostrando evidencias de flujo presente o pasado.
- **Glaciarete:** Glaciares de extensión menor a 25 hectáreas, sin marcados patrones de flujo visible en su superficie.

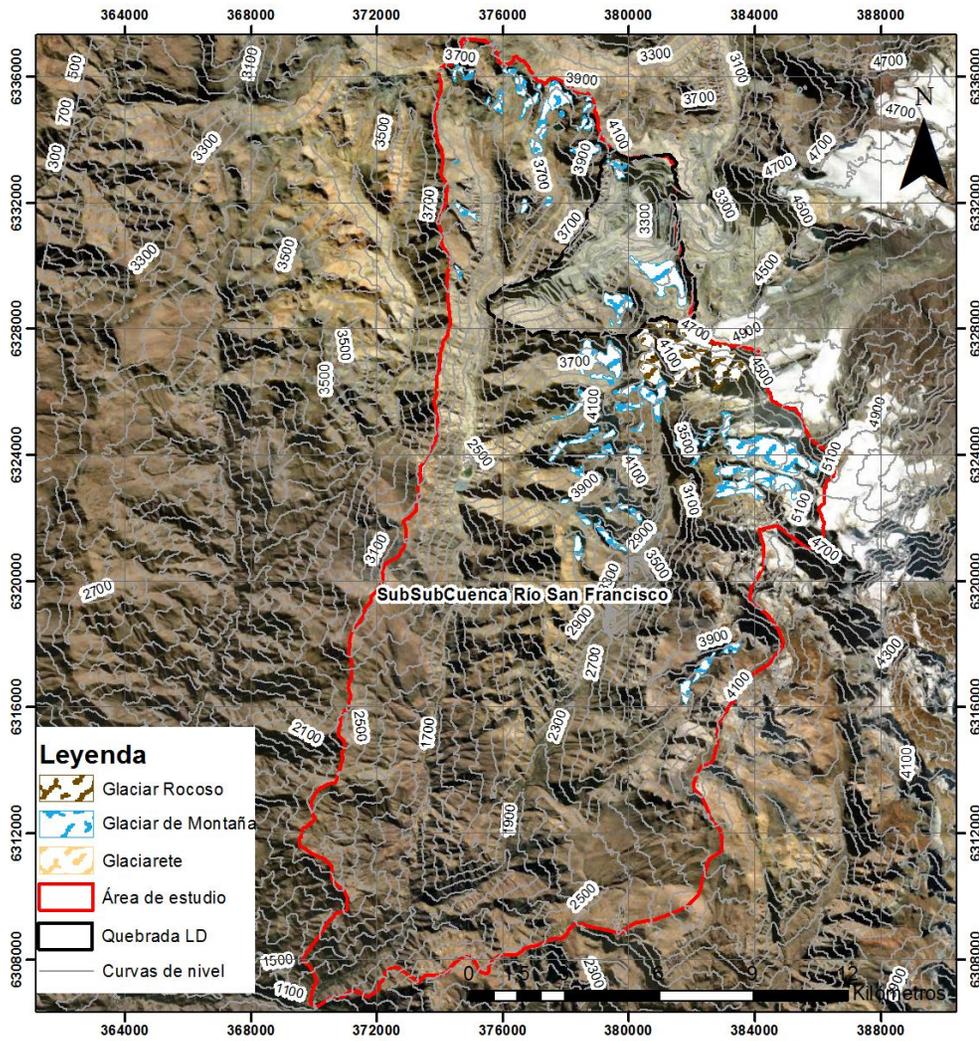
En Quebrada La Disputada, los glaciares rocosos Infiernillo, Agua Los Machos y La Perla se ubican entre las cotas 3.600 a 4.400 m.s.n.m. Las cotas presentes en la zona de estudio, fluctúan entre 3.200 m.s.n.m y 4.800 m.s.n.m (Figura 2.2), aproximadamente, siendo la cota media 3.700 m.s.n.m, tal como muestra la tabla 2.1.

Las pendientes más bajas del área de estudio se encuentran en la zona de los valles y el rajo, para aumentar progresivamente en las laderas, alcanzando las pendientes más altas en las zonas de mayor altura (Figura 2.3). La orientación de laderas en la zona (Figura 2.4), muestra que la mayor parte de las laderas posee una orientación oeste en la Subsubcuenca del río San Francisco y noroeste en el caso de la Quebrada La Disputada, tal como resume la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Proporción de orientación de laderas en los distintos sectores

| <b>Sector/<br/>Orientación ladera</b> | <b>Subsubcuenca Río<br/>San Francisco</b> | <b>Quebrada<br/>Disputada</b> | <b>La</b> |
|---------------------------------------|---|-------------------------------|-----------|
| Plano                                 | 0,28 %                                    | 1,01%                         |           |
| Norte                                 | 5,58%                                     | 15,78%                        |           |
| Noreste                               | 3,75%                                     | 3,99%                         |           |
| Este                                  | 10,84%                                    | 4%                            |           |
| Sureste                               | 14,25%                                    | 11,35%                        |           |
| Sur                                   | 11,63%                                    | 11,58%                        |           |
| Suroeste                              | 16,01%                                    | 8,56%                         |           |
| Oeste                                 | 21,51%                                    | 18,78%                        |           |
| Noroeste                              | 16,15%                                    | 24,95%                        |           |

**A) Mapa de glaciares Subsubcuenca Río San Francisco**



**B) Mapa de glaciares Quebrada La Disputada**

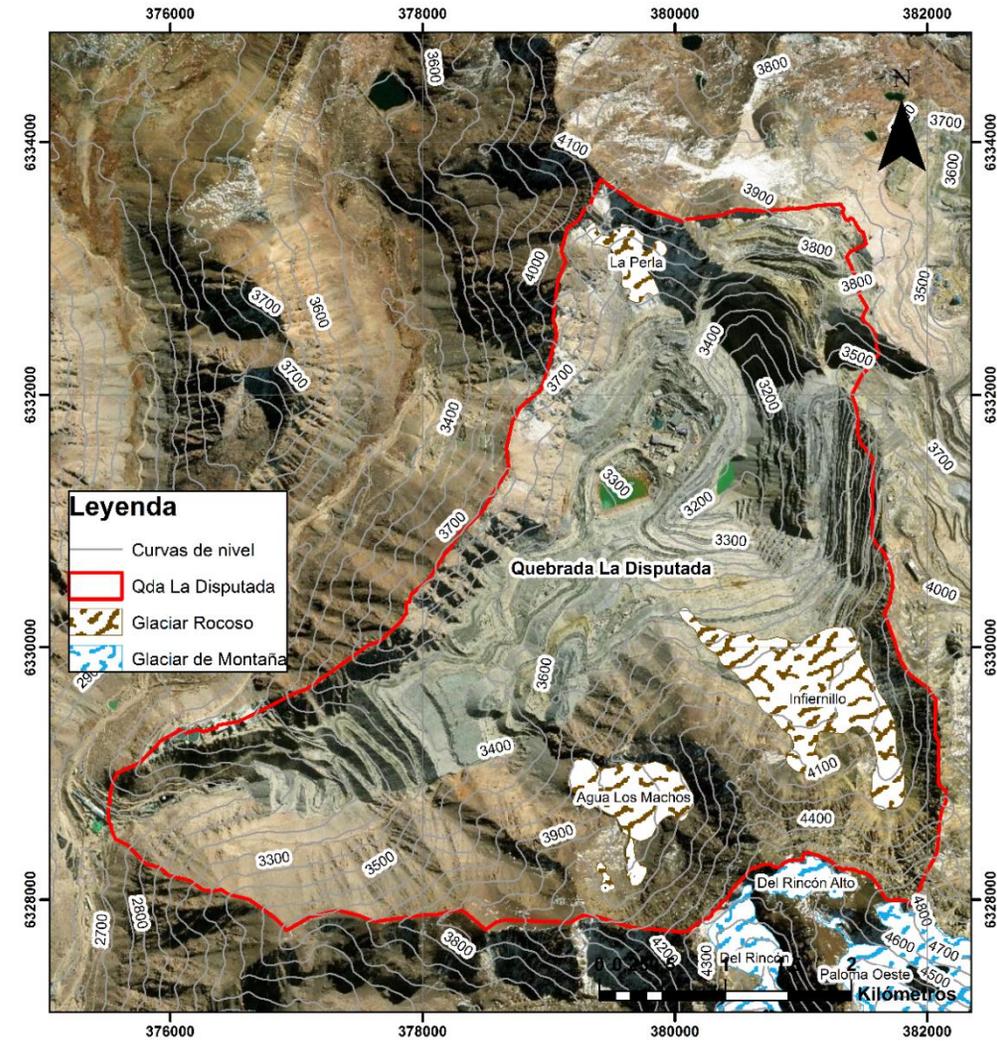
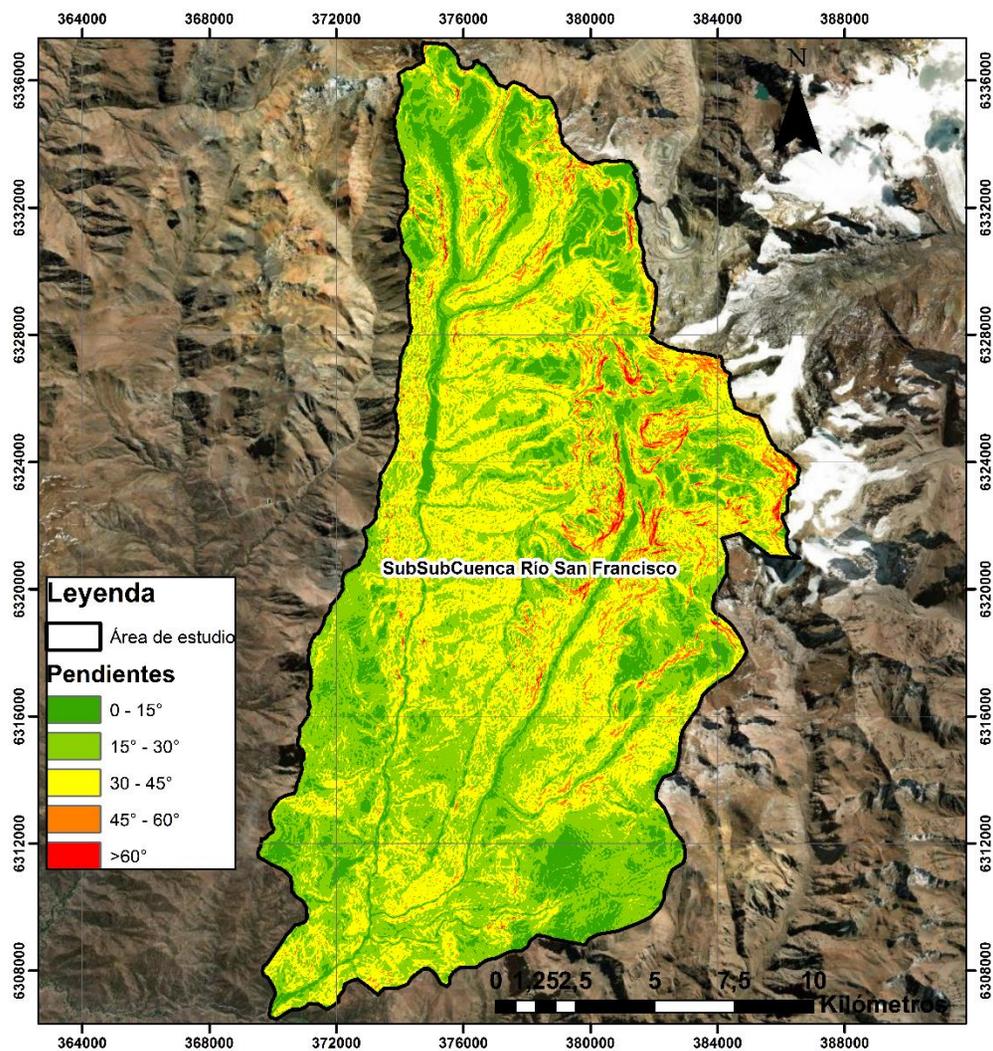


Figura 2.2: Mapa de glaciares presentes en el área de estudio. A) Subsubcuenca San Francisco. B) Quebrada La Disputada y Quebrada Yerba Loca. Fuente: Elaboración propia.

A) Mapa de pendientes Subsubcuenca Río San Francisco



B) Mapa de pendientes Quebrada La Disputada

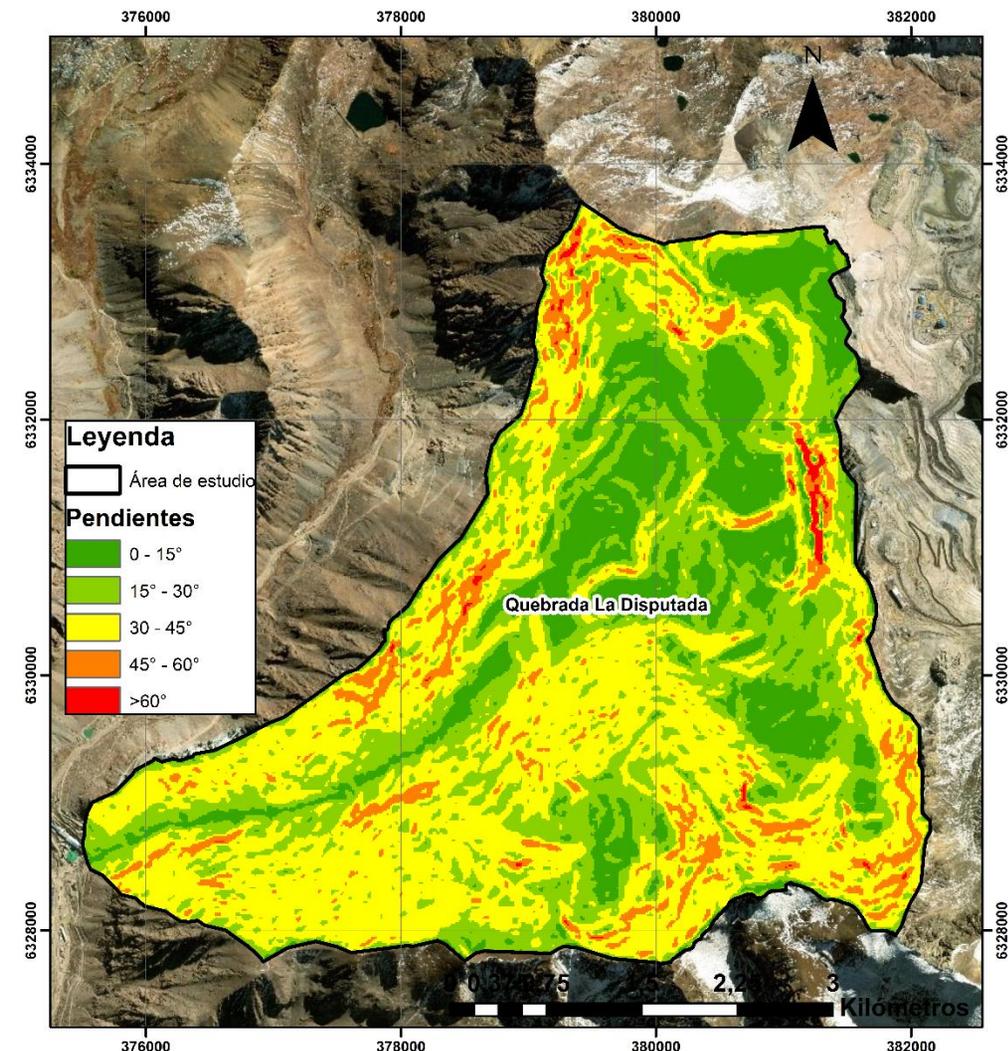
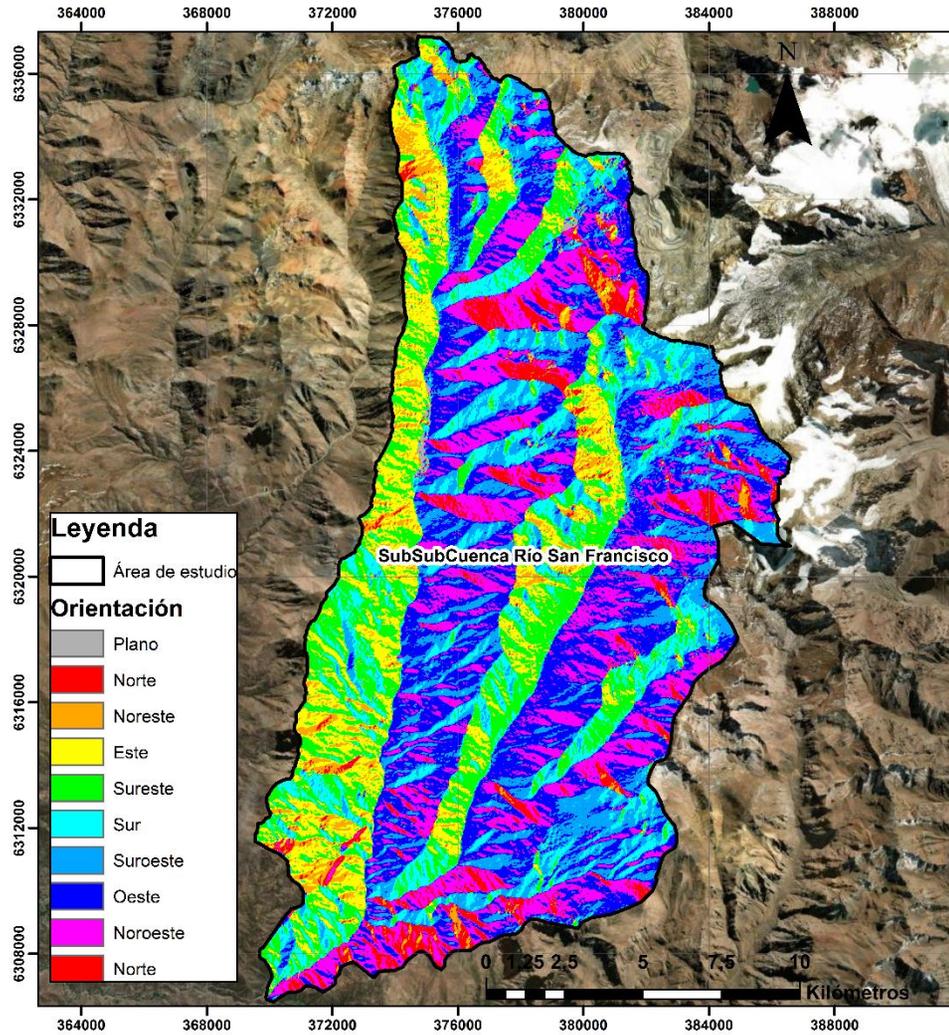


Figura 2.3: Mapa de pendientes del área de estudio. A) Subsubcuenca San Francisco. B) Quebrada La Disputada y Quebrada Yerba Loca. Fuente: Elaboración propia.

**A) Mapa de orientación Subsubcuenca Río San Francisco**



**B) Mapa de orientación Quebrada La Disputada**

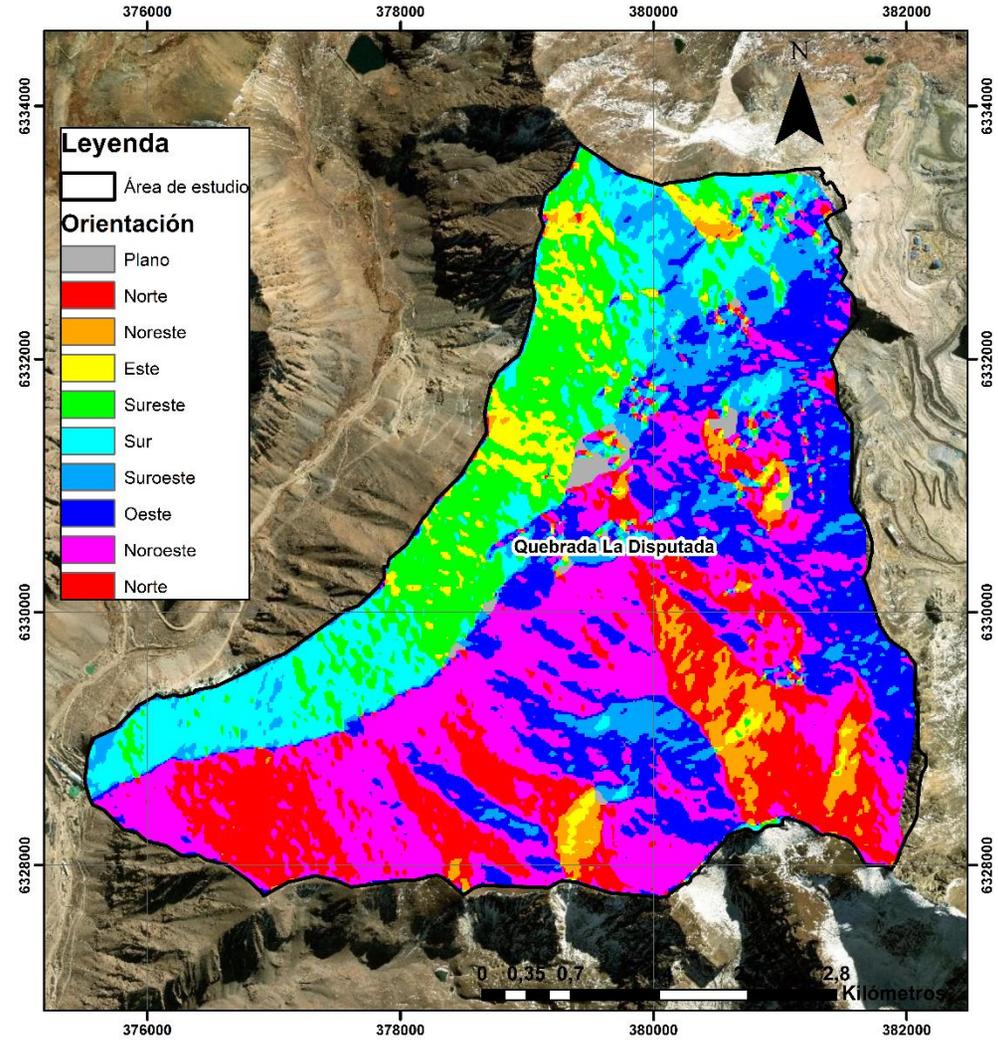


Figura 2.4: Mapa de orientación de laderas del área de estudio. A) Subsubcuenca San Francisco. B) Quebrada La Disputada y Quebrada Yerba Loca. Fuente: Elaboración propia.

### **2.1.5 Contacto primario – secundario**

La interacción de un macizo rocoso expuesto a superficie con las condiciones climáticas y sus variables de temperatura, humedad, precipitaciones, viento, etc., gatilla su meteorización tanto física como química y controla la intensidad de esta (González de Vallejo y otros, 2002). En el caso de un macizo rocoso que alberga un yacimiento tipo pórfido cuprífero, ocurre una zonación vertical referente a la calidad geotécnica y a la alteración/mineralización que afecta a las rocas, encontrando cerca de la superficie rocas de mayor meteorización física, con ocurrencia de procesos como lixiviación y oxidación de sulfuros e hidratación de anhídrita a raíz de la cual se forma yeso secundario (roca secundaria).

En profundidad, en cambio, se presenta una roca geotécnicamente competente, sin fracturas o cuyas fracturas se encuentran selladas con yeso o anhídrita (roca primaria). La proveniencia de los sulfatos que sellan fracturas es asociada a procesos hidrotermales, relacionada a distintos episodios de alteración que originaron el yacimiento de tipo pórfido cuprífero (AAS, 2019). En otras palabras, en superficie se encuentra el mismo tipo de roca que en profundidad, pero altamente fracturada y con alteración supérgena producto de lixiviación y oxidación, debido a la interacción con agua meteórica y condiciones superficiales. De esta manera, una vista en perfil exhibiría la transición de roca secundaria a primaria, al aumentar la profundidad (Figura 2.5).

Dada la competencia y sellamiento de las fracturas en la roca primaria, su permeabilidad es prácticamente nula, actuando como un piso impermeable o basamento hidrogeológico de cara a los flujos de agua que la alcanzan por medio de la infiltración a través de la roca secundaria, generando así que el agua escurra hacia cotas menores por medio de zonas preferenciales de circulación como fracturas, discontinuidades, etc. (AAS, 2019). Sumado al cambio de la calidad geotécnica de la roca primaria a la secundaria, también se considera un cambio en la mineralogía presente. El horizonte secundario, se entiende dominado por procesos supérgenos y la mineralogía asociada, mientras que el primario evidencia procesos y mineralogía hipógena. Dado esto, el contacto primario – secundario se define como la superficie que separa ambos horizontes (AAS, 2019). En el Distrito Los Bronces – Río Blanco – Los Sulfatos hay presencia de abundante anhídrita asociada a mineralización hipógena en zonas de alteración potásica, y por tanto ausente en zonas supérgenas. Debido a esto, en algunos sectores su presencia y la transición yeso - anhídrita se interpreta como indicador del contacto primario – secundario (AAS, 2019).

En este trabajo, se ha modelado la geometría de esta superficie de contacto primario secundario mediante el uso de Leapfrog, tomando como criterios el estado geotécnico de la roca (RQD, grado de fracturamiento), presencia/ausencia de minerales secundarios y profundidad del sondaje, según los datos proporcionados por AAS (2019,2020).

#### **Quebrada La Disputada**

En el sector de Los Bronces se observa una alta correlación de la primera aparición de yeso con las zonas de mayor RQD (Rock Quality Designation). Dadas las características de los sondajes, se estima que el contacto primario – secundario se encuentra a profundidades variables entre 150 a 500 m (AAS, 2019).

Este contacto, se interpreta además como límite inferior del nivel freático en Los Bronces, ya que el agua no suele infiltrar la roca primaria cuyas fracturas están selladas por yeso – anhídrita. Este hecho queda de manifiesto en tanto en el Rajo Los Bronces como en los primeros 2.600 m del Túnel de Exploración Los Sulfatos en roca secundaria (AAS, 2019).

La Figura 2.5 muestra la transición de dominio secundario a primario en sondajes y un perfil esquemático de él en profundidad.

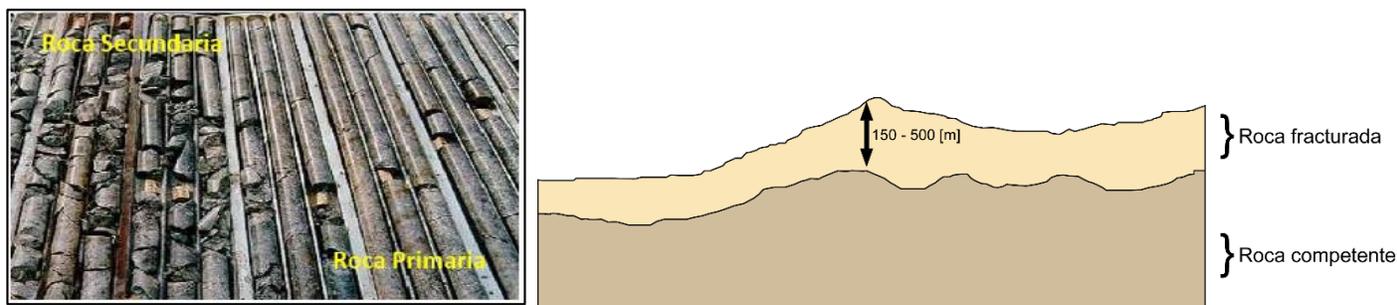


Figura 2.5: Contacto primario – secundario. Figura tomada de AAS (2019) (izquierda) y elaboración propia (derecha), basado en AAS. 2019.

## 2.2 Caracterización hidrológica

En esta sección se presentan las componentes hidrológicas de la subsubcuenca donde se sitúa la mina Los Bronces. Se comienza con el gráfico y resumen de datos registrados para la precipitación y fluviometría en estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA y a Angloamerican. Posteriormente se presenta la situación de la escorrentía en la Quebrada La Disputada para finalizar con la evolución temporal del Embalse Los Bronces.

### 2.2.1 Precipitación

Dentro de la subsubcuenca del río San Francisco se ubican estaciones meteorológicas de la DGA y propias de AAS (Figura 2.6). A continuación, se resumen brevemente su registro de datos y los promedios mensuales de precipitación. El registro de datos utilizados se presenta en el anexo 1.

#### Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA

Esta estación posee un registro de datos semicontinuo entre 2009 y 2020, presentando una falta de datos en algunos meses de 2017, 2018 y 2019.

Tabla 2.3: Estadística de promedios de precipitación mensual [mm] período 2009 – 2020. Fuente: DGA

| Estadística       | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May   | Jun  | Jul  | Ago   | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|-------------------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|
| <b>Promedio</b>   | 2    | 4,2  | 11,6 | 18,5 | 43    | 48,2 | 32,4 | 68,5  | 30   | 32,1 | 11,4 | 10,2 |
| <b>Mínimo</b>     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 1,3  | 0,5   | 0    | 3,4  | 0,1  | 0    |
| <b>Máximo</b>     | 10,9 | 21,2 | 88   | 120  | 154,4 | 118  | 94   | 260,6 | 54,4 | 84,2 | 24,6 | 49,9 |
| <b>Desv. Est.</b> | 4,1  | 8,1  | 30,9 | 41,3 | 54,6  | 38,4 | 32,4 | 99,6  | 22,6 | 36,5 | 11,8 | 22,2 |

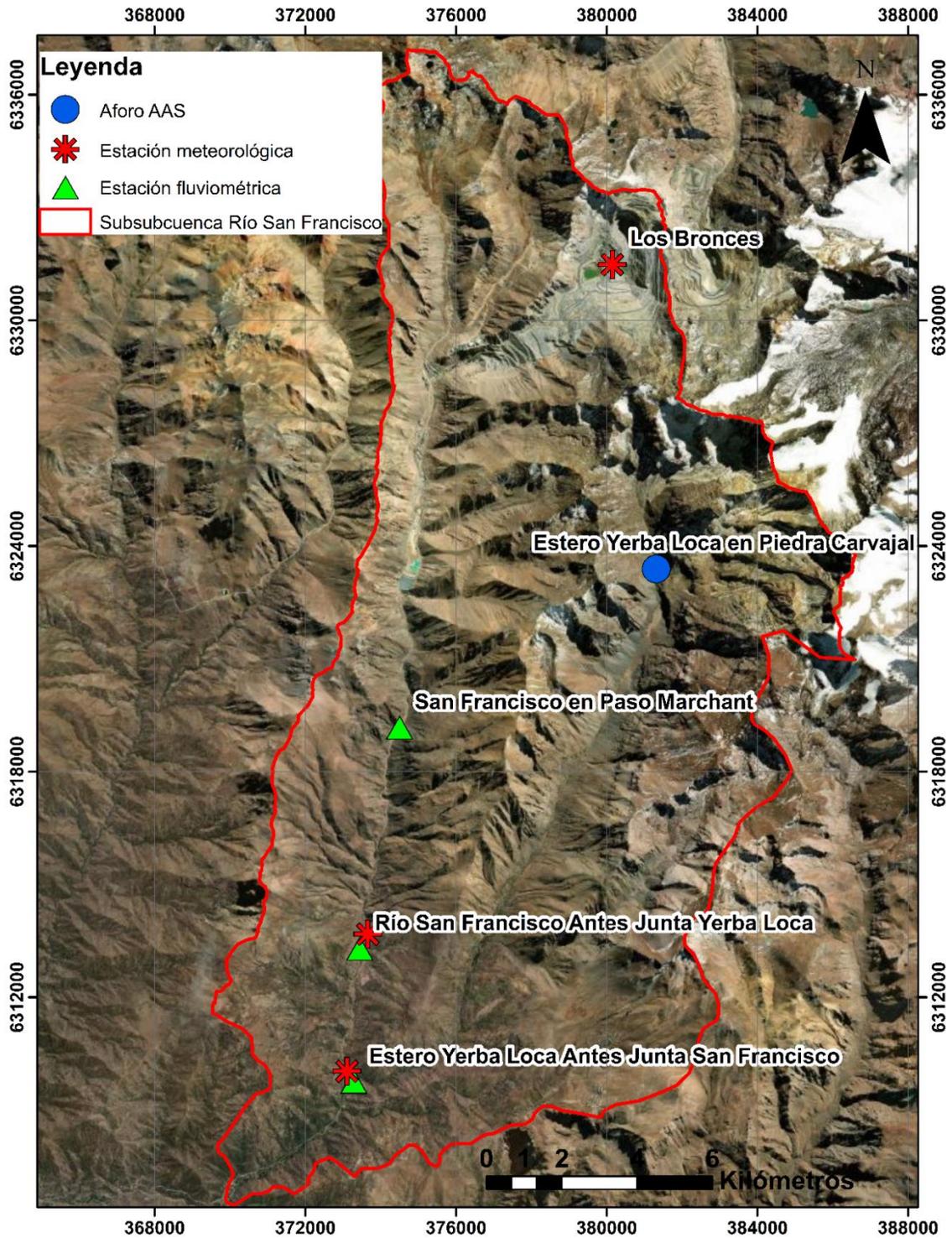


Figura 2.6: Ubicación de estaciones meteorológicas y fluviométricas en el área de estudio. Elaboración propia basado en AAS (2019).

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 2.3, se puede ver que las precipitaciones son mayores entre junio y agosto. En el período, se registra un máximo de precipitación igual a 260,6 [mm] en agosto y se alcanza un valor máximo promedio de 68,5 [mm] en agosto, mientras que los valores son

menores en los meses de verano diciembre a febrero, alcanzando un mínimo promedio de 1,9 [mm] en enero (Figura 2.7).

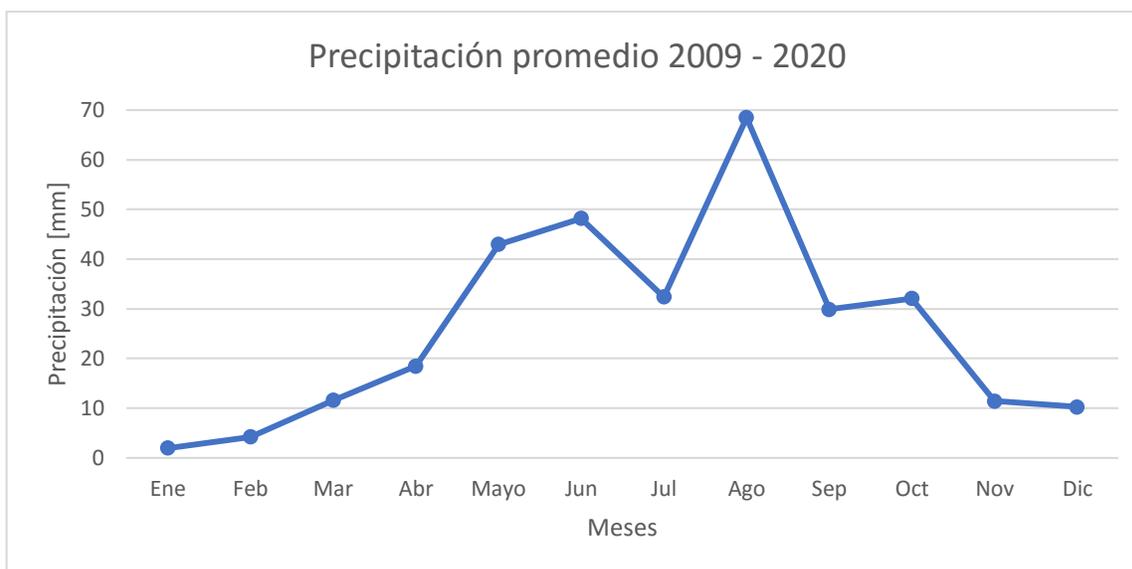


Figura 2.7: Comportamiento pluviométrico promedio mensual 2009 – 2020. Fuente: DGA

### Estación Los Bronces – AAS

El registro de esta estación comprende un registro continuo desde 1980 a 2015, presentando solo algunos datos faltantes entre 2014 y 2015.

Tabla 2.4: Estadística de promedios de precipitación mensual [mm] período 1980 – 2015. Fuente: AAS

| Estadística      | Ene | Feb | Mar  | Abr  | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep  | Oct  | Nov  | Dic |
|------------------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|
| <b>Promedio</b>  | 5,2 | 3,2 | 9,4  | 46,5 | 110,5 | 183,4 | 155,4 | 105,5 | 66,4 | 24,9 | 11,2 | 2,3 |
| <b>Mínimo</b>    | 0   | 0   | 0    | 0    | 8     | 18    | 3     | 1     | 0    | 0    | 0    | 0   |
| <b>Máximo</b>    | 29  | 22  | 44   | 217  | 312   | 704   | 670   | 345   | 295  | 144  | 71   | 15  |
| <b>Dev. Est.</b> | 8,3 | 5,8 | 11,7 | 54,8 | 84,4  | 158,6 | 157,4 | 91,3  | 62,4 | 29,3 | 17,8 | 4,2 |

En este caso, se repite la tendencia descrita anteriormente, presentando lo mayores valores promedio de precipitación durante los meses de invierno (Tabla 2.4). El valor máximo de precipitación del registro corresponde a 704 [mm] durante junio y el máximo promedio es igual a 183,4 [mm] en junio. Los valores mínimos promedio se registran durante los meses de verano, siendo el valor mínimo en este caso igual a 2,3 [mm], durante diciembre (Figura 2.8).

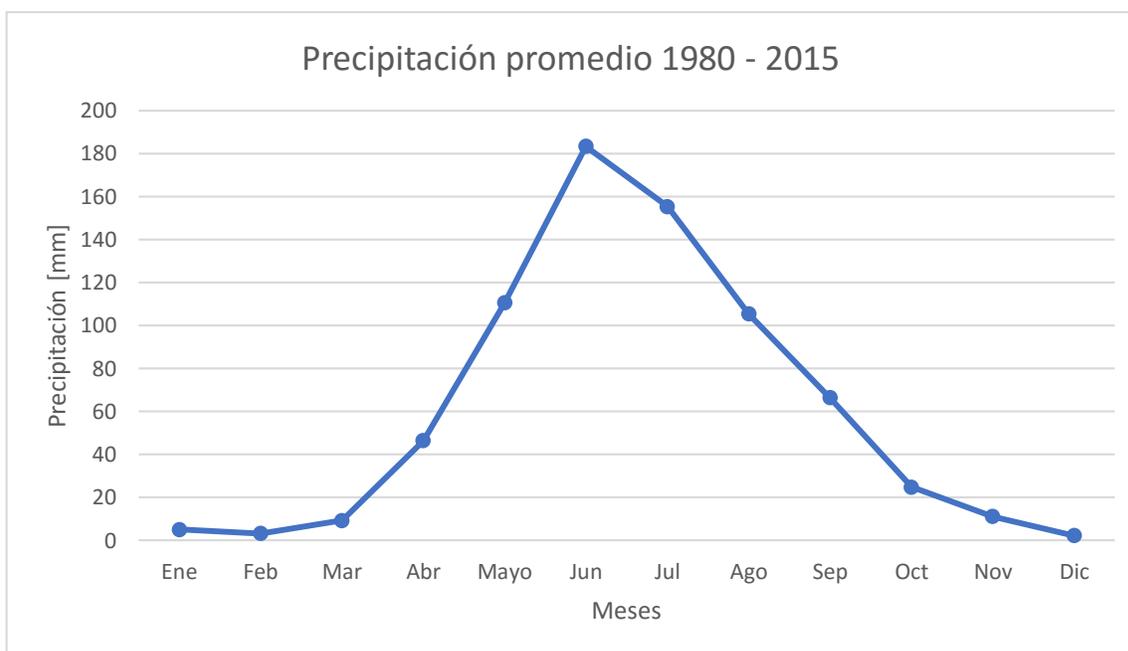


Figura 2.8: : Comportamiento pluviométrico promedio mensual 1980 – 2015. Fuente: AAS

### Estación Estero Yerba Loca antes junta Río San Francisco - DGA

Esta estación posee un registro de datos entre 2009 y 2020, presentando algunos datos faltantes entre 2017 y 2018.

Tabla 2.5: Estadística de promedios de precipitación mensual período 2009 – 2020. Fuente: DGA.

| Estadística       | Ene  | Feb  | Mar  | Abr   | May   | Jun   | Jul  | Ago   | Sep   | Oct  | Nov  | Dic  |
|-------------------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|
| <b>Promedio</b>   | 2,3  | 4    | 5,14 | 24,3  | 36,7  | 65,2  | 36,2 | 51,5  | 34,5  | 22,7 | 10,6 | 9,6  |
| <b>Mínimo</b>     | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 2,2  | 0     | 0     | 0,2  | 0    | 0    |
| <b>Máximo</b>     | 11,1 | 19,4 | 43,6 | 140,5 | 102,4 | 130,4 | 78,2 | 142,8 | 117,4 | 59,6 | 58,3 | 53,5 |
| <b>Desv. Est.</b> | 3,9  | 7    | 13,6 | 48,0  | 39,2  | 36,5  | 22,4 | 46,0  | 37,8  | 23,1 | 18,4 | 19,1 |

Se observa que los registros siguen la misma tendencia, el máximo de precipitación del registro de esta estación se presenta durante agosto con un valor de 142,8 [mm] y el promedio máximo de precipitación es igual a 65 [mm] en junio (Tabla 2.5). Por su parte, el promedio mínimo se registra en enero, alcanzando un valor igual a 2,3 [mm]. Lo anterior se grafica en la Figura 2.9.

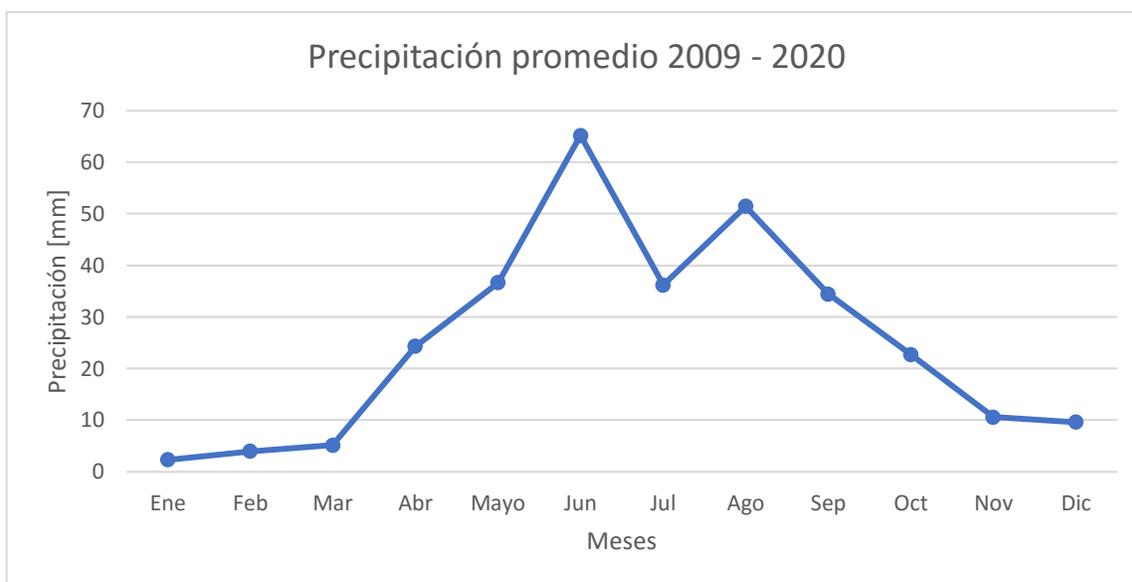


Figura 2.9: Comportamiento pluviométrico promedio mensual 2009 – 2020. Fuente: DGA

### 2.2.2 Fluviometría

Para caracterizar la fluviometría de la subsubcuenca del Río San Francisco se realizan curvas de variabilidad estacional promedio con datos de años hidrológicos (abril – marzo) de acuerdo a los registros mensuales de las estaciones de la DGA y de AAS (Figura 2.6). La subsubcuenca del Río San Francisco presenta intervenciones antrópicas históricas, por lo que el registro representa la situación actual y no el régimen natural (AAS, 2019). El registro de datos utilizado se presenta en el anexo 1.

#### Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA

El registro de datos en esta estación corresponde a los caudales mensuales [ $m^3/s$ ] desde 2009/2010 hasta 2019/2020, con datos relativamente continuos desde mediados del 2010, presentando algunos vacíos en el período previo.

Tabla 2.6: Estadística de promedios de caudal mensual [ $m^3/s$ ] período 2009/10 – 2019/20. Fuente: DGA.

| Estadística       | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb  | Mar  |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| <b>Promedio</b>   | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,1  | 0,1  |
| <b>Desv. Est.</b> | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,1 | 0,02 | 0,02 |

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 2.6, se observa que los mayores caudales se registran en la época de deshielo, especialmente durante noviembre y diciembre (Figura 2.10).

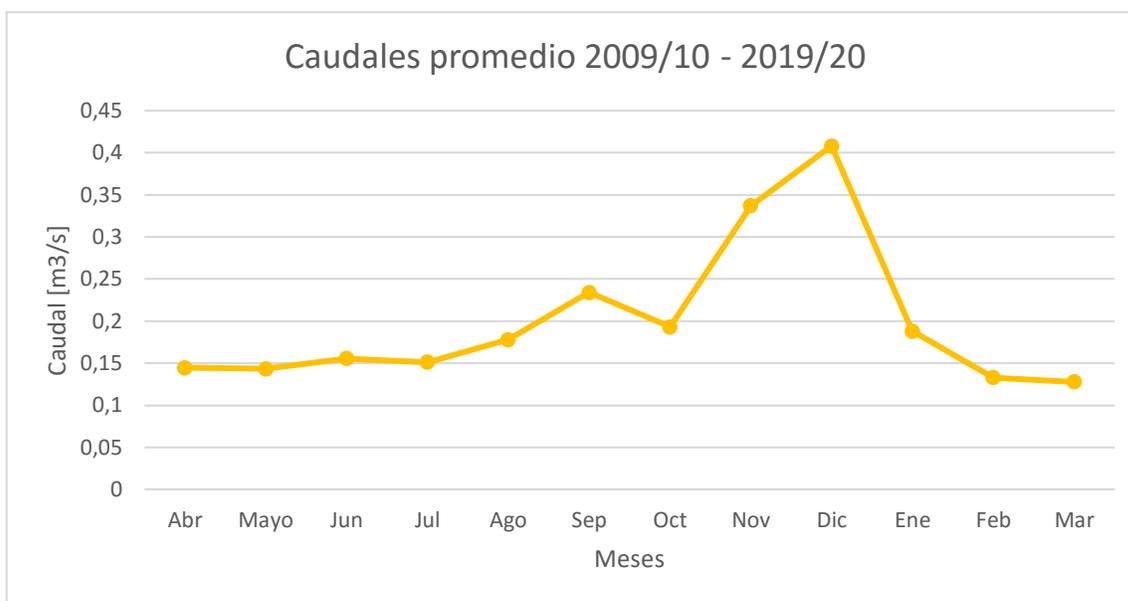


Figura 2.10: Comportamiento caudal promedio mensual 2009/10 – 2019/20. Fuente: DGA

### Estación Río San Francisco en paso Marchant – AAS

La estación de Angloamerican posee registros desde 2007/08 hasta 2017/18, presentando solo falta de datos en algunos meses.

Tabla 2.7: Estadística de promedios de caudal mensual [m³/s] período 2007/08 – 20 17/18. Fuente: AAS.

| Estadística       | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Promedio</b>   | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| <b>Desv. Est.</b> | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,7 | 0,6 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |

El comportamiento registrado en esta estación tiene la misma tendencia que el caso anterior, con los caudales más altos también en noviembre y diciembre (Tabla 2.7), lo que se ilustra en la Figura 2.11.

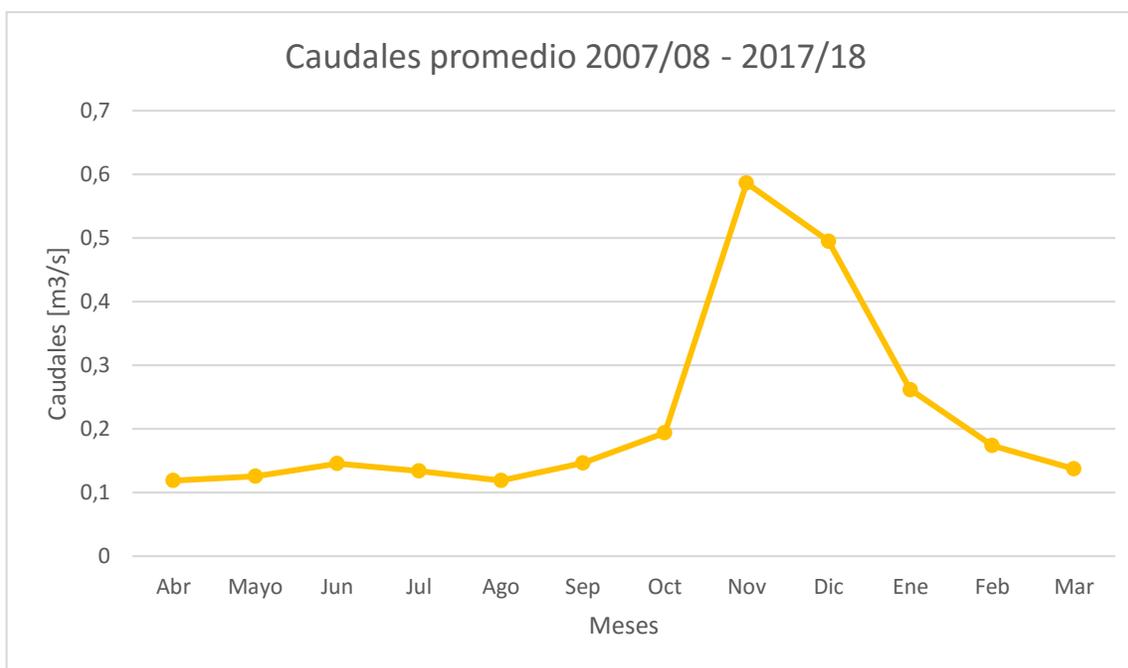


Figura 2.11: Comportamiento caudal promedio mensual 2007/08 – 2017/18. Fuente: AAS

### Estación Estero Yerba Loca antes junta Rio San Francisco – DGA

Esta estación presenta un registro completo de datos que comprende desde 1986/87 hasta 2019/20.

Tabla 2.8: Estadística de promedios de caudal mensual [m³/s] período 1986/87 – 2019/20. Fuente: DGA.

| Estadística       | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Promedio</b>   | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 1,5 | 2,4 | 2,2 | 1,4 | 0,9 |
| <b>Desv. Est.</b> | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,9 | 1,6 | 0,1 | 0,6 | 0,4 |

En general, en la Figura 2.12, se observa que la escorrentía es mayor entre los meses octubre a marzo, concentrándose en noviembre y diciembre (Tabla 2.8), lo que es coherente considerando un régimen hidrológico nival para la subsubcuenca.

De acuerdo con lo anterior, aguas abajo de la cuenca hay un aumento de la fluvimetría, tal como resume la Figura 2.13, según la ubicación de las estaciones fluviométricas (Figura 2.6).

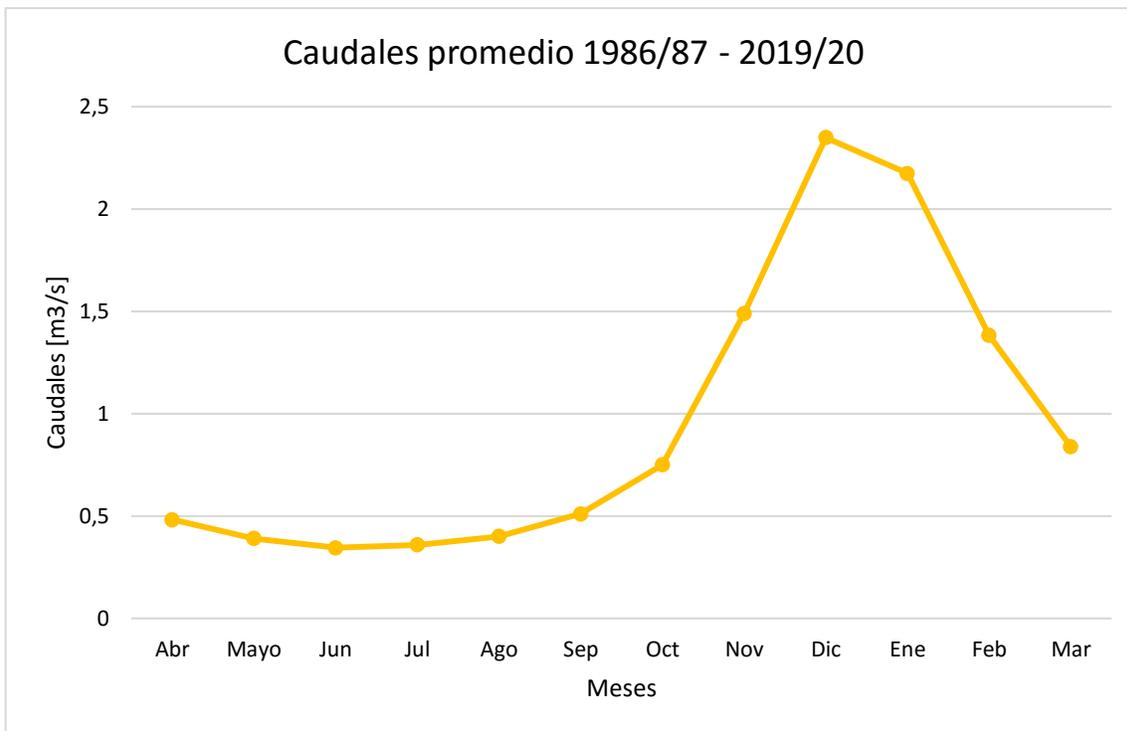


Figura 2.12: Comportamiento caudal promedio mensual 1986/87 – 2019/20. Fuente: DGA

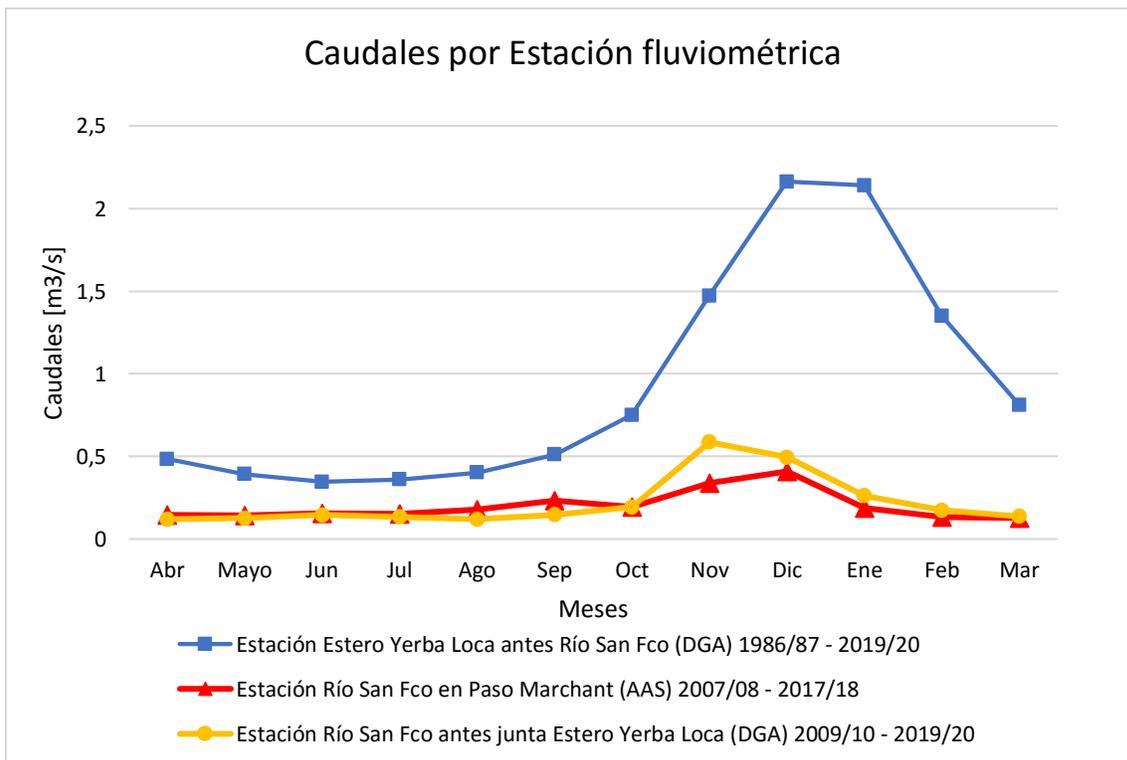


Figura 2.13: Gráfico conjunto de caudales promedio por estación fluviométrica

### **2.2.3 Escorrentía Quebrada La Disputada**

Debido a la intervención antrópica en la zona donde se ubica el rajo, se hace necesario detallar la situación de la escorrentía en quebrada La Disputada (AAS, 2019), donde se observan dos procesos diferentes. Por una parte, en el sector donde se ubica el rajo Los Bronces correspondiente a la zona alta de la quebrada, los flujos de agua exhiben un comportamiento endorreico, donde el rajo actúa como sumidero y el agua de deshielo se infiltra rápidamente, constituyendo un flujo subsuperficial que desemboca en el rajo. Este flujo no forma parte de la recarga profunda a la roca fracturada, debido a que es extraído de manera directa desde zanjas de intercepción de afloramientos en bancos superiores del rajo durante la época de deshielo, y desde el fondo del rajo por un sistema de drenaje minero. Por tanto, esto además implica que no hay escorrentía superficial que ingrese al rajo durante el deshielo (AAS, 2019).

Por otro lado, en el sector bajo de la Quebrada La Disputada, mientras los aportes hídricos del glaciar Aguas Los Machos se desvían antrópicamente por medio de una captación aguas abajo del muro cortafugas, al estero San Francisco, los flujos de agua superficiales y subsuperficiales se infiltran rápidamente en los depósitos antrópicos del sector, siendo captados por un sistema de drenaje en el Botadero San Francisco (BSF), desde donde se recirculan al proceso (AAS, 2019).

Sumado a lo anterior, a la salida de la quebrada se ubica un muro cortafugas, que tiene por función interceptar flujos subsuperficiales y subterráneos, los cuales son posteriormente drenados y recirculados al proceso. De esta forma, se considera a la Quebrada La Disputada, hídricamente aislada del resto del sistema (AAS, 2019).

### **2.2.4 Evolución temporal del embalse Los Bronces**

El embalse Los Bronces, construido en 1991, posee una capacidad de almacenar un volumen de 3,5 millones de [m<sup>3</sup>] y un área de 1,1 millones de [m<sup>2</sup>] (Icold Chile, s.f.). AAS deposita en este embalse el agua bombeada desde el rajo y la recolectada en las zanjas de intercepción (AAS, 2020).

Con base en la observación de imágenes satelitales LANDSAT 5, LANDSAT 8 y SENTINEL 2 de la zona de estudio en un período comprendido entre el año 2000 y el 2020, tanto en el primer como segundo semestre del año con el fin de comparar el comportamiento del embalse en distintas estaciones, se han notado algunas tendencias que destacar. En primer lugar, el embalse es permanente, es decir, durante todo el año posee agua. Sin embargo, el volumen de agua es variable. Por otra parte, de forma periódica se nota que durante los meses invierno el embalse posee menor cantidad de agua reduciendo su tamaño en planta. Lo anterior, en general está acompañado de la cubierta nival del paisaje. Así, durante los meses de verano, se aprecia que el embalse acumula más agua, aumenta su tamaño en vista en planta y es acompañado de un paisaje árido o con una notable disminución de la nieve circundante. Lo anterior es esperable dado el régimen nival de la cuenca, donde durante los meses de verano la nieve se funde, generando un aumento en la escorrentía.

No obstante, de manera particular, se observa que, durante el primer semestre del año 2020, la cantidad de agua del embalse es menor que la de los meses de invierno. Esto puede explicarse por la sequía que afecta a la zona, donde el año 2019 fue uno de los más secos que se haya registrado (Minería Chilena, 2020).

De acuerdo con lo anterior, de manera generalizada se puede establecer un comportamiento del embalse de mayor volumen de agua durante los meses cálidos, y de menor volumen durante los meses fríos. Sin embargo, se debe considerar además la componente de sequía de la zona, que puede afectar significativamente el comportamiento descrito anteriormente.

## 2.3 Caracterización hidrogeológica

Se presenta la información referente a la circulación de agua subterránea. Primero se presenta un catastro de pozos en la mina, se clasifican por su función y se detalla la información de los pozos de bombeo. Luego se sintetiza la información disponible sobre parámetros hidráulicos en las rocas, tanto conductividad hidráulica como almacenamiento.

### 2.3.1 Catastro de pozos

En la zona de estudio existen pozos de distinto tipo y distribución. El catastro de pozos/sondajes presentado por AAS (2019) da cuenta de la existencia de 194 pozos que cumplen diferentes funciones (Tabla 2.9) en distintos períodos de tiempo tanto en el sector de La Disputada como en Yerba Loca. De este registro, en este trabajo solo se consideran los datos correspondientes a los pozos ubicados en el rajo y sus cercanías, es decir, dentro de Quebrada La Disputada.

Dentro del registro, existen 31 pozos de bombeo ubicados dentro del rajo (Figura 2.14), de los cuales solo se encuentran 14 operativos actualmente (AAS, 2020). Se dispone de información de caudales de bombeo más completa para solo 22 pozos, en un rango de tiempo entre 2015 y 2019, con registros variados para cada pozo según su tiempo de extracción. Estos datos se consideran para estimar un caudal de bombeo promedio.

Tabla 2.9: Resumen de cantidad y tipos de pozos en Los Bronces. Fuente: AAS (2019).

| Tipo de pozo          | Nº de pozos |
|-----------------------|-------------|
| Bombeo/Monitoreo      | 33          |
| Exploración           | 49          |
| Exploración/Monitoreo | 5           |
| Monitoreo             | 83          |
| Observación           | 24          |
| <b>TOTAL</b>          | 194         |

La Tabla 2.10 muestra los pozos de bombeo junto a su coordenada, rango de tiempo en que hay datos y estado actual (AAS, 2019; 2020).

Tabla 2.10: Pozos de bombeo con coordenada, rango de registro de datos y estado. \*Pozos con información de caudales de bombeo disponible más completa. Fuente: AAS (2019).

| ID POZO | Coordenadas UTM |         | Rango de datos | Estado       |
|---------|-----------------|---------|----------------|--------------|
|         | ESTE            | NORTE   |                |              |
| PB01*   | 380141          | 6332511 | 2015           | No operativo |
| PB02*   | 380371          | 6331748 | 2015-2017      | No operativo |
| PB03*   | 380502          | 6332629 | 2015-2017      | No operativo |
| PB04*   | 380669          | 6332619 | 2015-2017      | No operativo |
| PB05*   | 380748          | 6332527 | 2015-2017      | No operativo |
| PB06    | 380785          | 6332329 | 2015-2016      | No operativo |
| PB07    | 380841          | 6332205 | 2015           | No operativo |
| PB08    | 380776          | 6332420 | 2015-2016      | No operativo |
| PB09    | 379884          | 6332196 | 2015-2016      | No operativo |
| PB10    | 380349          | 6331223 | 2015-2016      | No operativo |
| PB11    | 380511          | 6331538 | 2016           | No operativo |
| PB12    | 380586          | 6332098 | 2016           | No operativo |
| PB15    | 380547          | 6332422 | 2016           | No operativo |
| PB16    | 380599          | 6332426 | 2016           | No operativo |
| PB17*   | 380809          | 6330582 | 2016-2019      | Operativo    |
| PB18*   | 380857          | 6330666 | 2016-2019      | Operativo    |
| PB19*   | 380669          | 6330578 | 2016-2019      | Operativo    |
| PB20*   | 380462          | 6330604 | 2016-2018      | No operativo |
| PB21*   | 379983          | 6331485 | 2017-2019      | Operativo    |
| PB22*   | 379931          | 6331384 | 2017-2019      | Operativo    |
| PB23*   | 380794          | 6330733 | 2017-2019      | Operativo    |
| PB24*   | 380732          | 6330571 | 2016-2019      | Operativo    |
| PB25*   | 380535          | 6330599 | 2017-2019      | Operativo    |
| PB26*   | 380715          | 6330666 | 2017-2019      | Operativo    |
| PB27*   | 380107          | 6331059 | 2017           | No operativo |
| PB28*   | 380175          | 6331568 | 2018-2019      | Operativo    |
| PB30*   | 380369          | 6331144 | 2017-2019      | No operativo |
| PB32*   | 381264          | 6330489 | 2019           | Operativo    |
| PB34*   | 381004          | 6330255 | 2019           | Operativo    |
| PB35*   | 379957          | 6331074 | 2019           | Operativo    |
| PB36*   | 380013          | 6331123 | 2019           | Operativo    |

# Pozos de bombeo Rajo Los Bronces

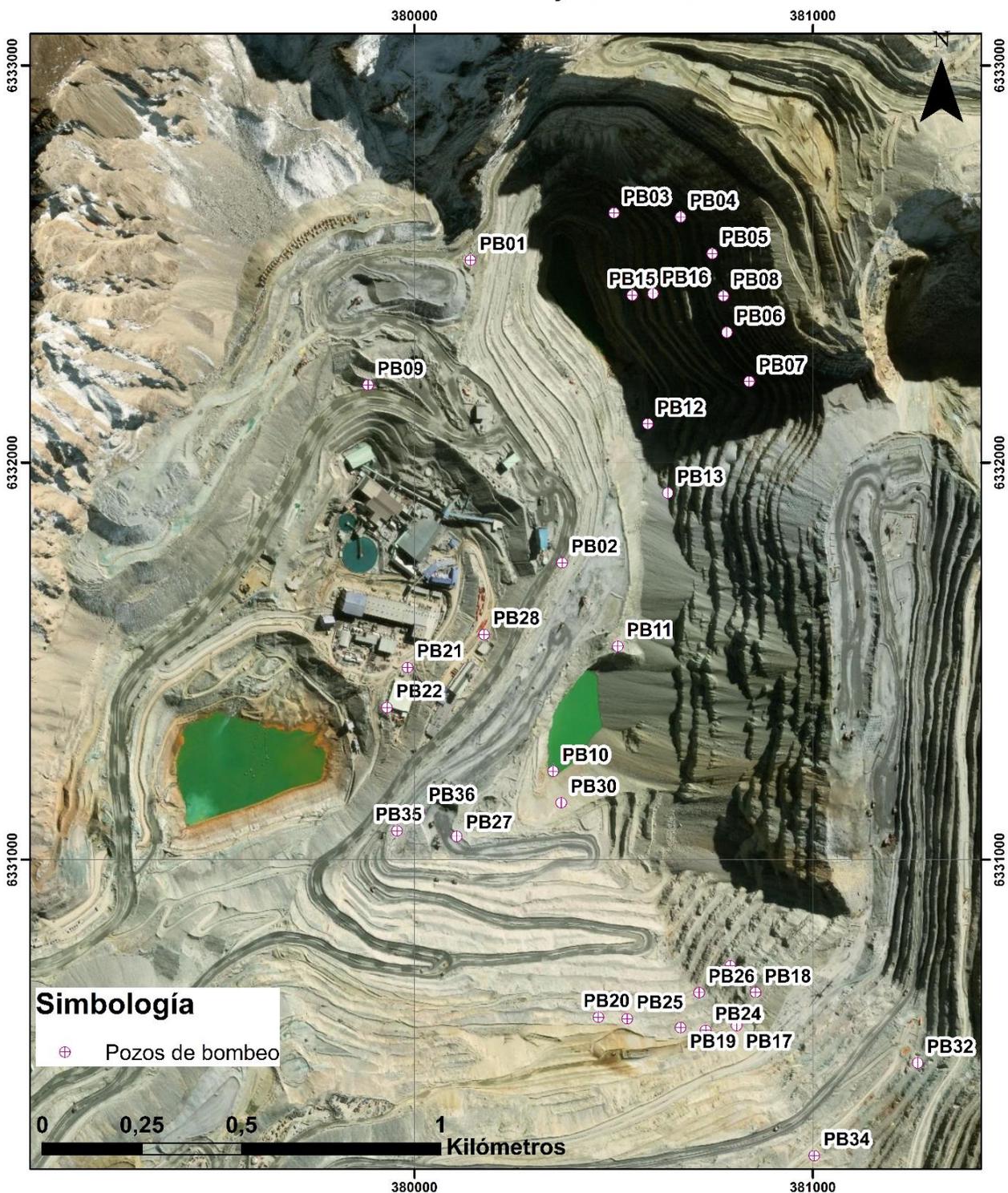


Figura 2.14: Distribución de pozos de bombeo en el rajo y sus cercanías. Fuente: AAS (2019).

### 2.3.2 Parámetros hidráulicos

El estudio de AAS (2019) consta de una recopilación de valores de conductividad hidráulica obtenidos de diferentes ensayos realizados a lo largo del tiempo durante la explotación (datos entre 1998 y 2018). A continuación, se resumen los valores de conductividad hidráulica y de almacenamiento estimados en la zona para distintas unidades geológicas.

#### Conductividad hidráulica

En la zona de Quebrada La Disputada se dispone de un total de 79 datos de conductividad hidráulica, para un total de 39 pozos, cuya ubicación se detalla en la Figura 2.15. Para 14 de estos 79 datos, solo se conoce su ubicación en el dominio secundario, pero no su litología (intrusivo o brecha), por lo que no serán considerados para este cálculo.

Los valores de permeabilidad se han obtenido de ensayos tipo Lugeon, Lefranc, Packer, y Recuperación, y la cantidad de datos que se dispone para cada pozo es variable. En algunos casos, solo se cuenta con un valor en un determinado tramo de profundidad, y en otros con varios valores a distintas profundidades. La información completa se encuentra en el anexo 1.

Este trabajo considera los rangos aproximados de permeabilidades para las litologías utilizadas en AAS (2019). Los valores fueron clasificados de acuerdo con la profundidad del ensayo y la litología en que se realizaron. Considerando una profundidad de 250 m para el contacto primario – secundario para distinguir entre roca primaria y secundaria, ya sea intrusivo o brecha.

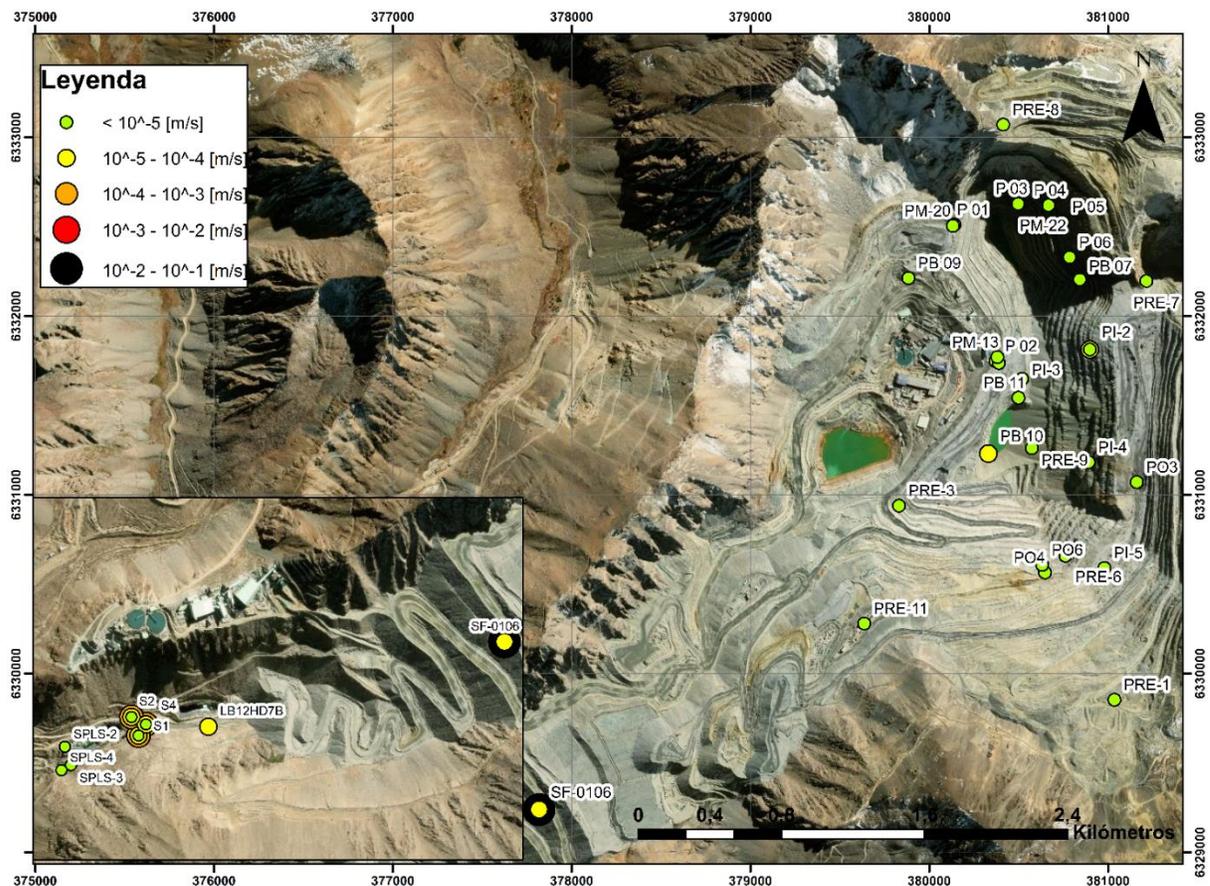


Figura 2.15: Datos disponibles de conductividad hidráulica en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019).

Por lo tanto, la clasificación considera relleno no consolidado, roca primaria y roca secundaria, clasificando las últimas en pórfidos/intrusivos y brechas. La Tabla 2.11 resume los valores obtenidos para cada categoría según la clasificación detallada.

Tabla 2.11: Estadística de parámetros hidráulicos por unidad litológica. Fuente: AAS (2019).

| Litología / Estadística | K [m/s]           |           |                   |        |           |           |
|-------------------------|-------------------|-----------|-------------------|--------|-----------|-----------|
|                         | Roca Secundaria   |           | Roca Primaria     |        | Relleno   | Relleno   |
|                         | Pórfido/intrusivo | Brecha    | Pórfido/intrusivo | Brecha | Aluvial   | antrópico |
| <b>Máximo</b>           | 1,30,E-05         | 2,60,E-07 | 4,84,E-07         | -      | 3,50,E-04 | 1,E+00    |
| <b>P80</b>              | 3,13,E-06         | 2,08,E-07 | 1,23,E-07         | -      | 2,10,E-04 | 5,E-01    |
| <b>P50</b>              | 6,85,E-07         | 1,31,E-07 | 3,03,E-08         | -      | 9,50,E-05 | 9,E-02    |
| <b>P20</b>              | 4,00,E-08         | 5,35,E-08 | 8,35,E-09         | -      | 3,12,E-05 | 6,E-05    |
| <b>Mínimo</b>           | 4,70,E-09         | 1,90,E-09 | 3,26,E-09         | -      | 3,40,E-06 | 2,E-05    |
| <b>N° de datos</b>      | 26                | 2         | 12                | 0      | 18        | 7         |

Cabe destacar que la diferencia entre las permeabilidades de los intrusivos de la roca primaria y la secundaria es de hasta 4 órdenes de magnitud.

### Coefficiente de almacenamiento

Los datos disponibles de coeficiente específicos son acotados, constando de información para solo 10 sondajes. Los datos son obtenidos por métodos de solución de Copper-Jacob y Theis, tal como se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12: Coeficientes de almacenamiento obtenidos para distintos sondajes. Fuente: AAS (2019).

| Sondaje          | Almacenamiento |              |
|------------------|----------------|--------------|
|                  | Theis          | Copper-Jacob |
| <b>P 01</b>      | 6,17E-04       | -            |
| <b>P 02</b>      | 7,56E-06       | -            |
| <b>P 03</b>      | 6,44E-04       | -            |
| <b>P 04</b>      | 2,65E-03       | -            |
| <b>P 05</b>      | 7,81E-03       | -            |
| <b>P 06</b>      | 2,19E-03       | -            |
| <b>PM-20</b>     | 2,17E-02       | 2,20E-02     |
| <b>PM-13</b>     | 3,10E-07       | 5,39E-06     |
| <b>PM-22</b>     | 3,96E-04       | 1,00E-04     |
| <b>LB140-181</b> | 4,24E-02       | 1,27E-03     |

Para la porosidad y rendimiento específico ( $S_y$ ) se consideran valores representativos de literatura para distintas litologías. Se muestran en la Tabla 2.13 y se basan en Morris y Johnson (1967), Hamil y Bell (1986) en Singhal y Gupta (2010) y Heath (1983).

Tabla 2.13: Valores de porosidad y rendimiento específico representativos de la literatura. Fuente: Morris y Johnson (1967), Hamil y Bell (1986) en B.B.S Singhal y R.P Gupta (2010) y Heath (1983).

| Formación Geológica              | Porosidad ( $\eta$ %) | Rendimiento Específico ( $S_y$ %) | Retención Específica ( $S_r$ %) |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| <b>Depósitos no consolidados</b> |                       |                                   |                                 |
| Gravas                           | 28-34                 | 15-30                             | 3-12                            |
| Arenas                           | 35-50                 | 10-30                             | 5-15                            |
| Limo                             | 40-50                 | 5-20                              | 15-40                           |
| Arcilla                          | 40-60                 | 1-5                               | 25-45                           |
| Dunas                            | 40-45                 | 25-35                             | 1-5                             |
| Loess                            | 45-50                 | 15-20                             | 20-30                           |
| <b>Rocas</b>                     |                       |                                   |                                 |
| Arenisca                         | 15-30                 | 5-25                              | 5-20                            |
| Caliza, Dolomita                 | 10-25                 | 0,5-10                            | 5-25                            |
| Lutita                           | 0-10                  | 0,5-5                             | 0-5                             |
| Limolita                         | 5-20                  | 1-8                               | 5-45                            |
| Glacial Till                     | 30-35                 | 4-18                              | 15-30                           |
| Rocas cristalinas densas         | 0-5                   | 0-3                               |                                 |
| Rocas cristalinas fracturadas    | 5-10                  | 0,09-5                            |                                 |
| Rocas cristalinas erosionadas    | 20-40                 | 10-20                             |                                 |
| Basalto                          | 5-30                  | 2-10                              |                                 |

Para el almacenamiento específico ( $S_s$ ), se consideran los valores listados en la Tabla 2.14, según Domenico y Mifflin (1965).

Tabla 2.14: Valores de almacenamiento específico según Domenico y Mifflin (1965).

| Material            | $S_s$ [ $m^{-1}$ ]                            |
|---------------------|---|
| Arena suelta        | $4,9 \times 10^{-4}$ a $1,02 \times 10^{-3}$  |
| Grava arenosa densa | $4,9 \times 10^{-5}$ a $1,02 \times 10^{-4}$  |
| Roca fisurada       | $3,28 \times 10^{-6}$ a $6,89 \times 10^{-5}$ |
| Roca sana           | $< 3,28 \times 10^{-6}$                       |

### 2.3.3 Piezometría

En la zona de Quebrada La Disputada se dispone de los registros de niveles de agua subterránea medidos en 103 pozos comprendidos entre 2005 y 2018. Dichos registros corresponden a distintos tipos de sondajes, entre los que se encuentran pozos abiertos de observación/monitoreo (PO-PM-P), pozos distritales (LB), pozos cortos (PC-PCB), pozos de bombeo (PB), sondajes exploratorios (SF, INF) y piezómetros cerrados de cuerda vibrante (PRE) (AAS, 2019).

La Tabla 2.15 muestra un resumen de la cantidad de datos de cotas de niveles disponibles según el año.

Tabla 2.15: Disponibilidad de datos de cotas de niveles piezométricos por año. Fuente: AAS (2019, 2020).

| Año         | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | TOTAL |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| N° de datos | 117  | 386  | 196  | 5    | 0    | 0    | 6    | 24   | 53   | 3312 | 2546 | 1618 | 745  | 33   | 9041  |

En este registro se observa que la densidad de datos es variable, siendo el mínimo de datos igual a 0 en años como 2009 y 2010, y un máximo variable entre 1600 y 3000 en los años 2014 - 2016.

Para analizar el comportamiento de los niveles de agua subterránea, como se muestra en la Figura 2.16, el total de pozos se separa en 3 sectores: rajo (76 pozos), periférico norte y sur (23 pozos) y botadero San Francisco (4 pozos), siendo los pozos de registro más amplio los que se encuentran en el rajo y en la periferia de este.

No se han incluido en el análisis los niveles medidos en los pozos de bombeo debido a que sus acotados registros impiden que su comportamiento muestre una tendencia clara en el tiempo, debido a que son niveles dinámicos e incluyen pérdidas de carga, lo que no los hace representativos.

# Red de monitoreo de niveles de agua subterránea Los Bronces

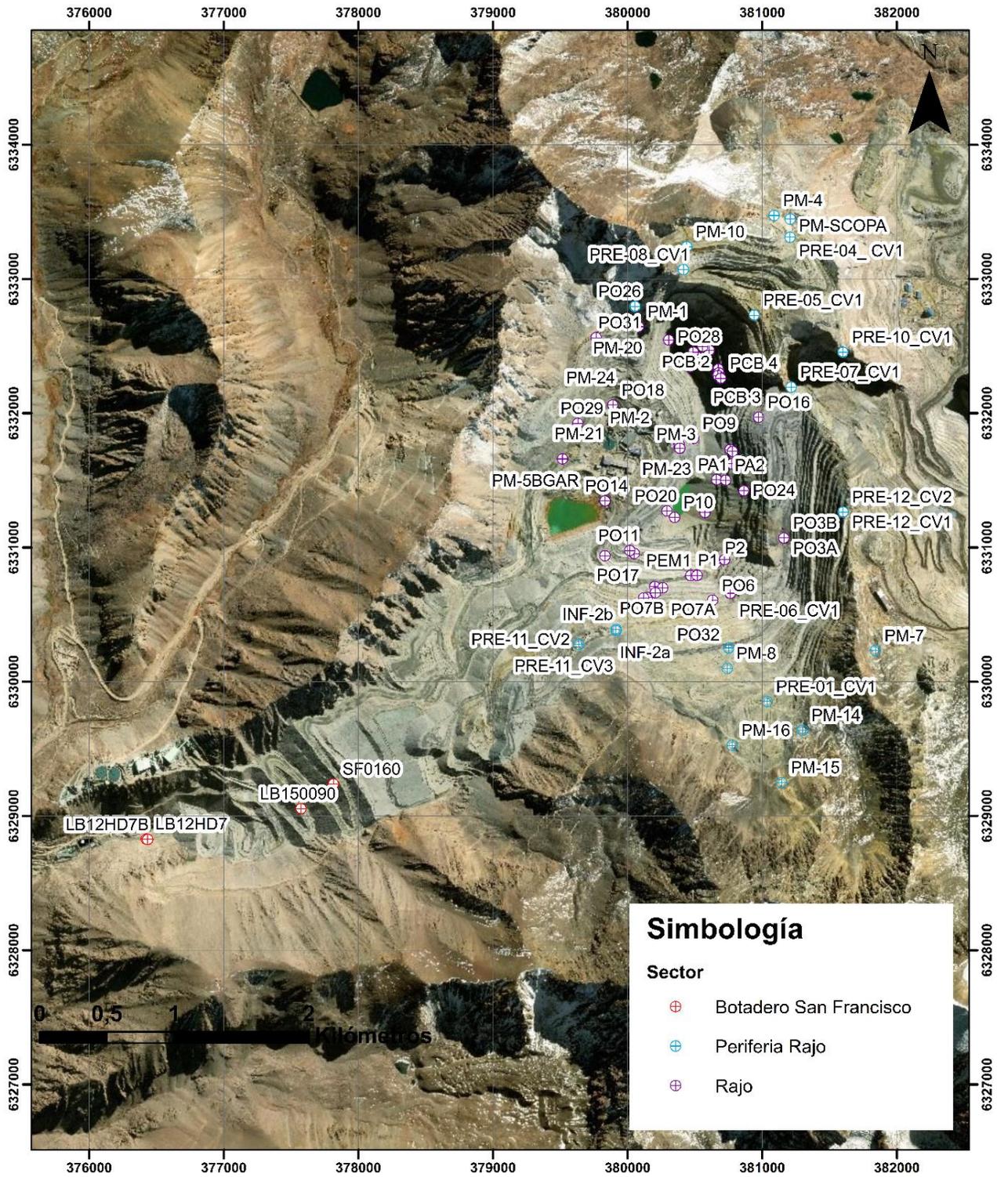


Figura 2.16: Red de monitoreo de niveles piezométricos en Los Bronces. Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019, 2020).

A continuación, se presenta la gráfica de la evolución temporal de niveles en los distintos sectores.

### Sector Rajo Los Bronces

En este sector, debido a la ausencia de datos entre 2009 y 2010, se separa la gráfica en dos períodos: 2005 a 2008 y 2011 a 2017. En la Figura 2.17, se aprecia el primer período de tiempo estudiado en el sector, donde se observa que de manera general los niveles tienden a disminuir entre 2005 y 2007, para estabilizarse, o bien tener un descenso más suave hacia el final del período. Los descensos registrados son, en general, menores a 50 m. Cabe destacar que el rango de cotas en que se mueven los niveles va desde 3.300 a 3.625 m.s.n.m., aproximadamente.

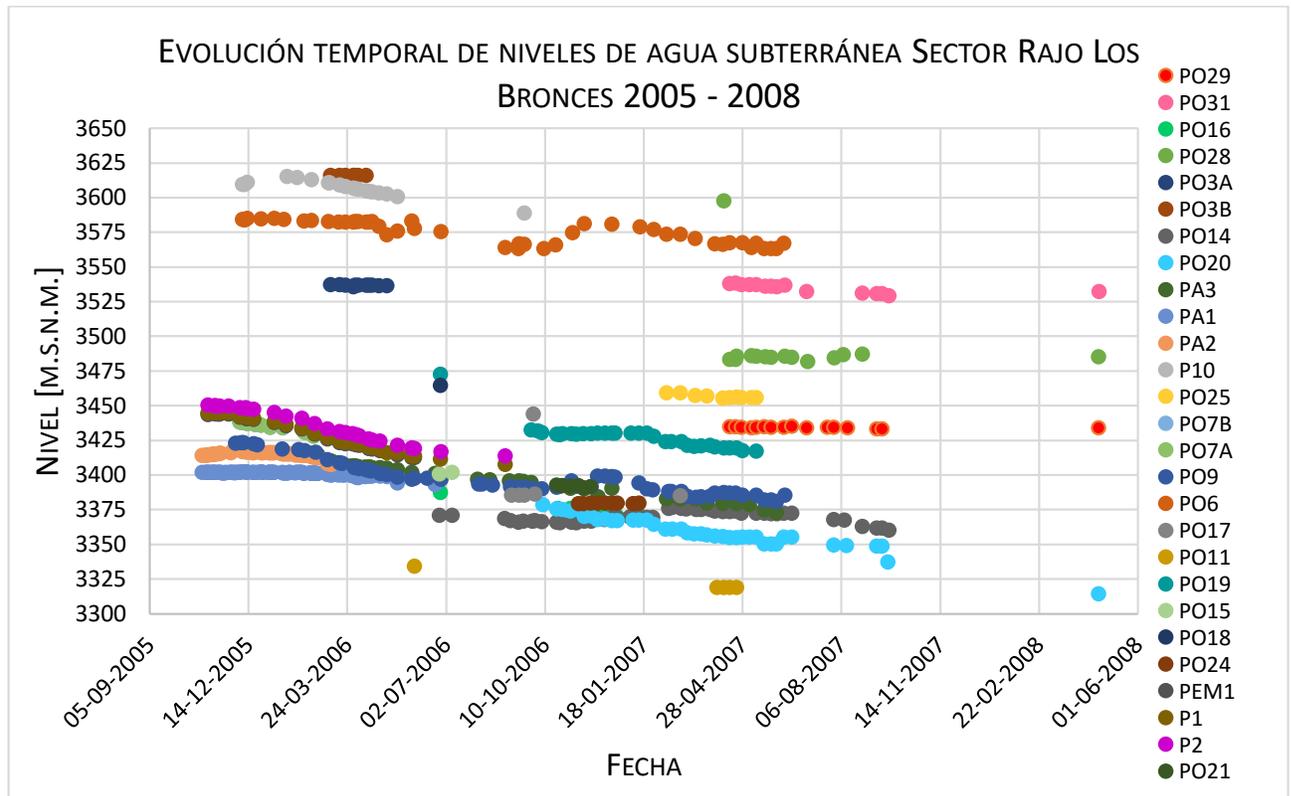


Figura 2.17: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Rajo en el período 2005 – 2008. Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019).

Por su parte, la Figura 2.18, muestra una tendencia similar a la anteriormente descrita, ya que, los niveles también descienden durante este período. Dentro de este comportamiento, es posible distinguir un aumento generalizado en el descenso de niveles a partir de 2015, lo que puede explicarse por la influencia de la puesta en marcha de la batería de pozos de bombeo (AAS, 2019). Durante este período, los descensos registrados son variables dependiendo el pozo, pero los máximos rondan los 75 m. El rango de cotas aproximado que alcanzan los niveles abarca desde 3.175 a 3.500 m.s.n.m.

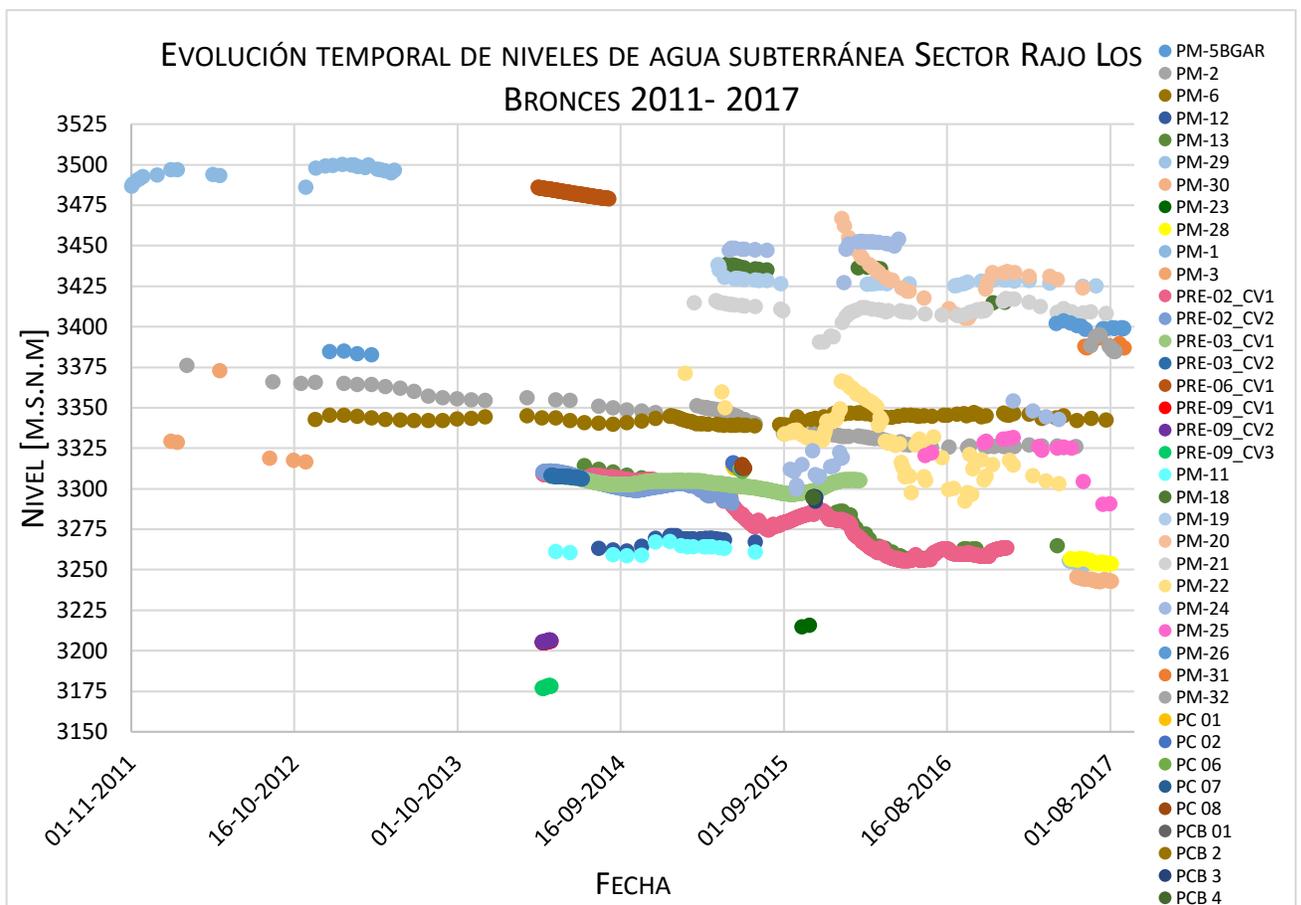


Figura 2.18: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Rajo en el período 2011 – 2017. Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019).

### Sector Periférico Norte y Sur

El comportamiento de los niveles de agua subterránea en este sector se muestra en las Figura 2.19 y Figura 2.20. En el sector norte, es posible observar una estabilización de niveles, sin descensos pronunciados, a excepción del pozo PRE-05\_CV1, que muestra un descenso aproximado de 50 m a partir de 2015. Sumado a lo anterior, se observa un comportamiento estacional en los niveles de agua subterránea, como grafican los pozos PM-SCOPA y PM -10.

En el sector periférico sur, el comportamiento es análogo al sector norte, no obstante, no se registran descensos importantes de niveles en el período.

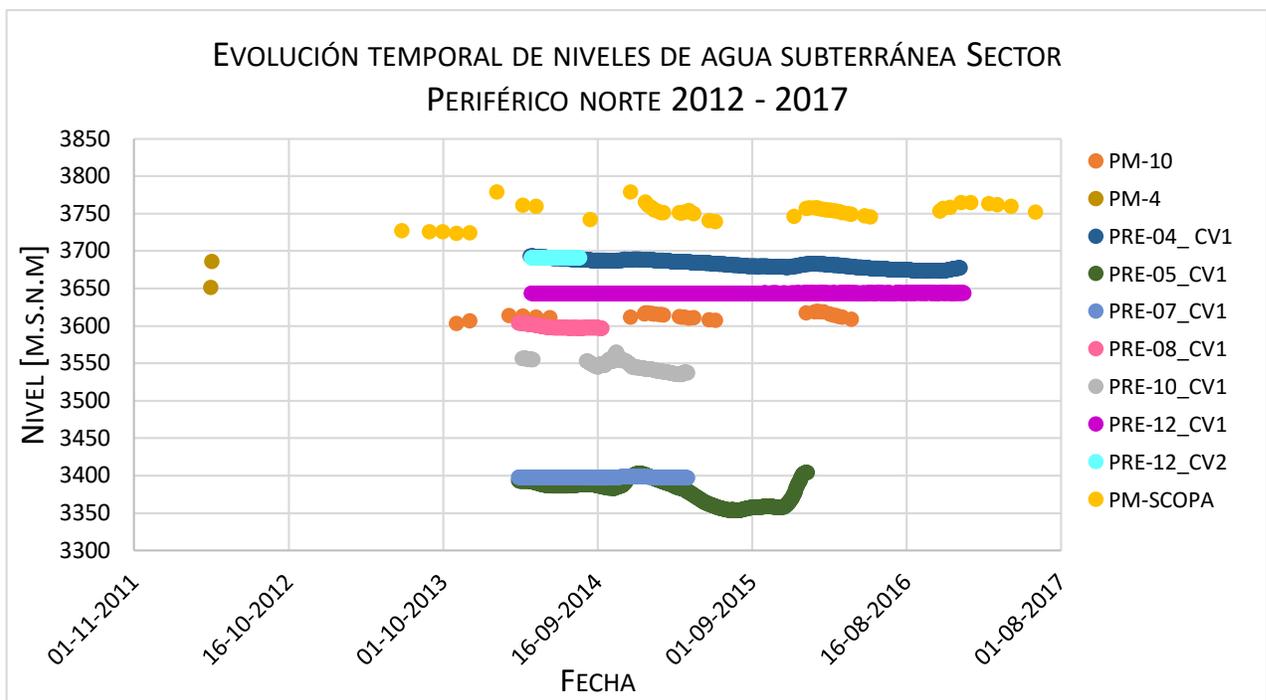


Figura 2.19: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Periférico Norte en el período 2012 – 2017.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019)

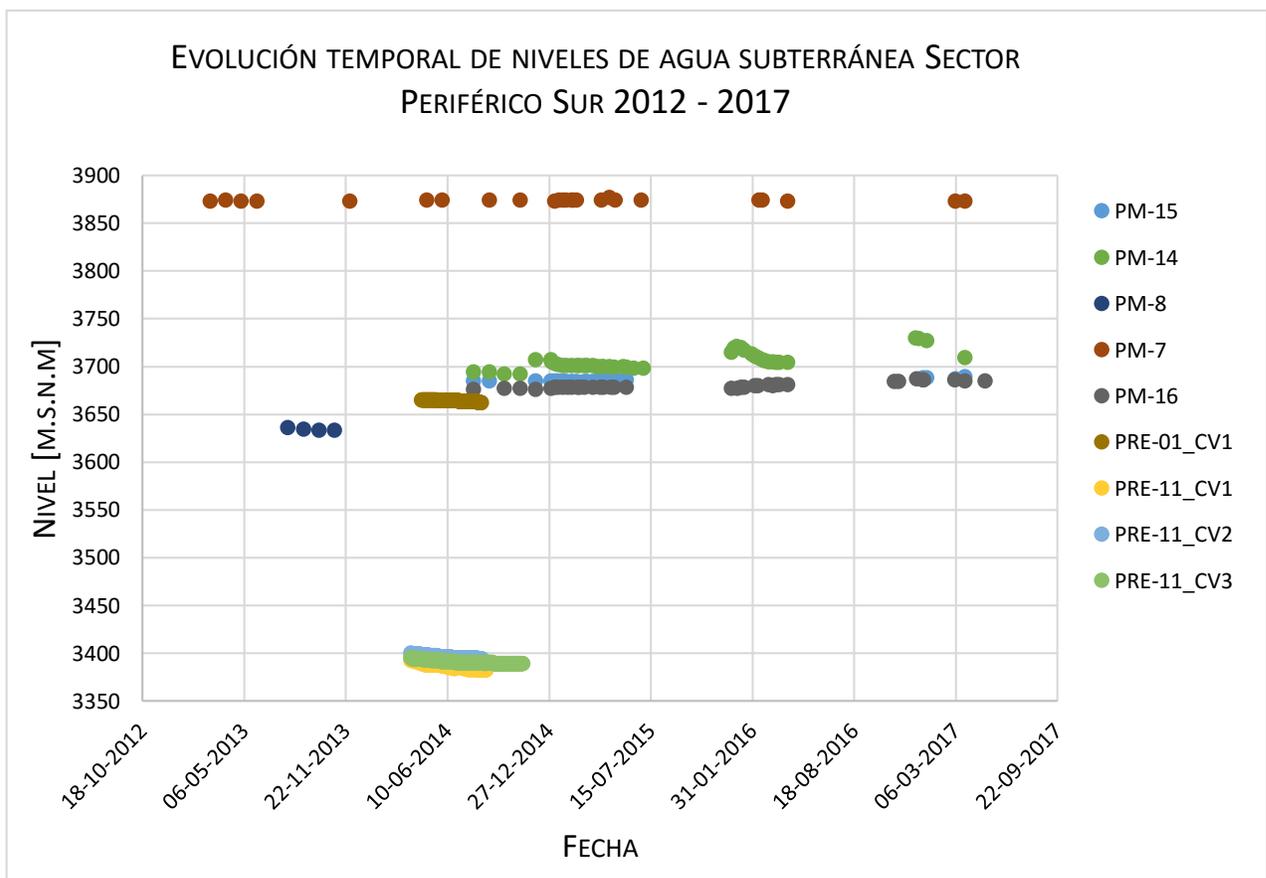


Figura 2.20: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Periférico Sur en el período 2012 – 2017.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019)

## Sector Botadero San Francisco

En este caso, los datos de los 4 pozos del sector también se presentan en dos períodos debido a la ausencia de registro entre los años 2008 y 2011. En la Figura 2.21 se presenta la evolución temporal del nivel de agua subterránea medido en el pozo SF0160 durante 2006 - 2007. En esta gráfica se aprecia un nivel de comportamiento estable, levemente menor a la cota 3.100 m.s.n.m.

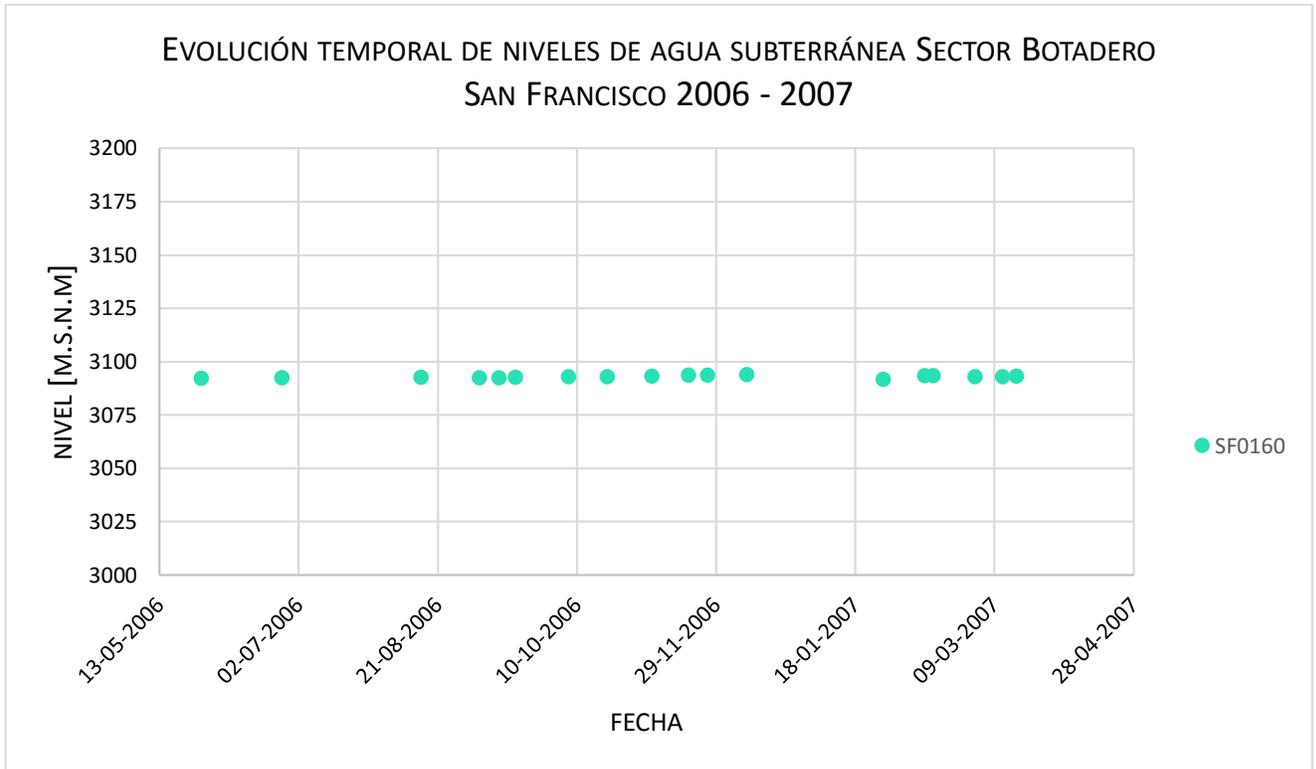


Figura 2.21: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Botadero San Francisco en el período 2006 – 2007.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019)

La Figura 2.22 muestra la evolución de los niveles medidos en el sector del botadero entre 2012 y 2016. De manera análoga al caso anterior, el comportamiento de los niveles registrados en los pozos LB12HD7 y LB12HD7B es relativamente constante, pero exhibe un leve descenso a partir de 2015. Por su parte el pozo LB150090 solo posee datos de 2016, donde se aprecia un comportamiento constante del nivel entorno a la cota 3.050 m.s.n.m.

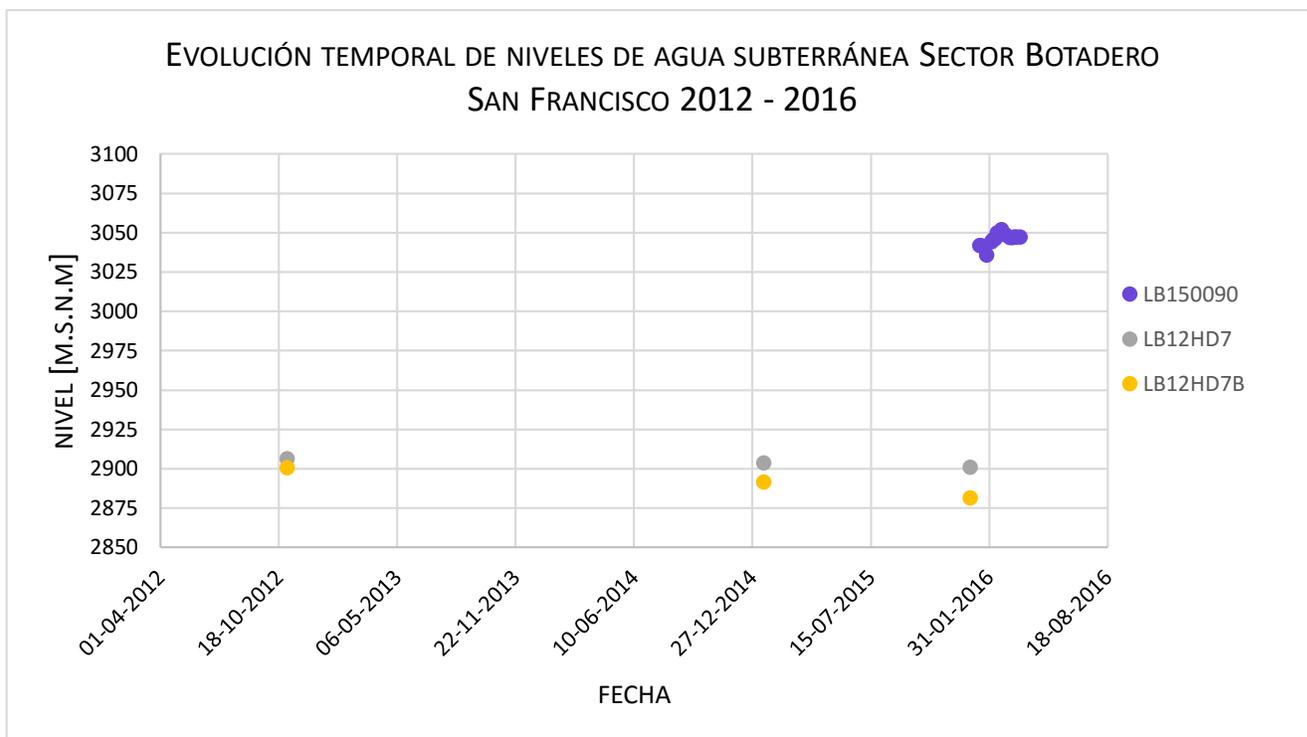


Figura 2.22: Evolución temporal de niveles piezométricos en el sector Botadero San Francisco en el período 2012 – 2016.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019)

Debido a la disponibilidad de datos en distintos períodos, se han generado 3 piezometrías con el fin de visualizar la evolución de los niveles de agua subterránea en el tiempo. La más antigua se generó con niveles promedios de datos comprendidos entre junio 2006 y junio 2007 (Figura 2.23). La siguiente considera un período comprendido entre abril 2014 y abril 2015 (Figura 2.24), justo antes de la instalación de la batería de pozos de bombeo, que comenzó en mayo 2015 (AAS, 2019). Para la piezometría más reciente se han considerado niveles piezométricos promedio de un año, entre marzo 2016 y marzo 2017 (Figura 2.25). La cantidad de pozos considerados en cada piezometría junto con el nivel piezométrico se detallan en el **Anexo 1**.

Al comparar las Figura 2.23, Figura 2.24 y Figura 2.25, se encuentran algunas similitudes y diferencias. En las tres se puede apreciar el efecto sumidero del rajo, donde las cotas piezométricas bordean y disminuyen progresivamente hacia el centro del rajo. Sin embargo, es importante notar que mientras más reciente es la piezometría, la cota que envuelve el rajo es menor siendo 3.400 [m.s.n.m] en la más antigua, y 3.350 [m.s.n.m] en la más reciente, lo que indica que el cono de depresión se ha expandido y los niveles de agua subterránea se han deprimido.

Además, es posible apreciar una aparente desconexión entre la zona del rajo y parte baja de la Quebrada La Disputada (divisoria de aguas), donde las isopiezas disminuyen en dirección al muro cortafugas. Sobre esto, cabe destacar que, a pesar de que la divisoria de aguas parece tener poca variación en su ubicación en los tres escenarios, cada vez es alcanzada por cotas piezométricas menores que envuelven al rajo, mientras que hacia la izquierda se aprecia que la cota de 3.325 [m.s.n.m] se aleja de ella con el pasar del tiempo.

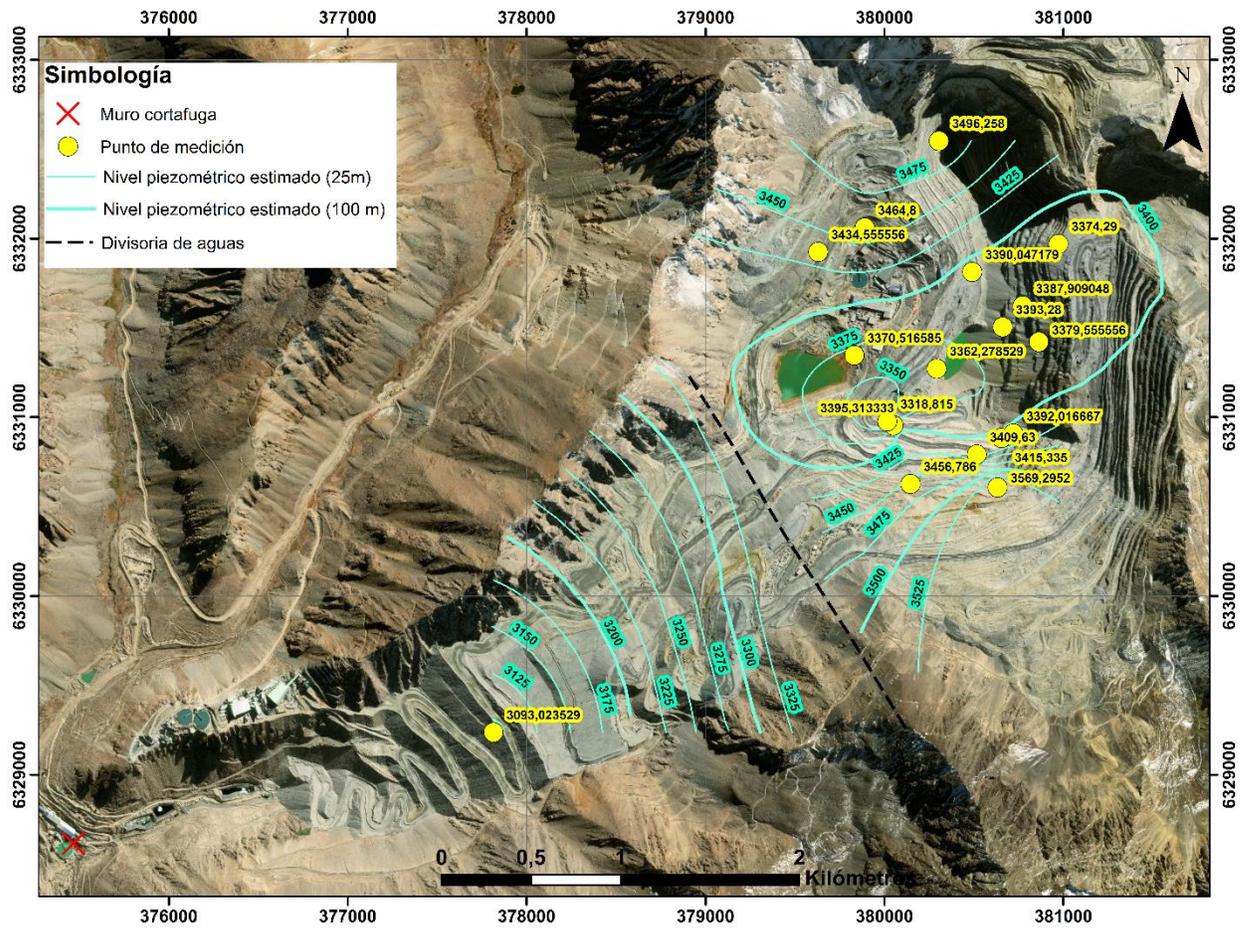


Figura 2.23: Piezometría estimada para la zona de estudio con datos de cotas piezométricas entre junio 2006- junio 2007.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019).

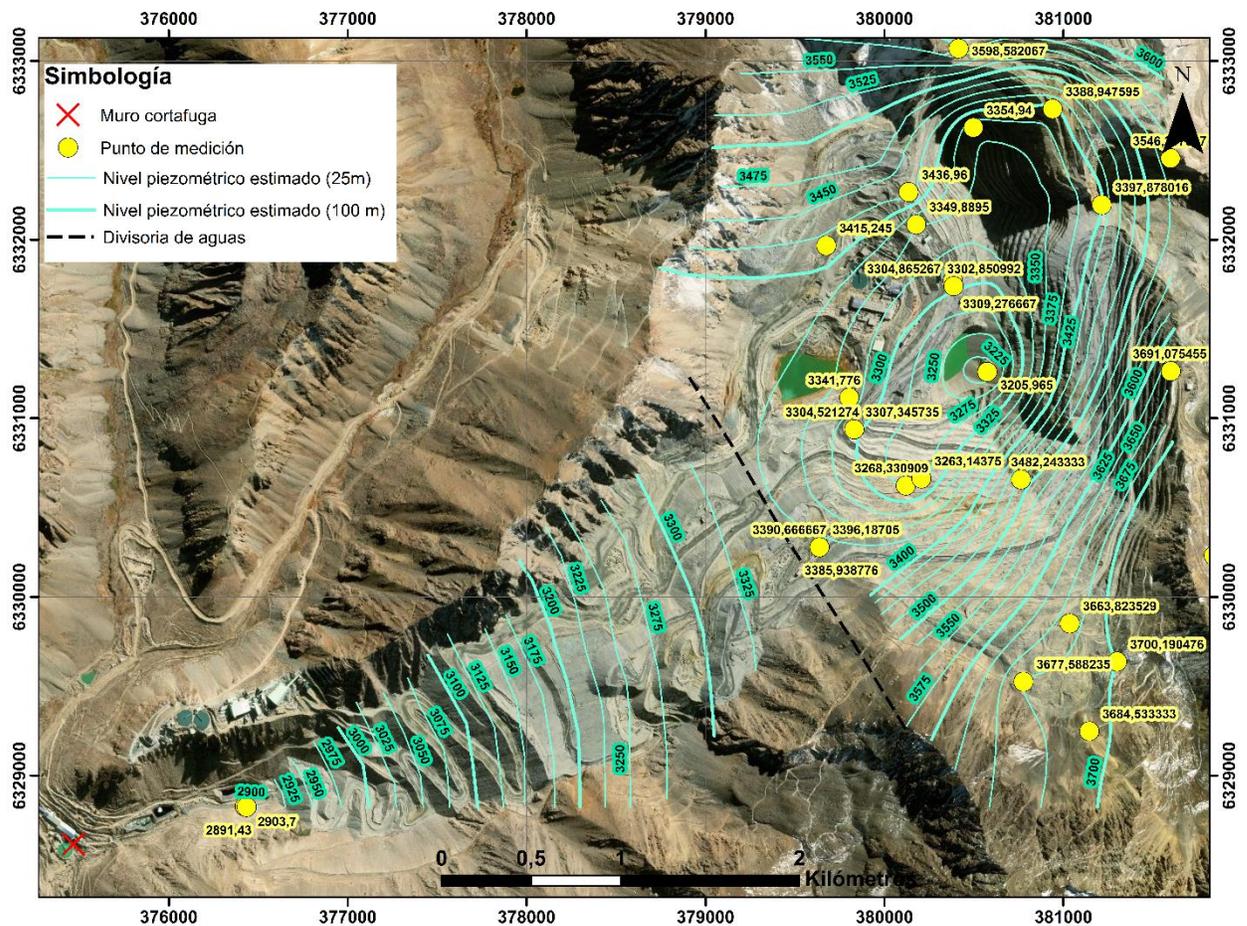


Figura 2.24: Piezometría estimada para la zona de estudio con datos de cotas piezométricas entre abril 2014- abril 2015.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019).

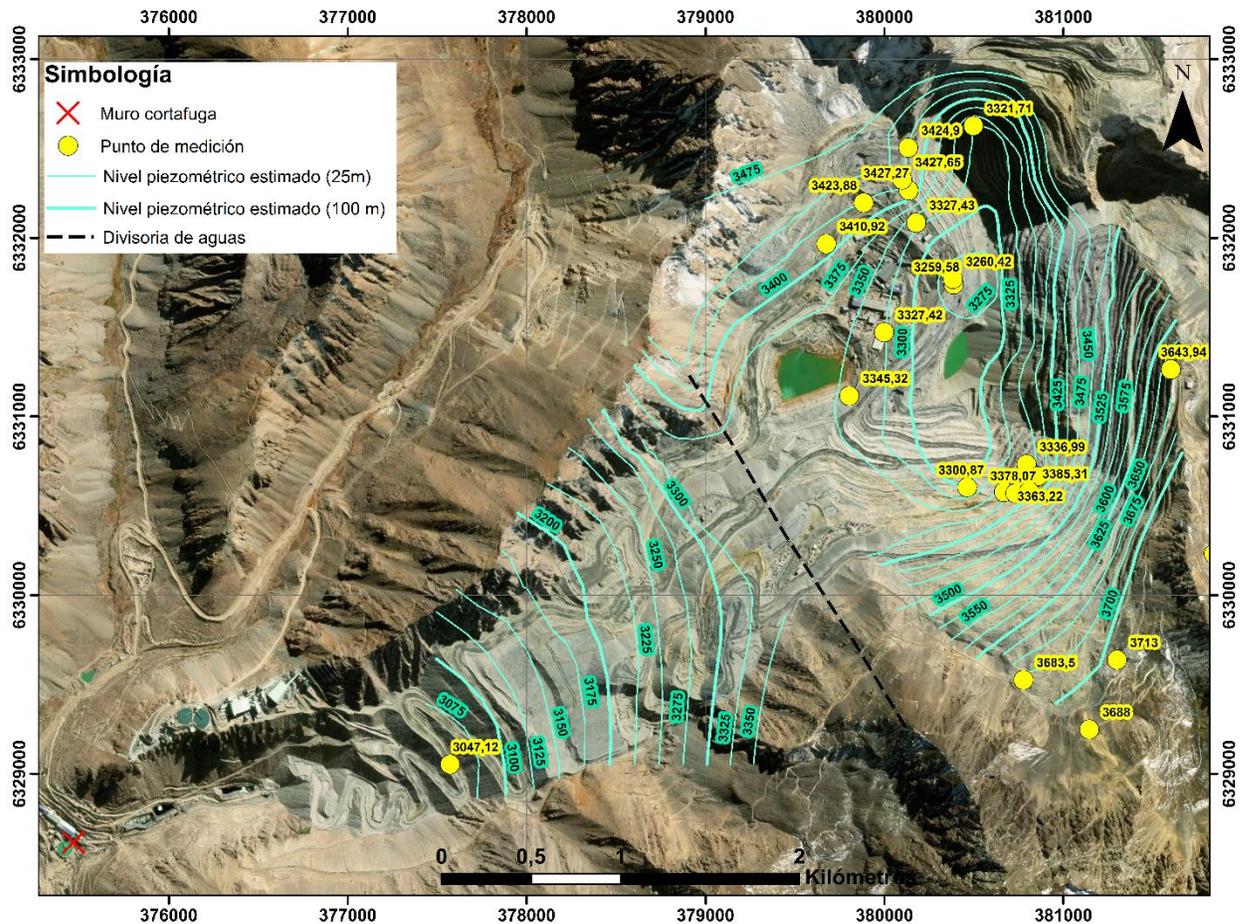


Figura 2.25: Piezometría estimada para la zona de estudio con datos de cotas piezométricas entre marzo 2016- marzo 2017.  
Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019).

En la zona del rajo, entre la piezometría de la Figura 2.23 y la de la Figura 2.24, es posible notar que los niveles se profundizaron y el cono de depresión se desplazó hacia el noreste. En la piezometría de la Figura 2.25 nuevamente se verifica una migración del cono hacia el noreste y un descenso de niveles. Sumado a ello, se verifica un cambio en la geometría de las isopiezas, lo que puede asociarse a una conexión entre ambos *pit lakes* (Donoso al norte e Infiernillo al sur) debido al inicio del bombeo de pozos en mayo de 2015.

De esta forma, se ve que el flujo de agua en la parte alta de la Quebrada La Disputada se mueve desde las zonas montañosas más altas hacia las zonas más profundas del rajo, mientras en la zona baja de la quebrada se mueven hacia el muro cortafugas, configurándose una “divisoria de aguas” dentro de la quebrada a raíz del bombeo de agua desde los pozos.

Las zonas en que se concentran los descensos de niveles piezométricos pueden observarse claramente en las Figura 2.26 y Figura 2.27, tanto para el año 2015 como 2017, en comparación al año 2007, respectivamente. Hasta el 2015, es posible apreciar que los mayores descensos se generan en la zona del rajo, en conjunto al desarrollo de dos conos de descenso hacia la zona sur del rajo. Hacia el 2017, los descensos se concentran también en la zona del rajo, y se genera un nuevo cono de descenso hacia el sureste del rajo.

# Descensos 2007 - 2015

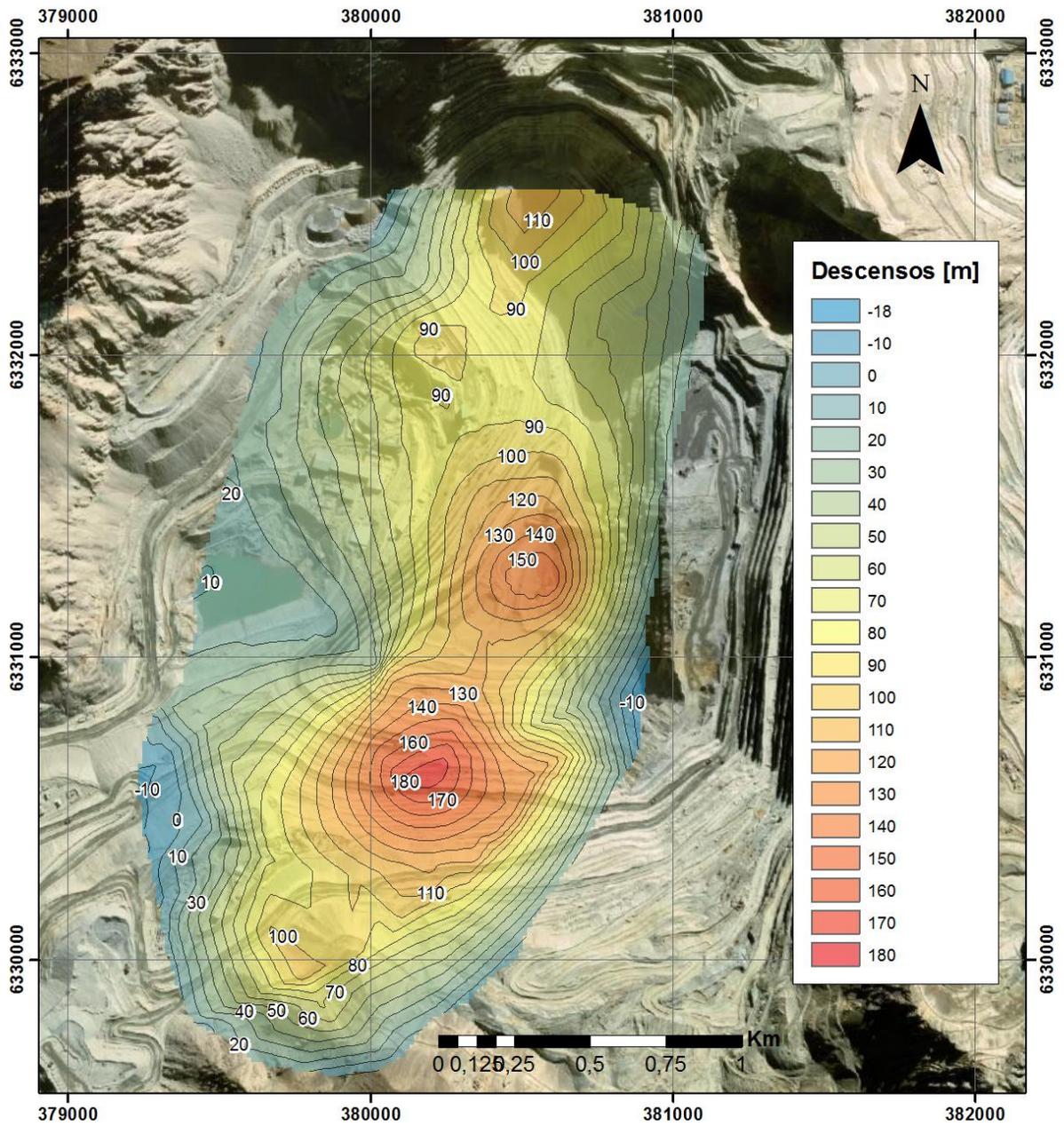


Figura 2.26: Mapa de descensos de niveles piezométricos entre 2007 y 2015. Fuente: Elaboración propia

# Descensos 2007 - 2017

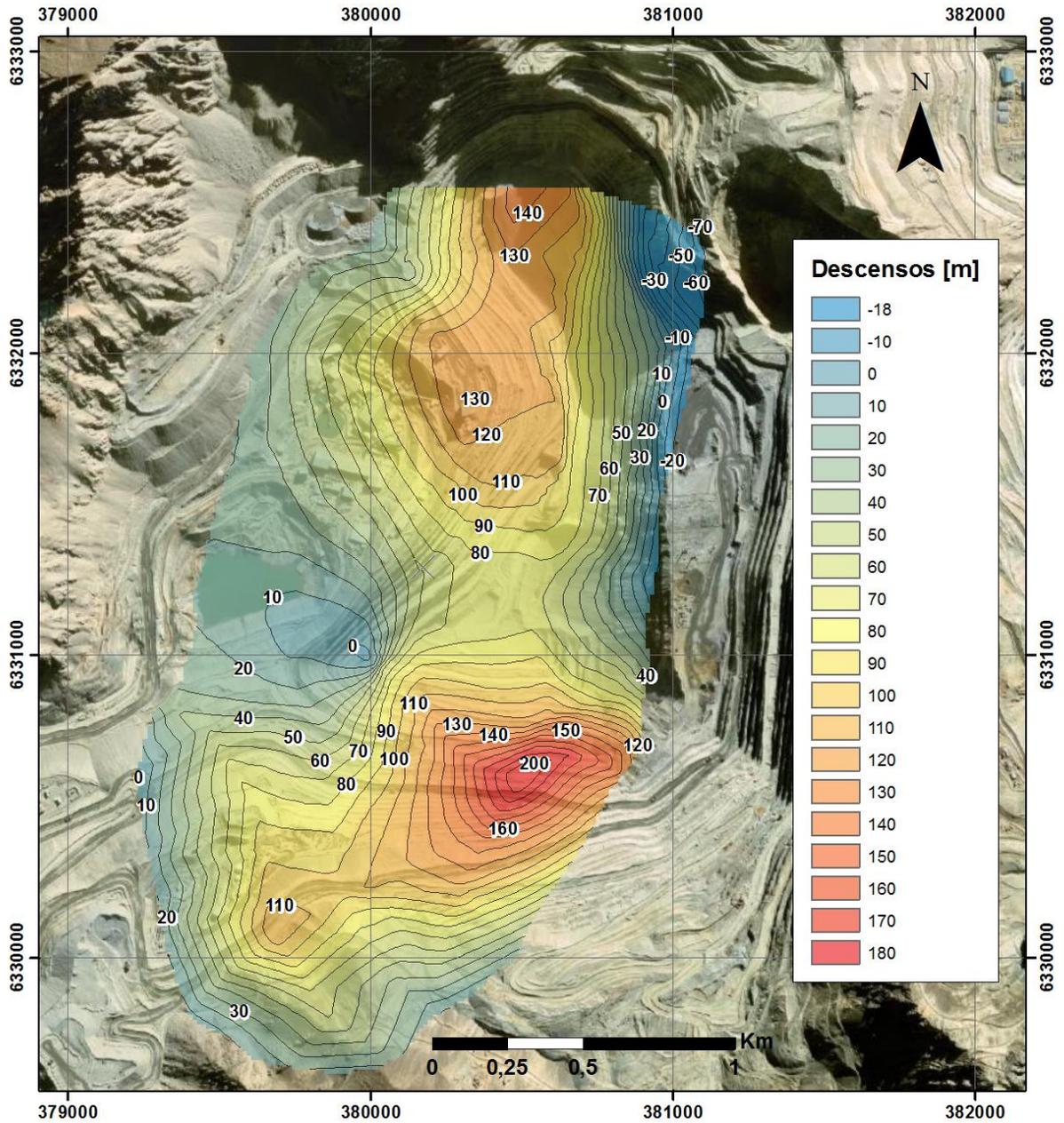


Figura 2.27: Mapa de descensos de niveles piezométricos entre 2007 y 2017. Fuente: Elaboración propia

### **3. Modelo hidrogeológico conceptual**

En este capítulo se integra toda la información recopilada en el capítulo anterior, mediante la generación de un modelo conceptual del sistema hidrogeológico de la zona de estudio, que represente su funcionamiento de forma simplificada. Las componentes de este modelo conceptual son posteriormente ingresadas al modelo numérico. Se comienza definiendo las unidades hidrogeológicas, para posteriormente caracterizar sus parámetros hidráulicos y geometría. Se finaliza el capítulo presentando el balance hídrico del sistema.

#### **3.1 Unidades hidrogeológicas**

En este apartado se definen y describen las unidades hidrogeológicas que componen el modelo conceptual.

##### **3.1.1 Criterio definición unidades hidrogeológicas**

Las unidades hidrogeológicas (UH) se definen mediante los mismos criterios utilizados por AAS (2019), que consideran principalmente las características geológicas – geotécnicas de las unidades: litología (depósito no consolidado o roca), frecuencia de fracturamiento, presencia de minerales supérgenos en fracturas/discontinuidades, dominio primario y secundario definidos por contacto primario – secundario. Para la Quebrada la Disputada, se considera en promedio una profundidad de 250 m del contacto primario – secundario (AAS, 2019) para las zonas donde no se dispone de datos litológicos como perfiles o sondajes.

A su vez, las unidades hidrogeológicas se clasifican en acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugo de acuerdo con su capacidad de almacenar y suministrar agua. En la literatura (Singal y 2010; Custodio y Llamas, 1986) un acuífero se define como una formación geológica saturada con agua que posee buena conductividad hidráulica ( $>10^{-6}$  [m/s]) de la cual se puede extraer una cantidad razonable de agua por medio de un pozo de bombeo, mientras que un acuitardo se entiende como una formación geológica relativamente impermeable, que puede almacenar apreciables cantidades de agua, pero que las transmite muy lentamente, permitiendo una limitada circulación de agua en comparación a una unidad acuífera. Un acuicludo se refiere a una formación geológica que, a pesar de contener agua en su interior, es incapaz de transmitirla, no pudiendo ser explotada. Finalmente, se denomina acuífugo a las formaciones geológicas que no son capaces de contener agua y, por lo tanto, tampoco de transmitirla.

##### **3.1.2 Descripción UH**

Para la zona, se definen entonces 3 unidades hidrogeológicas.

###### **UH 1**

Comprende depósitos no consolidados, ya sea material sedimentario o depósitos antrópicos. El material sedimentario posee escasa continuidad lateral y valores moderados de conductividad hidráulica, actuando como zona vadosa y encontrándose saturado parcialmente solo en época de deshielo (AAS, 2020). De acuerdo con lo anterior, la unidad se clasifica hidrogeológicamente como acuitardo.

Dentro de esta unidad hidrogeológica, se distinguen dos subunidades, basándose en la diferencia de los valores medidos de sus conductividades hidráulicas. La primera corresponde a material sedimentario no consolidado (UH 1A) cuya conductividad hidráulica se encuentra en un rango entre  $3,4 \times 10^{-6}$  y  $3,5 \times 10^{-4}$  [m/s]. Por su parte, UH 1B consiste en material no consolidado de origen antrópico, y posee una conductividad hidráulica que varía entre  $9 \times 10^{-7}$  y  $9,9 \times 10^{-1}$  [m/s].

UH 1A corresponde a depósitos no consolidados de tipo coluvial y morrena, no saturados que permiten la infiltración. Se considera de bajo potencial hidrogeológico, con características de zona vadosa y con saturación parcial solo durante el deshielo, no constituyendo unidad acuífera dada su escasa continuidad lateral (AAS, 2019). Esta UH tiene un espesor promedio de 38 m, con un mínimo de 1 m y un máximo de 100 m, hacia el final de la quebrada y cerca del glaciar Infiernillo, respectivamente.

UH 1B se define como depósitos antrópicos o lastre, que al igual que UH 1A se presentan de manera localizada (Figura 3.1), actuando como zonas de recarga e infiltración, pero no como unidades acuíferas, dado el continuo proceso de drenaje de la mina que ocasiona el descenso de niveles freáticos en el rajo. En la zona del botadero San Francisco los depósitos presentan buena continuidad lateral, lo que sumado a recargas artificiales y naturales genera la existencia de flujos subterráneos relativamente constantes entre UH 1B y UH 2. Estos flujos son captados y recirculados a la operación minera, generando una saturación parcial en el sector del Botadero (AAS, 2020). Esta UH tiene en promedio un espesor de 35 m, alcanzando un mínimo de 2 m en zonas cercanas al rajo y un máximo de 180 m en la zona del botadero San Francisco.

UH 1A Se distribuye en la zona sur de Quebrada La Disputada, bordeando a los glaciares Agua Los Machos e Infiernillo, mientras que la UH 1B se ubica en la zona del botadero (Figura 3.1).

## **UH2**

Se define como roca de distintas litologías (brechas hidrotermales y magmáticas, andesitas, riolitas e intrusivos) altamente fracturada, perteneciente al dominio secundario limitado inferiormente por el contacto primario-secundario. Constituye el sistema hidrogeológico principal, dado que, a pesar de los bajos valores de permeabilidad ( $1,9 \times 10^{-9} - 5,3 \times 10^{-5}$  [m/s]), la interconexión de las fracturas posibilita la movilización de agua subterránea, configurando niveles piezométricos y direcciones de flujo dentro de esta UH (AAS, 2019). Constituye un acuitardo basado en los valores de permeabilidad, dado que el 80% de los datos se encuentra en un orden de magnitud igual o menor a  $10^{-6}$ . Se sitúa entre UH 1 y UH 3, aflorando en superficie en gran parte de Quebrada La Disputada (Figura 3.1). Su espesor en promedio es aproximadamente 200 m, siendo su mínimo ~ 80 m y su máximo ~450 m.

## **UH3**

Roca sana, no fracturada o con fracturas selladas, debido a lo cual posee bajísimos valores de permeabilidad ( $3,26 \times 10^{-9} - 4,84 \times 10^{-7}$  [m/s]) y se interpreta como límite impermeable para el flujo de agua. Se ubica en dominio primario y subyace a la UH 2, en Quebrada la Disputada aflora en superficie solo en el rajo Donoso y en algunas zonas del rajo Infiernillo (Figura 3.1). Dado que consiste en roca competente, su capacidad de almacenar y transmitir agua es prácticamente nula, debido a lo cual se define como acuífugo.

### **3.2 Propiedades hidráulicas de UH**

En esta sección se presentan los valores de parámetros hidráulicos para cada UH definida, según los datos y bibliografía recopiladas.

#### **Conductividad hidráulica**

Para asignar las propiedades hidráulicas a las UH, se considerarán las propiedades de las unidades geológicas calculadas en el apartado 2.3.2 y los datos que no fueron incluidos anteriormente dado que no tienen asignada litología, pero pertenecen al dominio secundario.

Para la UH 1A y la UH 3 los valores son los mismos calculados en 2.3.2, para el relleno aluvial y para pórfidos/intrusivos en roca primaria (dado que no hay valores de brecha en roca primaria), respectivamente.

En el caso del a UH1B, se considera un valor mínimo acotado por la bibliografía para depósitos no consolidados tamaño arena gruesa igual a  $9 \times 10^{-7}$  [m/s] (Domenico y Schwartz, 1990), debido al limitado número de ensayos disponibles (7) cuyos valores muestran diferencias de hasta cinco órdenes de magnitud. El valor máximo es el entregado por los ensayos (AAS, 2019).

En tanto que, para asignar valores de propiedades hidráulicas a la UH 2, se promediarán los datos para todo el dominio de roca secundaria (pórfidos/intrusivos y brechas) y los 14 datos no incluidos en las propiedades de las unidades geológicas.

Tabla 3.1: Valores de conductividad hidráulica para las UH. Fuente: AAS (2019) y Domenico y Schwartz (1990).

| UH Estadística | K [m/s]   |           |           |           |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                | UH 1 A    | UH 1 B    | UH 2      | UH 3      |
| Máximo         | 3,50,E-04 | 9,90,E-01 | 5,30,E-05 | 4,84,E-07 |
| P80            | 2,10,E-04 | 5,42,E-01 | 4,04,E-06 | 1,23,E-07 |
| P50            | 9,50,E-05 | 9,10,E-02 | 5,72,E-07 | 3,03,E-08 |
| P20            | 3,12,E-05 | 5,82,E-05 | 6,52,E-08 | 8,35,E-09 |
| Mínimo         | 3,40,E-06 | 9,E-07    | 1,90,E-09 | 3,26,E-09 |
| N° de datos    | 18        | 7         | 42        | 12        |

De acuerdo con la literatura, las permeabilidades para UH 1 son moderadas a bajas, mientras que para UH 2 y UH 3 son bajas a muy bajas (Singhal y Gupta, 2010).

### Coeficiente de almacenamiento

Todos los datos disponibles listados en la Tabla 2.12 corresponden a la UH 2, por lo tanto, el rango de valores en que se encuentra su almacenamiento específico es entre  $3,1 \times 10^{-7}$  y  $4,24 \times 10^{-2}$ . En el caso de la UH 1 y la UH3 se puede estimar un valor de acuerdo con la literatura. Para la UH 1 se considera un valor entre arena suelta y grava arenosa densa correspondiente a un rango entre  $4,9 \times 10^{-5}$  y  $1,02 \times 10^{-3}$ , mientras que para la UH 3 se considera el valor de roca sana, menor a  $3,28 \times 10^{-6}$  (Tabla 2.14).

### 3.3 Geometría del sistema hidrogeológico

En el área de estudio se distinguen 3 unidades hidrogeológicas como se explica en la sección 3.1. Su distribución en la zona condiciona la circulación del agua subterránea de acuerdo con sus propiedades hidráulicas.

La Figura 3.1 muestra el mapa hidrogeológico de la zona según la clasificación de Struckmeier. Este mapa fue realizado con información proporcionada por AAS (2019, 2020) y con resultados de la modelación de geometrías de unidades hidrogeológicas en Leapfrog. Por lo tanto, se considera que corresponde al estado actual.

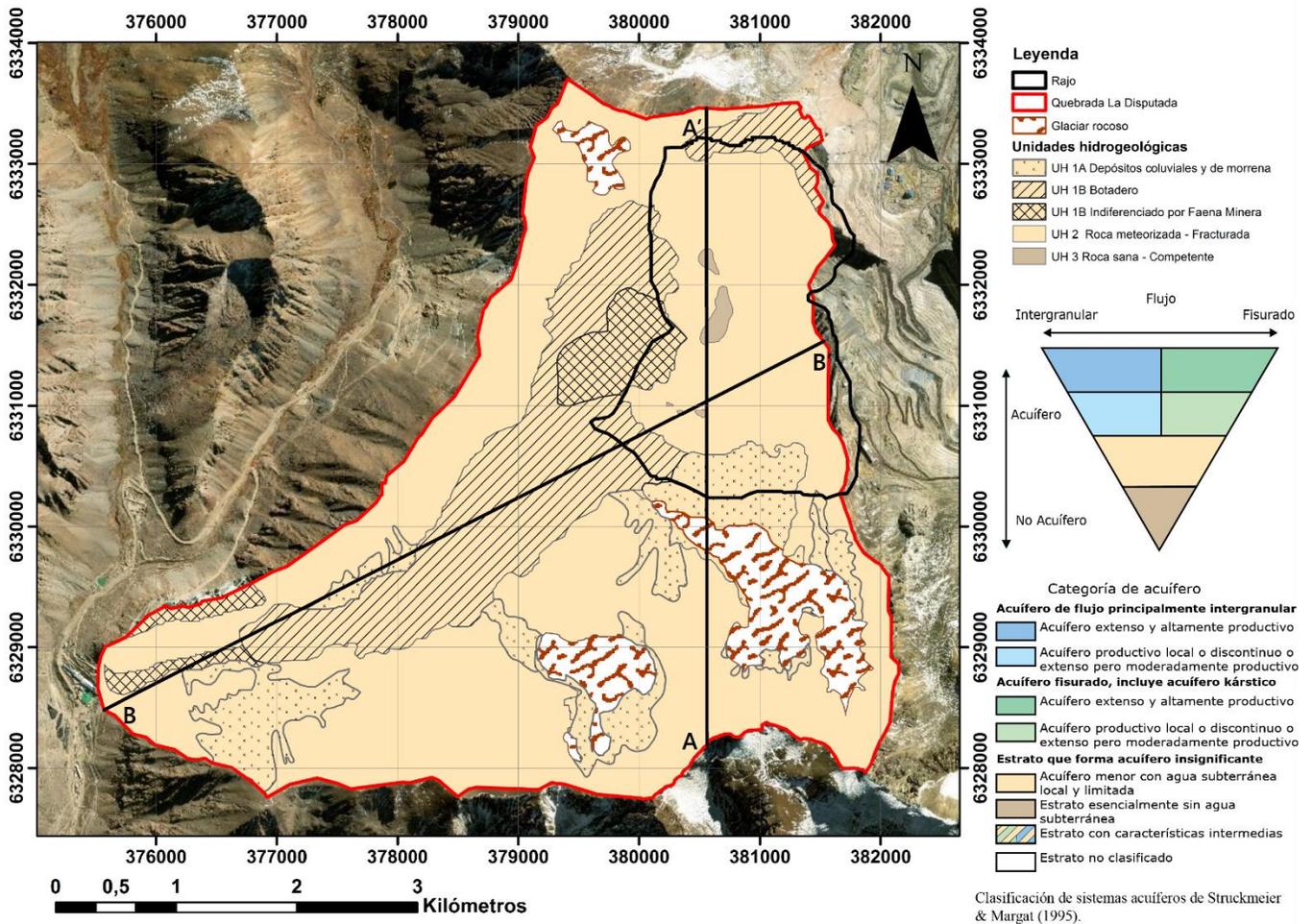


Figura 3.1: Mapa hidrogeológico de la zona de estudio (2020). Fuente: Elaboración propia basado en AAS (2019) y trabajo en Leapfrog

Las Figura 3.2 y Figura 3.3 corresponden a los perfiles señalados en la Figura 3.1. Estos perfiles muestran la geometría en profundidad de las unidades hidrogeológicas según la modelación realizada en Leapfrog utilizando los datos de estratigrafía, condición geotécnica y mineralógicos de los sondajes proporcionados por AAS (2019, 2020).

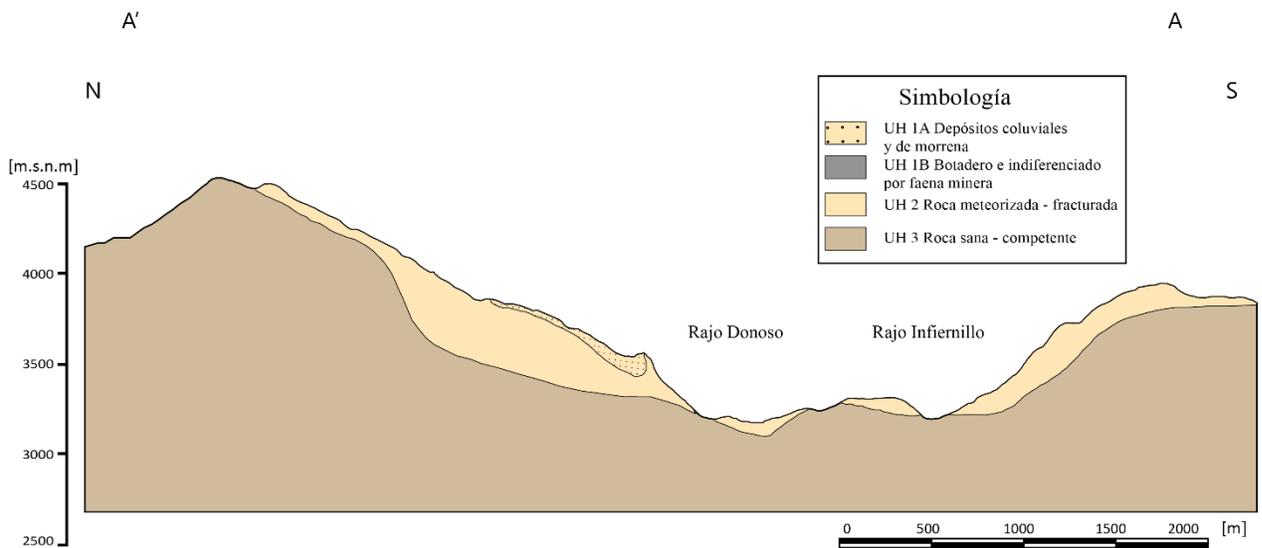


Figura 3.2: Perfil AA' unidades hidrogeológicas en profundidad. Fuente: Elaboración propia basado en trabajo en Leapfrog.

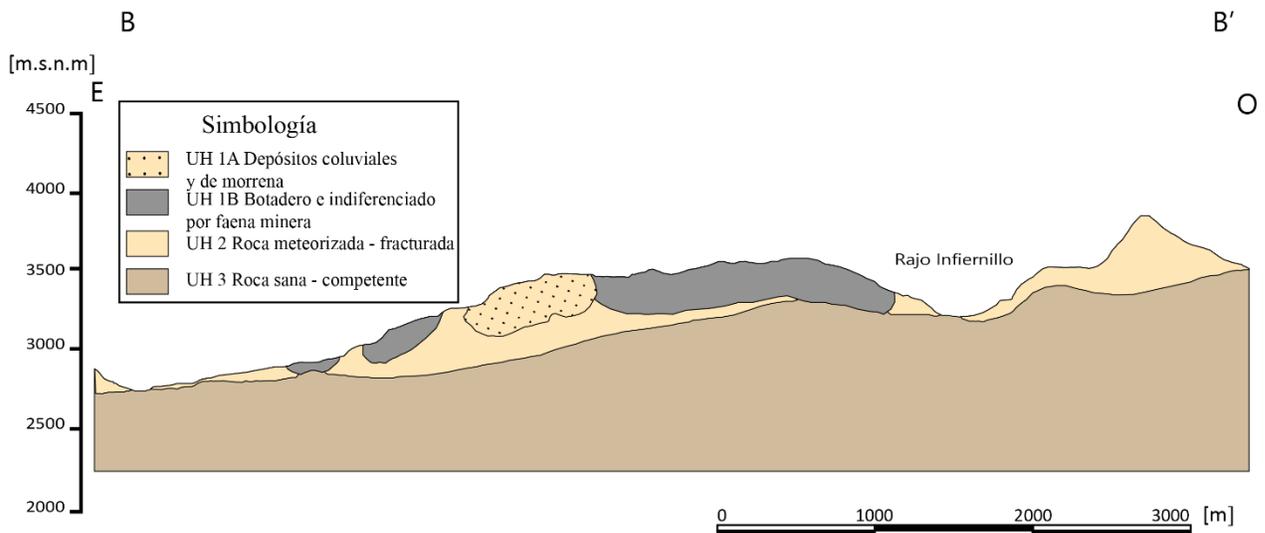


Figura 3.3: Perfil BB' unidades hidrogeológicas en profundidad. Fuente: Elaboración propia basado en trabajo en Leapfrog.

### 3.4 Balance hídrico

En esta sección se presentan los componentes del balance hídrico de la zona de estudio, y los balances preoperacional y operacional.

#### 3.4.1 Componentes balance hídrico

##### Entradas

##### *Recarga por precipitación*

Esta recarga corresponde al flujo que se infiltra atravesando la zona vadosa hasta alcanzar el nivel freático del acuitardo. Su origen corresponde a la precipitación nival de la zona, que durante la época de deshielo se derrite y percola desde la superficie. Este valor es tomado de la modelación hidrológica de la Quebrada La Disputada (AMTC, 2019). Para el balance preoperacional se considera un período entre 1996 – 2005, mientras que el operacional considera una ventana de

tiempo entre 2006 y 2018. Se totaliza en 25 [l/s] y 19 [l/s] en el sector del rajo (zona alta Quebrada La Disputada), para el estadio preoperacional y operacional, respectivamente.

#### *Filtración Embalse Los Bronces*

Desde el embalse se considera un aporte a la recarga subterránea por infiltración de un valor de 20 [l/s]. Este valor es estimado por AAS (2019) de acuerdo con las permeabilidades del área donde se ubica el embalse ( $2 \times 10^{-4}$  [m/s]).

#### *Recarga profunda Glaciar Infiernillo y La Perla*

Corresponde a los flujos de agua asociados al derretimiento de los glaciares Infiernillo y La Perla, los que percolan hasta alcanzar el nivel freático del agua subterránea. Según el estudio de AMTC (2019), se estima un valor de 6,2 [l/s] y 7 [l/s] para ambos glaciares, en un balance preoperacional y operacional, respectivamente.

#### *Escorrentía subsuperficial por precipitación*

Esta componente está referida a los flujos de agua que provienen del derretimiento en época de deshielo de la precipitación nival caída en la zona durante los meses de invierno, pero que no se infiltran hasta alcanzar el nivel freático, sino que afloran por las paredes del rajo en dirección al fondo del mismo. La Figura 3.4 muestra la trayectoria de estos flujos. Se considera un valor de 83 [l/s] a partir de la modelación hidrológica WEAP (AMTC, 2019) para el balance operacional.

### **Salidas**

#### *Salida natural Quebrada La Disputada*

Antes de la implementación de los pozos de bombeo, en el período preoperacional, se toma el supuesto de que una porción del agua subterránea escurre hacia la parte baja de la Quebrada La Disputada, por la salida natural. Se realiza una estimación simple de este valor de lo que resulta 46 [l/s]. El detalle del cálculo se encuentra en el **Anexo 2**.

#### *Zanjas de intercepción y bombeo pit lake*

Para el período preoperacional, solo se considera el agua que aflora por el fondo del rajo. Para este valor también se hace una estimación simple que se detalla en el **Anexo 2**. El valor considerado corresponde a 7,4 [l/s].

Para el balance operacional contempla el caudal de agua bombeado desde el fondo del rajo que no es captado por los pozos de bombeo, además del agua que aflora por las paredes del rajo y escurre hacia el fondo del rajo, siendo captada en su trayectoria por zanjas de intercepción ubicadas entre los bancos del rajo. El caudal correspondiente a esta componente se ha estimado de acuerdo al caudal de aguas mina declarado por AAS al Consejo Minero durante 2015 y 2019, resultando un valor de 71 [l/s].

#### *Pozos de bombeo*

Corresponde al caudal con que el agua es bombeada de los pozos desde el rajo, con la finalidad de disminuir los niveles freáticos del acuitardo y despresurizar los taludes del rajo. Con base en los caudales de bombeo entregados en AAS (2020) se estima en un valor de 37 [l/s], considerando un período comprendido entre mayo de 2015 y septiembre de 2019.

## Túnel de exploración Los Sulfatos

En la zona de Quebrada La Disputada, el Túnel Los Sulfatos se emplaza dentro de la UH 2, razón por la que actúa como dren de esta UH (AAS, 2019). AAS registra los caudales mensuales entre mayo 2010 y abril 2018, período en el cual la mayor medición tiene un valor de 180 [l/s] a inicios de la construcción. Para estimar un valor a incorporar en el balance hídrico, se han considerado datos entre 2015 y 2018, resultando un caudal promedio de 24 [l/s].

Con lo anterior, se realiza el balance de entradas y salida de flujos de agua que configuran el funcionamiento del sistema hidrogeológico dentro de la parte alta de Quebrada La Disputada, en el sector del rajo, tanto para el período preoperacional (Tabla 3.2) como para el operacional (Tabla 3.3), como representan las Figura 3.5, Figura 3.6 y Figura 3.7.

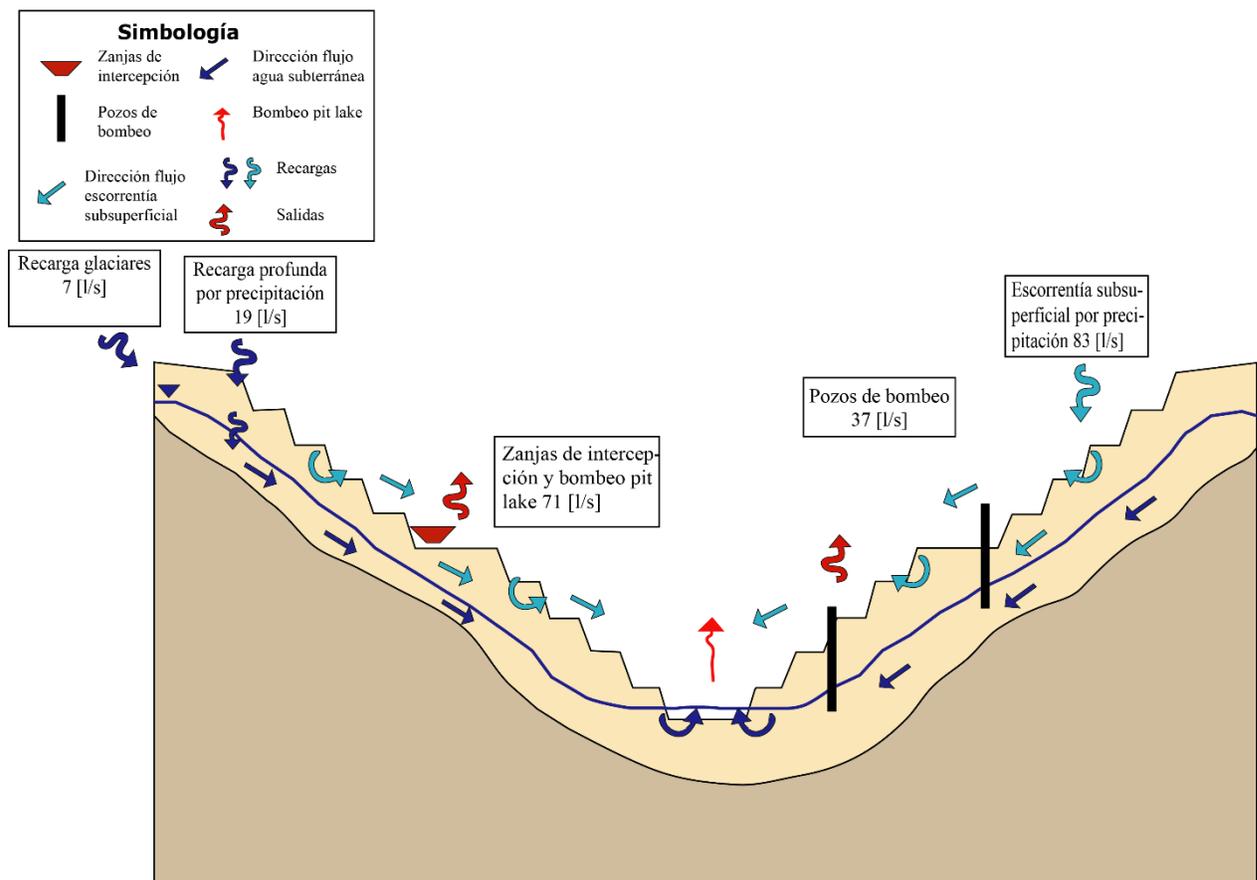


Figura 3.4: Perfil esquemático de trayectoria de recargas profundas y escorrentía subsuperficial en el rajo.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 Balance preoperacional

Este balance busca representar un estado preoperacional del sistema (Figura 3.5). Las labores mineras llevan más de 100 años ocurriendo en la zona, lo que impide realizar una estimación de las componentes del sistema hidrogeológico sin intervención antrópica. Entonces, se considera como preoperacional al estadio previo a la operación de pozos de bombeo y existencia del túnel

Los Sulfatos, siendo la única salida antrópica de agua la que aflora por el fondo del rajo (*pit lakes*). El período comprende valores de las componentes entre 1996 y 2005.

Se considera que las componentes que recargan el sistema en este período son la recarga profunda por precipitación, la recarga asociada al Embalse Los Bronces que funciona desde 1991 y la recarga profunda de los Glaciares Infiernillo y La Perla. Para las salidas, además de considerar el volumen de agua evacuado por fondo del rajo, se toma el supuesto de que una fracción del agua escurre hacia la parte baja de la Quebrada La Disputada, en dirección al Estero San Francisco (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Balance hídrico preoperacional para el sistema período 1996 – 2005

| <b>Entradas</b>                                 | <b>[l/s]</b> | <b>Salidas</b>                       | <b>[l/s]</b> |
|---|--------------|--------------------------------------|--------------|
| Recarga profunda por precipitación              | 25           | Pit lakes                            | 7,4          |
| Recarga profunda por filtración Embalse LB      | 20           | Salida natural Quebrada La Disputada | 46           |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo y La Perla | 6,2          |                                      |              |
| <b>Total entradas</b>                           | 51,2         | <b>Total salidas</b>                 | 51,2*        |
| Variación de almacenamiento                     | 0            |                                      |              |

\* La suma total de las salidas en la etapa preoperacional corresponde a 53,4 [l/s], sin embargo, se asume un total de 51,2 [l/s] debido a que en esta etapa el sistema está en equilibrio. La diferencia de 2,2 [l/s] puede deberse a una sobreestimación de algún caudal de salida.

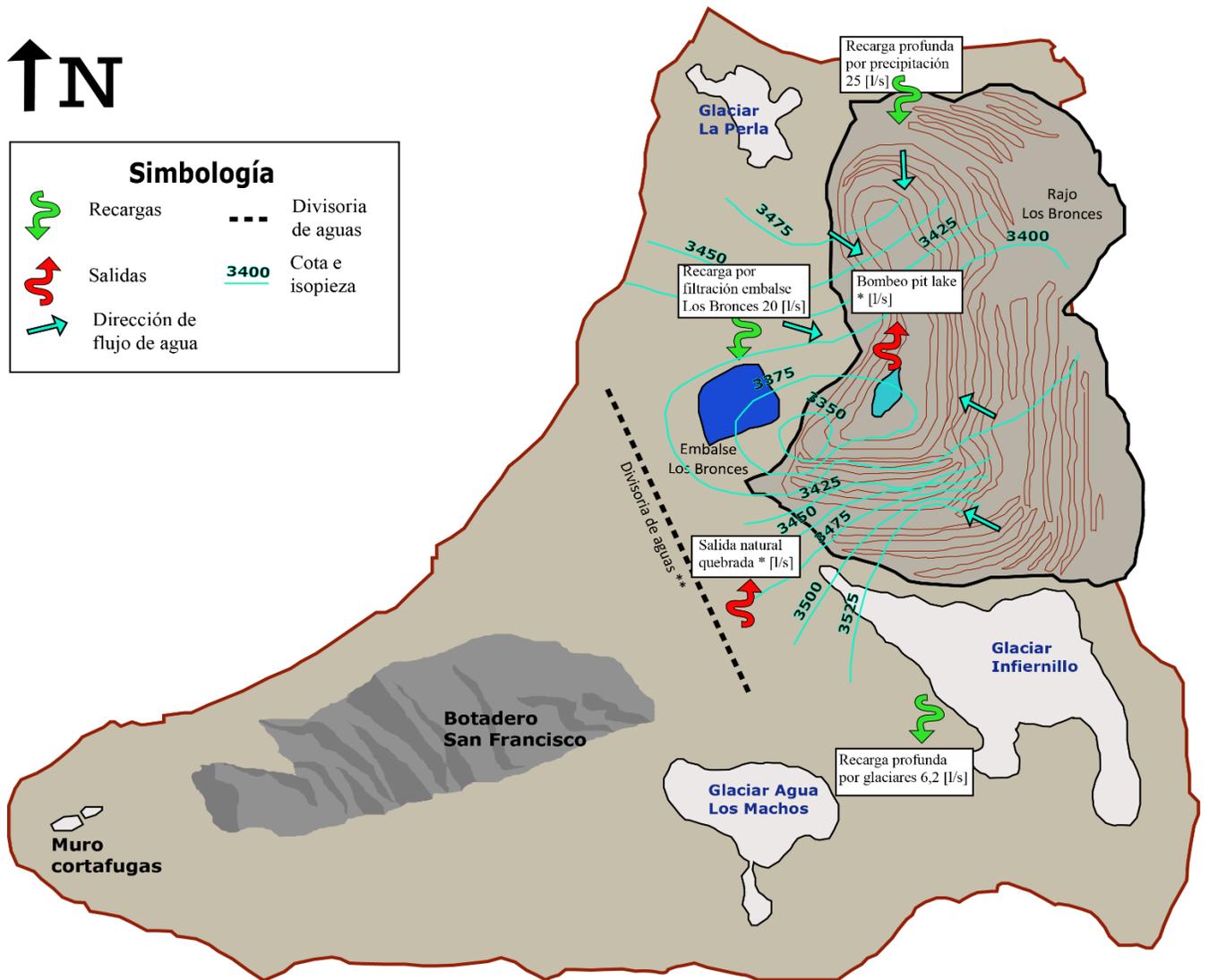
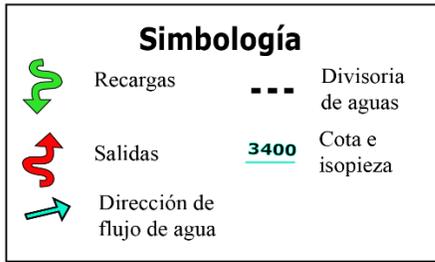


Figura 3.5: Esquema en planta de funcionamiento y componentes del sistema hidrogeológico en la zona del rajo en etapa pre – operacional. Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Balance operacional

El balance hídrico operacional busca representar el funcionamiento más actual del sistema. Considera solo las entradas y salidas en el período comprendido entre mayo de 2015 y septiembre de 2019. Para este caso, se consideran las recargas asociadas a la precipitación, escorrentía subsuperficial, filtración del Embalse Los Bronces y recargas por Glaciares La Perla e Infiernillo. Como salidas se tienen los pozos de bombeo, las zanjas de intercepción y el bombeo de los *pit lakes* y el Túnel de exploración Los Sulfatos.

Tabla 3.3: Balance hídrico operacional para el sistema período 2015 - 2019

| <b>Entradas</b>                                 | <b>[l/s]</b> | <b>Salidas</b>                           | <b>[l/s]</b> |
|---|--------------|--|--------------|
| Recarga profunda por precipitación              | 19           | Pozos de bombeo                          | 37           |
| Escorrentía subsuperficial por precipitación    | 83           | Zanjas de intercepción y bombeo pit lake | 71           |
| Recarga profunda por filtración Embalse LB      | 20           | Túnel de exploración Los Sulfatos        | 24           |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo y La Perla | 7            |  |              |
| <b>Total entradas</b>                           | 129          | <b>Total salidas</b>                     | 132          |
| Variación de almacenamiento                     | -3           |  |              |

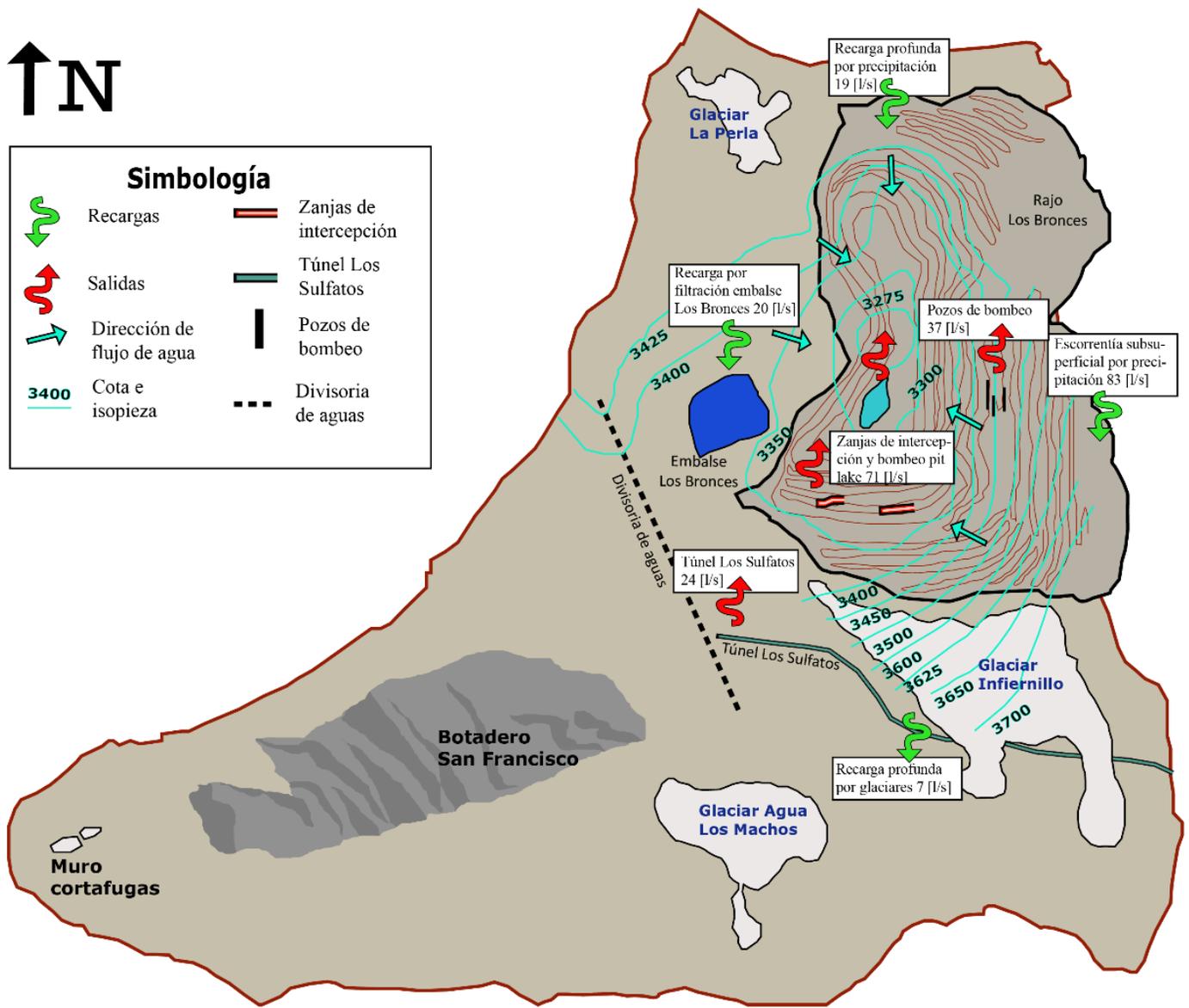


Figura 3.6: Esquema en planta de funcionamiento y componentes del sistema hidrogeológico en la zona del rajo en etapa operacional. Fuente: Elaboración propia



## **4. Modelos numéricos**

En este capítulo se presentan los resultados de este trabajo, que consisten en la definición de los criterios comparativos, la descripción de la construcción de los modelos y los resultados de las simulaciones de los modelos estacionarios calibrados. Se comienza el capítulo con la definición de los distintos criterios de comparación que se utilizan para contrastar cada software, para seguir con una reseña de los softwares, que resume sus principales características y especificaciones además de las versiones utilizadas en ese trabajo. Se presentan luego por cada software las características a evaluar, en primer lugar, las interfaces de cada uno, para seguir con el proceso de construcción de los modelos por software, su proceso de calibración, el postproceso y finalmente se habla de otros atributos.

### **4.1 Criterios de comparación**

Los criterios de comparación se separan según las etapas del modelo numérico: preproceso, capacidad de simulación, calibración y postproceso. Incluyen también aspectos inherentes a los códigos, comparación de complejidad de interfaz y otros.

El preproceso consiste en los pasos para la construcción de los modelos en cada software, la capacidad de simulación se refiere a las herramientas disponibles en cada software para representar distintos aspectos del sistema hidrogeológico a modelar. La calibración por su parte, es el proceso de variación de parámetros para el ajuste de niveles, mientras que el postproceso, es entendido como la presentación y obtención de resultados de las simulaciones. El último criterio agrupa otras características tales como disponibilidad de documentación de usuario/o, valor comercial, etc.

#### **4.2.1 Características técnicas inherentes a los códigos**

Este ítem considera los métodos de resolución de ecuaciones que posee cada software, lo que incide, por ejemplo, en la discretización bidimensional y tridimensional del espacio.

#### **4.2.2 Complejidad del uso de interfaz**

Este criterio se enfoca principalmente en la simplicidad o complejidad de las interfaces al momento de construir un modelo. Contempla rasgos como la presencia de herramientas básicas en la construcción de los modelos, las ventanas de visualización del modelo 2D y 3D, lo intuitiva que resultan a quien modela.

#### **4.2.3 Preproceso**

Este criterio está referido a las herramientas y facilidad de implementación de distintos atributos y características del modelo en cada software en la fase de construcción de este. Los atributos considerados corresponden a la grilla, capas y topografía. Este criterio considera, además, la compatibilidad de la extensión de archivos trabajados de otros programas informáticos (Ej. GIS, CAD, etc.) que posee cada software para incorporar distintos parámetros y condiciones de borde al modelo por medio de su importación, o bien, la posibilidad de incorporarlos directamente en el programa.

#### **4.2.4 Capacidad de simulación**

La capacidad de simulación se refiere a las capacidades que posee cada software para representar las variables a modelar, los problemas y ventajas que presenta cada uno, y que tan simple o compleja es la representación de las variables. Las capacidades consideradas para este trabajo son las utilizadas en la construcción y calibración del modelo estacionario, incorporación de

condiciones de borde del modelo transiente, además de algunas referentes a escenarios postminería, con base en la documentación de cada software y bibliografía complementaria, ya que no se modelaron en este trabajo.

#### 4.2.5 Calibración del modelo estacionario

Consiste en la comparación de los valores utilizados para los parámetros hidráulicos en la calibración del modelo estacionario en cada software, junto a los estadígrafos y errores de balance obtenidos en cada caso.

#### 4.2.6 Postproceso

En esta sección se evalúan las técnicas de análisis, presentación y obtención de resultados de las simulaciones en cada software.

#### 4.2.7 Otras características

Se incluyen otros aspectos como lenguajes disponibles en plataformas y manuales de uso, documentación y medios oficiales de aprendizaje de los softwares, condiciones iniciales y valor comercial.

### 4.2 Reseña de softwares

#### GV

Groundwater Vistas (GV) es una interfaz gráfica para la modelación de flujo de agua subterránea y de transporte de contaminantes en 3D, de pre y post proceso. Su código de simulación es MODFLOW que nace en 1984 (McDonald y Harbaugh, 2003) bajo el auspicio del United States Geological Survey (USGS). GV resuelve la ecuación general de flujo subterráneo en tres dimensiones (Ec. 1) utilizando el método de Diferencias Finitas y es comercializado por Environmental Simulations, Inc (ESI).

$$q = -K * \nabla(h(x, y, z)) = - \begin{bmatrix} K_x & \frac{\partial h}{\partial x} \\ K_y & \frac{\partial h}{\partial y} \\ K_z & \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

q: Caudal [L<sup>3</sup>/T]

K<sub>x</sub>: Conductividad hidráulica del medio en x [L/T]

∂h/∂z: Variación de altura piezométrica h en z

El método de diferencias finitas es un método numérico de resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales que discretiza un medio continuo en puntos equiespaciados, generando una malla de elementos cuadrados o rectangulares. Cada uno de estos puntos representa una ecuación que debe ser resuelta. Mientras más fina sea la discretización del medio, es decir, a mayor cantidad de nodos, más preciso es el resultado, pero se requiere un mayor tiempo de cálculo y aumenta la inestabilidad matemática. Estas ecuaciones son resueltas iterativamente hasta que el error es lo suficientemente pequeño. Un modelo de diferencias finitas es construido dividiendo el dominio del modelo en regiones cuadradas o rectangulares llamadas bloques o celdas. Variables primarias (niveles, descensos, concentraciones) son computadas en los nodos del modelo. La red de celdas y nodos es llamada grilla. En principio, una grilla es creada especificando filas, columnas y capas de igual tamaño (grilla regular), y aunque una grilla regular es la manera más precisa de la solución (Anderson y Woessner, 1992), a menudo es necesario refinar la grilla en áreas de interés. De esta forma, se logra mayor precisión en áreas clave a expensas de menor precisión en los bordes de la grilla.

Este trabajo utiliza la versión 7.24 de GV, que incluye todas las versiones de MODFLOW (MOFLOW-NWT<sup>win32</sup>, MODFLOW-USGwin32, MODFLOW2005win32, MODFLOW2000win32, MODFLOW96win32 y MODFLOWwin32), además de interfaces para MT3D y MODPATH, softwares de modelado de transporte.

Esta versión incorpora la posibilidad de crear grillas triangulares y voronoi para MODFLOW-USG, por medio del generador de grillas AlgoMesh, cuya licencia solo se incluye en los niveles Profesional y Premium. Además, el soporte técnico es gratuito, aunque se reserva el derecho a cobrar por soporte técnico excesivo (soporte técnico extendido).

GV admite en esta versión grillas no estructuradas para el modelo MODFLOW-USG. Esto confiere la posibilidad de agregar áreas refinadas a la malla por medio de las herramientas *quadtree* y *nested*. La grilla tipo *quadtree* divide cada celda principal en celdas más pequeñas por potencia de dos, permitiendo realizar un suavizado en la malla entre las celdas más pequeñas y las más grandes. El refinamiento se replica en todas las capas y no se admiten subcapas. Por su parte, en una malla tipo *nested* las áreas refinadas son de forma rectangular y pueden contener más capas que la malla principal, pueden estar restringidas solo a un subconjunto de capas y puede haber más de una zona refinada al mismo tiempo, separadas por al menos dos filas y columnas para evitar la superposición.

Este trabajo utiliza la versión MODFLOW-USG, ya que utiliza una grilla no estructurada para simular el flujo de agua subterránea y una fórmula de diferencia finita de volumen control.

## FEFLOW

Finite Element Subsurface Flow system (FEFLOW) fue creado en 1979 por Hans-Jörg G. Diersch en el Research Centre for Soil Fertility of Müncheberg (Alemania) y posteriormente desarrollado en Institute for Water Resources Planning and Systems Research Inc. (WASY Gmgh) (Diersch, 2009). Es una herramienta de modelación numérica de 2D y 3D, aplicable en proyectos de transporte de calor y contaminantes o flujos de agua subterránea, en un medio saturado o de condiciones variables. Resuelve la ecuación de Darcy en 3d (Ec. 1) en medios saturados y la ecuación de Richards para medios no saturados (Ec. 2). Trabaja con el método de Elementos Finitos y actualmente es comercializado por Grupo DHI.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - K \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$\partial \theta / \partial t$ : Cambio de humedad volumétrica en el tiempo

K: Conductividad hidráulica del medio

D: Difusividad

Z: Dirección eje z

El método de elementos finitos es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales. La discretización del medio se hace en un número finito de elementos que se conectan por nodos. Se generan ecuaciones diferenciales por cada elemento incorporando las condiciones de cada nodo. Mientras más fina sea la discretización en elementos, mayor es la precisión del resultado, lo que demanda más tiempo de cálculo y aumenta la inestabilidad matemática. Un modelo desarrollado por el método numérico de elementos finitos (FEM) divide el medio en un número finito de elementos, en los cuales se aplican discretamente ecuaciones de balance. Diersch (2014), considera que FEM es superior a otros métodos por características como: Capacidad de ser aplicado a dominios de forma y condiciones de contorno arbitrarias (geometrías arbitrarias), capacidad de manejar geometrías complejas de forma sencilla al colocar elementos finitos en el lugar necesario independiente del tamaño (grillas no estructuradas), aproximaciones locales se ensamblan sistemáticamente para lograr una aproximación global de una solución a una ecuación

diferencial parcial, lo que confiere estabilidad en cuanto a la geometría e insensibilidad a las distorsiones de la malla (robustez), y base matemática sólida y rica que cubre incluso estimaciones de error a priori y a posteriori, lo que permite avanzar a FEM a problemas nuevos y relevantes, por sobre los niveles tradicionales de empirismo (fundamento matemático).

Este trabajo utiliza la versión 7.4 de FEFLOW, que admite el preprocesamiento, la simulación y el postprocesamiento. Sumado a ello, posee aplicaciones que apoyan propósitos específicos como interfaces de visualización para calibración automática, georreferenciación de mapas y transformación de coordenadas, diseño de gráficos y mapas, entre otros: FePEST, FEFLOW Viewer, Command-Line Mode, WGEO, FEPLLOT, FE-LM2. En esta versión FEFLOW incorpora una serie de funciones ampliadas en comparación a sus versiones anteriores. Entre estas destacan, mayor flexibilidad geométrica, revisión y mejoras en interfaz, mejoras en postprocesamiento y en aplicaciones como FePEST, etc.

## **MINEDW**

MINEDW es un programa de modelación de flujo de agua subterránea, de elementos finitos y en 3D desarrollado con funciones enfocadas en aplicaciones mineras. Contempla funciones de pre y post proceso. Es un código cuyo núcleo se basa en algoritmos del código de elementos finitos FEMFLOW3D, desarrollado por Tim J. Durbin y C. Berenbrock para el USGS. El código de MINEDW resuelve la ecuación de Darcy en 3D (Ec. 1). En el 2012 Itasca Denver desarrolló la versión 2.0 de MINEDW (Ugoretz, 2015) y ha continuado mejorando el funcionamiento de MINEDW hasta la versión 3.06, actualmente comercializada. Desde 2018, MINEDW ha sido utilizado exitosamente en más de 50 minas en todo el mundo, con diversas condiciones hidrogeológicas y climáticas. El código ha sido utilizado por aproximadamente 30 años, y sus predicciones han sido validadas por los datos recolectados en terreno con el pasar del tiempo.

MINEDW incorpora características especiales que facilitan la simulación de desaguado de minas a cielo abierto y subterráneas, como, por ejemplo: cambio de elevación de nodos para simular excavación progresiva, flujo de agua subterránea simulado en medio saturado-no saturado donde la malla fija permite la representación de la variabilidad hidrogeológica espacial del sistema hidrogeológico, representación 3D de la geología, del dominio del modelo, de la geometría del rajo, de niveles y flujos de agua subterránea, de zonas de recarga, evaporación y de presión de poros. Además, contempla el uso de condiciones de borde de nivel específicas variables o invariables en el tiempo, de condiciones de borde de flujo específicas particulares para cada paso de tiempo, de condiciones de flujo variable para simular flujos variables en el tiempo en respuesta a niveles variantes. Posee también interacción entre el sistema de agua subterránea y redes de drenaje, simulación de variación espacial y temporal de la precipitación a lo largo del dominio del modelo, simulación de zonas de relajación alrededor del rajo y resultados de distribución de presión de poros para ser usados en modelos geomecánicos 2D y 3D, entre otras características.

Este trabajo utiliza la versión 3.06.1 de MINEDW, cuya corrección de errores contempla: exportación de sección para presión de poros, mejora de soporte de *shapefile*, definición de *thead*, conexión del río cuando varios ríos comparten los últimos nodos, actualización de elevación desde la última modificación y vista de elementos del rajo después de cambiar unidades hidráulicas. Sumado a esto, los principales cambios de esta versión respecto a la anterior incluyen un nuevo SAMG solver, optimización del código de cálculo que aumenta la velocidad del 100 al 400%, nuevo archivo de salida *.MNE* que reporta la infiltración en el rajo o minas subterráneas, simplificación en la creación y simulación de redes de drenaje, rediseño de función de nivel constante para tener mayor control de salidas del modelo, *pinch-outs*, seguimiento y visualización

de partículas, función deshacer/rehacer, rediseño de la interfaz para facilitar la manipulación de la malla, función de minería a rajo abierto y minería subterránea que facilitan construcción de escenarios de operación y cierre, construcción y almacenamiento de vistas del modelo, exportación de vistas como archivo CAD, mejoras en los atributos gráficos para facilitar la visualización del modelo y sus resultados y nueva herramienta que permite crear rápidamente secciones transversales del dominio del modelo, entre otros atributos.

### **4.3 Interfaces de usuario**

#### **GV**

La interfaz de GV es relativamente simple, posee un menú principal en la parte superior de la pantalla, una ventana principal subdivididas en dos, una muestra vista en planta del modelo y la otra parte muestra una vista de sección transversal del modelo a lo largo de una fila o una columna, una barra de herramientas, una barra de estado y un cubo de referencia del modelo (Figura 4.1).

El menú principal posee submenús que abordan distintos aspectos del modelo. Entre ellos se incluyen también los cuatro modos de diseño del modelo: *Analytic Elements*, *Grid*, *Boundary Conditions (BCs)*, *Properties (Props)*, *View*, *Plot*, *XSect*, *File*, *Edit*, *Model*, *Reports*, *Windows* y *Help*. La barra de herramientas contiene los cuatro modos de diseño del modelo, que pueden ser activados presionando el botón que representa a cada uno, para posteriormente ser modificados a partir del resto de botones que aparecen. Contiene también un botón para comenzar la simulación y para importar los resultados de esta. La barra de estado muestra información de coordenadas, capa, fila, columna, nodo y valor de propiedad/condición de borde a medida que el cursor se mueve a través del modelo. El cubo de referencia permite cambiar rápidamente la capa actual que se muestra en la vista en planta, cambiar la fila o columna que se muestra en la vista de sección transversal o el período de stress en que se trabaja. Un detalle a destacar es que GV no posee la herramienta “deshacer”, por lo que el progreso debe guardarse periódicamente mientras se diseña el modelo en nuevas versiones del archivo, lo que permite volver atrás si se quiere volver a un estado previo de diseño del modelo (ESI, 2017).

Esta interfaz no posee una vista 3D, y se puede cambiar la vista en planta a una vista de sección transversal o de diseño de mapa. No es posible tener ventanas de visualización simultáneas y solo fue posible cargar archivos *.shp* para visualizarlos en la interfaz, lo que puede deberse a la versión del programa utilizada.

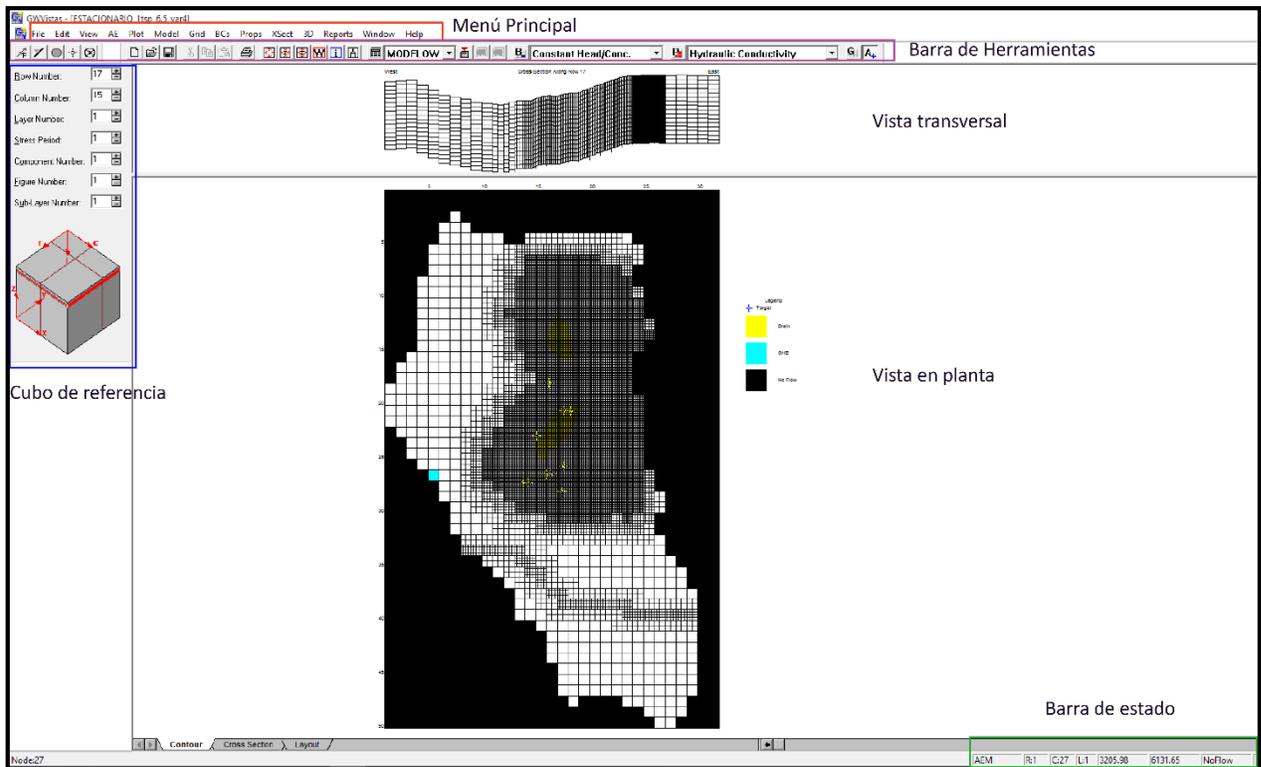


Figura 4.1: Interfaz GV

## FEFLOW

La interfaz de usuario de FEFLOW es más compleja que la de GV en una primera impresión. Esto principalmente debido a que está diseñada para proporcionar tantas herramientas como sea posible sin la necesidad de abrir cuadros de diálogo o menús específicos, lo que con experiencia permite un flujo de trabajo eficiente. Posee cinco componentes principales en la configuración de un modelo, que son menús (*File, Edit, View, Simulation, Scripting, Tools, Window, Help*), barras de herramientas, vistas, paneles y gráficos (cada uno con más de un tipo). Existen además menús contextuales que agilizan la funcionalidad de la construcción del modelo. La ubicación y visibilidad de los componentes es personalizable, lo que permite ubicarlas según las visualizaciones necesarias (DHI, 2016).

La interfaz posee un desarrollo gráfico importante, permitiendo una vista 3D del dominio del modelo y de la distribución de propiedades/condiciones de borde dentro del mismo. Se puede disponer de distintas ventanas de visualización que contienen distintas vistas del modelo (2D o 3D) de forma simultánea, donde cada una posee su propia configuración y manejo de componentes. En esta interfaz es posible cargar archivos *.dxf* y *.shp*, y establecer selecciones de nodos/elementos y atributos según ellos.

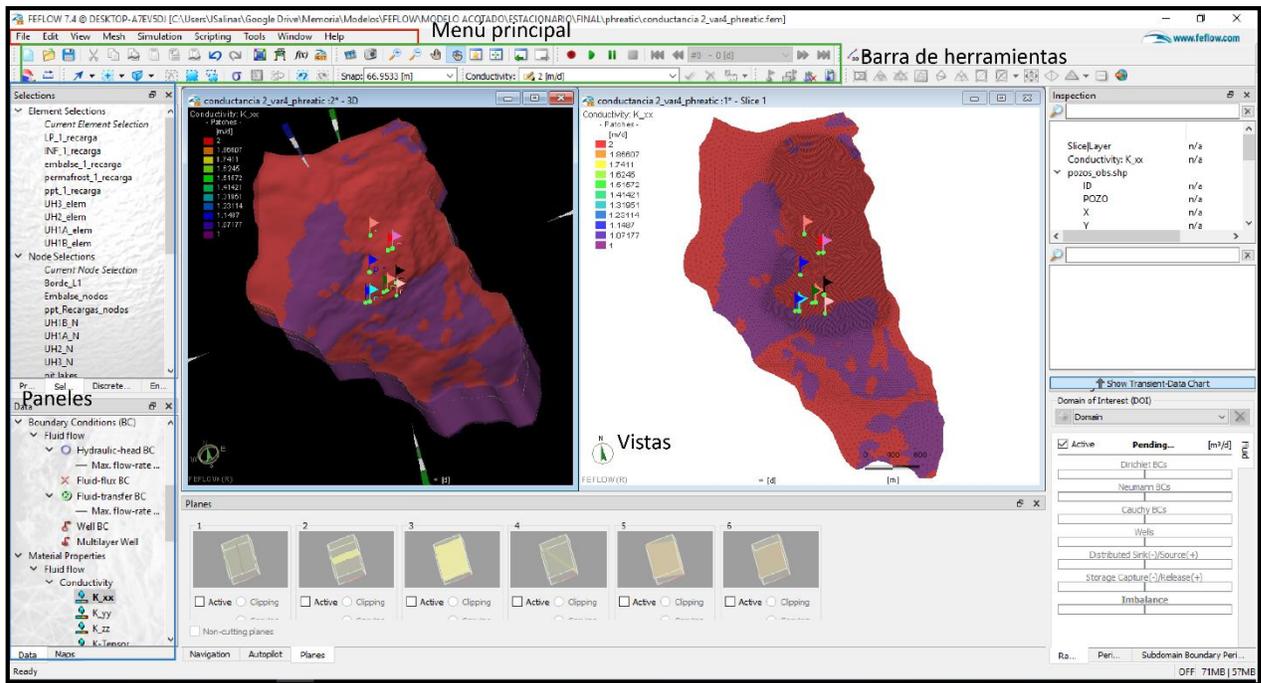


Figura 4.2: Interfaz FEFLOW

## MINEDW

La interfaz de usuario de MINEDW consiste en 4 componentes principales: panel de visualización, barra de menú principal, barra de herramientas y panel de control. El panel de visualización se utiliza para representar gráficamente distintos aspectos del modelo. El ensamble de elementos graficados y su apariencia se realiza por medio del panel de control. La barra de menú principal incluye las funciones mayores de la interfaz gráfica de MINEDW, que son: *File, Project, Mesh, Bcs, Mining, Run, Results, View, Tools, Windows* y *Help*.

La barra de herramientas se encuentra bajo la barra de menú principal y contiene herramientas para la creación e impresión de visualizaciones, selección de nodos/elementos, creación de planos en las vistas desplegadas, movimiento de nodos y componentes del panel de control. Posee también un deslizador de pasos de tiempo de las herramientas “deshacer” y “rehacer”. El panel de control muestra los elementos a graficar en el panel de visualización, como se nombró anteriormente. Panel de control se subdivide en tres subpaneles (elementos de visualización, vista e información) que controlan distintos atributos de los elementos graficados. El primer subpanel se usa para construir las gráficas agregando elementos a la vista especificando su apariencia (nodos, elementos, 2D,3D, propiedad, condición de borde, etc.). El subpanel de vista provee herramientas para mostrar herramientas para manipular la vista (rotación, magnificación, posición, etc.) y finalmente, el subpanel de información proporciona información como ID y localización de los nodos o elementos donde el cursor se posiciona (Itasca, 2018).

La interfaz proporciona vistas 2D y 3D del dominio del modelo, y de las propiedades/condiciones de borde asociadas. Tiene la capacidad de abrir distintas ventanas de visualización del modelo simultáneas, donde cada una tiene la dimensión y configuración propia y desacoplada del resto, lo que permite tener una vista comparativa de distintas características del modelo. Sumado a ello, es posible generar secciones transversales donde sea necesario, las que, pueden ser almacenadas por el programa, de la misma manera que se pueden almacenar vistas determinadas del modelo. En



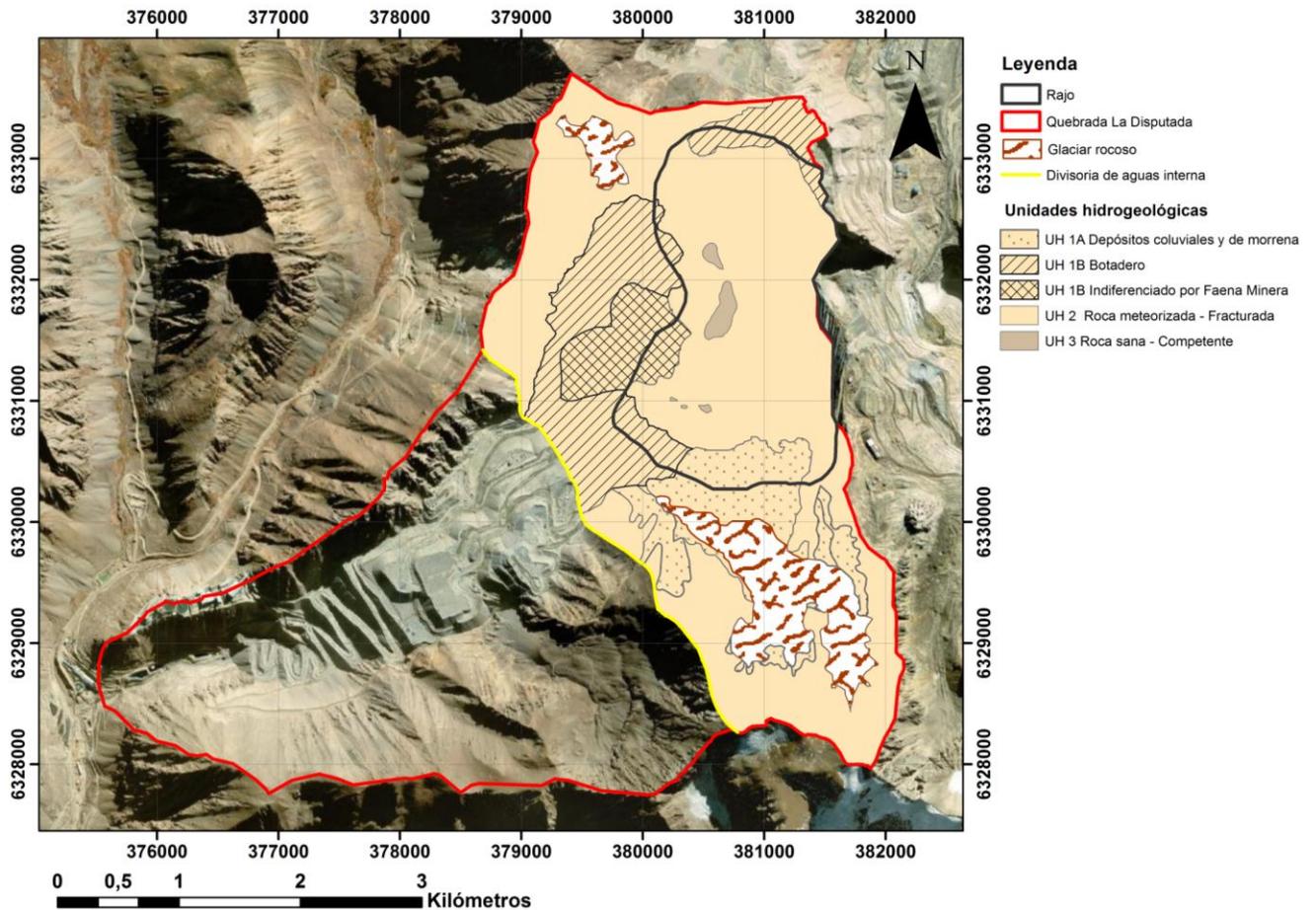


Figura 4.4: Dominio del modelo numérico y sus límites (divisoria con otras cuencas y divisoria interna)

#### 4.4.2 Tamaño de la grilla, discretización horizontal y vertical

##### GV

En este caso la malla ha sido creada directamente en el software. Se ha creado una grilla que posee 50 filas y 31 columnas, cada una espaciada por 120 m. A las celdas que están fuera del dominio de la Quebrada la Disputada se les ha asignado la característica de “No flujo”, dejándolas inactivas para la modelación (Figura 4.5).

Además, la grilla ha sido refinada en los sectores de interés, con el fin de obtener mayor detalle en zonas como el rajo y el túnel Los Sulfatos. Se estableció en la horizontal un tamaño de celda de 15 y de 30 m, respectivamente. Lo anterior se ha realizado mediante el uso de la herramienta *Quadtree Refinement*, zonificando unidades hidroestratigráficas (HSU) por *shapefiles* importados de cada zona de interés (rajo y túnel), según la cantidad de divisiones para cada celda (2, 4 u 8). Sumado a esto, la malla ha sido suavizada en las celdas de mayor y menor tamaño, ubicando celdas de tamaño intermedio a fin de establecer una transición en el cambio de tamaño (*Smooth Quadtree Mesh*) (Figura 4.5). Finalmente, la malla refinada fue asignada al modelo (*Allocate Quadtree Mesh*), lo que permite que el programa considere un tamaño menor de celda solo en los sectores indicados. GV posee una opción para discretizar las capas verticalmente en zonas de interés (*pinch outs*), pero esto no es compatible con el refinamiento horizontal.

Verticalmente, el modelo posee 16 capas de espesor variable. Es importante destacar que no fue posible asignar un espesor variable a las capas directamente en el programa. Para lograrlo, se exportaron desde FEFLOW las elevaciones de cada slice (separación de capas). Así, se asignó en GV en las propiedades *Top Elevation* y *Bottom Elevation* las elevaciones correspondientes. Para esto, se importaron los archivos en formato *.shp*, ya que esta versión de GV solo asigna a la malla refinada datos ingresados en este formato. Se realizó una interpolación de los valores mediante el método inverso a la distancia. El *Top elevation* de la capa 1 corresponde a la topografía del modelo.

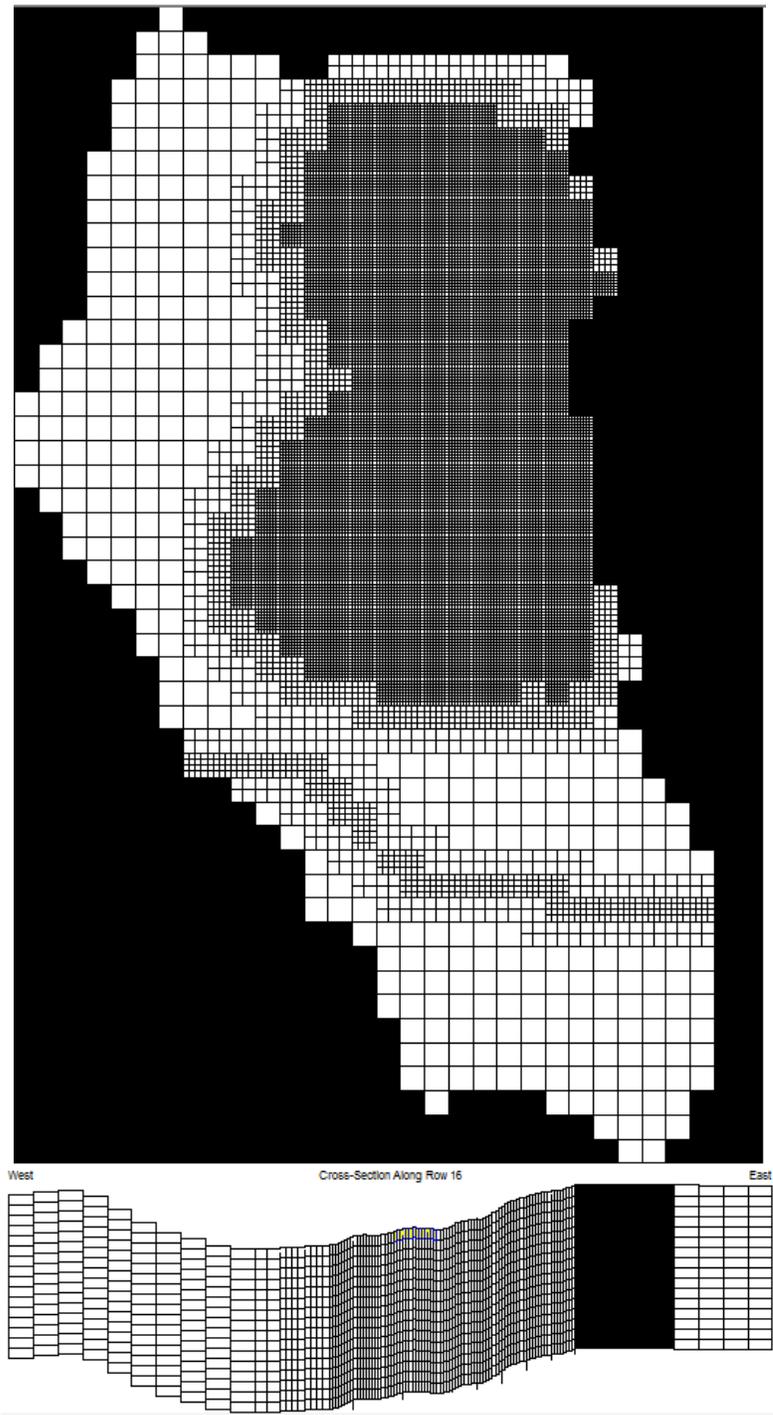


Figura 4.5: Grilla refinada diseñada en GV vista en planta y vista de sección transversal a lo largo de fila 16. Zonas negras corresponden a celdas de "no flujo".

## FEFLOW

Para este caso, la malla ha sido creada en un programa anexo (GMS) debido a que posee mayor flexibilidad en la creación de la malla que el mismo FEFLOW, en términos de manejo del tamaño de los elementos. Cabe destacar que, en el caso de los elementos finitos, el dominio de la malla está restringido al área a modelar, por lo que no hay elementos que inhabilitar como en GV. Respecto a la discretización horizontal, las dimensiones de los elementos que conforman la malla son 100 m para los bordes y se aplicó un refinamiento de 15 m y de 30 m para el rajo y Túnel Los Sulfatos, respectivamente, con el fin de igualar la resolución en todos los programas (Figura 4.6).

Este modelo también posee 16 capas de espesor variable, con una distancia aproximada de 60 m en la zona del rajo. En principio, se configuran 16 capas equiespaciadas entre las cotas 3000 y 5000 m.s.n.m. El espesor variable de las capas fue asignado por el mismo programa al ingresar la topografía en la primera capa mediante un archivo *.xlsx*, y la interpolación por el inverso a la distancia de los datos. Es decir, el mismo programa se encarga de darle geometría a las capas mediante la indicación ingresada de conservar una distancia mínima de 60 m entre las capas. FEFLOW permite ingresar subcapas entre capas, pero no generar *pinch outs* en zonas específicas.

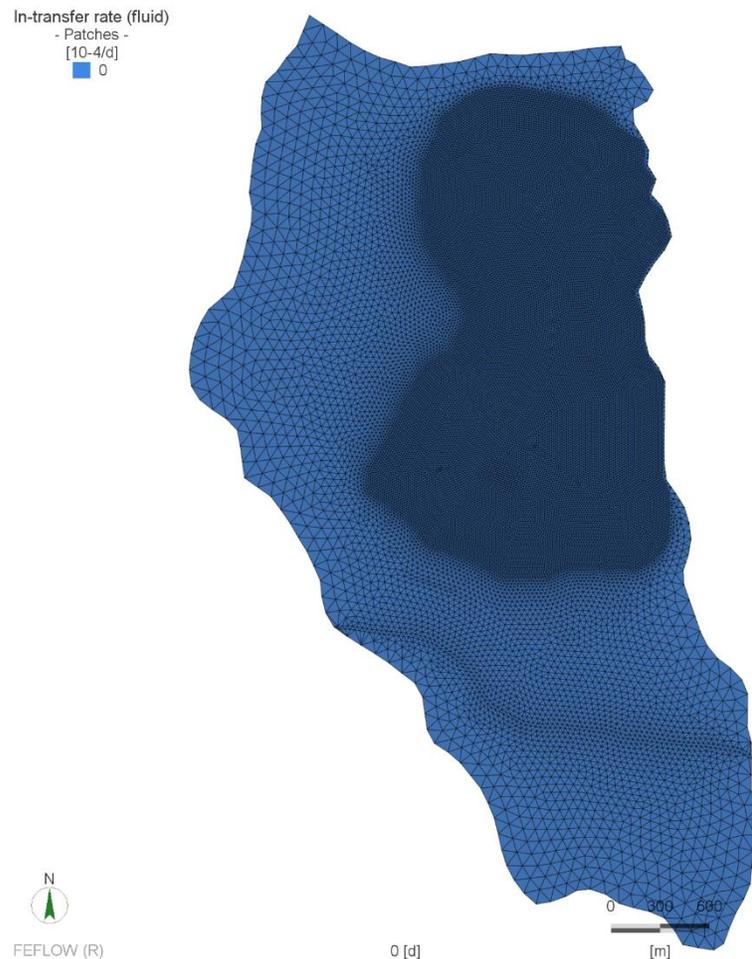




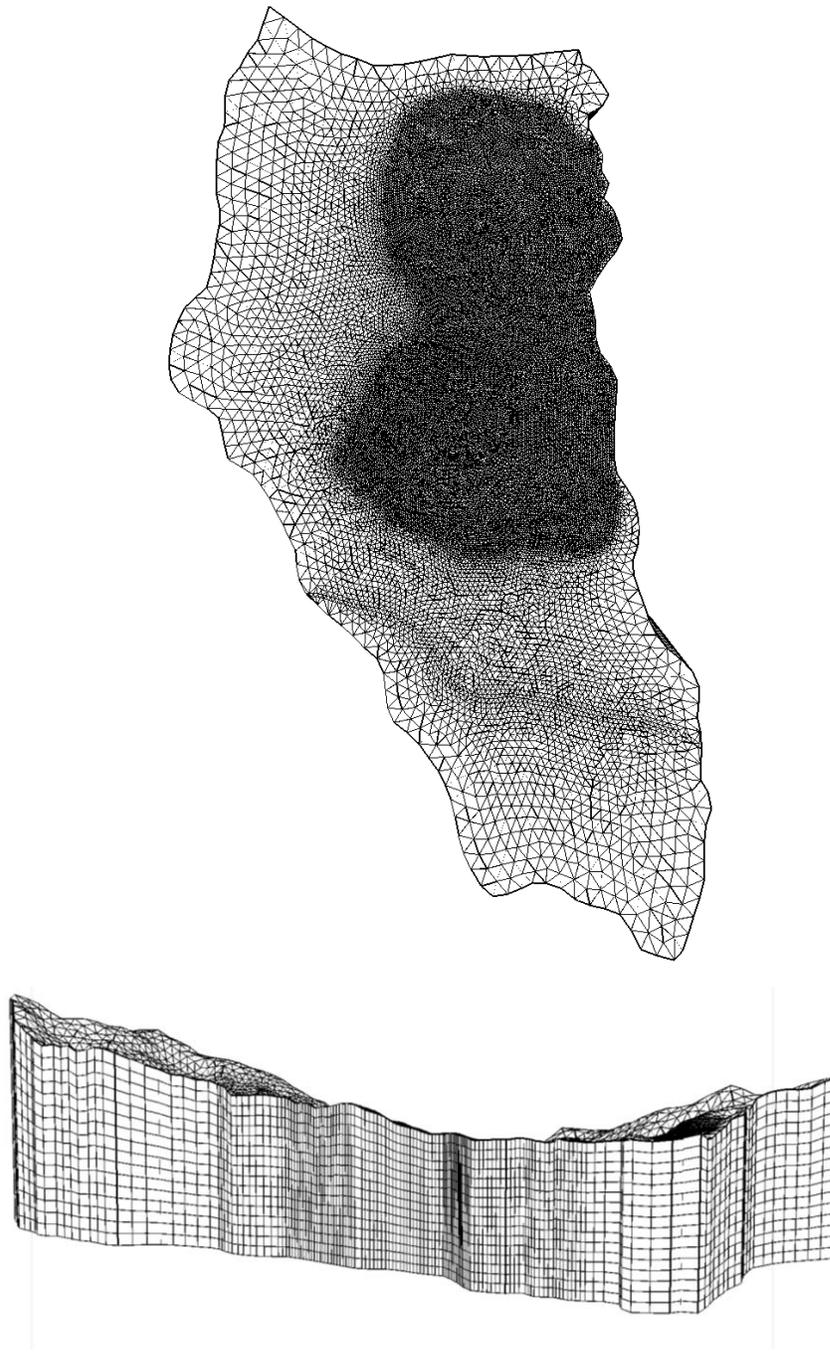
Figura 4.6: Grilla refinada diseñada en GMS e importada a FEFLOW. Vista en planta y vista transversal sentido SN

## **MINEDW**

Al igual que en FEFLOW, la malla fue importada desde GMS, por lo que cumple con la misma resolución horizontal que la señalada anteriormente.

En este modelo también se implementaron 16 capas (Figura 4.7), que cumplen las mismas especificaciones anteriormente nombradas. El espesor variable de las capas también es asignado por el programa, mediante el ingreso manual de cada capa indicando que se le ubique en la elevación promedio entre dos existentes, luego de ingresar la topografía. Posee además una opción especial para ingresar *pinch outs* en las zonas de interés, y no en toda la capa, que no fue utilizada en este trabajo debido a que no pudo replicarse en los otros softwares.

La topografía se ingresó mediante la asignación de un archivo de puntos (*.dat*, *.csv*, *.txt*) a todos los nodos de la primera capa, con una interpolación de inverso a la distancia.



*Figura 4.7: Grilla diseñada en GMS importada a MINEDW. Vista en planta y vista transversal dirección SN.*

#### **4.4.3 Parámetros hidráulicos**

A continuación, se señala la manera de implementación y la distribución de la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento lograda en cada software (Figura 4.8). En principio se ingresó la mediana para cada parámetro según el rango de valores establecidos en la Tabla 3.1.

La zona de relajación (ZOR) alrededor de un rajo se refiere a la zona donde ocurre una apertura o ensanchamiento de fracturas debido a la remoción de material a causa de las operaciones mineras. Existen estudios que reportan que la descarga litostática, como consecuencia de la remoción de material en una mina a cielo abierto, puede generar dilatación y por lo tanto cambios en la apertura

de fracturas, que se traduce en aumento de la conductividad hidráulica del material (Stacey y otros, 2003; Foster y otros, 2018). Los efectos de este fenómeno son diversos, Foster y otros (2018) proponen que podría o no expandirse el radio de influencia de un rajo dependiendo de los factores que existan conjuntamente. De esta manera, considerar el efecto de la descarga litostática en el sistema hidrogeológico del rajo resulta ser clave para mejorar la precisión y evaluación hidrogeológica de las explotaciones mineras en él (Foster y otros, 2018), ya que, aunque no se genere un impacto mayor en la tasa de flujo de descarga hacia el rajo, cualquier cambio en la presión de agua tendrá implicancias para la estabilidad y despresurización de laderas (Beale y Read, 2014; Marchand y otros, 2010). A pesar de que en este estudio no se realizaron simulaciones del modelo transiente, la implementación de la ZOR en la modelación hidrogeológica de un rajo es un aspecto relevante ya que el desarrollo de la ZOR puede afectar el funcionamiento hidrogeológico al variar la conductividad hidráulica del medio en el tiempo.

## **GV**

En este caso, se exportaron los nodos del modelo como archivo de puntos *.csv*, para ser evaluados en el modelo geológico construido en Leapfrog para la geometría de las unidades hidrogeológicas. Una vez que se tuvo la asignación de cada nodo a una UH, se le asignó manualmente un valor diferente según la UH (1,2,3 o 4) en un archivo *.xls*. Esta información fue importada mediante un archivo *.shp* en cada capa a GV para zonificar por UH. De esta manera, se definieron cuatro zonas en el modelo numérico correspondientes a cada UH del modelo conceptual, cuyos valores de conductividad hidráulica y de almacenamiento se pueden variar directamente en la interfaz del programa, dependiendo de la propiedad hidráulica de interés.

GV permite variar las conductividades hidráulicas en el tiempo, solo en sus *packages* MODFLOW-SURFACT y MODFLOW-USG. Para incorporar una zona de relajación (ZOR) en torno al rajo, la delimitación y cambio en el tiempo debe ser ingresada manualmente.

## **FEFLOW**

Al igual que en GV, no fue posible asignar los elementos correspondientes a cada UH de manera directa en el programa, por lo que fue necesario importar un archivo *.xls* con valores distintos para cada elemento según la correspondiente UH. Para lograr esto, se exportaron las coordenadas de los elementos del modelo como archivo *.csv*, que fueron posteriormente evaluados en Leapfrog. Una vez que se tuvo la asignación de cada elemento a una UH, se le asignó manualmente un valor diferente según la UH (1,2,3 o 4) en un archivo *.xls*. Este último archivo se importó a FEFLOW, enlazando los valores correspondientes a cada UH con un valor de conductividad hidráulica en la horizontal ( $K_{xx}$ ). Hecho esto, mediante la selección de elementos por valores, se almacenan las selecciones correspondientes a cada UH para un manejo facilitado de la asignación del resto de parámetros hidráulicos. Finalmente, usando las selecciones almacenadas se asignaron los valores de conductividad hidráulica y almacenamiento correspondientes a cada UH.

FEFLOW también permite variar las conductividades hidráulicas durante la simulación, y al igual que en GV, la incorporación de una ZOR debe ser ingresada de forma manual, tanto en el espacio como en el tiempo.

## MINEDW

En este caso, se cargaron directamente los archivos *.dxf* exportados desde Leapfrog, y se asignaron los elementos a las UH correspondientes, previamente definidas. El cambio de los valores de cada parámetro se realiza directamente en el software.

Este programa posee un menú específico para la incorporación de la ZOR alrededor del rajo debido a la remoción de material. Varía automáticamente la conductividad hidráulica y delimita la ZOR en torno al rajo, según los parámetros ingresados y los períodos indicados.

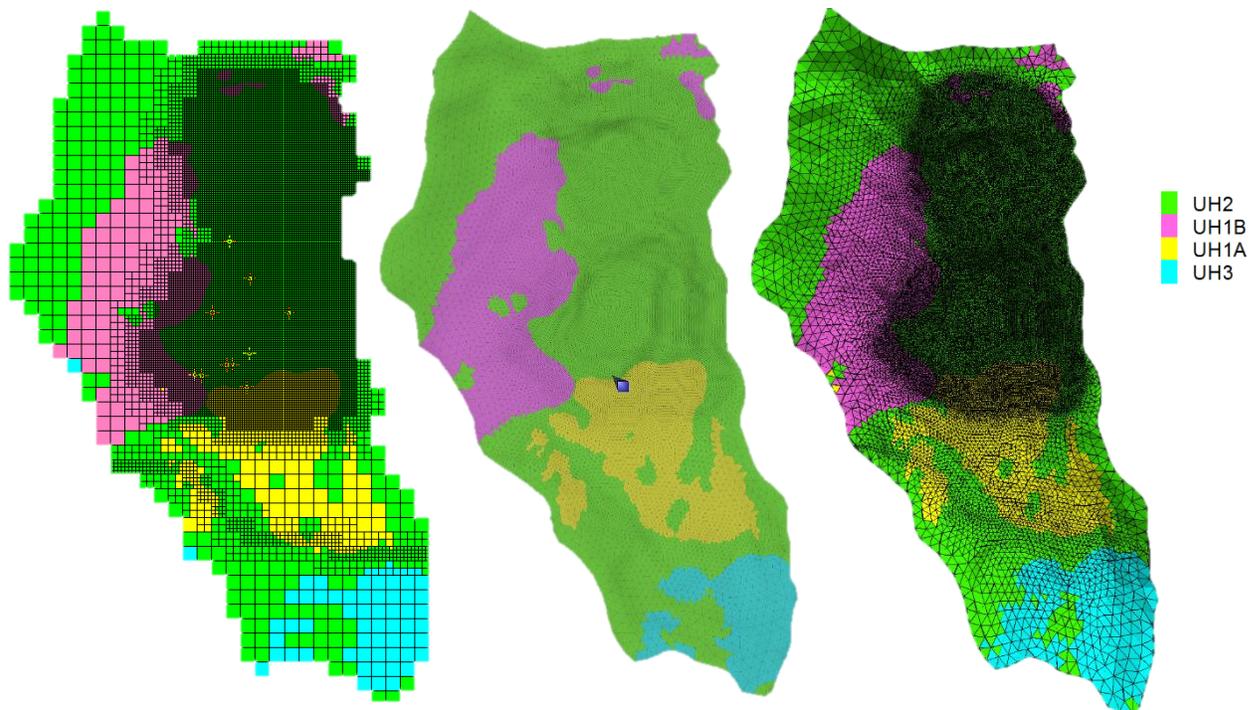


Figura 4.8: Distribución de UH en los modelos. De izquierda a derecha: GV, FEFLOW y MINEDW

### 4.4.4 Condiciones de borde

Se han implementado como condición de borde distintos elementos del modelo conceptual. Entre ellos se encuentran el límite suroeste del modelo (o divisoria interna), la salida de agua subterránea mediante los *pit lakes*, los pozos de bombeo, el túnel Los Sulfatos y por último la topografía. Cabe destacar que en régimen estacionario únicamente se encuentran activas las condiciones de los *pit lakes* y el límite suroeste.

Una condición de primer tipo o Dirichlet especifica un valor para una variable primaria en un nodo o celda, en este caso un nivel hidráulico (Ec. 3), ya sea constante o variable en el tiempo. La entrada y salida de un flujo de agua del modelo de acuerdo a dicha condición, es calculada en la simulación resultante.

$$H = h \text{ (Ec. 3)}$$

Donde H = Nivel especificado [L]

h = Nivel simulado [L]

La condición de segundo tipo o tipo Neumann describe un flujo de agua que entra o sale del modelo, en un caudal específico, en cierto sector. La condición de “No flujo” constituye una condición de segundo tipo, donde no ingresa flujo a la celda/nodo.

Una condición de borde tipo mixta (o Cauchy), corresponde a una donde un flujo se extrae o ingresa al modelo de acuerdo a si el nivel simulado está sobre o bajo un nivel especificado, respectivamente. En este sentido, resulta necesario detallar la expresión (Ec. 4) mediante la cual se computa el caudal el que entra o sale del modelo en una condición de borde tipo mixta.

$$Q = C(H - h) \quad (\text{Ec.4})$$

Donde Q = Flujo entrante o saliente de modelo [L/T<sup>3</sup>]

C = Conductancia [L<sup>2</sup>/T]

H = Nivel especificado [L]

h = Nivel simulado [L]

Por su parte, la conductancia es un coeficiente que es calculado usando la Ec. 5, y que depende principalmente de parámetros del modelo:

$$C = K * \frac{A}{B} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde K = Conductividad hidráulica del material [L/T]

A = Área de la celda/elemento [L<sup>2</sup>]

B = Ancho o espesor de la celda/elemento [L]

## GV

El límite suroeste, se incorporó como una condición de borde tipo nivel constante (CHB), que aporta agua si el nivel piezométrico se encuentra bajo la cota de nivel especificada y saca agua si lo sobrepasa. La cota de nivel asignada a la divisoria fue de 3325 m, con base en la estimación piezométrica más antigua disponible (Figura 2.23).

La salida de agua por los *pit lakes*, por el Túnel los Sulfatos y la topografía se implementaron como condición de dren (*drain*), que corresponde a una condición tipo mixta. La condición tipo dren es propia de GV, y posee la particularidad que saca agua si el nivel freático supera la cota de nivel asignada, pero no aporta agua si el nivel está bajo ella.

En el caso de los *pit lakes*, se delimitó un polígono basado en la observación de imágenes satelitales. Este archivo *.shp* fue importado a GV para asignar las celdas correspondientes de la capa 1. Estas celdas se exportaron como archivo *.csv* para asignar como cota de nivel a cada una el valor de la topografía correspondiente manualmente. Hecho esto, se importó como archivo de puntos la información de los *pit lakes* a GV. Para efectos de este trabajo la conductancia (C), se calcula como el producto de la conductividad hidráulica de UH<sub>2</sub> (K<sub>UH2</sub>) implementada en el modelo, por el área de la celda, dividido en el espesor de la primera capa.

Para implementar el túnel en GV, se digitalizó una polilínea en Leapfrog según la geometría y elevación del túnel Los Sulfatos. Esta polilínea fue exportada desde Leapfrog como archivo *.csv*, y se le asignó como cota de nivel la elevación de cada vértice, para posteriormente ingresarla en GV. Cabe destacar que esta característica solo se encuentra activa en el modelo transiente, desde

febrero del 2010, por lo que estas celdas en los períodos anteriores tienen asignada una cota alta, para asegurar que no extraigan agua.

Respecto de la topografía, se utilizó inicialmente la topografía del año 2005 y posteriormente la de los años 2008, 2011, 2014 y 2017. Cada topografía se asume vigente por los 3 años que la siguen. Los datos se obtuvieron de los DEM gratuitos de EarthData. Para su implementación en el tiempo, en primer lugar, se exportaron las coordenadas de las celdas de la capa 1 (coordenadas que se repiten en las capas inferiores) del modelo de GV, para ser importadas como puntos en Leapfrog, donde mediante la herramienta *Set Elevation* se asigna una nueva elevación a cada celda según su ubicación en la topografía que corresponde. Tras realizar esto, se exportó un archivo *.csv* desde Leapfrog con las elevaciones de cada celda para cada año. Con esto, se obtuvieron las celdas afectadas por la excavación en cada etapa. Una vez que se identificaron las celdas involucradas en cada capa, se les asigna manualmente un valor alto de cota mientras no estén activas, para asegurar que no saquen agua, y se les deja la cota correspondiente a la topografía del período representado cuando la excavación las alcanza. Esta característica también se usa solo en el modelo transiente, ya que es aquí donde la excavación avanza. Se debe especificar la cota de cada celda, indicando el período de inicio y de fin de la condición.

Finalmente, para incluir en el modelo los pozos de bombeo, se utilizó la condición de borde *Well* de GV. Esta condición extrae agua del modelo según un caudal determinado para cada período modelado. Para la implementación de los pozos, se ingresa para cada uno un archivo que contiene sus coordenadas, su cota, el caudal que extraen y el período de inicio y fin de actividad. De esta manera, para los primeros pasos de tiempo, previos a mayo de 2015 el caudal bombeado es 0 [m<sup>3</sup>/d], y para los siguientes se especifica un caudal igual a los datos registrados. Como ya se mencionó, esta condición solo se considera en el régimen transiente.

## **FEFLOW**

Para FEFLOW, el límite suroeste se incorporó como la condición Dirichlet o de primer tipo *Hydraulic-head BC*, en la cual se entrega una cota de nivel freático a cada nodo, y el modelo sacará o meterá agua dependiendo si el nivel simulado es mayor o menor a la cota especificada, respectivamente. La cota de nivel asignada a esta condición es el mismo que en GV, 3.325 [m.s.n.m].

La salida de agua por los *pit lakes*, por el Túnel Los Sulfatos y la topografía se representaron mediante el uso de condiciones de borde Cauchy tipo *fluid-transfer BC*, mediante la cual, al asignar una cota de nivel freático determinada y parámetros de conductancia, el modelo saca o mete agua basado en si el nivel simulado supera o no la cota ingresada. Además, a cada condición se le indicó una restricción de máxima tasa de ingreso de agua al modelo igual a 0 [m<sup>3</sup>/d], con el fin de asegurar que por esos nodos solo salga agua.

Para el caso de los *pit lakes*, se comenzó ingresando un archivo *.shp* para generar la selección de nodos que los representan. Una vez identificados los nodos, se guardó la selección y se exportaron como *.csv*, archivo que es editado para darle a cada nodo la cota de la topografía como cota de nivel piezométrico. Hecho esto, el archivo fue importado a FEFLOW como *.xlsx*, se enlazaron los parámetros a la condición de borde anteriormente señalados y se asignaron los valores a los nodos correspondientes. Posteriormente, a la condición de borde se le ingresó la correspondiente restricción de máximo caudal entrante igual a 0 [m<sup>3</sup>/d]. La conductancia se especificó mediante el parámetro *in/out transfer rate*, y se asignó a los mismos nodos a los que se les asignó la condición tipo Cauchy. Es importante notar que, si esta propiedad no es asignada, el modelo no sacará agua por dichos nodos. Respecto de esta misma condición, cabe destacar que FEFLOW ofrece la

posibilidad de utilizar *Seepage Faces*, que es una condición tipo Dirichlet, que asigna automáticamente el valor de la topografía a los nodos, además de una restricción de ingreso de agua de 0 [m<sup>3</sup>/d]. En este trabajo se han incorporado los *pit lakes* usando el parámetro de conductancia con el fin de hacer los modelos lo más comparables posible.

Para el túnel los Sulfatos, se exportó la polilínea construida en Leapfrog en formato *.dxf*. Se cargó posteriormente en FEFLOW y se seleccionaron por polígono los nodos cercanos a ella para almacenar dicha selección. Se exportaron los nodos seleccionados y se les asignó como cota de nivel la misma de su elevación, para ser ingresados nuevamente a FEFLOW como *Fluid-transfer BC*. Dado que esta condición también varía en el tiempo, para cada nodo se debe crear una serie de tiempo (*time series*) que guarde su valor en distintos pasos de tiempo, y cargarlo al software. Se debe también cargar un archivo *.xlsx* que enlace cada nodo con el ID de su serie de tiempo correspondiente. En este caso también se les debe asignar a los nodos una restricción que anule el ingreso del agua. Además, se les debe asignar un valor de conductancia para permitir que saquen agua del modelo. Esta condición de borde es activa solo en el modelo transiente.

En el caso de la topografía, el procedimiento es relativamente análogo a GV, excepto que en FEFLOW se debe crear una serie de tiempo para cada nodo, ya que cada uno tendrá una variación topográfica diferente en el tiempo. Se comienza por la exportación de los nodos del modelo en un archivo *.csv*, que se importa a Leapfrog para asignarles una elevación según la topografía correspondiente a cada año, mediante la herramienta *Set Elevation*. De esta manera, se identifican los nodos involucrados en cada capa en el cambio de topografía. Hecho esto, se exporta el archivo *.csv* desde Leapfrog y se construye en un archivo la variación topográfica en el tiempo para cada nodo (*time series*), considerando que cada elevación es constante por los siguientes tres años. Posteriormente, se importaron las series de tiempo con un ID debidamente asignado en un archivo *.pow* al software, para además importar un archivo *.xlsx* que contenga el número de cada nodo con el ID de la serie de tiempo que describe su cambio en el tiempo, con el fin de enlazarlos mediante *Parameter Association*. Por último, a todos los nodos involucrados en el cambio topográfico se les debe asignar una restricción de tasa máxima 0 [m<sup>3</sup>/d]. Condición activa solo en modelo transiente.

Para los pozos de bombeo, se utiliza la opción *Multilayer Well*. Se comienza cargando un archivo *.shp* que contiene la ubicación, cota superior, cota inferior, radio, nombre de cada pozo e ID de cada serie de tiempo asociado a cada uno. Se debe, por lo tanto, cargar también las series de tiempo que describan el cambio en los caudales de bombeo de cada pozo. Finalmente, se asocia en *Parameter Association* cada columna del archivo *.shp* con las opciones contenidas en *Multilayer Well* según corresponda, y la tasa o caudal de bombeo la con serie de tiempo asociada. Esta condición también es activa solo en el modelo transiente, desde mayo de 2015.

## **MINEDW**

MINEDW entiende las condiciones de borde como grupos de nodos que identifica por nombre y tipo (dren, nivel fijo). En este caso, el límite suroeste fue implementado como una condición de nivel constante, en los nodos ubicados en esta zona. La cota asignada nuevamente fue 3325 [m.s.n.m]. La selección se hizo mediante el uso del archivo *.shp* de una polilínea que representaba el borde suroeste

Por su parte, los *pit lakes* se asignaron como condición de dren, mediante la selección de nodos basada en la importación de un archivo *.shp* que los delimita. El programa asigna por defecto a estos nodos el valor de la topografía.

Para el túnel, se creó nuevo grupo de condiciones de borde tipo dren. Se carga el archivo *.dxf* en MINEDW y se seleccionó manualmente por capa los nodos que representan el túnel, ya que el programa no los detecta automáticamente, para asignarlos a la condición de borde previamente determinada. Esta condición por defecto otorga como cota de nivel la elevación de cada nodo. Posteriormente, por cada nodo se configuró una serie de tiempo, indicando la fecha en que comienza a estar activa la condición. Condición tipo transiente.

Este software posee un menú específico para el cambio de la topografía (*Open Pit*), que entiende como la incorporación de un plan minero, que también puede crearse en el software. En dicho plan minero pueden agregarse las topografías directamente como archivo de puntos (*.csv*, *.dat*, *.txt*), y la delimitación de la zona del rajo. Lo anterior, permite además indicarle al software especificaciones para la interpolación de la topografía, que solo considere que la topografía disminuye y las fechas asociadas a cada una. El menú *Open Pit*, permite además especificar parámetros para incluir al modelo una zona de relajación (ZOR) debido a la remoción de material. En él también es posible configurar escenarios post minería referentes a la formación de un *pit lake* y el relleno de la mina. Ninguna de estas tres condiciones es implementada en este modelo.

Para los pozos de bombeo, se carga en el menú *Pumping Well* un archivo de puntos que contiene las coordenadas, el nombre, la altura superior e inferior de los pozos de bombeo. Luego, para cada uno se configura la serie de tiempo que contiene la información de cambio del caudal de bombeo en el tiempo. Esta serie puede ser importada al programa o ingresada directamente en él.

#### 4.4.5 Recargas

En los tres programas se designan 5 zonas de recarga, correspondientes al Glaciar La Perla, Glaciar Infiernillo, precipitación, Embalse Los Bronces y permafrost (zona de recarga nula), como muestra la Figura 4.9.

La Tabla 4.1 muestra las áreas de cada zona de recarga, además de los valores de recarga obtenidos para ellas de AMTC (2019) para el período del modelo estacionario.

Tabla 4.1: Recargas y áreas asociadas a cada zona. Fuente: AMTC (2019).

| Zona                | Área [m <sup>2</sup> ] | Recarga [m <sup>3</sup> /d] |
|---------------------|------------------------|-----------------------------|
| Glaciar La Perla    | 882206,05              | 75,17                       |
| Glaciar Infiernillo | 2477160,96             | 458,78                      |
| Precipitación       | 7586676,76             | 2156,54                     |
| Embalse Los Bronces | 128085,56              | 1728                        |
| Zona Permafrost     | 764936,42              | 0                           |

#### GV

Para sectorizar las recargas en GV, se cargaron archivos *.shp* que delimitan las zonas correspondientes, con lo cual se pueden seleccionar y asignar en la primera capa del modelo las celdas asociadas a cada zona de recarga, previamente definidas. Hecho lo anterior, en el menú de recargas en propiedades se asignó el valor de la recarga en unidades de longitud/tiempo, para el modelo estacionario.

En el caso del modelo transiente, las recargas pueden ingresarse cargando un archivo *.csv* en la opción *Transient Data by Zone* para cada zona designada. En el archivo se especifica el valor de la recarga para cada período.

## FEFLOW

En FEFLOW, las zonas de recarga también se cargaron como archivo *.shp*, enlazando al parámetro *in/outflow on top/bottom* valores diferentes por zona, para posteriormente generar una selección de elementos por valor para almacenar las distintas zonas, y trabajar más fácilmente cambiando los valores según sea necesario.

Para el modelo transiente, las recargas de cada zona se ingresan con una serie tiempo asociada. Luego, a cada selección guardada de cada zona de recarga se asigna la serie de tiempo correspondiente, o alternativamente, se enlazan los nodos correspondientes a cada zona con el número de serie de tiempo mediante *Parameter Association*.

## MINEDW

Para el caso de MINEDW, también se ingresaron archivos *.shp* para generar la selección de elementos con el fin de ser asignados a una zona de recarga. Luego, manualmente se introdujo el valor de la recarga en unidades de longitud/tiempo.

Para el modelo transiente, se ingresan las series de tiempo correspondientes a cada zona de recarga. Esto puede hacerse manualmente o bien importar un archivo que contenga las recargas con su fecha asociada.

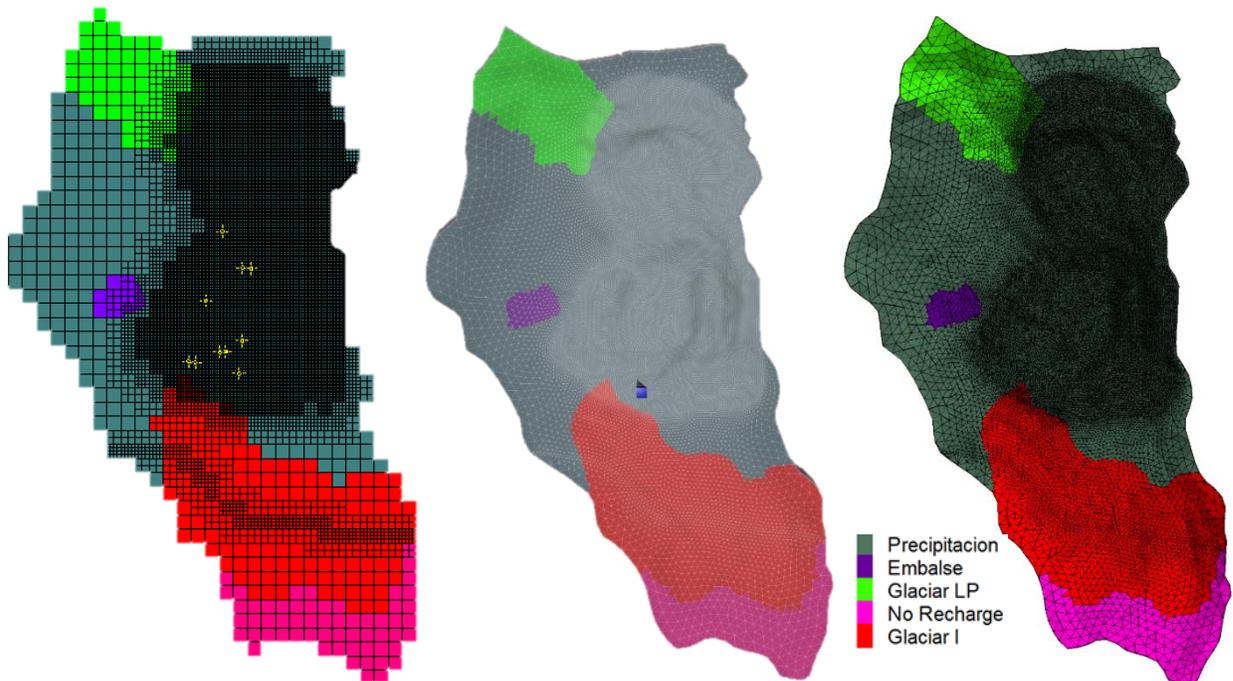


Figura 4.9: Zonas de recarga en los distintos softwares. De izquierda a derecha: GV, FEFLOW y MINEDW

### 4.4.6 Pozos de observación

Para la calibración de los modelos se utilizan niveles históricos medidos en los pozos de observación del sector. Para el modelo estacionario, se cuenta con los datos de niveles medidos en 10 pozos en diciembre de 2005 (Figura 4.10), que se detallan en la Tabla 4.2, y son los utilizados

en la calibración de dicho modelo (Sección 4.5). Para el modelo transiente, solo se describe como fueron cargados los datos en los softwares, ya que este modelo no fue calibrado.

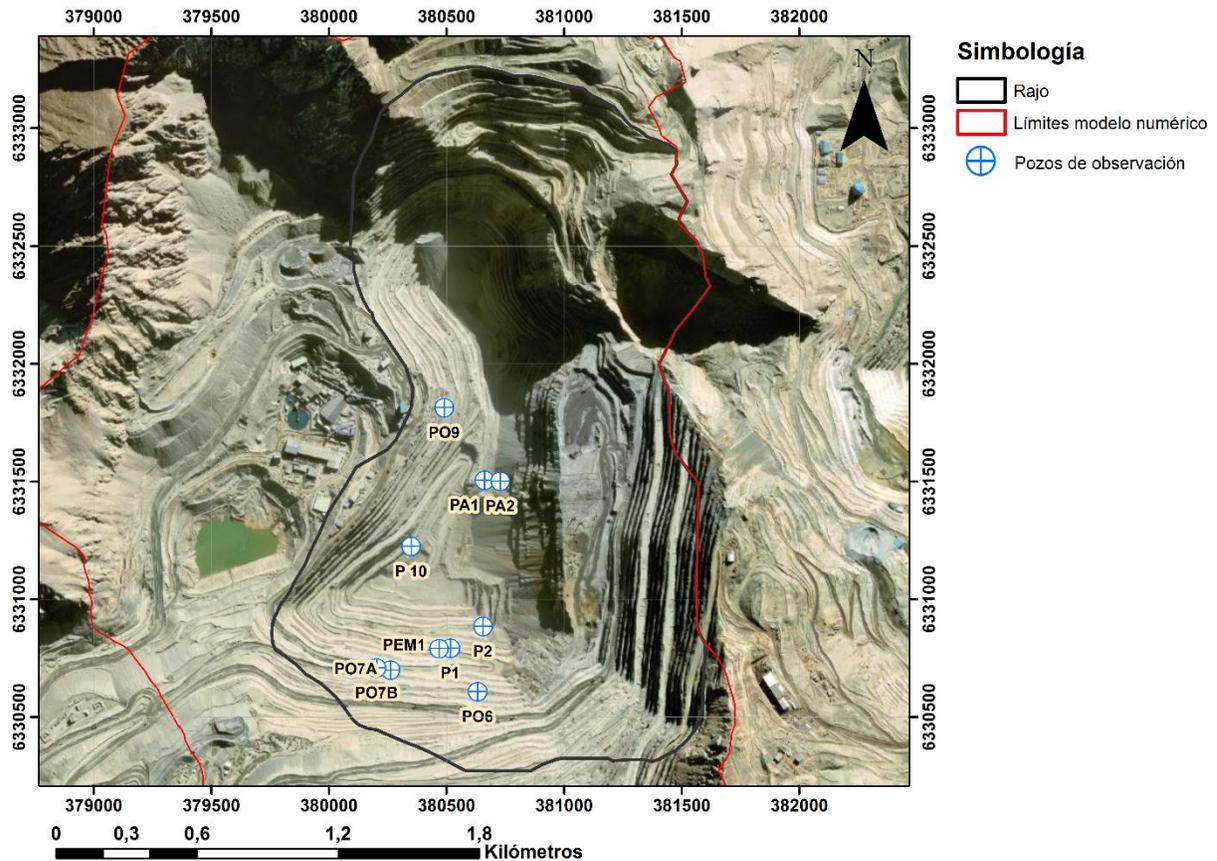


Figura 4.10: Ubicación pozos de observación en zona de estudio

Tabla 4.2: Niveles medidos en pozos de observación

| Pozo             | P10    | P1      | P2      | PA1     | PA2     | PEM1    | PO6     | PO7A   | PO7B    | PO9     | MIN     | MAX    |
|------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Nivel Medido [m] | 3609,9 | 3441,91 | 3448,13 | 3402,03 | 3416,49 | 3440,88 | 3584,46 | 3437,3 | 3437,37 | 3422,82 | 3402,03 | 3609,9 |
| Cota [m.s.n.m]   | 3622   | 3457    | 3457,7  | 3473,2  | 3486,1  | 3456,3  | 3607    | 3502   | 3700,3  | 3517    | -       | -      |

## GV

Los pozos de observación para el modelo estacionario fueron cargados en el menú *targets* mediante un archivo *.csv* que contiene las coordenadas, elevaciones, y la cota del nivel medido de cada pozo de observación, para un momento determinado en el caso del régimen estacionario.

Para el régimen transiente, por cada pozo se ingresan todas las mediciones que existen. Esto mediante un archivo *.csv* que especifica el pozo, sus coordenadas, elevación y el número de mediciones, seguido de la fecha de la medición y la cota del nivel medido.

## FEFLOW

Para el estacionario, se cargó un archivo *.shp* con las coordenadas, altura superior y altura inferior, nombre, largo y cota de niveles medidos en los pozos. En *Map Panel* se utilizó el menú contextual

*Convert to > Observation Points* y se asignaron las columnas del archivo a las variables correspondientes, con lo que los pozos de observación quedan ingresados en el modelo estacionario.

Para el modelo transiente, al igual que en los pasos anteriores, el archivo debe incluir una columna que contenga la serie de tiempo que describe su evolución en el tiempo, que naturalmente debe cargarse de forma previa.

## **MINEDW**

En este caso se cargaron en el menú *Results > Observations* los pozos como un archivo .csv que contiene el nombre del pozo, sus coordenadas, sus cotas inferior y superior. Cabe destacar que MINEDW solo ofrece la posibilidad de cargar la ubicación de los pozos de observación para luego entregar la cota del nivel simulado en cada uno de ellos, pero no acepta un valor medido en una fecha determinada en cada uno para hacer una comparativa del postproceso.

### **4.4.7 Régimen temporal**

#### *Régimen estacionario*

Este régimen corresponde a una fecha específica, donde se intenta simular el sistema en equilibrio, con entradas igual a salidas, y con variación de almacenamiento despreciable. Representa un balance hidrogeológico promedio de largo plazo. La fecha escogida es diciembre del 2005, dada la existencia de datos de niveles en pozos ubicados en el rajo. Este modelo es calibrado con las limitaciones propias del acotado número de datos de niveles medidos y su cercana ubicación espacial (Figura 4.10). En cada calibración se priorizó la disminución del error residual (diferencia entre cotas de niveles medidos y simulados). La calibración de este régimen constituye las condiciones iniciales de régimen transiente para algunos softwares.

#### *Régimen transiente*

El régimen transiente del modelo considera desde enero del 2006 a marzo del 2018, por ser el período en que existen datos públicos de niveles medidos. Los modelos se configuraron en pasos de tiempo mensuales (147 en total). Las condiciones de borde y las recargas son variables en el tiempo. Los modelos de este régimen solo fueron construidos y no calibrados, dado el alcance temporal de esta memoria de título.

## **GV**

Para pasar de régimen estacionario a transiente, en el menú *Model > MODFLOW > Packages Options* se desmarca la opción *Steady-State Simulation* cambia la configuración se especifica la cantidad de *time steps* del modelo. Cabe destacar que en este software se utilizan 148 *time steps* dado que GV ofrece la posibilidad de simular el primer *time step* como estacionario. GV no considera fechas para su simulación, solo número de días.

Cada condición de borde (dren, pozos de bombeo) y recarga variable en el tiempo se ingresa al modelo especificando el valor y el período de inicio y fin de su vigencia.

## **FEFLOW**

En el menú *Problem Setting* se debe seleccionar *Transient* en *Problem Class* y posteriormente ir al nuevo menú disponible *Simulation - Time Control*, donde se selecciona la opción *Varying time steps*, ya que cada mes tiene una duración diferente. En este caso solo se usan 147 pasos de tiempo, ya que son todos de régimen transiente, los que se ingresan al programa mediante un archivo .pow

que contiene, en cada fila, el número de día en que comienza de cada paso. FEFLOW no considera fechas para su simulación, solo número de días.

Cabe destacar el hecho que se debe crear una serie de tiempo para cada nodo/grupo de nodos que presenta una variación de sus valores en el tiempo, ya sea en sus propiedades o condiciones de borde.

## **MINEDW**

La configuración del modelo transiente se realiza en el menú *Project > Project Properties*, especificando el tipo de simulación. Posteriormente, en el menú *Project > Time Step* se configuran los 147 pasos de tiempo, de duración mensual y la fecha de inicio del modelo transiente. MINEDW trabaja con la fecha específica de inicio del modelo y de cada condición variable en el tiempo.

Para cada propiedad/condición de borde variable en el tiempo también se debe definir una serie de tiempo, y su ubicación es distinta que en FEFLOW, ya que se puede realizar o importar directamente en los menús relacionados.

### **4.4.8 Escenarios post-minería**

En este estudio no se incorporaron escenarios post-minería ya que no era el objeto de esta memoria, sin embargo, se considera relevante abordar las capacidades de los programas en este aspecto, ya que es un posible escenario importante en el modelo de un rajo.

## **GV**

GV es capaz de simular el volumen de un *pit lake* luego del cierre de la mina mediante el paquete *Lake* (Council, 1999), pero no es capaz de entregar los flujos provenientes de las unidades hidrogeológicas. Para el relleno de mina no posee un menú específico, pero podría realizarse desactivando la condición de dren de celdas utilizadas para la excavación, cuya implementación nuevamente debe ser manual.

## **FEFLOW**

Por sí solo, FEFLOW no es capaz de simular la formación de un *pit lake*, pero con el uso de algún código externo gratuito como un *plug-in* PitLakeBC (WASY, 2015) o IFMLake (WASY, 2012) proporcionado por DHI puede simularse. Al igual que GV no posee una opción para el relleno de mina, pero puede ser ingresado manualmente.

## **MINEDW**

En el caso de la formación del *pit lake*, MINEDW entrega el área, volumen y flujo de agua desde cada unidad al *pit lake*, que simula por medio de las opciones entregadas en su menú para esto. Respecto al relleno de mina, MINEDW posee un menú para la simulación de este en un paso de tiempo.

### **4.5 Calibración modelo estacionario**

La calibración es un proceso que consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo dentro de límites realistas, con el objetivo de reproducir las variables observadas (SEIA, 2012), que en este caso corresponden a niveles piezométricos. Su propósito es que el modelo constituya una buena representación del sistema físico de interés (Barnett y otros, 2012). En otras palabras, una calibración resuelve un problema de manera inversa, ajustando los valores desconocidos de los parámetros hasta que la solución calza con los valores conocidos de niveles

(Middlemis, 2000). De lo anterior, se deduce que se requiere un conjunto de datos históricos u observaciones que registran como el agua subterránea se comportó en el pasado.

Un desafío de la calibración de modelos es el problema de la no unicidad, que se refiere a la posibilidad de que múltiples combinaciones de parámetros generen un buen ajuste de la simulación a los niveles históricos (Barnett y otros, 2012). Para abordar este problema, se recomienda que el modelo sea calibrado considerando períodos de distintas condiciones hidrológicas, y que la conductividad hidráulica y otros parámetros sean consistentes con valores medidos (Middlemis, 2000).

Luego de repetir simulaciones del pasado numerosas veces, es posible acercarse a una buena estimación de los parámetros hidráulicos, es decir, calibrar el modelo. Cuando esta estimación de parámetros se combina con parámetros que describen forzantes del sistema en el futuro, el modelo es capaz de predecir el comportamiento del sistema en el futuro. En otras palabras, un modelo del pasado se calibra con el fin de dar confianza a un modelo del futuro (Barnett y otros, 2012). No obstante, las predicciones de la simulación tienen una incertidumbre asociada que describe la calidad de estas.

Es importante definir desde el principio como se medirá la bondad de ajuste, aunque no siempre es necesario definir un objetivo para ella, ya que esto dependerá de si la información y cantidad de datos disponibles son suficientes para asegurar un buen ajuste entre el modelo y las mediciones. Las opciones disponibles para medir la bondad de ajuste dependen tanto del método mediante el cual se llevará a cabo la calibración como de la finalidad del modelo: predicción, carácter interpretativo, gestión y planificación, etc.

En el caso de un modelo predictivo, lograr un valor específico de bondad de ajuste puede o no ser una manera de incrementar la confianza en las predicciones. Esto, debido a que, los parámetros pueden tener un gran impacto en el modelo durante período de calibración, pero menor impacto en las predicciones. De acuerdo con esto, es posible que la mejor calibración de un modelo sea un conjunto de estimaciones de parámetros de los que resulte una medida de bondad de ajuste mayor que el mínimo posible (Barnett y otros, 2012).

No existe una metodología universal para la calibración de un modelo, dado que la alta complejidad propia de un sistema hidrogeológico obliga a analizar cada problema de forma particular, dejando gran parte del trabajo a la experiencia a quien modela. No obstante, se reconocen dos enfoques de calibración: la calibración manual y la calibración automática (SEIA, 2012). El primer enfoque, también llamado prueba y error, consiste en asignar a cada parámetro seleccionado para la calibración un rango de variación y un valor inicial. Cuando el modelo cuenta con la información de entrada definida (condiciones de borde, recargas y valores iniciales de parámetros) y correctamente ingresada, se ejecuta y los resultados que entrega se comparan cualitativa y/o cuantitativamente con los valores observados, para posteriormente volver a correr el modelo variando uno, alguno o todos los parámetros. Este proceso se repite de manera invariable hasta lograr una buena correspondencia entre los valores simulados y los observados, cumpliendo con los criterios de aceptación previamente definidos (SEIA, 2012). Por su parte, una calibración automática es realizada en gran parte por un software aplicando una metodología matemática rigurosa que busca un conjunto de parámetros del modelo óptimo, según una función objetivo a optimizar. Lo anterior, requiere además que quien modela comprenda claramente lo que el software hace, para obtener resultados significativos (Barnett y otros, 2012).

Dado que la calibración manual sigue siendo la más utilizada (SEIA, 2012), es la que se ocupó en este trabajo. El éxito de la calibración de un modelo debe ser evaluada tanto cualitativa como

cuantitativamente. De forma cualitativa, la evaluación considera la comparación del sentido de flujo del agua subterránea del modelo con el modelo conceptual considerado, del cual se adoptan rangos de valores medidos las propiedades del acuífero modelado. Los métodos cuantitativos de comparación de niveles simulados y medidos comúnmente utilizados son gráficos de dispersión e indicadores estadísticos del error residual (diferencia entre cotas de niveles medidos y simulados). Además, incluye comparación de los componentes simulados y estimados o medidos del balance hídrico del modelo, y el error de cierre de este. Idealmente, los datos caerán en una línea de pendiente 1 en el gráfico de dispersión, mientras que la diferencia entre valores observados y simulados será la mínima posible en los indicadores estadísticos. Para el balance hídrico, se espera que el error sea menor al 1% en el régimen estacionario y al final de cada período de stress en el régimen transiente.

Existen distintos estadígrafos basados en el error residual de niveles ( $R_i = z_{hi} - h_i$ ). Los indicadores estadísticos utilizados en este trabajo son los indicados en la Guía Australiana de modelamiento de agua subterránea (Barnett y otros, 2012):

**RMS:** Raíz del error cuadrático medio (Ec. 6). Este error cuantifica cuan distinto es un conjunto de valores de otro. Cuando más pequeño es el RMS, más cercanos son los valores simulados y observados. Es una medida absoluta que depende del problema, ya que su valor se ve afectado por el rango de valores medidos.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(z_{hi} - h_i)]^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde  $z_{hi}$  son medidas de cotas de niveles  $h_i$  en  $n$  lugares y tiempos.

**SRMS:** Raíz del error cuadrático medio normalizado (Ec. 7). Corresponde el RMS dividido por el rango de niveles medidos expresado como porcentaje. Dependiendo del grado de confianza de las mediciones, pueden ser ponderadas por un peso entre 0 y 1. Se espera que el valor del SRMS sea bajo (entre 5 y 10 %, o algún otro acordado), lo que indica que la proporción entre el error y el rango de medición de niveles es pequeña, y, por tanto, los errores son solo una pequeña parte de la respuesta general del modelo (Middlemis, 2000).

$$SRMS = \frac{100}{\Delta H} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i [(z_{hi} - h_i)]^2} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde  $W_i$  son pesos entre 0 y 1, y  $\Delta H$  es el rango de medición de niveles en el dominio del modelo.

**MSR:** La suma promedio de residuales (Ec. 8). Usa valores absolutos de errores y a veces se prefiere porque otorga menos peso en las mediciones que parecen ser aisladas. Es independiente del tamaño de la muestra, pero depende del rango de los valores medidos.

$$MSR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i |z_{hi} - h_i| \quad (\text{Ec. 8})$$

Cuando todos los pesos son 1, el MSR puede visualizarse como el promedio de todas las desviaciones verticales entre los puntos en un gráfico de dispersión y la línea 1:1. Este error corresponde al MAE indicado en SEIA (2012). En este trabajo no se considera el MAE ya que hay pozos que se consideran con un peso menor a 1.

**SMSR:** La suma promedio de residuales normalizada (Ec. 9). Es el MSR normalizado por el rango de medidas y expresado como porcentaje. La bibliografía no especifica un valor esperado para este estadístico, pero se extrapola el rango entre 5 y 10 % del SRMS.

$$SMSR = \frac{100}{\Delta H} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i |z_{hi} - h_i| \quad (\text{Ec. 9})$$

Cada modelo fue calibrado únicamente en el régimen estacionario. Es importante destacar que el acotado número de pozos (10) y su cercana distribución (Figura 4.10), dificultan y sesgan la calibración. Es por esto que a continuación se exponen calibraciones que, si bien no cumplen con los estándares recomendados de los estadígrafos para validar los modelos, son el resultado más cercano a serlo. Asimismo, el objetivo de este trabajo es comparar herramientas de modelación y no validar los modelos según los estándares establecidos ni generar un modelo completamente realista, por lo que se eligieron los resultados que minimizaran el error residual, además de considerar las simplificaciones necesarias.

En cada calibración, los pozos PO6 y P10 fueron ponderados por 0,1, dada una baja fiabilidad de la medición, debido principalmente a que sus valores se escapan del promedio de cotas de nivel del resto de los pozos y su distribución es relativamente cercana a ellos (Figura 4.10). Estos pozos sistemáticamente resultaron tener niveles mucho más bajos que su valor observado. Como criterio para considerar un modelo como calibrado, se tomó la simulación que entregó un MSR con el valor más cercano a 15 [m], con el fin de obtener un error promedio de cotas de nivel menor a la altura aproximada de un banco del rajo. Además, se consideró que el error de cierre del balance de agua fuese  $< 1\%$ .

## GV

En la comparación gráfica entre niveles observados y simulados (Figura 4.11), se puede ver que la mayor parte de los pozos están cercanos a la línea roja o se encuentran a una distancia máxima de 50 [m] aproximadamente, a excepción de los pozos PO6 y P10, que se encuentran bajo la línea roja entre ~100 y 185 [m]. El ajuste final de los parámetros hidráulicos para la calibración de este modelo y sus valores se muestran en la Figura 4.12.

Los niveles simulados, medidos y errores asociados a la calibración de este modelo se detallan en la Tabla 4.3. Aquí se aprecia que los mayores residuales absolutos corresponden a los pozos PO6 y P10 ( $> 100$  [m]), seguidos del pozo PO9 con  $\sim 50$  [m], mientras que todo el resto posee residuales menores a 26 [m]. Se muestra también que SRMS alcanza un valor ligeramente mayor a 10% y SMSR está por debajo de dicho valor. De la misma manera, RMS supera levemente los 20 m, mientras que el MSR se encuentra por debajo de este valor, incluso bajo los 15 [m].

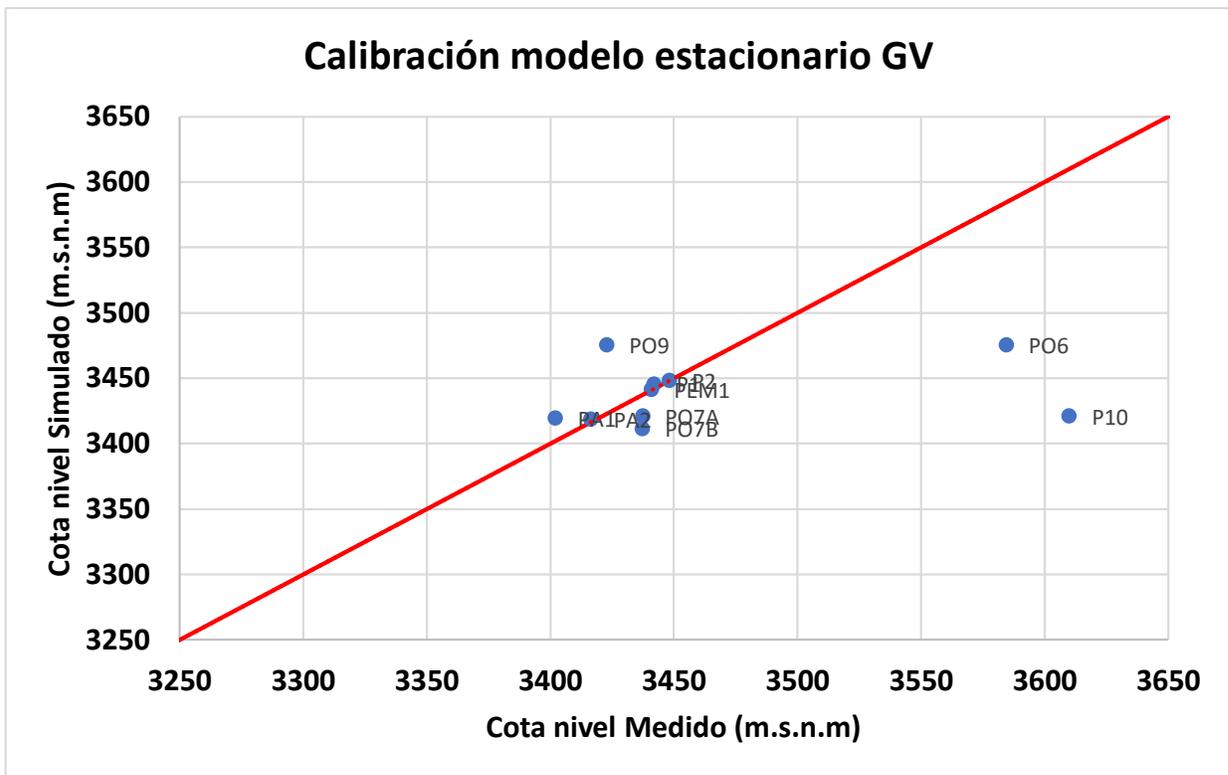


Figura 4.11: Gráfico de dispersión de calibración de niveles en régimen estacionario calibrado en GV

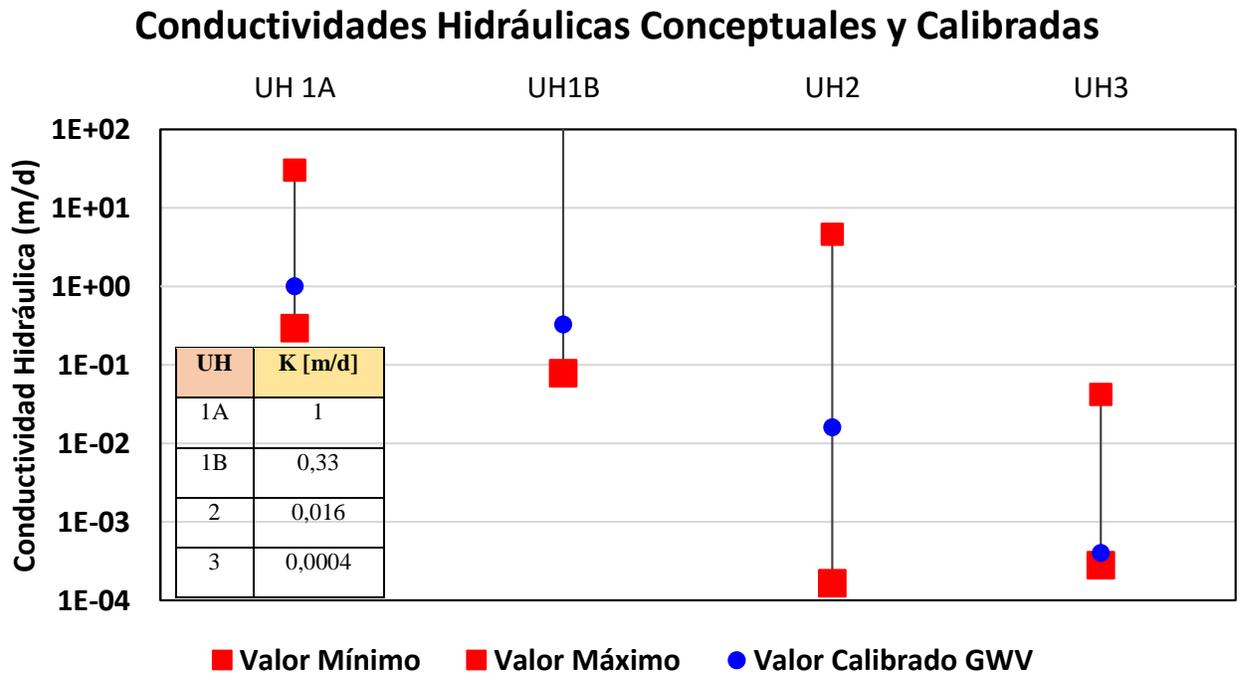


Figura 4.12: Conductividades hidráulicas conceptuales y calibradas GV

Tabla 4.3: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en calibración GV

| Pozo            | Nivel Simulado | Nivel Medido | Residual | Abs (Residual) | Peso | Peso*residual | Abs(peso*residual) |
|-----------------|----------------|--------------|----------|----------------|------|---------------|--------------------|
| PA1             | 3419,69        | 3402,03      | 17,65    | 17,65          | 1,00 | 17,65         | 17,65              |
| PA2             | 3418,76        | 3416,49      | 2,27     | 2,27           | 1,00 | 2,27          | 2,27               |
| P10             | 3421,24        | 3609,90      | -188,66  | 188,66         | 0,10 | -18,87        | 18,87              |
| PO7B            | 3411,50        | 3437,30      | -25,79   | 25,79          | 1,00 | -25,79        | 25,79              |
| PO7A            | 3421,13        | 3437,37      | -16,24   | 16,24          | 1,00 | -16,24        | 16,24              |
| PO9             | 3475,46        | 3422,82      | 52,64    | 52,64          | 1,00 | 52,64         | 52,64              |
| PO6             | 3475,39        | 3584,46      | -109,07  | 109,07         | 0,10 | -10,91        | 10,91              |
| PEM1            | 3441,38        | 3440,88      | 0,50     | 0,50           | 1,00 | 0,50          | 0,50               |
| P1              | 3445,58        | 3441,91      | 3,68     | 3,68           | 1,00 | 3,68          | 3,68               |
| P2              | 3448,54        | 3448,13      | 0,41     | 0,41           | 1,00 | 0,41          | 0,41               |
| <b>Suma</b>     |                |              | -262,61  | 416,92         |      | 5,35          | 148,97             |
| <b>Mínimo</b>   | 3411,50        | 3402,03      | -188,66  |                |      |               |                    |
| <b>Máximo</b>   | 3475,46        | 3609,90      | 52,64    |                |      |               |                    |
| <b>Promedio</b> | 3437,87        | 3464,13      | -26,26   | 41,69          |      |               |                    |
| <b>Mediana</b>  | 3431,31        | 3439,13      | 0,46     | 16,95          |      |               |                    |
| <b>Rango</b>    | 63,96          | 207,87       | 241,30   |                |      |               |                    |
| <b>RMS</b>      | 21,23          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SRMS (%)</b> | 10,21          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>MSR</b>      | 14,90          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SMSR (%)</b> | 7,17           |              |          |                |      |               |                    |

El balance hidrogeológico final entregado por el modelo se encuentra en la Tabla 4.4, y en él es posible ver la relación entre las salidas del modelo, donde la mayor parte del agua sale por la salida natural de la quebrada, superando casi 5 veces la salida de los *pit lakes*.

Tabla 4.4: Balance hidrogeológico calibrado en régimen estacionario GV

| Entradas [l/s]                                      |              | Salidas [l/s]                        |              |
|---|--------------|--------------------------------------|--------------|
| Recarga profunda por precipitación                  | 25,25        | Pit lakes                            | 8,87         |
| Recarga profunda por filtración Embalse Los Bronces | 19,5         | Salida natural Quebrada La Disputada | 42,3         |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo                | 0,9          |                                      |              |
| Recarga profunda Glaciar La Perla                   | 5,51         |                                      |              |
| <b>TOTAL</b>  | <b>51,16</b> | <b>TOTAL</b>                         | <b>51,17</b> |
| <b>Variación almacenamiento</b>                     | 0            |                                      |              |
| <b>Error balance (%)</b>                            | 8,69E-05     |                                      |              |

La Figura 4.13 muestra el resultado final del modelo estacionario calibrado en la primera capa, con los contornos de las cotas de niveles piezométricos y los residuales en cada pozo de observación. En ella se puede ver que las celdas se secan hacia los bordes del modelo, mientras que se inundan en la zona del embalse y del *pit lake* Infiernillo. Lo anterior se entiende como que las celdas no son alcanzadas por el nivel simulado, y que el nivel sobrepasa la cota superior de la celda, respectivamente.

Además de lo anterior, es posible notar que, a grandes rasgos, el agua fluye mayoritariamente hacia el SO, en el sentido de la salida natural de la quebrada. Localmente, el agua también fluye hacia el centro del rajo.

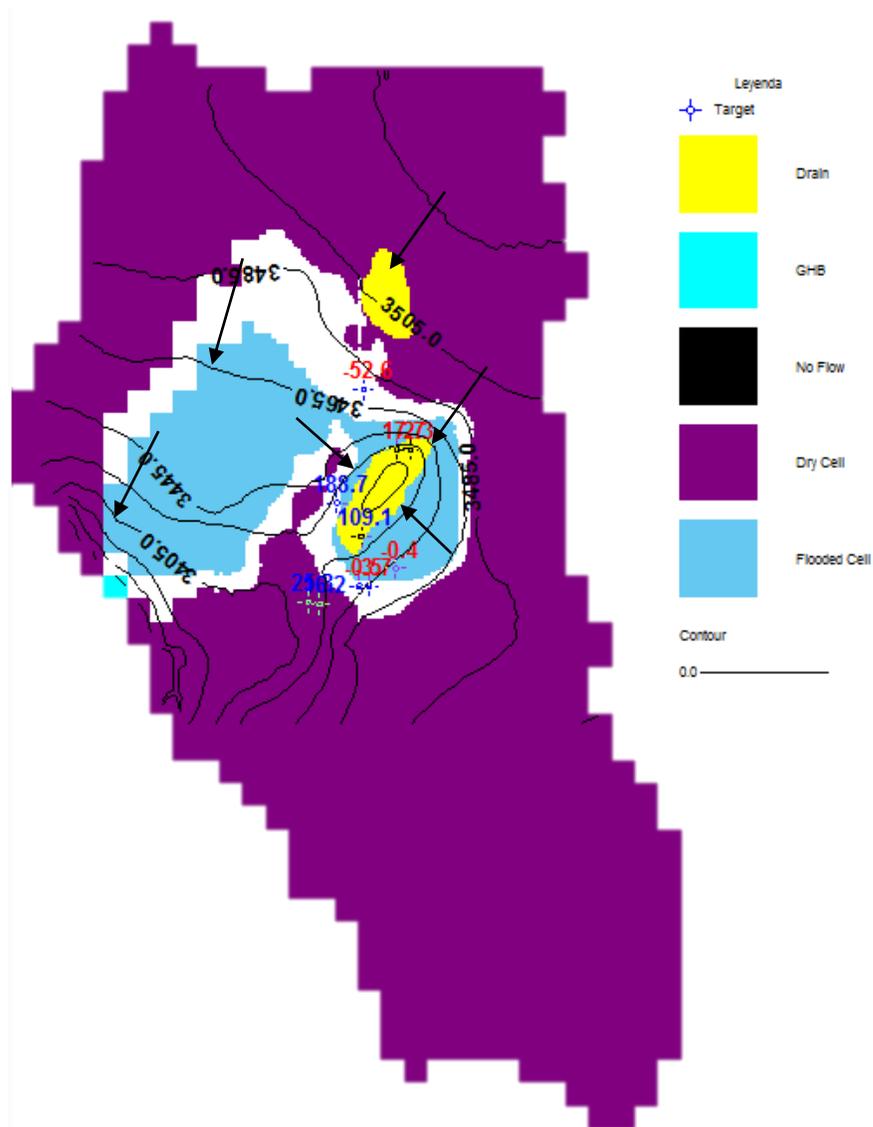


Figura 4.13: Resultado modelo estacionario calibrado GV

Por último, cabe destacar que GV cuenta con PEST, una herramienta de calibración automática y con un análisis de sensibilidad que identifica los parámetros a los que el modelo es más sensible. Sin embargo, esta última herramienta no funciona con las versiones MODFLOW-USG y MODFLOW6.

## FEFLOW

La comparación gráfica entre niveles observados y simulados (Figura 4.14) muestra que la mayor parte de los pozos están cercanos a la línea roja o se encuentran a una distancia máxima de 50 [m] aproximadamente, a excepción de los pozos PO6 y P10, que se encuentran bajo la línea roja entre 100 y 200 [m], aprox. El ajuste final de los parámetros hidráulicos para la calibración de este modelo y sus valores se muestran en la Figura 4.15.

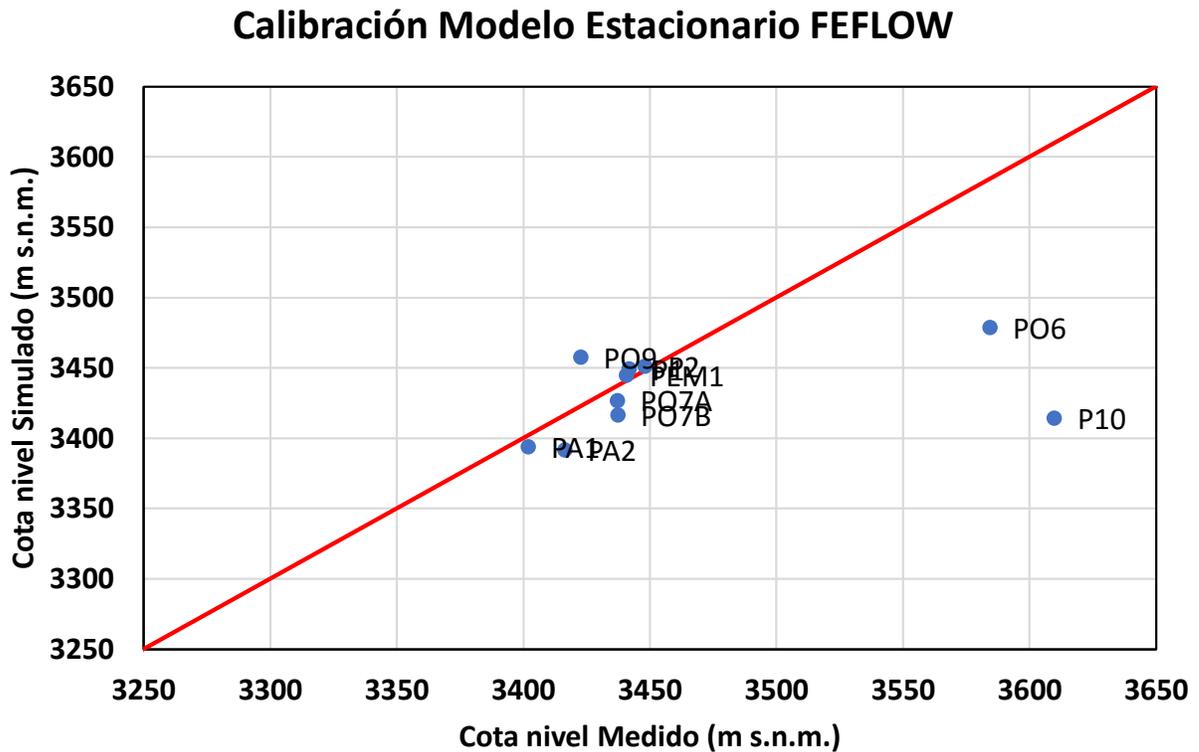


Figura 4.14: Gráfico de dispersión de calibración de niveles en régimen estacionario calibrado en FEFLOW

La Tabla 4.5 muestra los niveles simulados, medidos y errores asociados a la calibración de este modelo. Aquí se aprecia que los mayores residuales corresponden a los pozos PO6 y P10 (> 100 [m]), seguidos del pozo PO9 con ~ 35 [m], mientras que todo el resto posee residuales menores a 25 [m]. Se muestra también que tanto el SRMS como el SMSR alcanza un valor menor a 10%. De la misma manera, el RMS y el MSR se encuentran bajo los 20 [m], incluso el MSR está bajo los 15 [m]. Cabe destacar que para el cálculo de los estadígrafos los pozos P10 y PO6 se han considerado con un peso igual a 0.1, a diferencia del resto de los pozos que tienen peso 1, debido a la poca fiabilidad de estos datos.

## Conductividades Hidráulicas Conceptuales y Calibradas

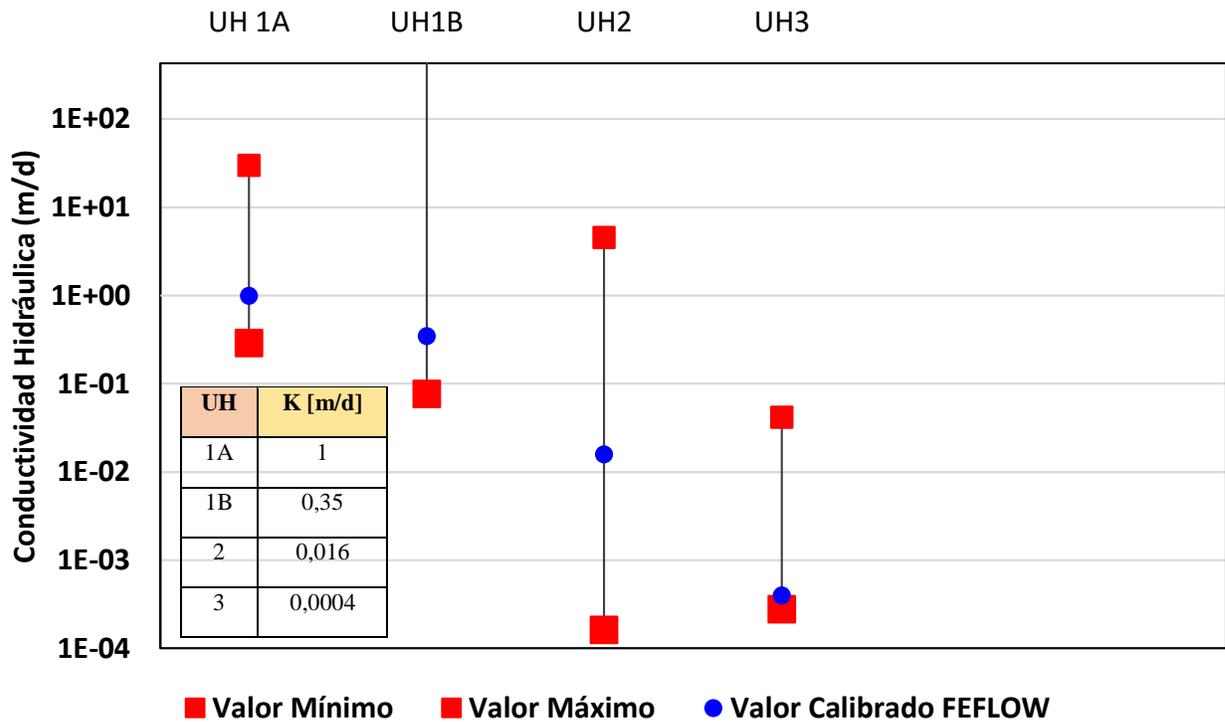


Figura 4.15: Conductividades hidráulicas conceptuales y calibradas FEFLOW

Tabla 4.5: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en calibración FEFLOW

| Pozo            | Nivel Simulado | Nivel Medido | Residual | Abs (Residual) | Peso | Peso*residual | Abs(peso*residual) |
|-----------------|----------------|--------------|----------|----------------|------|---------------|--------------------|
| P10             | 3414,24        | 3609,90      | -195,66  | 195,66         | 0,10 | -19,57        | 19,57              |
| P1              | 3449,23        | 3441,91      | 7,32     | 7,32           | 1,00 | 7,32          | 7,32               |
| P2              | 3451,33        | 3448,13      | 3,20     | 3,20           | 1,00 | 3,20          | 3,20               |
| PA1             | 3393,77        | 3402,03      | -8,27    | 8,27           | 1,00 | -8,27         | 8,27               |
| PA2             | 3391,64        | 3416,49      | -24,84   | 24,84          | 1,00 | -24,84        | 24,84              |
| PEM1            | 3444,83        | 3440,88      | 3,96     | 3,96           | 1,00 | 3,96          | 3,96               |
| PO6             | 3478,67        | 3584,46      | -105,78  | 105,78         | 0,10 | -10,58        | 10,58              |
| PO7A            | 3426,82        | 3437,30      | -10,48   | 10,48          | 1,00 | -10,48        | 10,48              |
| PO7B            | 3416,44        | 3437,37      | -20,93   | 20,93          | 1,00 | -20,93        | 20,93              |
| PO9             | 3457,47        | 3422,82      | 34,66    | 34,66          | 1,00 | 34,66         | 34,66              |
| <b>Suma</b>     |                |              | -316,82  | 415,09         |      | -45,52        | 143,80             |
| <b>Mínimo</b>   | 3391,64        | 3402,03      | -195,66  |                |      |               |                    |
| <b>Máximo</b>   | 3478,67        | 3609,90      | 34,66    |                |      |               |                    |
| <b>Promedio</b> | 3432,45        | 3464,13      | -31,68   | 41,51          |      |               |                    |
| <b>Mediana</b>  | 3435,83        | 3439,13      | -9,37    | 15,70          |      |               |                    |
| <b>Rango</b>    | 87,03          | 207,87       | 230,32   |                |      |               |                    |
| <b>RMS</b>      | 17,35          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SRMS (%)</b> | 8,34           |              |          |                |      |               |                    |
| <b>MSR</b>      | 14,38          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SMSR (%)</b> | 6,92           |              |          |                |      |               |                    |

El balance hidrogeológico final entregado por el modelo se encuentra en la Tabla 4.6, y en él es posible ver la relación entre las salidas del modelo, donde, al igual que en GV la mayor parte del agua sale por la salida natural de la quebrada, siendo casi 4 veces la salida de los *pit lakes*.

Tabla 4.6: Balance hidrogeológico calibrado en régimen estacionario FEFLOW

| Entradas [l/s]                                      |              | Salidas [l/s]                        |              |
|---|--------------|--------------------------------------|--------------|
| Recarga profunda por precipitación                  | 24,9         | Pit lakes                            | 11,49        |
| Recarga profunda por filtración Embalse Los Bronces | 20,1         | Salida natural Quebrada La Disputada | 39,63        |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo                | 5,32         |                                      |              |
| Recarga profunda Glaciar La Perla                   | 0,87         |                                      |              |
| <b>TOTAL</b>  | <b>51,19</b> | <b>TOTAL</b>                         | <b>51,12</b> |
| <b>Variación almacenamiento</b>                     | 0            |                                      |              |
| <b>Error balance (%)</b>                            | 1.41E-01     |                                      |              |

La Figura 4.16 muestra el resultado final del modelo estacionario calibrado en la primera capa del modelo, con los contornos de las cotas de niveles piezométricos y la delimitación del rajo. En este caso no se muestran elementos secos o inundados, ya que FEFLOW usa como límite superior la topografía y se adapta en caso de que los niveles sean menores a ella.

Es posible notar además que, de forma general, el agua fluye mayoritariamente hacia el SO, en el sentido de la salida natural de la quebrada. Localmente, el agua también fluye hacia el centro del rajo.

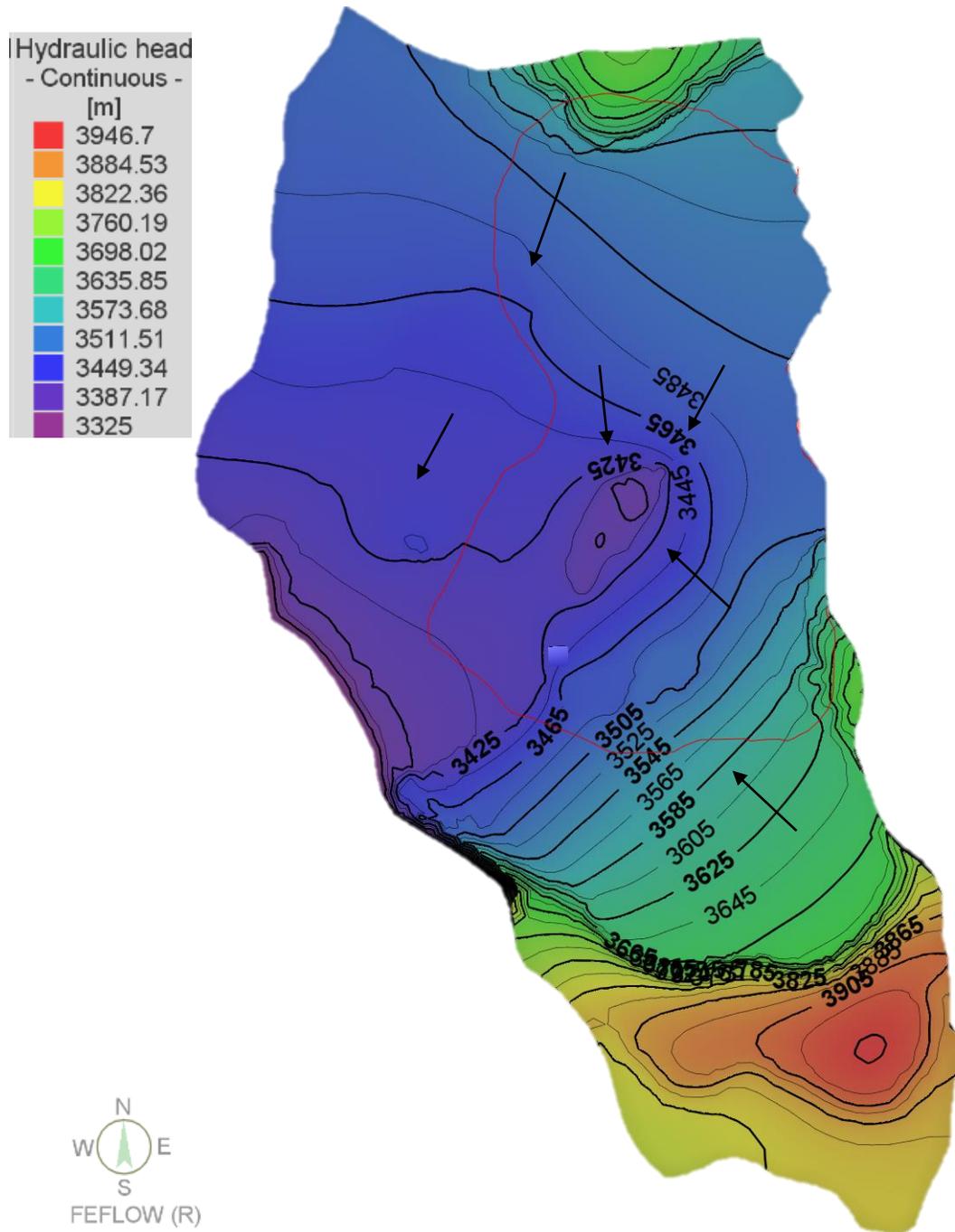


Figura 4.16: Resultado modelo estacionario calibrado FEFLOW

Finalmente, se debe mencionar que FEFLOW cuenta con una herramienta de calibración automática FePEST que además incluye análisis de sensibilidad.

## MINEDW

El gráfico de dispersión que representa la comparación gráfica entre niveles observados y simulados (Figura 4.17) expone que la mayor parte de los pozos están cercanos a la línea roja o se encuentran a una distancia máxima de 50 [m] aproximadamente, a excepción de los pozos PO6 y P10, que se encuentran bajo la línea roja entre 60 y 200 [m], aprox. El ajuste final de los parámetros hidráulicos para la calibración de este modelo y sus valores se muestran en la Figura 4.18.

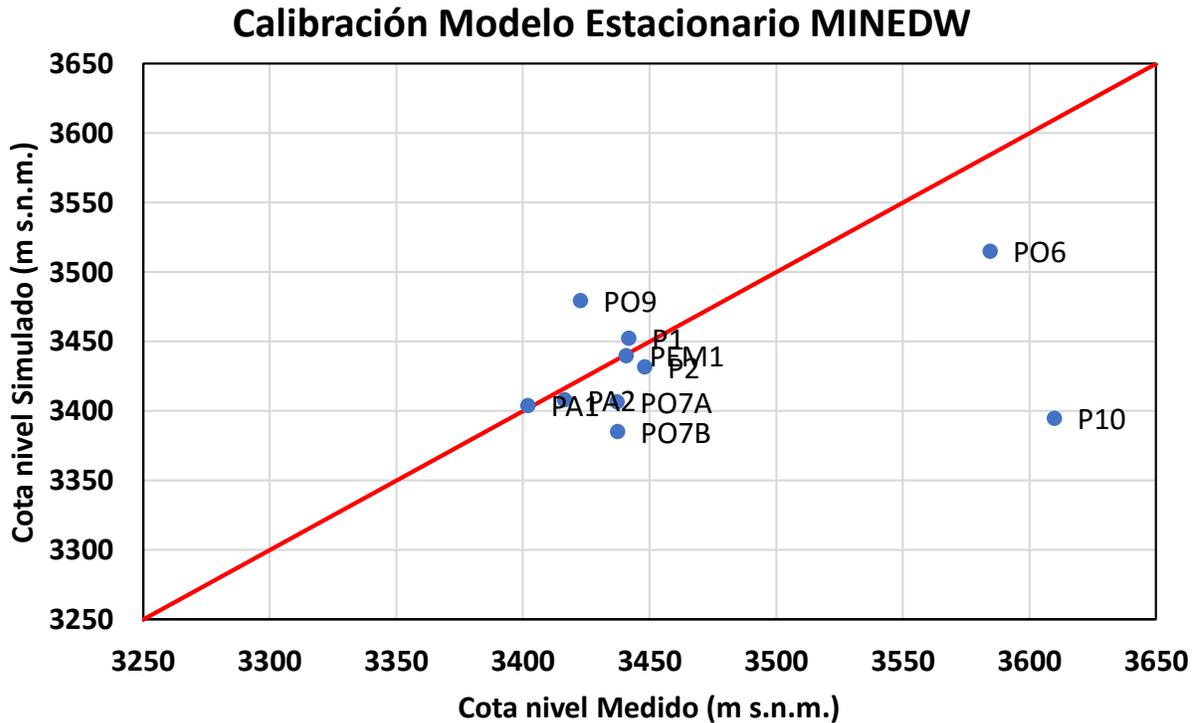


Figura 4.17: Gráfico de dispersión de calibración de niveles en régimen estacionario calibrado en MINEDW

La Tabla 4.7 muestra los niveles simulados, medidos y errores asociados a la calibración de este modelo. Aquí se aprecia que el mayor residual absoluto corresponde al pozo P10 ( $> 200$  [m]), seguidos de los pozos PO6, PO9 y PO7B con residuales que se mueven entre  $\sim 70$  y  $57$  [m], mientras que todo el resto posee residuales menores a  $31$  [m]. Se muestra también que tanto el SRMS como el SMRS alcanzan un valor menor a  $14\%$ , y solo SMSR bajo  $10\%$ . De la misma manera, el RMS y el MSR se encuentran bajo los  $30$  [m], siendo el MSR más bajo, con un valor cercano a  $21$  [m]. Cabe destacar que para el cálculo de los estadígrafos los pozos P10 y PO6 se han considerado con un peso igual a  $0.1$ , a diferencia del resto de los pozos que tienen peso  $1$ , debido a la poca fiabilidad de estos datos.

## Conductividades Hidráulicas Conceptuales y Calibradas

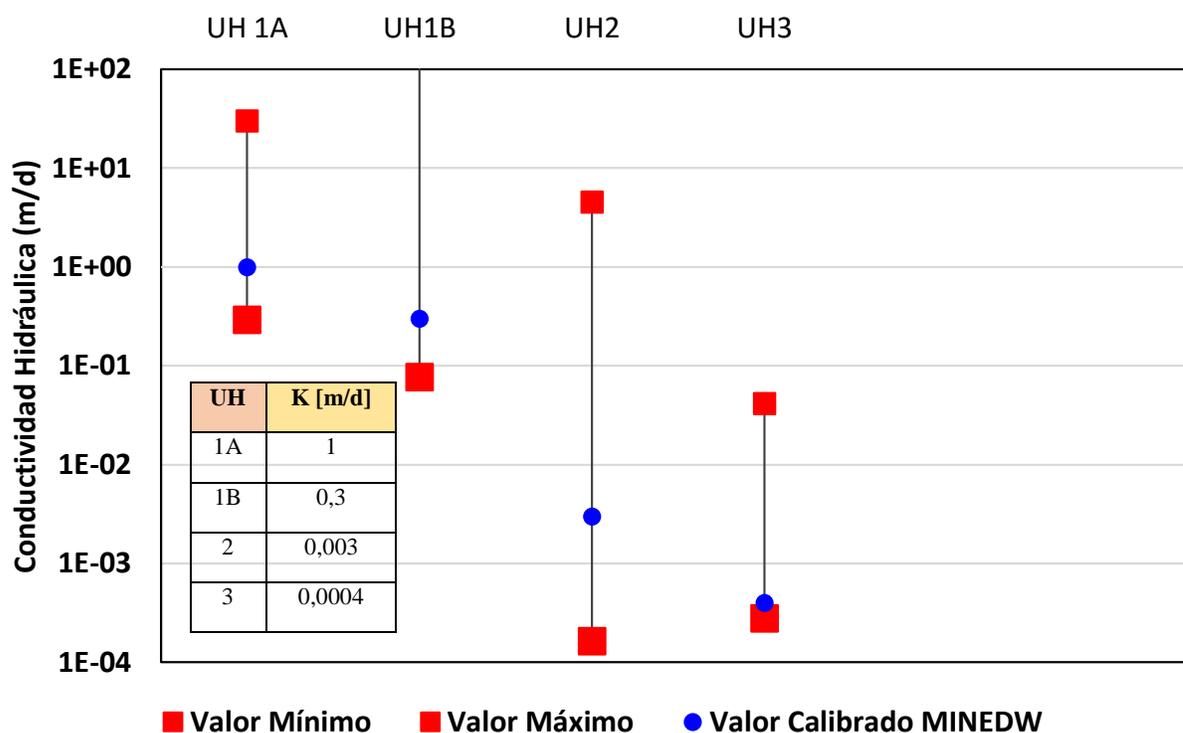


Figura 4.18: Conductividades hidráulicas conceptuales y calibradas MINEDW

Tabla 4.7: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en calibración MINEDW

| Pozo            | Nivel Simulado | Nivel Medido | Residual | Abs (Residual) | Peso | Peso*residual | Abs(peso*residual) |
|-----------------|----------------|--------------|----------|----------------|------|---------------|--------------------|
| P10             | 3394,77        | 3609,90      | -215,13  | 215,13         | 0,10 | -21,51        | 21,51              |
| P1              | 3452,30        | 3441,91      | 10,40    | 10,40          | 1,00 | 10,40         | 10,40              |
| P2              | 3431,68        | 3448,13      | -16,45   | 16,45          | 1,00 | -16,45        | 16,45              |
| PA1             | 3403,98        | 3402,03      | 1,95     | 1,95           | 1,00 | 1,95          | 1,95               |
| PA2             | 3408,26        | 3416,49      | -8,23    | 8,23           | 1,00 | -8,23         | 8,23               |
| PEM1            | 3440,00        | 3440,88      | -0,87    | 0,87           | 1,00 | -0,87         | 0,87               |
| PO6             | 3515,08        | 3584,46      | -69,37   | 69,37          | 0,10 | -6,94         | 6,94               |
| PO7A            | 3406,81        | 3437,30      | -30,49   | 30,49          | 1,00 | -30,49        | 30,49              |
| PO7B            | 3385,20        | 3437,37      | -52,17   | 52,17          | 1,00 | -52,17        | 52,17              |
| PO9             | 3479,73        | 3422,82      | 56,91    | 56,91          | 1,00 | 56,91         | 56,91              |
| <b>Suma</b>     |                |              | -323,47  | 461,98         |      | -67,41        | 205,93             |
| <b>Mínimo</b>   | 3385,20        | 3402,03      | -215,13  |                |      |               |                    |
| <b>Máximo</b>   | 3515,08        | 3609,90      | 56,91    |                |      |               |                    |
| <b>Promedio</b> | 3431,78        | 3464,13      | -32,35   | 46,20          |      |               |                    |
| <b>Mediana</b>  | 3419,97        | 3439,13      | -12,34   | 23,47          |      |               |                    |
| <b>Rango</b>    | 129,88         | 207,87       | 272,05   |                |      |               |                    |
| <b>RMS</b>      | 28,02          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SRMS (%)</b> | 13,48          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>MSR</b>      | 20,59          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SMSR (%)</b> | 9,91           |              |          |                |      |               |                    |

En este caso, ocurre algo distinto con el balance hidrogeológico total. Sucede que, MINEDW no admite todas las recargas ingresadas al modelo, dejando una fracción de ellas para considerar en el balance como entrada al modelo, y otra asociada a escorrentía (*runoff*), como muestra la Tabla 4.8. La existencia de escorrentía se debe a una característica del programa, y repercute en el balance total, ya que al haber menos agua entrando al modelo, disminuyen las salidas, y también los niveles. En este modelo, la escorrentía es aproximadamente el 75% de la recarga, lo que hace incomparable este aspecto con los otros modelos. El balance hidrogeológico final entregado por el modelo, sin considerar la escorrentía, se encuentra en la parte derecha de la Tabla 4.8, y en él es posible ver la relación entre las salidas del modelo, donde, al igual que en los casos anteriores la mayor parte del agua sale por la salida natural de la quebrada, siendo casi 4 veces la salida de los *pit lakes*. Cabe notar que, el error de este balance es del 7%.

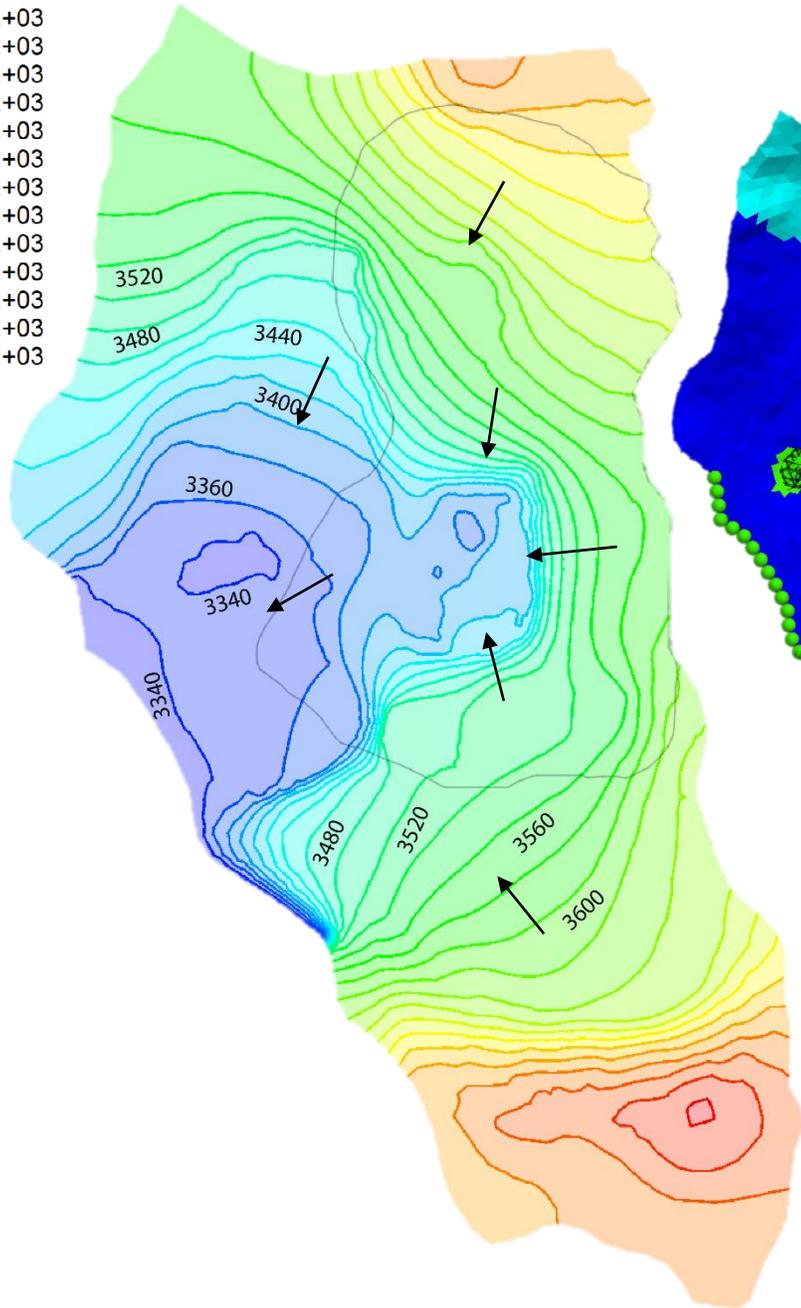
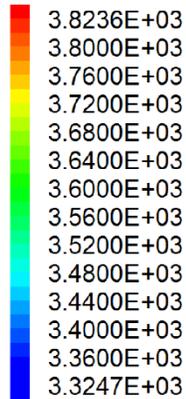
Tabla 4.8: Balances hidrogeológicos calibrados en régimen estacionario MINEDW. A la izquierda con escorrentía, a la derecha sin escorrentía.

| Entradas [l/s]                                      |                    | Salidas [l/s]                        |              | Entradas [l/s]                                      |                    | Salidas [l/s]                        |              |
|---|--------------------|--------------------------------------|--------------|---|--------------------|--------------------------------------|--------------|
| Recarga profunda por precipitación                  | 24,81              | Pit lakes                            | 1,59         | Recarga profunda por precipitación                  |                    | Pit lakes                            | 1,59         |
| Recarga profunda por filtración Embalse Los Bronces | 19,88              | Salida natural Quebrada La Disputada | 9,92         | Recarga profunda por filtración Embalse Los Bronces |                    | Salida natural Quebrada La Disputada | 9,92         |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo                | 5,28               | Escorrentía                          | 38,46        | Recarga profunda Glaciar Infiernillo                |                    |                                      |              |
| Recarga profunda Glaciar La Perla                   | 0,86               |                                      |              | Recarga profunda Glaciar La Perla                   |                    |                                      |              |
| <b>TOTAL</b>  | <b>50,83</b>       | <b>TOTAL</b>                         | <b>49,97</b> | <b>TOTAL</b>  | <b>12,37</b>       | <b>TOTAL</b>                         | <b>11,51</b> |
| <b>Variación almacenamiento</b>                     | <b>-1,4635E-07</b> |                                      |              | <b>Variación almacenamiento</b>                     | <b>-1,4635E-07</b> |                                      |              |
| <b>Error balance (%)</b>                            |                    |                                      |              | <b>Error balance (%)</b>                            | <b>7,00</b>        |                                      |              |

Dadas las diferencias de los modelos, se ha considerado como modelo calibrado la simulación lograda con RMS y MSR más bajos, junto a un error de balance hidrogeológico menor al 10%. La Figura 4.19 muestra el resultado final de los niveles del modelo estacionario calibrado en la primera capa del modelo con los contornos de las cotas de niveles piezométricos, la delimitación del rajo, además de las zonas donde se genera escorrentía (a la derecha) que son principalmente las zonas más profundas del rajo y la zona del embalse. En este caso no se muestran elementos secos o inundados, ya que MINEDW muestra únicamente los niveles de agua subterránea resultantes.

Es posible notar además que, de forma general, el agua fluye mayoritariamente hacia el SO, en el sentido de la salida natural de la quebrada. Localmente, el agua también fluye hacia el centro del rajo (Figura 4.19).

## 2D Water Table Contour



## 2D Recharge Plane

- Precipitacion
- Embalse
- Glaciar LP
- No Recharge
- Glaciar I

## Constant Head/Drain

- Pit lake
- Borde SO

Figura 4.19: Resultado de niveles modelo estacionario calibrado MINEDW (izquierda) y zonas de escorrentía (derecha)

Particularmente en este caso, se realizó un modelo adicional con fines netamente comparativos, con parámetros hidráulicos similares a los de calibración de los modelos en los otros softwares, con valores detallados en la Tabla 4.9, donde se puede ver que la diferencia con el modelo calibrado de MINEDW radica principalmente en el valor de K de la UH2, que es aumentado aproximadamente en un orden de magnitud en este caso.

Tabla 4.9: Parámetros hidráulicos modelo estacionario MINEDW comparativo

| UH | K [m/d] |
|----|---------|
| 1A | 1       |
| 1B | 0,35    |
| 2  | 0,016   |
| 3  | 0,0004  |

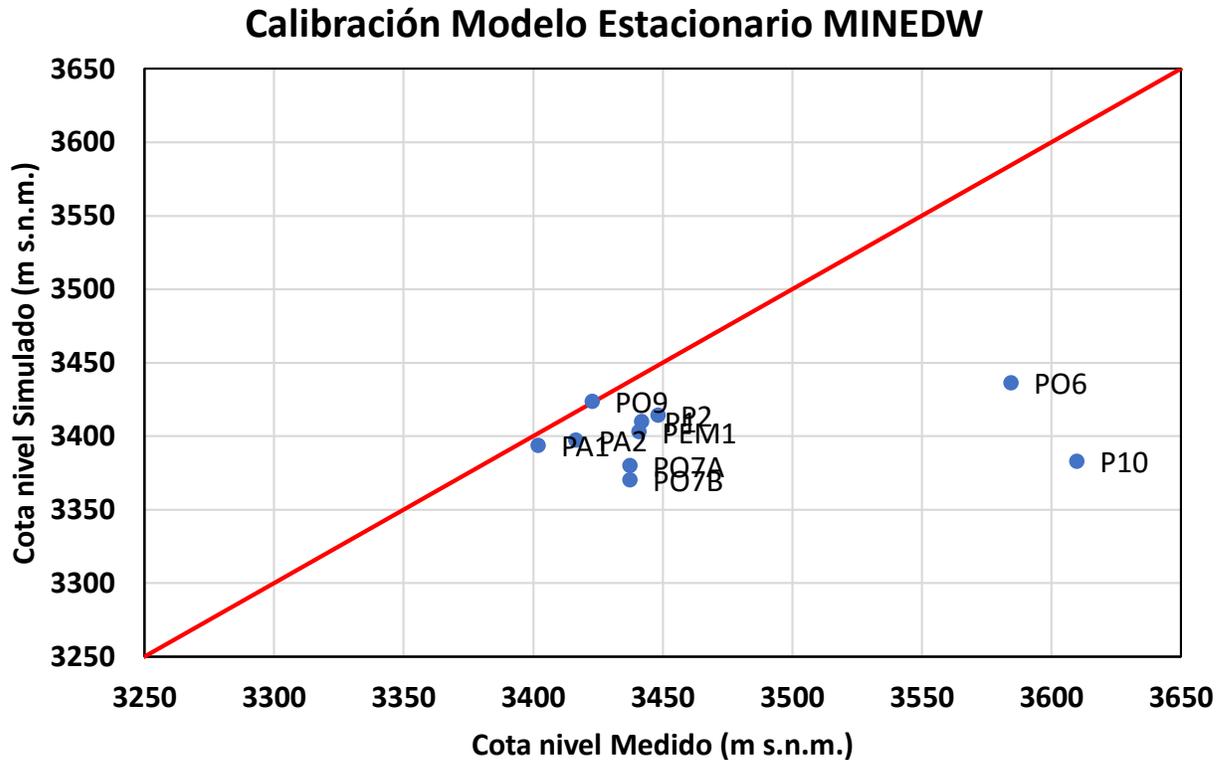


Figura 4.20: Gráfico de dispersión de niveles medidos vs simulados en régimen estacionario en MINEDW

En este caso, es posible apreciar en la Figura 4.20 que los niveles simulados son en general más bajos que los del caso anterior (Figura 4.17), con diferencias que se mueven entre 1 y 70 [m], aproximadamente. Se observa también, en la Tabla 4.10 que todos los pozos muestran niveles simulados menores a los medidos, con residuales absolutos mayores a ~20 [m], a excepción de los pozos PO9 y PA1, cuyos residuales absolutos son menores a 10 [m], e incluso cercano a 0 para PO9. Se muestra también que tanto el SRMS como el SMSR alcanzan un valor superior al 14%. De la misma manera, el RMS y el MSR se encuentran sobre los 29 [m], siendo el RMS el más alto, con un valor cercano a 36 [m]. Cabe destacar que para el cálculo de los estadígrafos los pozos P10 y PO6 se han considerado con un peso igual a 0.1, a diferencia del resto de los pozos que tienen peso 1, debido a la poca fiabilidad de estos datos. Todos los estadígrafos muestran un error mayor a los del modelo calibrado.

Tabla 4.10: Detalle de niveles simulados y estadígrafos en modelo comparativo MINEDW

| Pozo            | Nivel Simulado | Nivel Medido | Residual | Abs (Residual) | Peso | Peso*residual | Abs(peso*residual) |
|-----------------|----------------|--------------|----------|----------------|------|---------------|--------------------|
| P10             | 3382,79        | 3609,90      | -227,11  | 227,11         | 0,10 | -22,71        | 22,71              |
| P1              | 3410,00        | 3441,91      | -31,91   | 31,91          | 1,00 | -31,91        | 31,91              |
| P2              | 3414,17        | 3448,13      | -33,96   | 33,96          | 1,00 | -33,96        | 33,96              |
| PA1             | 3393,53        | 3402,03      | -8,51    | 8,51           | 1,00 | -8,51         | 8,51               |
| PA2             | 3397,04        | 3416,49      | -19,45   | 19,45          | 1,00 | -19,45        | 19,45              |
| PEM1            | 3402,94        | 3440,88      | -37,94   | 37,94          | 1,00 | -37,94        | 37,94              |
| PO6             | 3436,18        | 3584,46      | -148,27  | 148,27         | 0,10 | -14,83        | 14,83              |
| PO7A            | 3379,75        | 3437,30      | -57,55   | 57,55          | 1,00 | -57,55        | 57,55              |
| PO7B            | 3369,97        | 3437,37      | -67,40   | 67,40          | 1,00 | -67,40        | 67,40              |
| PO9             | 3423,52        | 3422,82      | 0,71     | 0,71           | 1,00 | 0,71          | 0,71               |
| <b>Suma</b>     |                |              | -631,39  | 632,80         |      | -293,55       | 294,96             |
| <b>Mínimo</b>   | 3369,97        | 3402,03      | -227,11  |                |      |               |                    |
| <b>Máximo</b>   | 3436,18        | 3609,90      | 0,71     |                |      |               |                    |
| <b>Promedio</b> | 3400,99        | 3464,13      | -63,14   | 63,28          |      |               |                    |
| <b>Mediana</b>  | 3399,99        | 3439,13      | -35,95   | 35,95          |      |               |                    |
| <b>Rango</b>    | 66,21          | 207,87       | 227,82   |                |      |               |                    |
| <b>RMS</b>      | 35,57          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SRMS (%)</b> | 17,11          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>MSR</b>      | 29,50          |              |          |                |      |               |                    |
| <b>SMSR (%)</b> | 14,19          |              |          |                |      |               |                    |

En este modelo, ocurre lo mismo que se señaló anteriormente respecto a la existencia de escorrentía en el balance (Tabla 4.11). Sin embargo, es importante destacar que la escorrentía generada es menor que en el caso anterior, lo que es representado en la Figura 4.21 (derecha). Por lo tanto, más agua entra al modelo, lo que se evidencia en el aumento de las salidas, tanto de los *pit lakes* como de la quebrada que mantienen la relación anteriormente descrita. Aunque disminuye la escorrentía, el porcentaje de esta sigue siendo más del 50% de la recarga total. Cabe destacar además que, disminuye la variación del almacenamiento y el error del balance es menor al 1%.

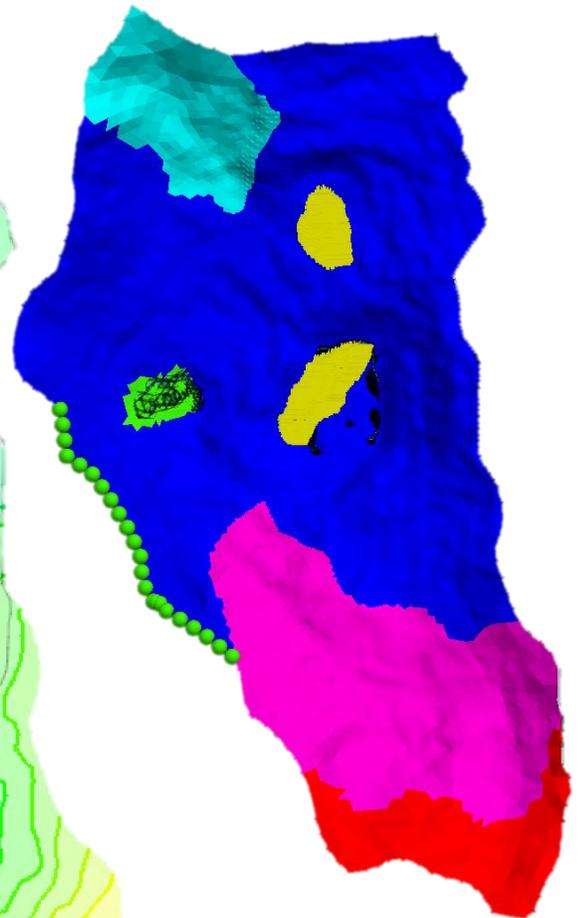
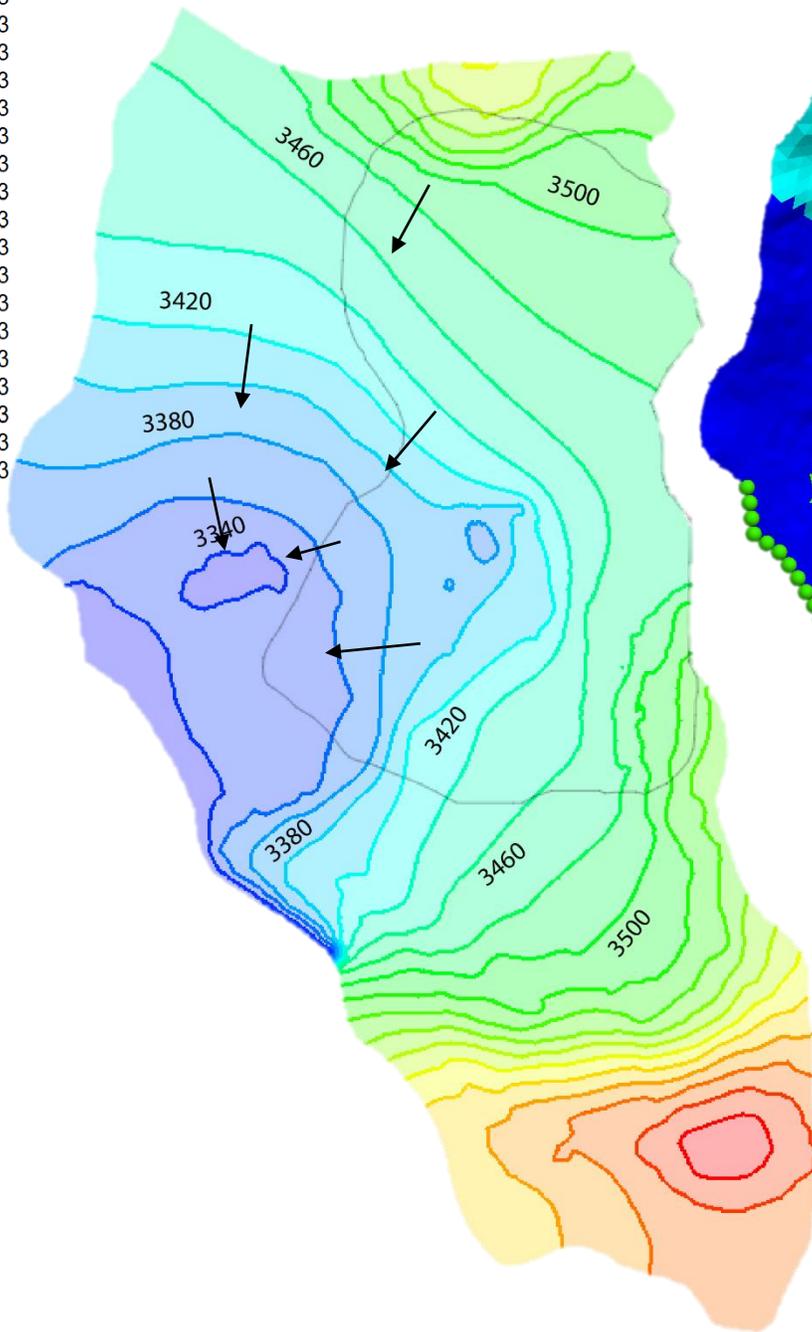
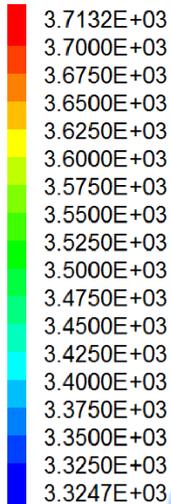
Tabla 4.11: Balances hidrogeológicos en régimen estacionario MINEDW. A la izquierda con escorrentía, a la derecha sin escorrentía

| Entradas [l/s]                                      |                  | Salidas [l/s]                        |              |
|---|------------------|--------------------------------------|--------------|
| Recarga profunda por precipitación                  | 24,81            | Pit lakes                            | 3,39         |
| Recarga profunda por filtración Embalse Los Bronces | 19,88            | Salida natural Quebrada La Disputada | 12,15        |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo                | 5,28             | Escorrentía                          | 35,18        |
| Recarga profunda Glaciar La Perla                   | 0,86             |                                      |              |
| <b>TOTAL</b>  | <b>50,83</b>     | <b>TOTAL</b>                         | <b>50,72</b> |
| <b>Variación almacenamiento</b>                     | <b>-2,15E-10</b> |                                      |              |
| <b>Error balance (%)</b>                            |                  |                                      |              |

| Entradas [l/s]                                      |                  | Salidas [l/s]                        |               |
|---|------------------|--------------------------------------|---------------|
| Recarga profunda por precipitación                  |                  | Pit lakes                            | -3,39         |
| Recarga profunda por filtración Embalse Los Bronces |                  | Salida natural Quebrada La Disputada | -12,15        |
| Recarga profunda Glaciar Infiernillo                |                  |                                      |               |
| Recarga profunda Glaciar La Perla                   |                  |                                      |               |
| <b>TOTAL</b>  | <b>15,65</b>     | <b>TOTAL</b>                         | <b>-15,54</b> |
| <b>Variación almacenamiento</b>                     | <b>-2,15E-10</b> |                                      |               |
| <b>Error balance (%)</b>                            | <b>0,70</b>      |                                      |               |

La Figura 4.21 muestra el resultado final del modelo estacionario no calibrado en la primera capa del modelo. Comparativamente al resultado expuesto en la Figura 4.19, se puede ver que en este caso las cotas de nivel son más bajas y el gradiente hidráulico es menor, ya que las isolíneas se muestran más espaciadas. De forma análoga es posible notar que, el agua fluye siguiendo la misma dirección, mayoritariamente hacia el SO, en el sentido de la salida natural de la quebrada y localmente hacia el centro del rajo.

## 2D Water Table Contour



## 2D Recharge Plane

- Precipitation
- Embalse
- Glaciar LP
- No Recharge
- Glaciar I

## Constant Head/Drain

- Pit lake
- Borde SO

Figura 4.21: Resultado niveles modelo estacionario MINEDW (izquierda) y zonas de escorrentía (derecha)

De forma resumida, resulta que solo FEFLOW alcanzó un error aceptable en la calibración de sus niveles, con un SRMS < 10%. En el caso del SMSR ninguno de los modelos alcanzó un valor menor al 5%, pero todos están bajo el 10%. Además, todos superan la cota máxima recomendada para el MSR (5% de la diferencia entre el nivel más bajo y más alto).

Sin embargo, solo los modelos de GV y FEFLOW alcanzaron errores de balance de agua menores al 1%, y consideraron el total de la recarga introducida para estos balances. Por su parte, el modelo calibrado de MINEDW alcanzó un 7% y no consideró toda la recarga introducida, ya que dejó una fracción como escorrentía (~75%), que no es considerada en el balance.

GV y MINEDW muestran zonas inundadas en el resultado. En el caso de GV el nivel freático sobrepasa la topografía, mientras que en MINEDW, la recarga ingresada supera la conductividad hidráulica del medio superficial (Figura 5.1). Esto sucede en la misma zona en ambos modelos, en la zona del embalse y en la zona de los *pit lakes*.

Sobre el sentido del flujo de agua, los tres modelos muestran de forma general la misma tendencia, donde el agua fluye principalmente hacia el SO, donde está la salida natural de la quebrada, y de manera local hacia el rajo. Sin embargo, FEFLOW y MINEDW muestran una tendencia de flujo NS en la zona norte del modelo, a diferencia de GV, donde la tendencia es sostenidamente hacia el SO.

Respecto a los valores de conductividad hidráulica calibrados, GV y FEFLOW poseen casi los mismos valores, de los mismos órdenes de magnitud, difiriendo únicamente en dos centésimas en el valor de  $K_{UH1B}$ . Para MINEDW, todos los valores se encuentran en los mismos órdenes de magnitud, a excepción de  $K_{UH2}$  que tiene un valor menor en un orden de magnitud en relación a los otros modelos. Lo anterior, debido a que con los mismos valores el software simula niveles más bajos que los otros en la zona del rajo.

## 4.6 Postproceso

### GV

Una vez terminada la simulación, mediante su interfaz, el software entrega los resultados gráficamente (Figura 4.13), indicando las celdas inundadas y secas, además de los contornos de cotas de niveles piezométricos, dirección de flujo en X/Y/Z, o velocidad del flujo, junto al error residual de cada pozo o su nivel medido (Figura 4.22), según la persona usuaria prefiera. Entrega también el balance de agua final, con el error asociado, del modelo completo y por capas. GV ofrece la posibilidad de conocer las entradas/salidas de agua de una UH y su interacción con el resto mediante el uso de Hydrostratigraphic Units (HSU). GV permite dibujar el contorno de presión calculada en base a los niveles simulados, pero no permite exportar esta información.

Sumado a ello, el programa entrega algunos cálculos estadísticos como el RMS y el SRMS, el promedio, mínimo, máximo, desviación estándar y suma de cuadrados de residuales, junto con la gráfica de niveles medidos vs. simulados, niveles medidos vs. residuales, suma de cuadrados y probabilidad acumulativa.

Todos los datos como niveles en los pozos de observación, entradas y salidas de agua al modelo pueden ser exportadas para su postproceso externo. GV exporta esta información como archivos .csv, en conjunto a el período de tiempo al que corresponde y el grupo de celdas asignado durante la construcción del modelo, permitiendo conocer la ubicación del agua que entra/sale del modelo.

GV permite también la exportación de mapas de los modelos tanto en planta como en sección transversal.

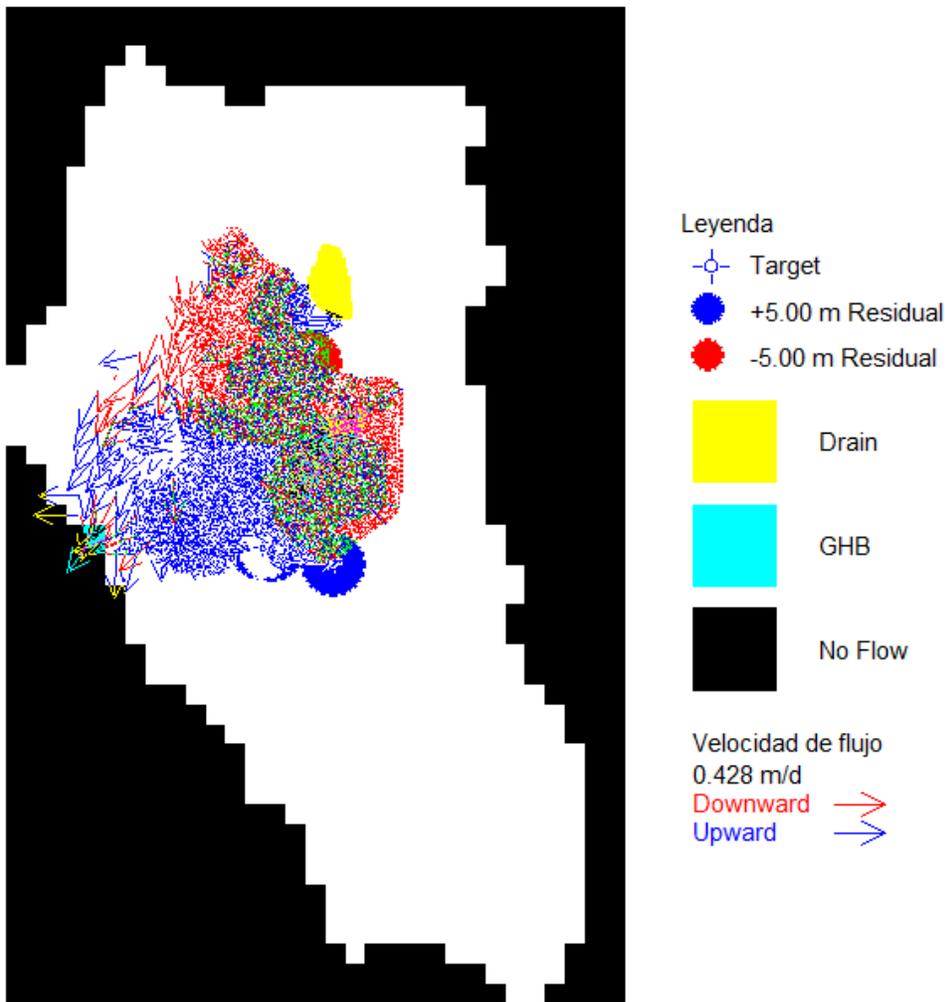


Figura 4.22: Velocidad de flujo y círculos de residuales en modelo estacionario calibrado

## FEFLOW

FEFLOW, al igual que GV entrega resultados gráficos de la simulación (Figura 4.16), que muestran los niveles modelados con una interacción 3D completa al ofrecer la posibilidad de visualizarlos en distintos colores, agregando isolíneas, isosuperficies, esferas según los valores y configurar la estética de visualización de forma personalizada. Permite también visualizar la dirección del flujo, su velocidad y sentido de movimiento (Figura 4.23). Por medio de la herramienta *Rate Budget* entrega el balance de agua final total y en el conjunto de nodos o elementos que se seleccione, lo que permite conocer la cantidad de agua que entra/sale por cada nodo/elemento. Puede mostrar también el balance de agua durante un período determinado. Sin embargo, no entrega información sobre la interacción entre UHs. FEFLOW además entrega por capa el flujo de agua bombeado en cada una.

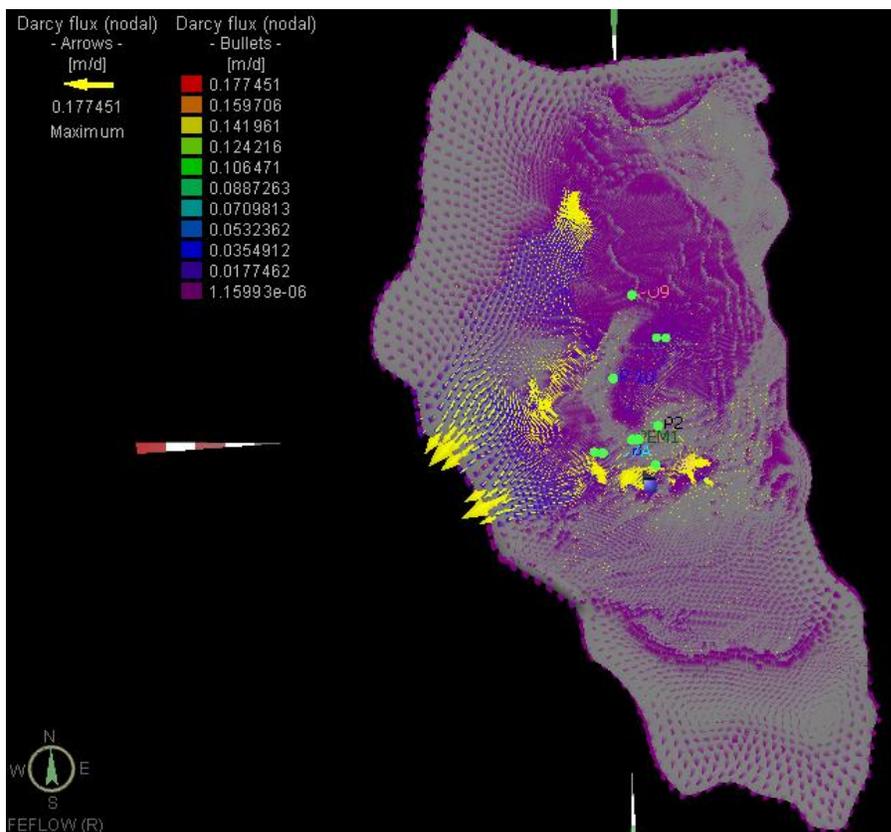


Figura 4.23: Velocidad de flujo en modelo estacionario calibrado

Estadísticamente, la interfaz proporciona el cálculo del RMS, del error residual absoluto medio y la desviación estándar. Genera también un gráfico de dispersión de niveles medidos vs. simulados, utilizando los pozos de observación.

Este software exporta también todos los resultados para trabajarlos externamente si se precisara, tanto niveles (de todo el modelo y en pozos de observación) como balances de agua en las distintas áreas que se seleccionen. Incluso con la presión calculada basada en los niveles. Esto puede hacer mediante archivos de distinta extensión, como, por ejemplo, *.csv*, *.txt*, *.dat*, *.shp*, *.xlsx*. FEFLOW, permite exportar como imagen la vista que se tiene del modelo, ya sea en formato 2D o 3D.

## **MINEDW**

Por su parte, MINEDW también otorga la posibilidad de visualizar las cotas de los niveles simulados (Figura 4.19), con la posibilidad de agregar isolíneas y verlos por capa. Sin embargo, a diferencia de los otros softwares, MINEDW no genera automáticamente la velocidad ni sentido de flujo. No obstante, este último puede conocerse mediante la interpretación de las isolíneas. Sumado a esto, en la versión utilizada de MINEDW la interfaz no muestra el balance hídrico total del modelo, y, por lo tanto, tampoco el flujo que entra o sale de cada UH.

MINEDW no entrega ningún cálculo estadístico ni gráfico de dispersión, solo permite exportar el valor de la cota de los niveles simulados en los pozos de observación para su postproceso manual. Entrega también un archivo que contiene los componentes del balance hidrogeológico del modelo, que especifica el caudal de agua que ingresa/sale del modelo por cada uno, y los identifica según el nombre asignado durante el preproceso. Es posible también visualizar y exportar un archivo que

contiene la presión de poros del modelo, y permite elegir cuantos datos se necesitan, interpolando los resultados.

Una característica destacable de MINEDW es que permite la exportación del modelo en imágenes y en otras extensiones como *.dxf* y *.svg*, lo cual lo hace compatibles con softwares de CAD como Leapfrog, AutoCAD, Rhinoceros, entre otros.

#### **4.7 Otras características**

##### **GV**

En otras características, GV posee una plataforma en idioma inglés, al igual que su Guía de uso y su manual tutorial. La documentación anteriormente nombrada es de circulación web gratuita y es el medio oficial para el aprendizaje del manejo del software, además de seminarios web pagados ofrecidos por Environmental Simulation Inc. (ESI).

Otro aspecto relevante son las unidades en las que trabaja GV. Para el largo se puede escoger entre centímetros, pies y metros, mientras que para el tiempo se puede trabajar en segundos, minutos, horas, días o años. Cualquier combinación es posible, solo se necesita que todos los datos ingresados en el modelo estén en las mismas unidades.

Para las condiciones iniciales, GV ofrece la posibilidad, como la mayor parte de los softwares de dar a un modelo transiente los niveles resultantes de un estacionario calibrado, pero además de generar un modelo híbrido, donde el primer paso de tiempo es estacionario y los siguientes son transientes. GV permite correr modelos de manera simultánea.

El valor de las licencias de uso perpetuas para la última versión de GV (8.0) fluctúa entre los 1.750 y 4.900 dólares, dependiendo si es una Estándar o Premium.

##### **FEFLOW**

Al igual que GV, la interfaz de FEFLOW está en inglés como su Guía de usuario y su Tutorial introductorio, de disponibilidad web gratuita. Existe también un foro oficial de DHI y libros que abordan las bases teóricas, numérica y de aplicación del programa (Diersch, 2005; 2014). Esto, en conjunto a los tutoriales de Youtube y los seminarios pagados ofrecidos del grupo DHI constituyen el medio oficial para el aprendizaje del software.

Sobre las unidades, FEFLOW ofrece la posibilidad de elegir la unidad de trabajo para cada propiedad y condición de borde ingresada al modelo, y el programa se encarga de estandarizarlos.

Respecto a las condiciones iniciales, FEFLOW necesita niveles calibrados resultantes del modelo estacionario para el modelo transiente. Mientras que para el modelo estacionario deben especificarse cada vez que se corre el modelo, siempre asegurando el medio saturado. FEFLOW permite correr más de un modelo al mismo tiempo.

DHI ofrece distintas opciones para optar a una licencia de FEFLOW, según las necesidades y naturaleza de quien la usará. El paquete más económico y básico ronda los 430 dólares mensuales, mientras que el siguiente cuesta ~570 USD mensuales.

##### **MINEDW**

En la misma línea de los softwares anteriores, MINEDW tiene su interfaz en inglés, como su documentación oficial de manejo del software, Manual de usuario y tutorial. Cabe destacar que, actualmente Itasca Chile desarrolla en la plataforma de Youtube videos tutoriales sobre el manejo

de MINEDW. Todo lo anterior en conjunto a los cursos de formación, tutoriales de software y seminarios web gratuitos ofrecidos por Itasca constituyen el medio oficial de aprendizaje del software. Por otra parte, destaca la existencia de tutoriales y soporte técnico tanto en inglés como en español.

Para las unidades, MINEDW especifica en cada parámetro y condición de borde del modelo la unidad en que debe ser ingresada, sin posibilidad de cambio. Adicional a esto, se puede escoger entre unidades de largo entre pies y metros para visualizar aspecto del modelo. Los resultados se entregan para cada paso de tiempo, cuya duración es determinada por el usuario, al igual que la fecha de inicio del modelo.

Para las condiciones iniciales, se debe ingresar para el caso del modelo transiente el resultado de niveles calibrados del modelo estacionario. En el caso del estacionario se ingresa una cota de nivel superior a lo esperado para asegurar la saturación del medio, y basta configurarlo una vez. MINEDW no permite correr simultáneos dos modelos directamente desde la interfaz, sino que permite hacerlo de forma manual por medio de una metodología distinta, desde un archivo creado específicamente para esto.

Los valores de una licencia estándar de MINEDW dependen de su duración, pudiendo ser mensual o anual, cuyo precio fluctúa entre los 1500 y 7500 USD. Existe también la posibilidad de adquirirla de forma perpetua por 15.000 dólares aproximadamente.

## 5. Discusiones

Este capítulo aborda la comparación de las características de los softwares según los criterios comparativos detallados en la sección 4.1. Se destacan las ventajas y desventajas de los programas en distintos aspectos, que se resumen en la Tabla 5.1, a excepción de la calibración del modelo estacionario. Al final del capítulo se discute sobre el aporte de este trabajo y las consideraciones que lo acompañan.

### 5.1 Criterios comparativos

#### Diferencias inherentes a los códigos

Una diferencia fundamental entre los softwares es que se basan en métodos numéricos distintos para resolver la ecuación de flujo de agua subterránea. GV utiliza el método de diferencias finitas, mientras que FEFLOW y MINEDW aplican el método de elementos finitos. Como sostienen Díaz y otros (2012), hay características intrínsecas de estos métodos confieren a los simuladores capacidades distintas. Entre ellas, la más relevante corresponde a la discretización espacial, que en el caso de FEFLOW y MINEDW consiste en elementos triangulares unidos por nodos que permiten adaptar el mallado a geometrías y contornos complejos, mientras que para GV se dificulta la representación porque dispone de celdas rectangulares con nodos en su centro. Esto queda de manifiesto también en la adaptación de los elementos o celdas a la topografía o superficies irregulares que configuran la geometría de las capas. Esto permite obtener resultados de mayor calidad en un modelo de elementos finitos comparación a un modelo de diferencias finitas (Koukidou y Panagopoulos, 2010). Por otro lado, el método de diferencias finitas genera errores numéricos no reportados por el método de elementos finitos en la resolución de la ecuación de flujo, lo que se asocia a que este último método promedia ampliamente las conductividades hidráulicas y la representación de las condiciones de borde de flujo (Simpson y Clement, 2003).

#### Complejidad del uso de interfaz

Respecto al criterio de complejidad de interfaz, en principio la interfaz de FEFLOW resultó ser más compleja, en comparación a los otros dos softwares, cuya organización es más intuitiva, en términos de ingreso de parámetros y ubicación de herramientas esenciales. No obstante, la complejidad es equilibrada con la comodidad que ofrece FEFLOW (GV no posee herramienta ‘deshacer’) al conocer el manejo del software, ya que posee editores de propiedades y selección, muy integrados en la interfaz, fáciles de manejar, versátiles y precisos, que facilitan la construcción del modelo y que no disponen los otros programas. La capacidad gráfica de FEFLOW y MINEDW es comparable entre ellos y ampliamente superior a la de GV, ya que ambos softwares permiten tener ventanas de visualización simultáneas tanto en 2D como en 3D, planos de corte en distintas direcciones y ángulos, manejo y personalización de simbologías.

#### Preproceso

Referente al preproceso, la dependencia de MINEDW a un software adicional para la generación de la malla es una clara desventaja. FEFLOW, a pesar de que permite generar su propia malla, refinarla y des-refinarla, solo permite subdividir iterativamente los elementos seleccionados. Debe destacarse de todas maneras la posibilidad que ofrece FEFLOW de crear mallas a partir de archivos importados como mapas. En este aspecto, GV permite generar tanto su malla como la refinación de esta de forma directa en las zonas de interés, mediante la división en potencias de 2 de las celdas mediante el *package* MODFLOW-USG.

GV se muestra claramente bajo los otros softwares en la adaptación de las capas a un espesor variable siguiendo la topografía, ya que la incorporación de esta característica solo fue posible gracias a la exportación de capas de FEFLOW. Los otros softwares simplifican la tarea. Además, se destaca la opción especial de MINEDW de generar *pinch outs* en las capas del modelo (refinamiento vertical), en una extensión personalizada, sin la necesidad de dividir toda la capa y demandar más trabajo computacional. A pesar de que esto no fue incorporado en el modelo, debe mencionarse que esta opción no está disponible en FEFLOW, tiene restricciones en GV, y resulta ser importante en el modelado de rajos ya que da la escala vertical de los bancos de éstos.

En general todos los programas mostraron una buena compatibilidad con archivos importados desde otros softwares (como GIS, CAD). Sin embargo, es importante destacar algunas características de cada uno que facilitan o aumentan el tiempo de construcción del modelo. En este aspecto, MINEDW destaca por la facilidad de implementación de las propiedades hidráulicas, ya que es posible designar la zonificación de UHs directamente desde un archivo *.dxf*, mientras que en FEFLOW y GV no fue posible trabajar de forma directa con los mismos archivos. En su lugar, debió realizarse un trabajo externo apoyado en Leapfrog para obtener los mismos resultados. De la misma forma, destaca FEFLOW en la implementación el túnel, que pudo hacerse directamente desde el archivo *.dxf*, a diferencia de los otros softwares. Esto repercute directamente en el tiempo invertido en la generación del modelo, aumentándolo de manera significativa dependiendo de la cantidad de nodos/elementos y UHs que posea cada uno. Respecto a esto, debe mencionarse que MINEDW es el único software que permite exportar el modelo como archivo CAD.

Un aspecto importante en el preproceso del modelo de un rajo es la incorporación de un plan minero que represente la excavación de este, ya que es algo inherente a su evolución temporal. En este sentido nuevamente destaca MINEDW, debido a que posee un menú específico para el cambio topográfico temporal, que facilita el trabajo y lo reduce a la creación de un plan minero que se basa en la incorporación de las topografías como archivo, además de la delimitación del rajo. Esto permite implementar un cambio de topografía año a año si se dispone de los datos. Por el contrario, para GV y FEFLOW el cambio de topografía del rajo es el aspecto más demoroso en la construcción del modelo transiente, lo que obliga a simplificar el trabajo asumiendo una topografía constante por un rango de años, aunque se tengan datos topográficos año a año. Lo anterior, debido principalmente a que debe hacerse una importante cantidad de pasos entre los softwares de modelación y otros terceros, para el trabajo manual de archivos con los datos necesarios. Esto repercute directamente en el tiempo que toma el diseño del modelo siendo varias veces el tiempo invertido en MINEDW, además de aumentar la posibilidad de error en el manejo de datos. Análogamente, la incorporación de la ZOR en un modelo transiente demandará más tiempo y trabajo en GV y FEFLOW que en MINEDW, dado que este último posee un menú específico para ello. En este sentido, habilidades de programación podrían facilitar de manera importante este trabajo.

### **Capacidad de simulación**

La capacidad de simulación, en líneas generales es similar en todos los softwares ya que en todos fue posible incorporar las características del modelo hidrogeológico conceptual. Sin embargo, hay diferencias entre ellos que se deben mencionar. Una diferencia relevante entre los softwares es la existencia de la condición de dren (condición mixta) en MINEDW y GV, que simula perfectamente la salida de agua subterránea desde el rajo. FEFLOW por su parte no posee la condición propiamente tal, pero permite aplicar restricciones a la condición de borde tipo Cauchy, lo que es equivalente. Frente a esto, se debe mencionar la ventaja de FEFLOW de poseer la opción *Seepage Faces* o la posibilidad de ingresar restricciones a las condiciones de 1<sup>er</sup> tipo, ya que esto permite

generar una salida de agua del modelo sin la necesidad de considerar la conductancia, que aumenta la incertidumbre en la calibración agregando un parámetro adicional a calibrar (Noriega y otros, 2012). Además, tanto FEFLOW como MINEDW asignan a la condición de dren por defecto el valor de la elevación del nodo, mientras que en GV se debe ingresar manualmente a cada celda la elevación de su techo, lo que supone un trabajo mayor.

Los tres softwares simulan el flujo de agua subterránea en un medio saturado y no saturado, dejando fija la malla en el tiempo, excepto para la excavación en el caso de MINEDW. Esto facilita la representación de la variabilidad hidrogeológica del medio, además de entregar como resultado de la simulación zonas no saturadas (celdas/elementos secos, que están sobre el nivel simulado) o inundadas (celdas inundadas en el caso de GV, o escorrentía en MINEDW) donde hay agua sobre el límite vertical superior del modelo. Solo FEFLOW ofrece la posibilidad de generar un modelo totalmente saturado en todo momento, adaptando la malla de acuerdo con la cota del nivel freático.

Como se señala anteriormente, respecto a la inclusión de la ZOR en el modelo transiente, MINEDW destaca ampliamente, ya que la incorpora automáticamente en torno a la delimitación del rajo y a la excavación de cada período según los parámetros ingresados. Si bien los otros softwares poseen la capacidad de simulación para variar la conductividad hidráulica en el tiempo, su delimitación, valor y período de cambio deben ser ingresadas manualmente, lo que aumenta el tiempo de construcción considerablemente.

En este trabajo no se modelaron etapas tardías de un rajo, tales como formación de un *pit lake* o el relleno de la mina luego del cese de actividades. MINEDW posee una ventaja frente a los otros softwares en estos aspectos ya que presenta menús específicos para implementar en la simulación estos escenarios post-minería (Ugorets, 2015), interesantes para el manejo y gestión medioambiental. Para ambas variables posee un menú específico y los genera automáticamente. En la formación del *pit lake*, entrega información específica del volumen, área y zonas aportantes a su formación. GV y FEFLOW pueden simularlo también, mediante el *package Lake* y un código externo, respectivamente, sin entregar información tan detallada. El relleno de mina es simulado solo en un paso de tiempo en MINEDW, según parámetros especificados. GV y FEFLOW pueden simularlo también, pero el ingreso de datos debe ser manual. Esta ventaja de MINEDW se traduce en facilitación y reducción de tiempo de construcción.

### **Calibración modelo estacionario**

Los datos para llevar a cabo la calibración del modelo estacionario en este caso solo fueron las mediciones de 10 pozos (Tabla 4.2) ubicados espacialmente cerca (Figura 4.10), de los cuales 2 se consideraron como medidas poco fiables. De acuerdo con Barnett y otros (2012), si la estimación de parámetros no se ajusta lo suficiente debido a la falta de datos medidos en la fecha del modelo estacionario o a su acotada distribución espacial, constituye una limitación en la modelación debido a la insuficiencia de datos, más que una falla de esta. Por lo anterior, la calibración realizada no buscó disminuir los estadígrafos especialmente bajo los porcentajes sugeridos, sino que solo minimizarlos tanto como fue posible para tener un resultado aceptable en este aspecto. Este criterio de aceptabilidad de los modelos no afecta mayormente al objetivo general del trabajo, ya que el sesgo o nivel de error en los datos está presente en todos los modelos de manera igualitaria. Entonces, cuantitativamente se destaca el modelo de FEFLOW como el que mejor ajuste logró de acuerdo a los estadígrafos trabajados. Sin embargo, su diferencia no fue mayor al 2% con GV y 6% con MINEDW en el caso de SRMS, y de 1% y 4% para SMSR, respectivamente.

Los valores calibrados de conductividad hidráulica para GV y FEFLOW resultaron ser muy parecidos y del mismo orden de magnitud en todas las UHs (Figura 4.12 y Figura 4.15). MINEDW

por su parte, resultó con niveles en promedio 40 [m] más bajos en la simulación con los mismos parámetros hidráulicos de los otros programas (Tabla 4.10), por lo que para llegar a un ajuste parecido hubo que disminuir en un orden de magnitud la conductividad hidráulica de la UH2 (Figura 4.18), que constituye el sistema hidrogeológico principal. Lo anterior, se relaciona a una característica de MINEDW que consiste en separar la recarga ingresada en admisible, que incorpora al modelo y en escorrentía, que no incorpora al modelo. De esta situación se desprende una variable interesante y relevante de discutir. En el caso de que la calibración se enfocara únicamente en el ajuste de niveles medidos vs. observados, los casos en que MINEDW considere un gran porcentaje de la recarga ingresada como no admisible, es decir, como escorrentía, los niveles simulados serán más bajos y como consecuencia las conductividades hidráulicas calibradas que entregue serán probablemente más bajas en comparación a los otros softwares. Itasca Denver Inc. detalla este fenómeno en la metodología que utiliza MINEDW para simular la recarga (Figura 5.1). A pesar de que se realizaron distintas pruebas como aumento de valores de  $K_z$ , cambio en distribución de UH en primera capa, entre otras, para conseguir que la recarga fuese completamente incorporada, esto no fue logrado. Es posible que se requiera de un cambio en el modelo conceptual respecto de la distribución de UHs, lo que va más allá del alcance de este trabajo.

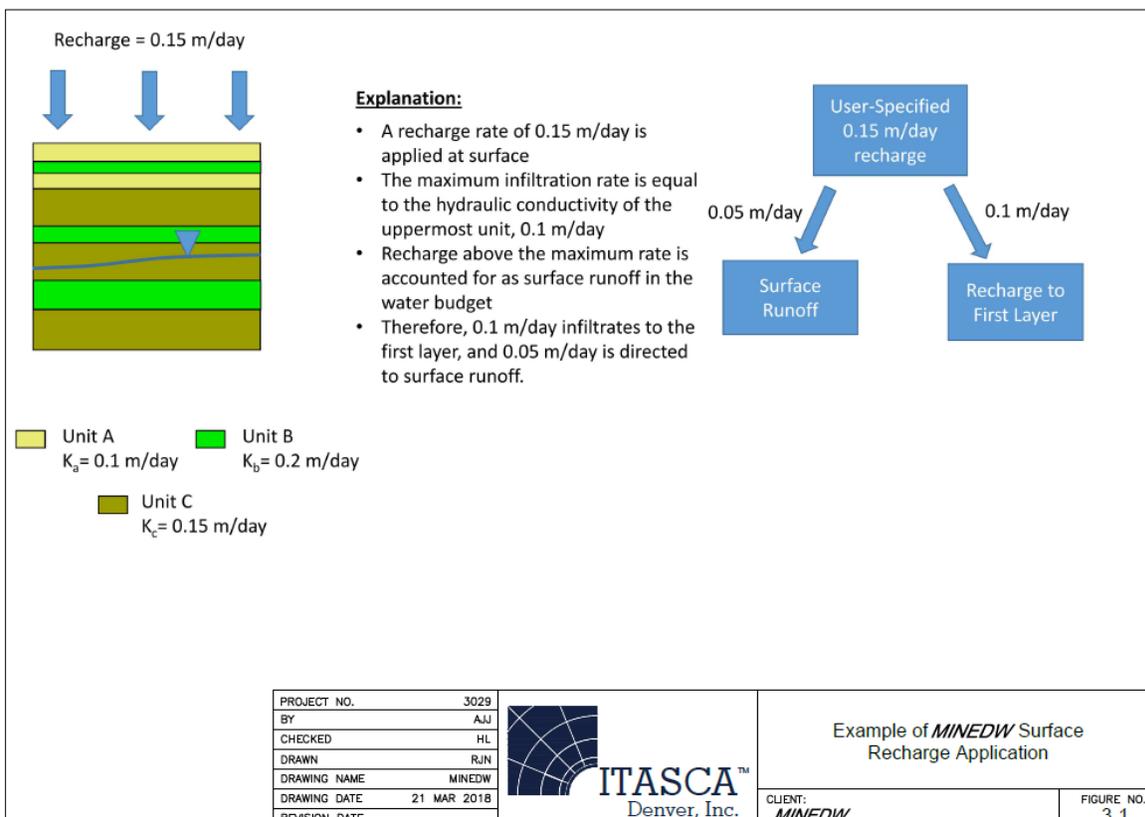


Figura 5.1: Metodología utilizada por MINEDW para simular recarga. Fuente: Itasca Denver Inc.

Esta metodología de MINEDW repercute, naturalmente, también en el balance de aguas del modelo. Este fue el único software cuyo error de cierre de balance en el modelo calibrado (considerando un buen ajuste de niveles) alcanzó el 7%, siendo la escorrentía el 75,7 % de la recarga total (Tabla 4.8). En la simulación no calibrada, se obtuvo una disminución del error de balance de aguas hasta el 0,7 %, con una escorrentía del 69,2% de la recarga. De esto se desprende que el error del balance de aguas no está necesariamente ligado a la cantidad de escorrentía. Se considera que el balance de aguas no es comparable con el resto de softwares ya que este no

considera la misma cantidad de agua que ellos. Sin embargo, se destaca la similitud de la proporción entre las salidas entre los tres modelos, donde la salida SO es la principal salida de agua. Al comparar los valores de los caudales de agua que saca cada componente en los modelos de FEFLOW y GV, se aprecia ambos poseen valores del mismo orden de magnitud (Tabla 4.4 y Tabla 4.6), por lo que, a grandes rasgos los balances coinciden, encontrándose dentro del mismo orden de magnitud de los estimados en el modelo conceptual.

Esta característica de MINEDW podría considerarse como una ventaja frente a los otros softwares en la medida que se entiende que el programa busca representar la realidad en términos de la relación entre la recarga efectiva y la conductividad hidráulica del medio, invitando a reconsiderar el modelo conceptual. Por el contrario, puede también entenderse como una desventaja al limitar la cantidad de agua con la que se requiere trabajar, cuya estimación puede estar bien apoyada en datos, por lo que la simplificación MINEDW respecto a la recarga admisible resulta limitante para el desarrollo del modelo, además de alterar el balance de aguas del modelo completo y repercutir en las conductividades calibradas. La consideración de esta variable cambiará dependiendo el tipo y las condiciones del modelo que se necesite construir, además de las revisiones que se hagan del modelo conceptual.

Cualitativamente, todos los modelos muestran en general un sentido de flujo de agua hacia el límite SO, y localmente hacia el rajo, por lo que no hay diferencias de resultados en esta línea. La condición de nivel constante en el borde SO en el modelo, en lugar de un límite de no flujo se hizo porque se consideró que la información disponible en la fecha era insuficiente para asumir una divisoria de aguas interna en la quebrada, como AAS (2019) sostiene para las fechas en que ya ocurre bombeo de pozos en el rajo.

Según Betancur y Palacio (2009) los modelos numéricos pueden tener también un carácter exploratorio y acompañar la construcción de un modelo conceptual durante la recolección, interpretación y complemento de datos. Esto debido a que cuando un modelo se construye con poca información es útil en la medida que proporciona una estructura para sistematizar la información de terreno y puede ayudar a identificar áreas donde se requiere información adicional. De acuerdo a esto, y considerando la falta de datos, el resultado replicado en los tres modelos del sentido de flujo del agua podría indicar que para dicha fecha esa divisoria de aguas aun no existía. Lo anterior cobra sentido si se tiene en cuenta que el límite SO constituye la salida natural de la quebrada La Disputada y que en la fecha del modelo estacionario no existía bombeo de pozos que sacaran agua por el rajo, de manera que acentuaran el cono de depresión de niveles en ese sector como para generar una divisoria de aguas interna dentro de la quebrada. De esta manera, el agua que aflora por el rajo llega ahí siguiendo únicamente el gradiente hidráulico local existente debido a la excavación del mismo y su efecto sumidero. Ahora bien, esto no es cotejable con el modelo conceptual debido a la falta de datos de la fecha y de un mapa piezométrico adecuado, ya que la piezometría más antigua que se tiene de referencia contempla datos interpolados comprendidos entre 2006 y 2007 (Figura 2.23). Sumado a ello, comparar contornos de las cotas de niveles modelados con contornos interpolados de valores observados por algún software (ej. GIS) es poco útil en relación a compararlos con contornos trazados a mano con base en datos de niveles observados, dada la ausencia de conocimiento de estructuras y propiedades geológicas por parte de los softwares, pero atribuibles a una persona con experiencia (Barnett y otros, 2012). Dado esto, solo puede proponerse que para la fecha del modelo estacionario la divisoria no existía.

Respecto también a la calibración, los tres softwares poseen mecanismos de calibración automática y de análisis de sensibilidad. GV cuenta con PEST, FEFLOW con FePEST y MINEDW con MINEPEST.

## **Postproceso**

Sobre el postproceso, todos los programas permiten visualizar y exportar los resultados esenciales, tanto de niveles piezométricos como de caudales de entrada y salida. Permiten también visualizar las isopiezas de niveles modelados, y además exportar estas gráficas. Sus diferencias radican principalmente en los cálculos estadísticos, en la representación del balance de aguas dentro de la interfaz, en aspectos específicos de balance, representación gráfica de otras variables y posibilidad de exportar ciertos resultados. MINEDW es el único software que no presenta cálculos estadísticos ni balance de aguas en su interfaz, sino que entrega archivos que contienen resultados, tanto de cotas de niveles en pozos de observación como componentes del balance, que deben procesarse manualmente para obtener lo deseado. GV ofrece la posibilidad de conocer la cantidad de agua que entra y sale por cada condición de borde y la interacción entre UHs, siempre y cuando se utilicen HSU para delimitarlas, lo que resulta útil para establecer dependencia hídrica entre zonas o verificar sentidos de flujo. Por su parte, FEFLOW permite conocer el balance de aguas en una selección personalizada de nodos/elementos, pero no la interacción entre UHs, lo que permite identificar las zonas de recarga y descarga del acuífero (Noriega y otros, 2012). La versión de MINEDW utilizada en este trabajo no presenta algo parecido a lo mencionado, lo que lo deja en desventaja frente a los otros programas en términos de un entendimiento más profundo del funcionamiento interno del sistema hidrogeológico que complementa los resultados finales.

Al considerar que los resultados de presión de agua de un modelo numérico hidrogeológico de un rajo pueden constituir datos de entrada para un estudio geomecánico de estabilidad de taludes del mismo, resulta relevante que el programa entregue estos datos. Todos los programas representan los contornos de presiones, pero destaca en este aspecto MINEDW que permite exportarlos y elegir la cantidad de datos que se desea al interpolar los resultados, frente a FEFLOW que solo permite exportar los valores en los nodos del modelo y a GV, que solo no deja exportarlos. GV y FEFLOW proporcionan también representación gráfica de variables como vectores de velocidad y sentido del flujo (Figura 4.22 y Figura 4.23), mientras que MINEDW solo se limita a presentar los niveles y sus isopiezas, a partir de lo cual se puede obtener manualmente dicha información.

### **Otras características**

En otros aspectos, todos los softwares tienen interfaz y documentación oficial en inglés y poseen servicio técnico y material disponible en la web, ya sea o no gratuito. Sin embargo, existe una mayor disponibilidad de información (tutoriales, manuales, foros, libros) para el uso de FEFLOW, en menor medida para GV e incipiente para MINEDW, que es el único que posee tutoriales oficiales y soporte técnico tanto en inglés como en español. Por otra parte, la libertad que confiere FEFLOW en el manejo de datos al elegir la unidad de medida para cada parámetro supera la metodología de los otros softwares en ese aspecto.

Destaca la capacidad de GV de modelar el primer paso de tiempo con configuración estacionaria seguido de transientes sobre los otros softwares, lo que permite trabajar en un único proyecto y reducir el manejo de archivos. Debe mencionarse también la diferencia de precios de las licencias de los programas, donde la licencia perpetua básica de GV es mucho más económica que la de los otros softwares, alcanzando casi el mismo valor que un mes de MINEDW o cuatro de FEFLOW básica. Esto puede ser una importante limitante a la hora de escoger un software.

Tabla 5.1: Comparación de softwares según distintas características enmarcadas en criterios comparativos

| Criterio de comparación                           | Software/<br>Característica                             | GV   | FEFLOW   | MINEDW  |
|---|---|--|--|---|
| Características técnicas inherentes a los códigos | Adaptabilidad de la malla a geometría compleja          | Difícil representación de contornos complejos debido a celdas rectangulares  | Buena adaptación a contornos complejos por elementos triangulares  | Buena adaptación a contornos complejos por elementos triangulares   |
| Complejidad del uso de interfaz                   | Interfaz  | Simple, organización intuitiva   | Compleja, herramientas específicas de selección  | Simple, organización intuitiva  |
|   | Gráfica   | 2D. Secciones transversales. Ventana transversal y en planta   | 2D y 3D. Cortes en distintos planos y ángulos. Disponibilidad de distintas ventanas de visualización           | 2D y 3D. Cortes en distintos planos y ángulos. Disponibilidad de distintas ventanas de visualización            |
| Preproceso  | Creación y refinamiento de malla                        | Crea malla y la refina en sectores de interés mediante package MODFLOW-USG   | Crea malla y refina sectores de interés  | No genera malla propia  |
|   | Capas de espesor variable                               | No las crea automáticamente, deben ingresarse elevaciones manualmente  | Adapta automáticamente las capas al incorporar la topografía   | Permite incorporar capas equidistantes a una con elevación irregular  |
|   | Pinch outs  | Requiere refinamiento de capas completas. <i>Pinch outs</i> incompatibles con refinamiento horizontal en MODFLOW-USG                             | Requiere refinamiento de capas completas   | Refinamiento vertical solo en las zonas de interés, con delimitación manual                                     |
|   | Compatibilidad con archivos GIS, CAD, archivos de texto | Posee. Solo acepta algunos para el ingreso zonificaciones hidráulicas  | Posee. Solo acepta algunos para la selección de nodos/elementos o zonificaciones hidráulicas                   | Posee. Es posible ingresar zonificaciones hidráulicas y selección de nodos directamente                         |
|   | Excavación del rajo                                     | Simulado por condición Dren. Implementación manual   | Simulado por condición de nivel cte o transferencia de flujo con restricción. Implementación manual            | Ajusta la malla automáticamente según archivos y opciones ingresadas al plan minero                             |
| Capacidades de simulación                         | Simulación de salida de agua subterránea                | Condición dren   | Condición de nivel cte ( <i>Seepage Faces</i> ) o de transferencia de fluido con restricción de Q de ingreso   | Condición dren  |
|   | Flexibilidad de la malla durante simulación             | Fija. Representación de zonas saturadas, inundadas y no saturadas  | Fija o flexible, que se adapta al nivel freático simulado  | Fija, excepto para excavación del rajo.   |
|   | Incorporación de zona de relajación (ZOR)               | Cambio de conductividad en el tiempo disponible en MODFLOW-SURFACT y MODFLOW USG. Delimitación, cambio temporal y K de ZOR ingresada manualmente | Conductividad hidráulica variable en el tiempo. Delimitación, cambio temporal y K de ZOR ingresada manualmente | Simulación automática de acuerdo a opciones ingresadas y delimitación del rajo                                  |
|   | Formación de <i>pit lake</i> post minería               | Solo entrega volumen a través de package Lake  | No es capaz, pero puede hacerlo por un código externo PitLakeBC o IFMLake                                      | Entrega área, volumen y flujo desde cada unidad hidrogeológica al <i>pit lake</i>                               |
|   | Relleno de mina   | Implementación manual  | Implementación manual  | Lo simula automáticamente en un paso de tiempo  |
|   | Admisibilidad de recarga                                | Admite toda la recarga ingresada   | Admite toda la recarga ingresada   | Discrimina entre recarga admisible y escorrentía, según valor de conductividad hidráulica vertical del material |
|   | Calibración automática                                  | Posee PEST   | Posee FePEST   | Posee MINEPEST  |

| <b>Criterio de comparación</b> | <b>Software/<br/>Característica</b>  | <b>GV</b>  | <b>FEFLOW</b>  | <b>MINEDW</b>  |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| <b>Postproceso</b>             | <b>Visualización de resultados</b>   | Visualización continua y contornos de cotas de niveles, vectores de velocidad y sentido de flujo. Contornos de presión   | Visualización continua y de contornos de cotas de niveles, presión, velocidad y sentido de flujo   | Visualización continua y de contornos de cotas de niveles y presión  |
|                                | <b>Cálculos estadísticos</b>         | RMS, SRMS, promedio, mínimo, máximo, desviación estándar, y suma de cuadrados residuales. Gráfica niveles medidos vs. simulados, medidos vs. residuales, probabilidad y suma de cuadrado acumulativa | RMS, error residual absoluto medio y desviación estándar. Gráfica de niveles medidos vs. simulados, presión medida vs. simulada                                | No genera  |
|                                | <b>Balance de aguas por UH</b>       | Entradas y salidas de agua de UH e interacción con otras siempre que se delimiten usando HSU   | Entradas y salidas de agua por nodos/elementos seleccionados manualmente   | No posee. Otras versiones poseen esta opción   |
|                                | <b>Exportación de mapas/imágenes</b> | Permite exportación de mapas configurados  | Permite exportación de imágenes de vistas del modelo   | Permite exportación de imágenes de vistas del modelo, y extensiones <i>.dxf</i> y <i>.svg</i> del modelo                   |
|                                | <b>Exportación de resultados</b>     | Niveles simulados solo en pozos de observación y componentes de balance en archivos de texto   | Niveles y presiones simulados en pozos de observación y en todo el modelo en <i>.shp</i> , <i>.xlsx</i> , o texto. Componentes de balance en archivos de texto | Niveles simulados en pozos de observación, presiones en todo el modelo. Componentes de balance en archivos de texto        |
| <b>Otras características</b>   | <b>Idioma</b>                        | Inglés en plataforma y documentación oficial   | Inglés en plataforma y documentación oficial   | Inglés en plataforma y documentación oficial   |
|                                | <b>Documentación disponible</b>      | Manual, tutorial manual, webinars  | Guía de usuario, tutorial introductorio, webinars, tutoriales Youtube, foros, libros   | Manual de usuario, tutorial, tutoriales Youtube y servicio técnico (inglés y español), cursos de formación, webinars       |
|                                | <b>Unidades de medida</b>            | Unidad de largo: cm, pies y m. Unidad temporal: s, min, hrs, días, años. Cualquier combinación posible, pero todo el modelo debe tener las mismas unidades   | Unidad de trabajo se puede elegir por cada parámetro ingresado o resultado visualizado, el programa se encarga de estandarizarlo                               | Específica para cada parámetro. Unidad de largo: pies o m, unidad temporal fija. Duración time steps elegibles por usuaria |
|                                | <b>Condiciones iniciales</b>         | Nivel que sature medio en estacionario. Ofrece la posibilidad de modelar el primer paso en estacionario y luego transiente   | Nivel que sature el medio en estacionario. Niveles estacionarios calibrados en transiente  | Nivel que sature el medio en estacionario. Niveles estacionarios calibrados en transiente                                  |
|                                | <b>Valor</b>                         | Licencia perpetua de última versión entre 1.750 y 4.900 USD si es estándar o premium   | Desde 430 USD mensuales en su paquete básico, hasta 570 USD mensuales en paquete completo  | Desde 1.500 USD mensuales, hasta 15.000 USD por licencia perpetua  |
|                                | <b>Corridas simultáneas</b>          | Permite  | Permite  | Permite con una metodología especial   |

## 5.2 Aporte del trabajo

Existen diferentes códigos de modelado de agua subterránea, con distintas capacidades y limitaciones. Para un proyecto es importante determinar que códigos realizan las simulaciones requeridas y son apropiados para representar todas las componentes del sistema hidrogeológico. Determinar las capacidades y limitaciones de los códigos es difícil e incluso imposible a partir de la documentación y sin ejecutarlos para ámbitos relevantes del proyecto. Para la selección eficiente de un código, se necesita por tanto la descripción sistemática y completa de sus características basada en una clasificación informativa (Kumar, 2012). Existen estudios que aportan datos en este ámbito, Kumar (2012) detalla información específica de distintos códigos de modelación; Noriega y otros (2012), realizan una comparación general entre el código MODFLOW y FEFLOW. MINEDW por su parte, es destacado por distintos autores como una potente herramienta para el modelado numérico de rajos (Houmao, 2013; Ugorets, 2015).

Este trabajo constituye un aporte a la base de información que caracteriza los softwares trabajados, particularmente para algunas etapas del modelado de un rajo, debido a que la construcción paralela de modelos en distintos softwares para evaluar la mejor representación, es una metodología improbable por razones económicas y temporales inherentes a los estudios. En este sentido, este ejercicio muestra que todos los softwares son capaces de representar la hidrodinámica de un rajo, pero destacan según sus características, dependiendo de los escenarios de interés y las condiciones del modelo (Tabla 5.1). Por lo tanto, la selección de un código para modelar un rajo, en el proceso integral de un modelo numérico, debe hacerse en consideración a los objetivos del estudio (por ejemplo, input para estudio de estabilidad de taludes del rajo, estudio de funcionamiento hidrogeológico del acuífero explotado, desaguado del rajo, etc.), las variables que se necesita representar (cambio topográfico debido a excavación, incorporación recarga total ingresada, incorporación ZOR, escenarios postminería, etc.), y las limitantes propias del estudio, tales como tiempo o presupuesto. Elegir uno u otro de los softwares utilizados en este trabajo, puede repercutir en el tiempo de construcción del modelo e incluso en los valores de parámetros calibrados, como se ha discutido anteriormente. Otra variable importante a considerar e independiente de las ya nombradas, es la historia de modelación que tiene un proyecto con algún software. Normalmente los modelos son actualizados en el software que se ha utilizado, más que construidos desde cero en otro programa. Esto debido al tiempo y costos asociados al cambio de plataforma de un software a otro, por lo que puede ser una condicionante importante a la hora de escoger un software para actualizar un modelo.

Si bien este trabajo es un aporte a la elección de la herramienta adecuada para cierto tipo de problemática, existen otros aspectos relevantes que considerar para la construcción de un modelo numérico. Dentro de ellos se encuentran el objetivo de la simulación, un modelo conceptual robusto, la existencia y disponibilidad de datos históricos fiables que sean suficientes, las suposiciones consideradas, metodologías de calibración, entre otros. Además, un modelo calibrado posee una incertidumbre inherente que debiese cuantificarse, con el fin de proporcionar información sobre la calidad de sus predicciones. Entonces, hay que tener en cuenta que cualquier modelo calibrado sigue siendo una representación simplificada y estratégica de la realidad, y su solución no es única, por lo que puede servir para un escenario predictivo, mientras que para otros no (Doherty y Simmons, 2013).

Actualmente, la toma de decisiones de manejo, gestión y control de recursos hídricos en ámbitos medioambientales se basa en simulaciones de modelos numéricos, por lo que es importante que estos se aproximen estrechamente a la realidad al recoger y representar todas las variables relevantes en el funcionamiento conceptual del sistema hidrogeológico. En el contexto de toma de

decisiones ambientales, las hipótesis que requieren pruebas a menudo son los resultados no deseados (Middlemis y otros, 2019). La métrica para todas estas decisiones es que la incertidumbre de la predicción de interés se reduzca tanto como sea posible sin dejar de ser sobreestimada (Doherty y Simmons, 2013), debido a que proporciona la base para estimar la probabilidad de que ocurra un suceso (Barnett y otros, 2012). Aún se encuentran en discusión métodos que mejoren el tratamiento de la incertidumbre en el modelado de aguas subterráneas aplicados a impactos ambientales, sin que exista todavía una guía de cómo abordarla (Middlemis y otros, 2019). En este proceso también influye, naturalmente, la estrategia de quien modela, en términos de simplicidad/complejidad del modelo. Por lo tanto, hacer una elección informada de una estrategia de modelado es necesariamente un compromiso, pero que también intenta optimizar la contribución del modelado al proceso de toma de decisiones (Doherty y Simmons, 2013) y enfatiza la responsabilidad de quien modela. Además, se resalta la importancia de entender los modelos numéricos que sustentan una decisión medioambiental, como un proceso integral que está constantemente mejorando, que depende de la calidad de los datos de entrada, de las decisiones tomadas durante su construcción y cuyo resultado es solo una de las inciertas aproximaciones posibles de la realidad, y no la única.

En este sentido, debido a que la etapa de modelación alcanzada en este estudio fue la calibración del modelo estacionario e implementación de condiciones de borde del modelo transiente, y no la etapa predictiva, no es posible establecer alguna predicción sobre el comportamiento de las aguas subterráneas en algún escenario de interés. Dado esto, no se puede realizar alguna recomendación de gestión específica para Los Bronces.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

La construcción de un modelo numérico del rajo Los Bronces en tres softwares distintos (GV, FEFLOW, MINEDW) permitió definir similitudes y diferencias entre ellos mediante criterios comparativos, que era el objetivo de este trabajo.

La comparación de los programas se hizo con base en 7 criterios: Características técnicas inherentes a los códigos, complejidad del uso de la interfaz, preproceso, capacidad de simulación, calibración modelo estacionario, postproceso y otras características. Tras la construcción de los modelos, se destacaron las ventajas y desventajas de cada software en distintos aspectos relacionados a los criterios de comparación. En el caso de la calibración, se compararon los resultados de las tres simulaciones calibradas, tanto de estadígrafos de niveles simulados, de parámetros hidráulicos como de resultados cualitativos.

Los criterios considerados se aplican y limitan al proceso de construcción y calibración del modelo estacionario e incorporación de condiciones de borde para el modelo transiente, dado el alcance temporal de esta memoria de título. Se incluyeron también algunas propiedades variables del modelo transiente y de escenarios de postminería, basado en la documentación oficial de los programas y sus menús específicos, por ejemplo, incorporación de ZOR, formación de *pit lakes* después del cierre de mina, relleno de mina.

Las principales diferencias entre los softwares se encuentran en los aspectos de discretización del espacio, implementación manual vs menús específicos de características como excavación del rajo, ZOR y escenarios postminería, simulación salida de agua subterránea como condición de primer tipo (Dirichlet) o tercer tipo (Cauchy), existencia de condición de admisibilidad de recarga, disponibilidad de herramientas para conocer el funcionamiento profundo del acuífero (*Zone Budget*), cálculos estadísticos integrados en interfaz, representación de variables referentes a resultados, capacidad de exportar resultados de presión de poros y valor comercial.

GV destaca en interacción entre UH y valor comercial, en contraposición a su dificultad al representar geometrías complejas y el tiempo que toma implementación de excavación del rajo. FEFLOW se distingue por la simulación de la salida de agua en condición de primer tipo, zonas de recarga/descarga acuífero y abundante documentación disponible en contraste a la dificultad de representar la excavación del rajo. MINEDW sobresale por sus menús específicos para excavación del rajo, la ZOR y postminería, además de entregar resultados de presión de poros extrapolados como se necesite, mientras que como desventaja se encuentra que no genera malla propia y el efecto que podría tener la admisibilidad de recarga.

De forma general, se concluye que, para modelar un rajo MINEDW resulta ser el software más adecuado en términos de facilidad de construcción y representación tanto de escenarios de explotación como de cierre de mina, e incluso para obtención de datos de entrada de presión de poros. Sin embargo, se debe tener cuidado de que la condición de admisibilidad de recarga no afecte el resultado del modelo. Por otra parte, si lo que interesa es disponer de un postproceso que genere cálculos estadísticos, o entender la interacción entre unidades hidrogeológicas, conviene el uso de GV. Ahora bien, si lo que interesa es trabajar en una interfaz interactiva, o tener más detalle de las zonas de recarga/descarga del acuífero, FEFLOW será la mejor opción. En estos últimos casos, se debe considerar el tiempo de construcción que toma la implementación de parámetros y de la topografía en el modelo.

Los resultados confirman las hipótesis de este trabajo, dado que todos los códigos permiten simular un modelo de un rajo, pero hay softwares que facilitan la construcción de él. Por otro lado, diferencias en las metodologías de los softwares alteran resultados de balance de aguas total, lo que eventualmente podría repercutir en una toma de decisión medioambiental. La selección de un código para modelar un rajo debe hacerse de acuerdo al objetivo del modelo, las características a representar, las limitantes propias del estudio y en consideración a los modelos previamente realizados.

No es posible obtener una conclusión sobre el manejo y gestión de recursos hídricos para Los Bronces, dado que solo se calibraron los modelos estacionarios realizados, sin posibilidad de alcanzar la etapa predictiva del modelo.

Dentro de las limitaciones de este estudio se encuentra la disponibilidad acotada e inexistencia de datos públicos para algunas fechas, que repercuten directamente en el aumento de supuestos y asunciones en el modelo conceptual para ingresarlas en el modelo numérico, lo cual puede generar resultados erróneos que no hay con que comparar, en el caso del modelo estacionario. Además, hay una limitación temporal que restringió la construcción y comparación de modelos solo hasta la calibración de los modelos estacionarios, dejando en la teoría aspectos de los softwares cuando sería interesante comparar los resultados que entreguen del modelo transiente y escenarios de simulación. Como última limitante, se considera el aprendizaje de los tres softwares en tiempo acotado para la realización de este trabajo.

A partir del trabajo realizado, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Realizar la comparación de resultados de calibración y escenarios predictivos en modelo transiente del rajo.
- Replicar la construcción del mismo modelo en distintos softwares para modelar otros escenarios, como salares, minas subterráneas o incorporar otros elementos de interés ambiental cuya toma de decisiones se base en modelos numéricos.
- Incorporar otros códigos de uso gratuito a la comparativa, como Model Muse, para comparar la diferencia de resultados de una interfaz gratuita y una pagada.
- Cuantificar la diferencia y error de los resultados entre diferencias finitas y elementos finitos.

## 7. Bibliografía

- AAS. (1996). Estudio de impacto ambiental “Proyecto de Expansión-2 Mina Los Bronces”
- AAS. (2006). Estudio de impacto ambiental “Proyecto Desarrollo Los Bronces”
- AAS. (2019). Estudio de impacto ambiental “Proyecto Los Bronces Integrado”
- AAS. (2020). Adenda 1 “Proyecto Los Bronces Integrado”
- AGRIMED (2014). Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido. Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Aguirre, L. (1960). Geología de Los Andes de Chile Central, Provincia de Aconcagua. Inst. Invest. Geol., (Chile), Bol., N°9, 70 pp.
- Alloisio, S., Douglas, B., Mckittrick, R., Prigneau P. (2014). Groundwater modelling for large-scale mine dewatering in Chile: MODFLOW or FEFLOW?
- AMTC. (2019). Estimación recarga cuencas Quebrada Dolores, El Plomo y Los Bronces. Anexo AD-196 Adenda 1 Proyecto “Los Bronces Integrado”. Elaborado por Advance Mining Technology Center, Universidad de Chile para AngloAmerican.
- Barnett, B., Townley, L.R., Post, V., Evans, R.E., Hunt, R.J., Peeters, L., Richardson, S., Werner, A.D., Knapp, A. y Boronkay, A. (2012). Australian groundwater modelling guidelines, Waterlines report, National Water Commission, Canberra, Australia.
- B.B.S Singhal, R.P Gupta (2010). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Second Edition, Springer. Hydraulic Properties of Rocks p. 140.
- Beale, G y Read, J. (2014). Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability. CSIRO PUBLISHING. Australia.
- Betancur, R. y Palacio, C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). Dyna Vol. 76, Nro. 160, pp. 39-49
- Carrizo, D., Silva, W., Vela, I. y Comte, D. (2012a). Búsqueda del Control Estructural en la Evolución de la Permeabilidad del Yacimiento Río Blanco – Los Bronces. En XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, Meeting Abstracts, 16-18.
- Carrizo, D., Comte, D. y Silva, W. (2012b). Estructura del distrito cercano Los Bronces, Anglo American Chile: tectónica y tomografía sísmica. AMTC- Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas, Reporte interno para ANGLO AMERICAN Chile. Marzo, 2012.
- Carrizo, D. y Comte, D. (2014). Estudio estructural 3D del proyecto los Sulfatos: geología estructural y tomografía sísmica, distrito Los Bronces, Anglo American Chile. Tecno explora SpA Applied Geoscience Solutions, reporte inédito interno para Anglo American Chile.
- Carrizo, D., Comte, D., Gutiérrez, F., Vela, I., Pablo, M. (2015). Congreso Geológico Chileno XIV, La Serena
- Charrier, R. (1973b). Geología de las Provincias O’Higgins y Colchagua. Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), Santiago, Publicación N° 7, 69 pp.

Charrier, R. (1981b). Geologie der chilenischen Hauptkordillere zwischen 34° 30' südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paleogeographische Entwicklung. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, (A) pp. 36, 270.

Charrier, R., Wyss, A.R., Flynn, J.J., Swisher, C.C. III, Norell, M.A., Zapatta, F., McKenna, M. C., Novaceck, M.J. (1996). New evidence for late Mesozoic - early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the upper Tinguiririca valley (35° S), Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 9, N° 2, pp. 1-30.

Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J.J., Gans, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A.R., Zurita, E. (2002a). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36° S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, 15, pp. 117-139.

Cid, D. (2014). Modelamiento numérico hidrogeológico del Rajo Andacollo. Memoria de título. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

CODELCO (2017), EIA “Adecuación Obras Mineras de Andina Para Continuidad Operacional Actual”, Codelco División Andina (DAND), Anexo 3.8-B Modelo Conceptual Hidrogeológico. Región de Valparaíso, Chile, Realizado por: Amphos 21 para ARCADIS.

Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2016). Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera

Corporación Alta Ley. (2019). Hoja de Ruta 2.0 de la Minería Chilena. Actualización y consensos para una mirada renovada.

Council, G. W. (1999). A Lake Package for MODFLOW (LAK2) - Documentation and User's Manual, HSI Geotrans - A Tetra Tech Company, Sterling, Va, USA.

Cuellar, A (2011). Análisis numérico del impacto físico en las aguas subterráneas debido al drenaje de mina a cielo abierto. Tesis para optar al grado de magíster. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Custodio, E., Llamas, M. (1983). Hidrología subterránea. Segunda Edición. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España.

Deckart, K., Godoy, E., Bertens, A. 2006. Miocene intrusions of the Central Andes: preliminary geochemistry and U/Pb geochronology. Congreso Geológico Chileno XI, Antofagasta, pp. 447–450.

DHI. (2016). FEFLOW 7.0 User Guide.

Dirección General de Aguas (DGA). (2015). Atlas del agua Chile 2016. Santiago, Chile.

Diersch, H.-J.G. (2005). FEFLOW Software—Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System—Reference Manual. WASY GmbH, Berlin, Alemania.

Diersch, H.-J. G. (2009): “30 years of FEFLOW. A Brief Historical Review.”DHI-WASY Aktuell. International Special Edition. DHI-WASY GmbH. Waltersdorfer Strabe 105,12526, Berlin, Alemania. 3,09, 6-9.

Diersch, H.-J.G. (2014). FEFLOW—Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer. DHI-WASY GmbH. Berlin, Alemania.

- Doherty, J. y Simmons, C. T. (2013). Groundwater modelling in decision support: reflections on a unified conceptual framework. *Hydrogeology Journal*, 21, pp. 1531 – 1537.
- Domenico, P.A. y Mifflin, M.D. (1965). Water from low-permeability sediments and land subsidence, *Water Resources Research*, vol. 1, no. 4., pp. 563-576.
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, p.824.
- Drake, R., Curtiss, G., Vergara, M. (1976). Potassium – argón dating of igneous activity in the central Chilean Andes latitude 33°S. *J. Volcanol. Geotherm. Re.*, Vol. 1, p. 285-295.
- Environmental Simulations, Inc (ESI). (2017). *Groundwater Vistas Version 7. Guide to Using*.
- Fock, A. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S, 179 pp, Universidad de Chile, Santiago.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M., Muñoz, M. (2006). Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°-34°S). *Asociación Geológica Argentina, Serie: Publicación Especial 6*, pp. 48-55.
- Foster, S., West, L.J., Bottrell, S., Hilyard, M. W. (2018). A DFN Approach to Evaluating the Hydrogeological Significance of Lithostatic Unloading in Fractured Strata Around Open-Pit Workings. 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference. 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, 20-22 Jun 2018, Seattle, WA, USA.
- Frikken, P., Cooke, D., Walshe, J., Archibald, D., Skarmeta, J., Serrano, L., Vargas, R. (2005). Mineral and Isoopic Zonation in the Sur-Sur Tourmaline Breccia, Río Blanco-Los BRonces Cu-Mo Deposit, Chile: Implications for Ore Genesis. *Society of Economic Geologists. Economic Geology*, v. 100, pp. 935 – 961.
- Godoy, E. (1988). Y Klonn tenía razón: La Formación Colimapu recupera sus miembros basales. *Congreso Geológico Chileno V*, Santiago, vol. 3 pp. H101 – H120
- Godoy, E. (1991). El Corrimiento El Fierro reemplaza a la discordancia intrasenoniana en el río Cachapoal, Chile Central. *Actas VI Congreso Geológico Chileno*, pp. 635-639.
- Godoy, E., Lara, L. (1994). Segmentación estructural andina a los 33°-34°: nuevos datos en la Cordillera Principal. *Actas VII Congreso Geológico Chileno*, Concepción, Vol. 2, pp. 1344 – 1348.
- Godoy, E., Yáñez, G., Vera, E. (1999). Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Central Chilean Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*, Vol. 306, N° 2, pp. 217-236.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, S.A. Madrid, España.
- Hamill, L., Bell, F.G. (1986). *Groundwater Resource Development*. Butterworths, UK.
- Hémera. (2019). Documento técnico: Información Geología, Geomorfología y Riesgos Naturales Sectores Los Bronces, Los Bronces Subterráneo y STP. Anexo AD-151 Adenda 1 Proyecto “Los Bronces Integrado”. Elaborado por Hémera Centro de Observación de la Tierra, Universidad Mayor para AngloAmerican.

Heath, R.C. (1983). Basic ground-water hydrology, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86p.

Houmao, L. (2013). Using MINEDW to simulate pore pressure as input for FLAC3D and 3DEC. En Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics – 2013. Proceedings of the 3rd International FLAC/DEM Symposium, October 22-24, 2013, Hangzhou, P.R. China, Zhu, Detournay, Hart & Nelson (eds.), Itasca International Inc., Minneapolis.

Icold Chile. (S.F). Los Bronces. Recuperado de <http://www.icoldchile.cl/directorio/suelo-enrocado/los-bronces/>.

Irrázaval, V., Sillitoe, R., Wilson, A., Toro, J., Robles, W. Lyall, G. (2010). Discovery History of a Giant, High-Grade, Hypogene Porphyry Copper-Molybdenum Deposit at Los Sulfatos, Los Bronces-Río Blanco District, Central Chile. Society of Economic Geology In Special Publication No. 15.

Itasca International Inc. (2018). MINEDW 3.05 User Manual.

Jaros, J. y Zelman, J., 1967. La relación estructural entre las formaciones Abanico y Farellones en la Cordillera del Mesón, Provincia de Aconcagua, Chile. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Publication N° 34, 8 pp.

Kay, S.M. and Kurtz, A. (1995). Magmatic and tectonic characterization of the El Teniente region. Informe Inédito para CODELCO Chile, 180 p.

Klohn, C. (1960). Geología de la Cordillera de Los Andes de Chile Central, Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol. N°8, 95 p.

Kumar, C. P. (2012). Groundwater Modelling Software-Capabilities and Limitations. Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT) Vol. 1, Nro 2, pp 46-57.

Levi, B. (1970). Burial metamorphic episodes in the Andean geosyncline, Central Chile. Geol. Rundsch., Vol. 59, N°3, p. 994-1013.

López, L., Vergara, M. (1982). Geoquímica y petrogénesis de rocas granodioríticas asociadas con el yacimiento cuprífero Rio Blanco – Los Bronces. Revista Geológica de Chile N° 15, pp. 59 - 70

Marchand, G., Waterhouse, J. y Chrisostomo, J. (2010). Mudstone depressurisation behaviour in an open pit coal mine, Indonesia. En Freund, W., ed. IMWA Minewater and innovative thinking, Sydney. IMWA, p.437-440.

Martinez, C., Ugorets, V. (2010). Use of Numerical Groundwater Modelling for Mine Dewatering Assessment

McDonald, M. G. y Harbaugh, A. W. (2003): "The History of MODFLOW." Ground Water, 41, 2, 280-283.

Middlemis, M. (2000). Murray-Darling Basin Comission. Groundwater flow modelling guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Western Australia

Middlemis, H., Walker, G., Peeters L., Richardson, S., Hayes, P. y Moore, C. (2019). Groundwater modelling uncertainty – implications for decision making. Summary report of the national groundwater modelling uncertainty workshop, 10 July 2017, Sydney, Australia. Flinders University, National Centre for Groundwater Research and Training, Australia.

Minería Chilena. (2020). Sequía golpea producción de Los Bronces. Minería Chilena. Recuperado de <https://www.mch.cl/2020/01/23/sequia-golpea-produccion-de-los-bronces/>.

Morris DA, Johnson AI (1967). Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by Hydrologic Laboratories of the U.S. Geological Survey 1948-1960. US Geol. Surv. Water Supply Paper, 1839-D, p. 42.

Moscoso, R., Padilla, H., Rivano, S. (1982). Hoja Los Andes, Región de Valparaíso, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile, Carta 52, 1:250.000, 67 pp.

Noriega, R., Fernández, J., Álvarez, L. (2012). Estudio comparativo de los simuladores de flujo subterráneo Visual MODFLOW y FEFLOW 6.0. 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica.

Piquer, J. y Skarmeta, J. (2012) Structural control on stratigraphy, magmatism and mineralization in the Rio Blanco-Los Bronces district, Central Chile. Conferencia Congreso Geológico Chileno XIII, Antofagasta.

Piquer, J., Skarmeta, J., Cooke, D. (2015). Structural Evolution of the Rio Blanco – Los Bronces District, Andes of Central Chile: Controls on Stratigraphy, Magmatism, and Mineralization. Society of Economic Geologists. Economic Geology, v. 110, pp. 1995 – 2023.

Preene M. (2018). Dewatering Reference Work entry. Springer

Quiroga, R. 2013. Análisis Estructural de los Depósitos Cenozoicos de la Cordillera Principal entre el Cerro Provincia y el Cordón El Quempe, Región Metropolitana, Chile (33°18' y 33°25' S). Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Ramos, V. A. (1996). Evolución Tectónica de la Alta Cordillera de San Juan y Mendoza. In Geología de la Región del Aconcagua (Ramos, V.A.; editor). Subsecretaría de Minería de la Nación: pp. 447-460. Buenos Aires.

Riegger, J. (2004). Proc. FEM\_MODFLOW Conference. Hydrogeological Models - A consistent Framework for the Generation of Groundwater Models. Carlsbad, Czech Republic.

Serrano, L., Vargas, R., Stambuk, V., Aguilar, C., Galeb, M., Holgrem, C., Contreras, A., Godoy, S., Vela, I., Skewes, A., Stern, C. (1996). The late miocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes: Society of Economic Geologists Special Publication 5, v.5, p. 119-130.

Servicio de Evaluación e Impacto Ambiental (SEA). (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.

Simpson, M.J. y Clement, T.P. (2003). Comparison of finite difference and finite element solutions to the variably saturated flow equation. Journal of hydrology 270, pp. 49-64.

Stacey, T., Xianbin, Y., Armstrong, R. y Keyter, G. (2003). New slope stability considerations for deep open pit mines. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 103(6), pp.373-389.

Struckmeier, W., Margat, J. (1995). Hydrogeological Maps: A guide and a Standard Legend. International Association of Hydrogeologists. Vol. 17, Hannover.

Thiele, R. 1980. Carta Geológica de Chile 1:250.000. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 39: 51 p.

Toro, J.C., Ortúzar, J., Zamorano, J., Cuadra, P., Hermosilla, J., Spröhnle, C. (2012). Protracted Magmatic-Hydrothermal History of the Río Blanco-Los Bronces District, Central Chile: Development of World's Greatest Known Concentration of Copper. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 16, 105–126.

Ugorets, V. (2015). Benefits of MINEDW Code for Mine Dewatering Projects in Complex Hydrogeological Settings. SRK Consulting, Denver, CO, USA.

Vergara, M., Drake, R. (1978). Edades K-Ar y su implicancia en la geología regional de Chile. Universidad de Chile. Departamento de Geología. Ser. Comun., N°23, 11p.

Vergara, M.; Drake, R. (1979). Edades K-Ar en secuencias volcánicas continentales postneocomianas de Chile central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. Asoc. Geol. Argent., Rev., Vol.24, N°1, p.42-52.

Vergara, M., Charrier, R., Munizaga, F., Rivano, S., Sepúlveda, P., Thiele, R., Drake, R. (1988). Miocene volcanism in the central Chilean Andes. Journal of South American Earth Sciences 1, 199-209.

Warnaars, F., Holmgren, C., Barassi, C. (1985). Porphyry Copper and Tourmaline Breccias at Los Bronces-Río Blanco, Chile. Economic Geology, Vol. 80, 1985, pp. 1544 – 1565.

WASY. (2012). IfmLake Plug-In. Disponible en: <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-by-dhi-tools/groundwaterandporousmediatools/ifmlake%20plugin>, DHI Worldwide.

Wingle, W. L. y Sinton, P. (2015). A Pit-Lake Module for FEFLOW. MODFLOW and More 2015: Modeling a Complex World - IGWMC - Maxwell, Hill, Zheng & Tonkin

## 8. Anexos

### 8.1 Anexo 1

#### I) Datos de pluviometría [mm]

*Estación Estero Yerba Loca antes junta Río San Francisco - DGA*

*Tabla 8.1: Registro pluviométrico Estación Estero Yerba Loca antes Río San Francisco - DGA*

| AÑO  | ENE  | FEB  | MAR  | ABR   | MAY   | JUN   | JUL  | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC  |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 2009 |      |      |      |       |       | 130,4 | 37,7 | 99,6  | 117,4 | 10,3  | 1,2   | 0    |
| 2010 | 0    | 0,5  | 0    | 3,1   | 62,6  | 100,6 | 51   | 7,3   | 33    | 17,6  | 58,3  | 2,4  |
| 2011 | 0,1  | 19,4 | 0    | 3,4   | 0,6   | 58,3  | 58,7 | 42,6  |       | 17,1  | 2     | 0    |
| 2012 | 8,4  | 0    | 0    | 97,6  | 50,9  | 81,1  | 2,2  | 74,4  |       |       | 0     |      |
| 2013 | 4,3  | 4,8  | 0    | 2,6   | 101,1 | 42,1  | 21,2 | 54,8  | 25    | 2,8   | 0,6   | 0,3  |
| 2014 | 1,5  | 2,9  | 1,8  | 1,7   | 17,2  | 88    | 19,8 | 62,6  | 30,2  | 1     | 9,6   | 0,6  |
| 2015 | 0    | 15,7 | 43,6 | 0     | 1,2   | 0     | 54,4 | 142,8 | 54,1  | 59,6  | 12,3  | 0    |
| 2016 | 11,1 | 0    | 0    | 140,5 | 49,3  | 67    | 78,2 | 0,4   | 0     | 41,81 | 42,47 | 53,5 |
| 2017 | 0    | 0,1  | 5    | 16,6  | 102,4 | 75,1  | 21,1 |       |       |       |       |      |

*Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA*

*Tabla 8.2: Registro pluviométrico Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA*

| AÑO  | ENE  | FEB  | MAR | ABR   | MAY  | JUN  | JUL  | AGO   | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  |
|------|------|------|-----|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 2013 |      | 0    | 0   | 4,8   | 0    | 66   | 39   | 75    | 36,4 | 0    | 1,6  | 0,8  |
| 2014 | 3    | 12,2 | 2,2 | 1,6   | 29,8 | 118  | 14,4 | 64,4  | 28,8 | 4,4  | 24,6 | 0,4  |
| 2015 | 0    | 21,2 | 88  | 0     | 4    | 0    | 94   | 260,6 | 54,4 | 84,2 | 23,4 | 0    |
| 2016 | 10,9 | 0    | 0   | 119,9 | 47,5 | 56,5 | 52,2 | 0,7   | 0    | 56,7 | 7,3  | 49,9 |
| 2017 | 0    | 0,1  | 1,2 | 16,2  | 92,2 | 50   | 15,5 |       |      |      |      |      |
| 2018 | 0    | 0    | 0   | 0     | 0    | 20,3 | 1,3  | 9,7   |      |      |      |      |
| 2019 | 0    | 0    | 1,3 | 0     | 7,2  | 26,7 | 10,3 | 0,5   |      | 11,6 | 0,1  | 0    |
| 2020 | 0    | 0    | 0   | 5,4   | 8,8  |      |      |       |      |      |      |      |

*Estación Los Bronces – AAS*

*Tabla 8.3: Registro pluviométrico Estación Los Bronces – AAS*

| <b>AÑO</b>  | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>1980</b> | 8          | 15         | 0          | 217        | 305        | 131        | 279        | 7          | 126        | 39         | 12         | 0          |
| <b>1981</b> | 0          | 9          | 18         | 18         | 241        | 44         | 29         | 43         | 14         | 0          | 4          | 1          |
| <b>1982</b> | 1          | 1          | 10         | 1          | 154        | 704        | 437        | 122        | 147        | 13         | 7          | 0          |
| <b>1983</b> | 29         | 0          | 0          | 40         | 60         | 159        | 231        | 93         | 22         | 5          | 3          | 0          |
| <b>1984</b> | 0          | 0          | 0          | 0          | 117        | 160        | 442        | 67         | 86         | 20         | 13         | 5          |
| <b>1985</b> | 2          | 0          | 20         | 11         | 69         | 32         | 125        | 1          | 53         | 144        | 0          | 0          |
| <b>1986</b> | 0          | 3          | 0          | 100        | 229        | 343        | 8          | 204        | 8          | 70         | 45         | 0          |
| <b>1987</b> | 4          | 0          | 15         | 18         | 120        | 99         | 670        | 345        | 44         | 60         | 0          | 0          |
| <b>1988</b> | 0          | 0          | 0          | 8          | 54         | 37         | 88         | 116        | 16         | 0          | 4          | 3          |
| <b>1989</b> | 0          | 0          | 0          | 37         | 109        | 29         | 195        | 291        | 61         | 2          | 2          | 2          |
| <b>1990</b> | 0          | 0          | 24         | 8          | 33         | 98         | 66         | 80         | 109        | 11         | 5          | 6          |
| <b>1991</b> | 0          | 0          | 0          | 135        | 221        | 253        | 367        | 4          | 106        | 13         | 8          | 15         |
| <b>1992</b> | 3          | 0          | 26         | 62         | 161        | 221        | 89         | 90         | 46         | 14         | 59         | 1          |
| <b>1993</b> | 10         | 3          | 0          | 202        | 215        | 93         | 60         | 24         | 18         | 13         | 5          | 0          |
| <b>1994</b> | 0          | 0          | 0          | 111        | 51         | 95         | 298        | 32         | 107        | 28         | 6          | 0          |
| <b>1995</b> | 19         | 3          | 0          | 84         | 34         | 147        | 122        | 49         | 57         | 16         | 0          | 0          |
| <b>1996</b> | 15         | 0          | 0          | 34         | 18         | 39         | 64         | 39         | 11         | 2          | 3          | 7          |
| <b>1997</b> | 0          | 0          | 16         | 10         | 109        | 540        | 45         | 249        | 295        | 74         | 4          | 0          |
| <b>1998</b> | 0          | 10         | 15         | 75         | 21         | 67         | 3          | 1          | 42         | 0          | 0          | 0          |
| <b>1999</b> | 18         | 0          | 5          | 59         | 79         | 164        | 24         | 154        | 172        | 33         | 0          | 2          |
| <b>2000</b> | 3          | 2          | 0          | 42         | 51         | 571        | 124        | 18         | 202        | 3          | 12         | 0          |
| <b>2001</b> | 0          | 0          | 10         | 30         | 58         | 18         | 371        | 167        | 31         | 41         | 3          | 0          |
| <b>2002</b> | 22         | 0          | 32         | 38         | 312        | 345        | 212        | 245        | 57         | 37         | 0          | 13         |
| <b>2003</b> | 20         | 0          | 0          | 1          | 140        | 140        | 121        | 19         | 59         | 0          | 43         | 0          |
| <b>2004</b> | 0          | 3          | 16         | 74         | 8          | 117        | 71         | 49         | 29         | 29         | 71         | 2          |
| <b>2005</b> | 22         | 0          | 44         | 49         | 227        | 369        | 8          | 201        | 69         | 17         | 13         | 0          |
| <b>2006</b> | 0          | 0          | 0          | 6          | 51         | 198        | 361        | 81         | 48         | 46         | 3          | 0          |
| <b>2007</b> | 0          | 4          | 25         | 8          | 63         | 243        | 162        | 70         | 0          | 10         | 6          | 15         |
| <b>2008</b> | 4          | 20         | 18         | 36         | 187        | 123        | 67         | 243        | 22         | 0          | 0          | 4          |
| <b>2009</b> | 6          | 12         | 4          | 0          | 23         | 189        | 35         | 157        | 86         | 10         | 4          | 0          |
| <b>2010</b> | 0          | 0          | 0          | 0          | 77         | 134        | 79         | 45         | 18         | 8          | 36         | 3          |
| <b>2011</b> | 0          | 6          | 0          | 1          | 9          | 136        | 68         | 189        | 30         | 30         | 0          | 0          |
| <b>2012</b> | 0          | 0          | 0          | 104        | 85         | 146        | 5          | 82         | 16         | 47         | 0          | 0          |
| <b>2013</b> | 0          | 0          | 0          | 3          | 111        | 102        | 40         | 72         | 79         | 11         | 9          | 0          |
| <b>2014</b> | 0          | 22         | 14         | 5          | 67         | 133        | 71         | 42         | 38         |            |            |            |
| <b>2015</b> | 0          | 3          | 25         |            |            |            |            |            |            |            |            |            |

## II) Fluviometría [m<sup>3</sup>/s]

*Estación Estero Yerba Loca antes junta Rio San Francisco – DGA*

*Tabla 8.4: Registro fluviométrico Estación Estero Yerba Loca antes junta Rio San Francisco – DGA*

| AÑO  | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1986 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 2,04 | 8,48 |
| 1987 | 3,28 | 2,45 | 1,78 | 0,7  | 0,34 | 0,34 | 1,11 | 1,45 | 1,08 | 2,05 | 5,08 | 5,34 |
| 1988 | 5,32 | 2,77 | 1,47 | 0,74 | 0,33 | 0,29 | 0,26 | 0,28 | 0,3  | 0,41 | 1,02 | 1,51 |
| 1989 | 2,04 | 1,64 | 0,65 | 0,45 |      | 0,37 | 0,3  | 0,47 | 0,73 | 1,15 | 2,27 | 2,25 |
| 1990 | 2,02 | 1,41 | 0,74 | 0,4  | 0,29 | 0,25 | 0,25 | 0,23 | 0,32 | 0,45 | 1,11 | 1,48 |
| 1991 | 1,13 | 0,86 | 0,66 | 0,35 | 0,33 | 0,35 | 0,64 | 0,45 | 0,88 | 1,02 | 2,38 | 2,74 |
| 1992 | 3,9  | 1,87 | 1,53 | 0,98 | 0,76 | 0,67 | 0,6  | 0,54 | 0,84 | 1,24 | 1,83 | 2,65 |
| 1993 | 3,45 | 2,07 | 1,51 | 0,95 | 1,16 | 0,56 | 0,48 | 0,35 | 0,35 | 0,64 | 1,35 | 2,48 |
| 1994 | 2,8  | 1,55 | 0,81 | 0,07 | 0,2  | 0,27 | 0,32 | 0,4  | 0,46 | 0,63 | 1,36 | 2,58 |
| 1995 | 1,91 | 1,19 | 0,75 | 0,5  | 0,37 | 0,31 | 0,34 | 0,35 | 0,54 | 0,45 | 1,28 | 1,92 |
| 1996 | 1,18 | 1,06 | 0,69 | 0,36 | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,21 | 0,2  | 0,24 | 0,41 | 0,67 |
| 1997 | 1,09 | 0,81 | 0,52 | 0,25 | 0,26 | 0,38 | 0,33 | 0,62 | 1,04 | 1,16 | 2,19 | 4,37 |
| 1998 | 4,98 | 1,86 | 0,86 | 0,46 | 0,38 | 0,28 | 0,23 | 0,18 | 0,2  | 0,22 | 0,45 | 1,09 |
| 1999 | 1,1  | 1,16 | 0,6  | 0,29 | 0,24 | 0,2  | 0,25 | 0,29 | 0,5  | 0,77 | 1,16 | 1,3  |
| 2000 | 1,74 | 0,95 | 0,61 | 0,38 | 0,22 | 0,25 | 0,38 | 0,45 | 0,62 | 1,48 | 1,85 | 4,13 |
| 2001 | 3,49 | 2,42 | 1,1  | 0,66 | 0,54 | 0,42 | 0,35 | 0,47 | 0,62 | 0,98 | 1,27 | 2,78 |
| 2002 | 1,6  | 1,18 | 0,73 | 0,53 | 0,47 | 0,68 | 0,62 | 1    | 0,95 | 1,29 | 2,28 | 3,2  |
| 2003 | 3,44 | 2,36 | 1,18 | 0,58 | 0,42 | 0,58 | 0,56 | 0,37 | 0,4  | 0,41 | 0,76 | 1,44 |
| 2004 | 0,81 | 0,59 | 0,27 | 0,22 | 0,21 | 0,2  | 0,21 | 0,38 | 0,59 | 0,44 | 1    | 1,85 |
| 2005 | 1,92 | 1,22 | 0,76 | 0,39 | 0,35 | 0,53 | 0,42 | 0,59 | 0,96 | 1,45 | 3,2  | 4,39 |
| 2006 | 4,3  | 2,51 | 0,96 | 0,69 | 0,56 | 0,36 | 0,41 | 0,32 | 0,43 | 0,98 | 2,41 | 3,18 |
| 2007 | 2,55 | 1,59 | 1,06 | 0,61 | 0,58 | 0,46 | 0,43 | 0,43 | 0,18 | 0,72 | 1,29 | 1,71 |
| 2008 | 1,99 | 1,23 | 1,47 | 0,89 | 0,79 | 0,52 | 0,41 | 0,66 | 0,97 | 1,33 | 2,11 | 1,68 |
| 2009 | 1,69 | 1,18 | 0,79 | 0,56 | 0,39 | 0,35 | 0,35 | 0,38 | 0,68 | 0,82 | 1,03 | 1,72 |
| 2010 | 1,57 | 1,03 | 1,01 | 0,5  | 0,35 | 0,31 | 0,29 | 0,26 | 0,27 | 0,35 | 0,61 | 0,86 |
| 2011 | 0,88 | 0,91 | 0,66 | 0,45 | 0,29 | 0,23 | 0,21 | 0,21 | 0,27 | 0,36 | 0,65 | 1,01 |
| 2012 | 1,19 | 1,15 | 0,67 | 0,36 | 0,55 | 0,21 | 0,18 | 0,19 | 0,36 | 0,56 | 1,43 | 1,81 |
| 2013 | 2,18 | 1,5  | 0,64 | 0,27 | 0,22 | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 0,27 | 0,42 | 1,08 | 2,11 |
| 2014 | 1,74 | 0,83 | 0,48 | 0,31 | 0,24 | 0,19 | 0,18 | 0,2  | 0,2  | 0,38 | 0,7  | 0,91 |
| 2015 | 1,03 | 0,83 | 0,53 | 0,35 | 0,25 | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,34 | 0,69 | 1,61 | 2,71 |
| 2016 | 2,03 | 1,37 | 0,98 | 0,75 | 0,49 | 0,47 | 0,37 | 0,33 | 0,44 | 0,63 | 1,45 | 2,24 |
| 2017 | 2,36 | 0,89 | 0,78 | 0,41 | 0,33 | 0,34 | 0,4  | 0,37 | 0,5  | 0,68 | 1    | 1,77 |
| 2018 | 1,1  | 1,08 | 0,41 | 0,29 | 0,22 | 0,23 | 0,23 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,68 | 0,94 |
| 2019 | 1,19 | 0,92 | 0,42 | 0,26 | 0,16 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,11 | 0,1  | 0,29 | 0,57 |
| 2020 | 0,92 | 0,57 | 0,45 | 0,22 | 0,19 |      |      |      |      |      |      |      |

*Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA*

*Tabla 8.5: Registro fluviométrico Estación Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca – DGA*

| <b>AÑO</b>  | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>2009</b> |            |            |            |            |            |            |            | 0,25       | 0,61       |            |            |            |
| <b>2010</b> |            |            |            |            |            |            |            |            | 0,2        | 0,21       | 0,26       | 0,15       |
| <b>2011</b> | 0,14       | 0,12       | 0,19       | 0,18       | 0,21       | 0,14       | 0,17       | 0,17       | 0,15       | 0,16       | 0,16       | 0,17       |
| <b>2012</b> | 0,15       | 0,11       | 0,11       | 0,11       | 0,09       | 0,11       | 0,12       | 0,1        | 0,1        | 0,11       | 0,2        | 0,12       |
| <b>2013</b> | 0,12       | 0,18       | 0,15       | 0,11       | 0,12       | 0,1        | 0,1        | 0,1        |            | 0,1        | 0,12       | 0,15       |
| <b>2014</b> | 0,17       | 0,13       | 0,13       | 0,12       | 0,11       | 0,1        | 0,1        | 0,1        | 0,1        | 0,1        | 0,1        | 0,12       |
| <b>2015</b> | 0,12       | 0,12       | 0,11       | 0,12       | 0,1        | 0,11       | 0,12       | 0,26       | 0,26       | 0,25       | 0,72       | 1,59       |
| <b>2016</b> | 0,53       | 0,13       | 0,08       | 0,25       | 0,27       | 0,44       | 0,35       | 0,4        | 0,5        | 0,56       | 1,06       | 1,21       |
| <b>2017</b> | 0,24       | 0,13       | 0,12       | 0,17       | 0,15       | 0,15       | 0,15       | 0,15       | 0,16       | 0,17       | 0,48       | 0,29       |
| <b>2018</b> | 0,14       | 0,14       | 0,13       | 0,11       | 0,11       | 0,11       | 0,11       | 0,12       | 0,13       | 0,14       | 0,14       | 0,15       |
| <b>2019</b> | 0,14       | 0,14       | 0,13       | 0,13       | 0,13       | 0,14       | 0,14       | 0,13       | 0,13       | 0,13       | 0,13       | 0,13       |
| <b>2020</b> | 0,13       | 0,13       | 0,13       | 0,13       | 0,13       |            |            |            |            |            |            |            |

*Estación Río San Francisco en paso Marchant – AAS*

*Tabla 8.6: Registro fluviométrico Estación Río San Francisco en paso Marchant – AAS*

| <b>AÑO</b>  | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>2007</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | 0,38       |
| <b>2008</b> | 0,12       | 0,15       | 0,16       | 0,08       | 0,16       | 0,24       | 0,14       | 0,11       | 0,19       | 0,45       | 2,22       | 1,73       |
| <b>2009</b> | 0,67       | 0,38       | 0,24       | 0,13       | 0,11       | 0,1        | 0,11       | 0,11       | 0,22       | 0,32       | 0,49       | -          |
| <b>2010</b> | 0,64       | 0,21       | 0,3        | 0,27       | 0,21       | 0,26       | 0,2        | 0,16       | 0,08       | 0,09       | 0,13       | 0,05       |
| <b>2011</b> | 0,08       | 0,1        | 0,09       | 0,05       | 0,05       | 0,04       |            |            |            |            |            |            |
| <b>2012</b> | 0,13       | 0,1        | 0,09       | 0,09       | 0,11       | 0,1        | 0,08       | 0,03       | 0,06       | 0,03       | 0,39       | 0,24       |
| <b>2013</b> | 0,13       | 0,22       | 0,09       | 0,04       | 0,07       | 0,02       | 0,03       | 0,04       | 0,04       | 0,02       | 0,21       | 0,11       |
| <b>2014</b> | 0,15       | 0,13       | 0,13       | 0,09       | 0,04       | 0,05       | 0,02       | 0,02       | 0,02       | 0,05       | 0,09       | 0,15       |
| <b>2015</b> | 0,1        | 0,1        | 0,11       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2016</b> | 0,37       | 0,2        | 0,1        | 0,22       | 0,27       | 0,28       | 0,27       | 0,25       | 0,33       | 0,37       | 0,78       | 0,96       |
| <b>2017</b> | 0,28       | 0,18       | 0,14       | 0,1        | 0,11       | 0,22       | 0,22       | 0,23       | 0,23       | 0,22       | 0,38       | 0,34       |
| <b>2018</b> | 0,21       | 0,14       | 0,06       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |

### III) Parámetros hidráulicos

Tabla 8.7: Datos de ensayos hidráulicos

| Sondaje   | UTM (WGS 84) |           | Tramo(m) |       | Tipo de prueba | K (m/s) | Tipo de prueba | Almacenamiento | Litología    | Fecha |
|-----------|--------------|-----------|----------|-------|----------------|---------|----------------|----------------|--------------|-------|
|           | UTM E        | UTM N     |          |       |                |         |                |                |              |       |
| PI-2      | 380.899      | 6.331.812 | 135,0    | 150,0 | Packer         | 2.E-09  | -              | -              | Brecha Gris  | 2008  |
| PRE-6     | 380.763      | 6.330.658 | 394,3    | 400,0 | Lugeon         | 3.E-09  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PRE-11    | 379.637      | 6.330.279 | 271,2    | 277,4 | Lugeon         | 4.E-09  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PI-5      | 380.980      | 6.330.590 | 122,0    | 127,0 | Packer         | 5.E-09  | -              | -              | QMZ          | 2008  |
| S1        | 376.109      | 6.328.780 | 24,0     | 34,0  | Lugeon         | 6.E-09  | -              | -              | Roca         | 1998  |
| PRE-6     | 380.763      | 6.330.658 | 340,9    | 354,2 | Lugeon         | 7.E-09  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PI-4      | 380.893      | 6.331.181 | 165,0    | 188,0 | Packer         | 1.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2008  |
| PRE-11    | 379.637      | 6.330.279 | 340,8    | 350,0 | Lugeon         | 1.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PRE-8     | 380.414      | 6.333.070 | 388,6    | 400,0 | Lugeon         | 1.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PRE-1     | 381.036      | 6.329.852 | 360,1    | 363,0 | Lugeon         | 3.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PI-5      | 380.980      | 6.330.590 | 116,0    | 120,0 | Packer         | 3.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2008  |
| PRE-10    | 381.599      | 6.332.455 | 362,9    | 369,2 | Lugeon         | 3.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PRE-9     | 380.575      | 6.331.260 | 138,9    | 147,1 | Lugeon         | 3.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| S2        | 376.075      | 6.328.866 | 22,6     | 30,0  | Lugeon         | 4.E-08  | -              | -              | Roca         | 1998  |
| PRE-3     | 379.831      | 6.330.938 | 172,2    | 200,7 | Lugeon         | 5.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| SPLS-2    | 375.765      | 6.328.723 | 28,0     | 31,0  | Lugeon         | 6.E-08  | -              | -              | Roca         | 2008  |
| PRE-7     | 381.215      | 6.332.195 | 305,3    | 320,0 | Lugeon         | 7.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| PRE-10    | 381.599      | 6.332.455 | 395,6    | 400,0 | Lugeon         | 7.E-08  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| SPLS-4    | 375.750      | 6.328.614 | 32,0     | 35,0  | Lugeon         | 9.E-08  | -              | -              | Roca         | 2008  |
| PRE-2     | 380.390      | 6.331.736 | 220,3    | 234,3 | Lugeon         | 1.E-07  | -              | -              | QMZ / Brecha | 2014  |
| P 01      | 380.141      | 6.332.511 | -        | -     | PB             | 1.E-07  | Theis          | 6,17,E-04      | -            | 2017  |
| PRE-1     | 381.036      | 6.329.852 | 268,7    | 275,2 | Lugeon         | 1.E-07  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| P 03      | 380.501      | 6.332.629 | -        | -     | PB             | 2.E-07  | Theis          | 6,44,E-04      | -            | 2017  |
| SG-8      | 381.646      | 6.331.232 | 374,0    | 377,3 | Lugeon         | 2.E-07  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| S1        | 376.109      | 6.328.780 | 34,0     | 40,0  | Lugeon         | 2.E-07  | -              | -              | Roca         | 1998  |
| PB 09     | 379.884      | 6.332.212 | -        | -     | PB             | 2.E-07  | -              | -              | -            | 2017  |
| PRE-2     | 380.390      | 6.331.736 | 197,1    | 218,7 | Lugeon         | 3.E-07  | -              | -              | Brecha / QMZ | 2014  |
| PO3       | 381.161      | 6.331.070 | 0,0      | 150,0 | Recuperación   | 3.E-07  | -              | -              | QMZ          | 2004  |
| PB 07     | 380.842      | 6.332.203 | -        | -     | PB             | 4.E-07  | -              | -              | -            | 2017  |
| SPLS-3    | 375.794      | 6.328.638 | 29,3     | 32,3  | Lugeon         | 4.E-07  | -              | -              | Roca         | 2008  |
| PRE-8     | 380.414      | 6.333.070 | 346,4    | 357,0 | Lugeon         | 5.E-07  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| P 05      | 380.748      | 6.332.527 | -        | -     | PB             | 5.E-07  | Theis          | 7,81,E-03      | -            | 2017  |
| PM-20     | 380.133      | 6.332.504 | -        | -     | PB             | 6.E-07  | Copper-Jacob   | 2,20,E-02      | -            | 2017  |
| P 04      | 380.668      | 6.332.619 | -        | -     | PB             | 6.E-07  | Theis          | 2,65,E-03      | -            | 2017  |
| PM-22     | 380.497      | 6.332.627 | -        | -     | PB             | 6.E-07  | Copper-Jacob   | 1,00,E-04      | -            | 2017  |
| LB140-181 | 380.748      | 6.332.524 | -        | -     | PB             | 9.E-07  | Copper-Jacob   | 1,27,E-03      | -            | 2017  |
| S2        | 376.075      | 6.328.866 | 30,0     | 35,5  | Lugeon         | 1.E-06  | -              | -              | Roca         | 1998  |
| PRE-9     | 380.575      | 6.331.260 | 55,3     | 67,0  | Lugeon         | 1.E-06  | -              | -              | QMZ          | 2014  |
| SPLS-4    | 375.750      | 6.328.614 | 19,4     | 25,2  | Lugeon         | 1.E-06  | -              | -              | Roca         | 2008  |
| PI-4      | 380.893      | 6.331.181 | 57,2     | 59,8  | Packer         | 1.E-06  | -              | -              | QMZ          | 2008  |

|           |         |           |       |       |              |        |              |           |               |      |
|-----------|---------|-----------|-------|-------|--------------|--------|--------------|-----------|---------------|------|
| SPLS-4    | 375.750 | 6.328.614 | 25,0  | 30,0  | Lugeon       | 2.E-06 | -            | -         | Roca          | 2008 |
| SPLS-3    | 375.794 | 6.328.638 | 12,1  | 17,2  | Lugeon       | 3.E-06 | -            | -         | Roca          | 2008 |
| P 06      | 380.785 | 6.332.328 | -     | -     | PB           | 3.E-06 | Theis        | 2,19,E-03 | -             | 2017 |
| SPLS-3    | 375.794 | 6.328.638 | 20,0  | 25,0  | Lugeon       | 3.E-06 | -            | -         | Roca          | 2008 |
| PI-3      | 380.520 | 6.331.648 | 189,0 | 200,0 | Packer       | 3.E-06 | -            | -         | QMZ           | 2008 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 12,7  | 18,0  | Lefranc      | 3.E-06 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| PM-13     | 380.382 | 6.331.770 | -     | -     | PB           | 4.E-06 | Copper-Jacob | 5,39,E-06 | -             | 2017 |
| S4        | 376.143 | 6.328.832 | 20,3  | 24,3  | Lugeon       | 6.E-06 | -            | -         | Roca          | 1998 |
| SPLS-3    | 375.794 | 6.328.638 | 17,0  | 20,2  | Lugeon       | 7.E-06 | -            | -         | Roca          | 2008 |
| PB 11     | 380.499 | 6.331.542 | -     | -     | PB           | 8.E-06 | -            | -         | -             | 2017 |
| PO6       | 380.632 | 6.330.607 | 0,0   | 168,0 | Recuperación | 8.E-06 | -            | -         | QMZ / Falla   | 2004 |
| P 02      | 380.371 | 6.331.748 | -     | -     | PB           | 8.E-06 | Theis        | 7,56,E-06 | -             | 2017 |
| PO4       | 380.648 | 6.330.564 | 0,0   | 144,0 | Recuperación | 9.E-06 | -            | -         | QMZ / Falla S | 2004 |
| PI-2      | 380.899 | 6.331.812 | 46,5  | 50,5  | Packer       | 1.E-05 | -            | -         | QMZ           | 2008 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 0,0   | 3,0   | Lefranc      | 2.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 100,3 | 100,3 | Lefranc      | 2.E-05 | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 6,0   | 9,0   | Lefranc      | 3.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 3,0   | 6,0   | Lefranc      | 3.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S4        | 376.143 | 6.328.832 | 5,0   | 10,0  | Lefranc      | 4.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 21,0  | 25,0  | Lefranc      | 5.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 71,3  | 71,3  | Lefranc      | 5.E-05 | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| PB 10     | 380.331 | 6.331.230 | -     | -     | PB           | 5.E-05 | -            | -         | -             | 2017 |
| S1        | 376.109 | 6.328.780 | 9,0   | 12,0  | Lefranc      | 7.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 19,3  | 19,3  | Lefranc      | 8.E-05 | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| LB12HD7B  | 376.436 | 6.328.825 | 9,0   |       | Lefranc      | 9.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 2012 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 18,0  | 21,0  | Lefranc      | 9.E-05 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 12,0  | 15,0  | Lefranc      | 1.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S1        | 376.109 | 6.328.780 | 4,0   | 6,0   | Lefranc      | 1.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S2        | 376.075 | 6.328.866 | 9,0   | 12,0  | Lefranc      | 1.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S1        | 376.109 | 6.328.780 | 15,0  | 18,2  | Lefranc      | 1.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S1        | 376.109 | 6.328.780 | 6,0   | 9,0   | Lefranc      | 2.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S4        | 376.143 | 6.328.832 | 0,0   | 5,0   | Lefranc      | 3.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S1        | 376.109 | 6.328.780 | 1,5   | 3,0   | Lefranc      | 3.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S4        | 376.143 | 6.328.832 | 15,0  | 20,0  | Lefranc      | 3.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| S4        | 376.143 | 6.328.832 | 10,0  | 15,0  | Lefranc      | 4.E-04 | -            | -         | Sedimento     | 1998 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 85,3  | 85,3  | Lefranc      | 9.E-02 | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 31,3  | 31,3  | Lefranc      | 2.E-01 | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 166,9 | 167,4 | Lefranc      | 6.E-01 | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| SF-0106   | 377.818 | 6.329.238 | 148,8 | 149,3 | Lefranc      | #####  | -            | -         | Lastre        | 2006 |
| PM-22     | 380.497 | 6.332.627 | -     | -     | PB           | -      | Theis        | 3,96,E-04 | -             | 2017 |
| PM-20     | 380.133 | 6.332.504 | -     | -     | PB           | -      | Theis        | 2,17,E-02 | -             | 2017 |
| PM-13     | 380.382 | 6.331.770 | -     | -     | PB           | -      | Theis        | 3,10,E-07 | -             | 2017 |
| LB140-181 | 380.748 | 6.332.524 | -     | -     | PB           | -      | Theis        | 4,24,E-02 | -             | 2017 |

#### IV) Cotas de niveles piezométricos utilizadas para piezometrías

Piezometría junio 2006 – junio 2007

Tabla 8.8: Niveles utilizados para piezometría junio 2006 - junio 2007

| Nº | Sector                 | Pozo   | Cota [m.s.n.m] | UTM E  | UTM N   | Cota nivel piezométrico promedio [m.s.n.m] |
|----|------------------------|--------|----------------|--------|---------|--|
| 1  | Rajo                   | PA1    | 3373,2         | 380661 | 6331505 | 3393,28                                    |
| 2  | Rajo                   | PO18   | 3431,8         | 379890 | 6332061 | 3464,80                                    |
| 3  | Rajo                   | PO15   | 3382,7         | 380780 | 6331715 | 3401,23                                    |
| 4  | Rajo                   | P1     | 3457,0         | 380516 | 6330792 | 3409,63                                    |
| 5  | Rajo                   | P2     | 3457,7         | 380655 | 6330884 | 3415,34                                    |
| 6  | Rajo                   | P10    | 3322,0         | 380349 | 6331224 | 3588,74                                    |
| 7  | Rajo                   | PO21   | 3425,9         | 380721 | 6330909 | 3392,02                                    |
| 8  | Rajo                   | PO24   | 3427,0         | 380863 | 6331422 | 3379,56                                    |
| 9  | Rajo                   | PO16   | 3426,8         | 380973 | 6331970 | 3374,29                                    |
| 10 | Rajo                   | PO17   | 3520,6         | 380050 | 6330955 | 3395,31                                    |
| 11 | Botadero San Francisco | SF0160 | 3211,3         | 377815 | 6329238 | 3093,02                                    |
| 12 | Rajo                   | PO11   | 3456,9         | 380016 | 6330977 | 3318,82                                    |
| 13 | Rajo                   | PO19   | 3512,1         | 380761 | 6331729 | 3427,63                                    |
| 14 | Rajo                   | PO25   | 3514,6         | 380146 | 6330627 | 3456,79                                    |
| 15 | Periférico norte       | PO26   | 3654,0         | 380055 | 6332796 | 3455,08                                    |
| 16 | Rajo                   | PA3    | 3389,8         | 380773 | 6331623 | 3387,91                                    |
| 17 | Rajo                   | PO6    | 3607,0         | 380632 | 6330607 | 3569,30                                    |
| 18 | Rajo                   | PO9    | 3517,0         | 380490 | 6331813 | 3390,05                                    |
| 19 | Rajo                   | PO14   | 3561,4         | 379832 | 6331347 | 3370,52                                    |
| 20 | Rajo                   | PO20   | 3442,5         | 380292 | 6331272 | 3362,28                                    |
| 21 | Rajo                   | PO28   | 3597,2         | 380305 | 6332546 | 3496,26                                    |
| 22 | Rajo                   | PO29   | 3434,5         | 379630 | 6331925 | 3434,56                                    |
| 23 | Rajo                   | PO31   | 3540,6         | 379766 | 6332563 | 3537,01                                    |

Piezometría abril 2014 – abril 2015

Tabla 8.9: Cota de niveles utilizados para piezometría abril 2014 - abril 2015

| Nº | Sector                 | Pozo       | Cota [m.s.n.m] | UTM E  | UTM N   | Cota de nivel piezométrico promedio [m.s.n.m] |
|----|------------------------|------------|----------------|--------|---------|---|
| 1  | Rajo                   | PM-2       | 3487,5         | 380178 | 6332085 | 3349,89                                       |
| 2  | Periférico norte       | PM-10      | 3860,0         | 380439 | 6333240 | 3613,88                                       |
| 3  | Rajo                   | PM-6       | 3360,9         | 379804 | 6331116 | 3341,78                                       |
| 4  | Periférico sur         | PM-15      | 3986,0         | 381145 | 6329249 | 3684,53                                       |
| 5  | Periférico sur         | PM-14      | 3949,8         | 381300 | 6329638 | 3700,19                                       |
| 6  | Periférico sur         | PM-7       | 4081,9         | 381841 | 6330232 | 3874,15                                       |
| 7  | Rajo                   | PM-12      | 3488,7         | 380120 | 6330624 | 3268,33                                       |
| 8  | Rajo                   | PM-13      | 3490,5         | 380382 | 6331770 | 3309,28                                       |
| 9  | Periférico sur         | PM-16      | 3908,7         | 380777 | 6329526 | 3677,59                                       |
| 10 | Periférico sur         | PRE-01_CV1 | 3561,0         | 381036 | 6329852 | 3663,82                                       |
| 11 | Rajo                   | PRE-02_CV1 | 3258,0         | 380387 | 6331740 | 3304,87                                       |
| 12 | Rajo                   | PRE-02_CV2 | 3258,0         | 380387 | 6331740 | 3302,85                                       |
| 13 | Rajo                   | PRE-03_CV1 | 3167,0         | 379831 | 6330938 | 3304,52                                       |
| 14 | Rajo                   | PRE-03_CV2 | 3167,0         | 379831 | 6330938 | 3307,35                                       |
| 15 | Periférico norte       | PRE-04_CV1 | 3607,0         | 381207 | 6333311 | 3688,28                                       |
| 16 | Periférico norte       | PRE-05_CV1 | 3251,0         | 380940 | 6332731 | 3388,95                                       |
| 17 | Rajo                   | PRE-06_CV1 | 3351,0         | 380763 | 6330658 | 3482,24                                       |
| 18 | Periférico norte       | PRE-07_CV1 | 3360,0         | 381215 | 6332195 | 3397,88                                       |
| 19 | Periférico norte       | PRE-08_CV1 | 3480,0         | 380414 | 6333070 | 3598,58                                       |
| 20 | Rajo                   | PRE-09_CV1 | 3041,0         | 380575 | 6331260 | 3205,58                                       |
| 21 | Rajo                   | PRE-09_CV2 | 3041,0         | 380575 | 6331260 | 3205,97                                       |
| 22 | Rajo                   | PRE-09_CV3 | 3041,0         | 380575 | 6331260 | 3177,77                                       |
| 23 | Periférico norte       | PRE-10_CV1 | 3491,0         | 381599 | 6332455 | 3546,21                                       |
| 24 | Periférico sur         | PRE-11_CV1 | 3233,0         | 379637 | 6330279 | 3385,94                                       |
| 25 | Periférico sur         | PRE-11_CV2 | 3233,0         | 379637 | 6330279 | 3396,19                                       |
| 26 | Periférico sur         | PRE-11_CV3 | 3233,0         | 379637 | 6330279 | 3390,67                                       |
| 27 | Periférico norte       | PRE-12_CV1 | 3610,0         | 381601 | 6331264 | 3643,76                                       |
| 28 | Periférico norte       | PRE-12_CV2 | 3610,0         | 381601 | 6331264 | 3691,08                                       |
| 29 | Periférico norte       | PM-SCOPA   | 3789,0         | 381208 | 6333446 | 3755,37                                       |
| 30 | Rajo                   | PM-11      | 3474,0         | 380207 | 6330663 | 3263,14                                       |
| 31 | Rajo                   | PM-19      | 3489,0         | 380135 | 6332266 | 3436,96                                       |
| 32 | Rajo                   | PM-21      | 3440,0         | 379675 | 6331967 | 3415,25                                       |
| 33 | Rajo                   | PM-22      | 3423,3         | 380497 | 6332627 | 3354,94                                       |
| 34 | Botadero San Francisco | LB12HD7    | 2909,0         | 376425 | 6328828 | 2903,70                                       |
| 35 | Botadero San Francisco | LB12HD7B   | 2909,0         | 376435 | 6328825 | 2891,43                                       |

Piezometría marzo 2016 – marzo 2017

Tabla 8.10: Cotas de niveles utilizados para piezometría marzo 2016 - marzo 2017

| N° | Sector                 | Pozo       | Cota [m.s.n.m] | UTM E      | UTM N       | Cota de nivel piezométrico promedio [m.s.n.m] |
|----|------------------------|------------|----------------|------------|-------------|---|
| 1  | Botadero San Francisco | LB150090   | 3216,0         | 377573     | 6329054     | 3047,12                                       |
| 2  | Periférico norte       | PM-10      | 3860,0         | 380439     | 6333240     | 3612,42                                       |
| 3  | Periférico norte       | PRE-12_CV1 | 3610*          | 381601     | 6331264     | 3643,94                                       |
| 4  | Periférico norte       | PRE-04_CV1 | 3607*          | 381207     | 6333311     | 3676,23                                       |
| 5  | Periférico norte       | PM-SCOPA   | 3789,0         | 381208     | 6333446     | 3755,13                                       |
| 6  | Periférico sur         | PM-16      | 3908,7         | 380777     | 6329526     | 3683,50                                       |
| 7  | Periférico sur         | PM-15      | 3986,0         | 381145     | 6329249     | 3688,00                                       |
| 8  | Periférico sur         | PM-14      | 3949,8         | 381300     | 6329638     | 3713,00                                       |
| 9  | Periférico sur         | PM-7       | 4081,9         | 381841     | 6330232     | 3873,00                                       |
| 10 | Rajo                   | PRE-02_CV1 | 3258*          | 380387     | 6331740     | 3259,58                                       |
| 11 | Rajo                   | PM-13      | 3490,5         | 380382     | 6331770     | 3260,42                                       |
| 12 | Rajo                   | PB20       | 3460,0         | 380462,259 | 6330603,742 | 3300,87                                       |
| 13 | Rajo                   | PM-22      | 3423,3         | 380497     | 6332627     | 3321,71                                       |
| 14 | Rajo                   | PM-25      | 3392,5         | 379998     | 6331472     | 3327,42                                       |
| 15 | Rajo                   | PM-2       | 3487,5         | 380178     | 6332085     | 3327,43                                       |
| 16 | Rajo                   | PB23       | 3367,0         | 380793,642 | 6330732,829 | 3336,99                                       |
| 17 | Rajo                   | PM-6       | 3360,9         | 379804     | 6331116     | 3345,32                                       |
| 18 | Rajo                   | PB18       | 3456,0         | 380856,845 | 6330666,049 | 3359,01                                       |
| 19 | Rajo                   | PB19       | 3457,0         | 380668,613 | 6330577,601 | 3363,22                                       |
| 20 | Rajo                   | PB24       | 3457,0         | 380731,699 | 6330570,78  | 3378,07                                       |
| 21 | Rajo                   | PB17       | 3457,0         | 380809,436 | 6330582,22  | 3385,31                                       |
| 22 | Rajo                   | PM-21      | 3440,0         | 379675     | 6331967     | 3410,92                                       |
| 23 | Rajo                   | PM-24      | 3463,0         | 379884     | 6332196     | 3423,88                                       |
| 24 | Rajo                   | PM-20      | 3541,6         | 380133     | 6332504     | 3424,90                                       |
| 25 | Rajo                   | PM-19      | 3489,0         | 380135     | 6332266     | 3427,27                                       |
| 26 | Rajo                   | PM-18      | 3509,5         | 380099     | 6332326     | 3427,65                                       |

- \*Cota del sensor.

## 8.2 Anexo 2

### I) Cálculo de salida de agua por *pit lakes*

Para estimar este valor de manera simple, se considera el volumen de agua que se evaporaría desde los *pit lakes* de acuerdo al área en que éstos afloran. Por lo tanto, se toma el valor de la evapotranspiración potencial (ETP) en la zona de estudio según AGRIMED (2014) y se multiplica por el área de los *pits* como expresa Ec. 10.

$$V_{evap} = ETP * \text{Área pit lakes (Ec. 10)}$$

AGRIMED (2014) estima un valor aproximado de  $3,6 * 10^{-8}$  [m/s] para la ETP anual entre 1980 y 2010. El área que cubren los *pit lakes*, de acuerdo con el mapeo realizado con base en imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 7 en ArcGis v10.3 ESRI corresponde a 204.431,8 [m<sup>2</sup>].

$$V_{evap} = 3,6 * 10^{-8} \text{ [m/s]} * 204.431,8 \text{ [m}^2\text{]} = 0,00736 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Según lo anterior, resulta un caudal de salida correspondiente a 0,0074 [m<sup>3</sup>/s] o de **7,4 [l/s]** desde los *pit lakes*.

### II) Cálculo de salida de agua natural Quebrada La Disputada

La estimación de este caudal de salida se hace por medio de la ecuación de Darcy (Ec. 11).

$$Q = K * i * A \text{ (Ec. 11)}$$

Donde:

Q = Caudal de salida [L<sup>3</sup>/T]

K = Conductividad hidráulica [L/T]

i = Gradiente hidráulico

A= Sección transversal [L<sup>2</sup>]

El área considerada se basa en una sección transversal de la geometría hidrogeológica construida en Leapfrog (Figura 8.1) en la zona de la salida de la Quebrada. La sección abarca una zona de la UH1B y una zona de la UH2. El área correspondiente a la UH1B es de 109.447 [m<sup>2</sup>], mientras que la que corresponde a UH2 posee un área de 52.120 [m<sup>2</sup>] (Figura 8.2).



Figura 8.1: Traza sección transversal en modelo Leapfrog

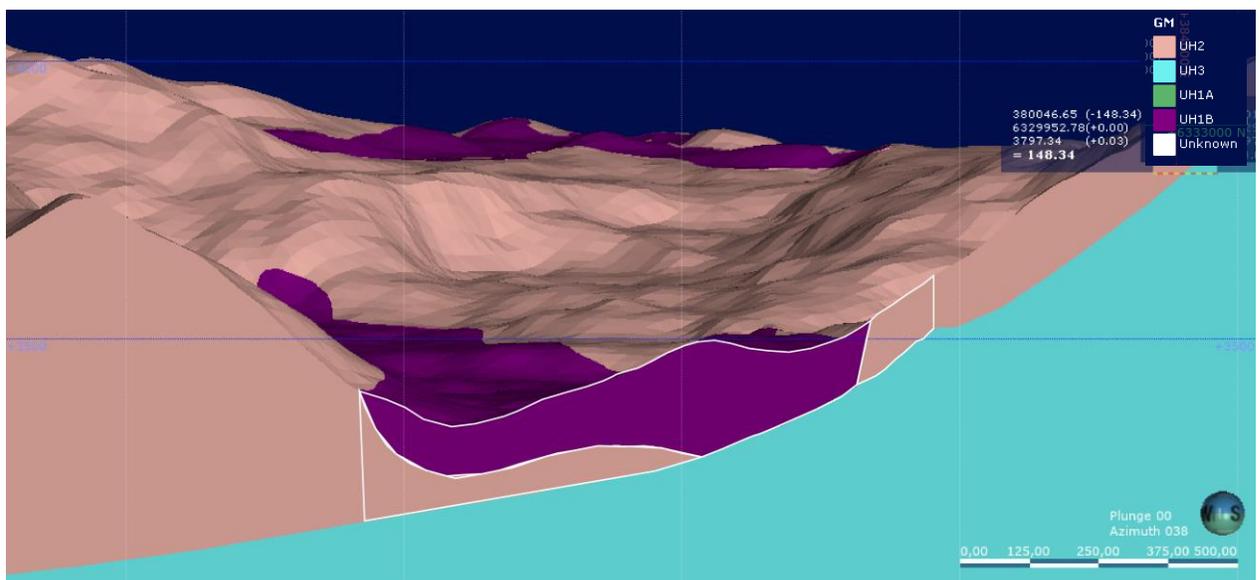


Figura 8.2: En blanco sección transversal considerada para cálculo de salida natural de quebrada

Las conductividades hidráulicas consideradas corresponden a  $9 \cdot 10^{-7}$  [m/s] para UH1B y  $4,04 \cdot 10^{-6}$  [m/s] para UH2 y se toman del modelo conceptual (sección 463.2). El

gradiente hidráulico se estimó de la piezometría más antigua que se obtuvo (Figura 2.23), resultando 0,15.

De esta manera se obtiene:

$$Q = 0,15 * (109.447 \text{ [m}^2\text{]} * 9 * 10^{-7} \text{ [m/s]} + 52.120 \text{ [m}^2\text{]} * 4,04 * 10^{-6} \text{ [m/s]}) = 0,046 \text{ [m}^3\text{/s]} = \mathbf{46 \text{ [l/s]}}$$